

ISSN 0202—3822

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

СЕРИЯ
ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

2024

Том 47
Выпуск 4

(Специальный выпуск)

В этом специальном выпуске журнала «Вопросы атомной науки и техники. Серия Термоядерный синтез» публикуется Программа физических исследований на токамаке T-15МД.

Токамак T-15МД введён в строй в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт». В настоящее время это крупнейший действующий отечественный токамак. Физический пуск установки осуществлён в 2021 г. президентом НИЦ «Курчатовский институт» М.В. Ковальчуком и Председателем Правительства РФ М.В. Мишустиним. В 2023 г. состоялся энергетический пуск установки и были получены разряды с лимитерной магнитной конфигурацией плазмы и током плазмы ~250 кА. В следующем, 2024 г. рабочая область установки была расширена: ток плазмы превысил 0,5 МА, получены разряды с вытянутостью $k > 1,5$ и длительностью квазистационарной стадии более 500 мс, получены первые разряды с диверторной магнитной конфигурацией плазмы. Установка вышла на качественно новые режимы. Ведутся работы по усовершенствованию диагностического комплекса: вводятся в действие новые диагностики, улучшаются возможности уже введённых систем.

Целью научных исследований на токамаке T-15МД является подготовка физической и технологической баз данных, необходимых для создания стационарных термоядерных источников нейтронов гибридных реакторов на основе токамаков, а также проведение работ в поддержку Международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР. Разработанная программа физических исследований рассматривает широкий спектр задач, которые обеспечивают достижение этой цели. Первый раздел документа посвящён созданию квазистационарной плазмы с реакторными параметрами, т.е. перспективного сценария для установки следующего поколения. Во втором разделе рассмотрены актуальные фундаментальные проблемы современной физики токамаков, связанные с механизмами аномальных потерь энергии и частиц, особенностями контроля устойчивости плазмы, изучением механизмов дополнительного нагрева плазмы и создания неиндукционного тока. Третий раздел посвящён экспериментальному анализу взаимодействия плазма—стенка и физике дивертора. Важную роль в научной программе установки T-15МД играют развитие теории, методов компьютерного моделирования и разработка численных кодов, что отражено в четвёртом разделе. Пятый и шестой разделы посвящены системам дополнительного нагрева и диагностическому комплексу установки. Прикладные задачи, связанные с отработкой технологий топливного цикла, разработкой систем дистанционного обслуживания, вопросами безопасности термоядерных реакторов, разработкой и тестированием теплотехнических технологий, рассмотрены в седьмом разделе.

Наряду с перечисленными физическими задачами безусловными целями установки T-15МД являются сохранение и укрепление российской школы термоядерных исследований и сохранение конкурентоспособности отечественных исследований по сравнению с аналогичными исследованиями, проводимыми в зарубежных лабораториях. Реализация публикуемой программы исследований позволит в полном объёме решить эти задачи.

Редколлегия журнала
«Вопросы атомной науки и техники. Серия Термоядерный синтез»

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

научно-технический сборник

СЕРИЯ
ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

ИЗДАЁТСЯ С 1978 г.

Том 47

Выпуск 4

Специальный выпуск:
Программа физических исследований на токамаке Т-15МД

МОСКВА — 2024

Главный редактор

Е.П. Велихов, академик РАН, почётный президент НИЦ «Курчатовский институт»

Редакционная коллегия:

А.Б. Кукушкин, зам. главного редактора, в.н.с., д.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт», Москва

Е.А. Филимонова, ответственный секретарь, н.с., НИЦ «Курчатовский институт», Москва

А.Б. Алексеев, рук. департамента, д. техн. н., Международная организация ИТЭР, Сен-Поль-ле-Дюранс, Франция

А.В. Бурдаков, г.н.с., д.ф.-м.н., профессор, ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

В.А. Быков, нач. группы, к. техн. н., ИФП им. Макса Планка, Грайфсвальд, Германия

Ю.М. Гаспарян, зав. кафедрой, к.ф.-м.н., доцент, НИЯУ МИФИ, Москва

Л.Е. Захаров (Zakharov), в.н.с., д.ф.-м.н., Li-WFusion, Princeton, NJ, USA

Н.А. Кирнева, руководитель отделения, к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт», Москва

А.Е. Киселёв, зав. отделением, д. техн. н., ИБРАЭ РАН, Москва

Д.В. Коваленко, главный специалист отдела управления НИОКР, с.н.с., Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Москва

А.В. Козлов, советник директора, д. техн. н., АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Свердловская обл.

Е.Р. Корешева, г.н.с., и.о. зав. лабораторией, д.ф.-м.н., ФИАН им. П.Н. Лебедева, Москва

С.И. Крашенинников (Krashenninikov), профессор, д.ф.-м.н., University of California at San Diego, San Diego, CA, USA

А.Ю. Лешуков, зам. начальника отдела, НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала, Москва

Журнал (основан в 1978 г.) зарегистрирован в реестре Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций ПИ № ФС77-73164 от 02 июля 2018 г.; электронное периодическое издание Эл. № ФС77-73162 от 22 июня 2018 г. Подписной индекс в Каталоге периодики агентства «Урал-Пресс» № 70541

Журнал включён в Перечень журналов ВАК, индексируется в базах данных Scopus, Ulrich's Periodicals Directory и РИНЦ на платформе Web of Science, имеет цифровой идентификатор статей (digital object identifier — DOI), реферируется в РЖ ВИНТИ РАН, имеет в открытом доступе полнотекстовую электронную версию на сайте <http://vant.iterru.ru> и на платформе Российской научной электронной библиотеки <http://www.elibrary.ru>

Двухлетний импакт-фактор журнала в РИНЦ: 0,620

И.В. Мазуль, г.н.с., д. техн. н., НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург

В.Б. Минаев, в.н.с., к.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

А.Б. Минеев, в.н.с., к.ф.-м.н., НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург

С.В. Мирнов, научный руководитель отделения, д.ф.-м.н., профессор, АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва

А.Н. Романиков, научный руководитель по УТС и плазменным технологиям, д.ф.-м.н., АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва

П.В. Романов, советник нач. отдела, к. техн. н., Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Москва

В.Ю. Сергеев, профессор, д.ф.-м.н., СПб политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

А.В. Спицын, начальник отдела, к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт», Москва

И.Л. Тажибаева, заместитель директора, д.ф.-м.н., профессор, ИАЭ НЯЦ Республики Казахстан, Курчатов, Республика Казахстан

П.П. Хвостенко, научный руководитель комплекса, д. техн. н., НИЦ «Курчатовский институт», Москва

В.И. Хрипунов, в.н.с., к. техн. н., НИЦ «Курчатовский институт», Москва

В.М. Чернов, г.н.с., д.ф.-м.н., профессор, АО «ВНИИИМ» им. А.А. Бочвара, Москва

Редактор Карпова Татьяна Юрьевна
karpova.tat@fc.iterru.ru, тел.: 7-499-196-98-31

Соучредители: Автономная некоммерческая организация Координационный центр «Управляемый термоядерный синтез — международные проекты» (УТС-Центр), федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

NATIONAL RESEARCH CENTRE «KURCHATOV INSTITUTE»

PROBLEMS OF ATOMIC SCIENCE AND TECHNOLOGY

Collected scientific and technical papers

Series

THERMONUCLEAR FUSION

PUBLISHED since 1978

Volume 47

Issue 3

[Voprosy Atomnoi Nauki i Tekhniki. Seriya: Termoyadernyi Sintez]

MOSCOW — 2024

Editor-in-Chief

E.P. Velikhov, Member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Honorary President of the NRC «Kurchatov Institute»

Editorial Board:

A.B. Kukushkin, Deputy Editor-in-Chief, Leading Research Scientist, Dr. of Science Degree in Physics and Mathematics, NRC «Kurchatov Institute», Moscow

E.A. Filimonova, Editorial Management, Research Scientist, NRC «Kurchatov Institute», Moscow

A.B. Alexeev, Department Head in the ITER International Organization, Dr. of Science Degree in Engineering, Saint Paul-lèz Durance, France

A.V. Burdakov, Laboratory Head, Dr. of Science Degree in Physics and Mathematics, G.I. Budker Institute of Nuclear Physics. Siberian Branch of RAS, Novosibirsk

V.A. Bykov, Group Leader, PhD in Engineering, Max Planck Institute for Plasma Physics, Greifswald, Germany

Yu.M. Gasparyan, Acting Department Head, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, National Research Nuclear University «Moscow Engineering Physics Institute», Moscow

L.E. Zakharov, Leading Research Scientist, PhD in Physics and Mathematics, LiWFusion, Princeton, NJ, USA

N.A. Kirneva, Department Head, PhD in Physics and Mathematics, NRC «Kurchatov Institute», Moscow

A.E. Kiselev, Department Head, Dr. of Science Degree in Engineering, Nuclear Safety Institute of RAS, Moscow

D.V. Kovalenko, Chief Specialist of the R&D Management Division, Senior Research Scientist, State Corporation «Rosatom», Moscow

A.V. Kozlov, Advisor to the Director, Dr. of Science Degree in Engineering, joint-stock company «Institute of Reactor Materials» Zarechnyj, Sverdlovsk region

E.R. Koresheva, Principal Research Scientist, Acting Laboratory Head, Dr. of Science Degree in Physics and Mathematics, P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow

S.I. Krasheninnikov, Professor, Dr. of Science Degree in Physics and Mathematics, University of California at San Diego, San Diego, CA, USA

A.Yu. Leshukov, Deputy Head of Division, N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, Moscow

I.V. Mazul, Principal Research Scientist, Dr. of Science Degree in Engineering, «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», St. Petersburg

V.B. Minaev, Leading Research Scientist, PhD in Physics and Mathematics, A.F. Ioffe Institute of Physics and Technology, St. Petersburg

A.B. Mineev, Leading Research Scientist, PhD in Physics and Mathematics, D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus, St. Petersburg

S.V. Mirnov, Scientific Head of Department, Dr. of Science Degree in Physics and Mathematics, Professor, Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research (TRINITI), Troitsk, Moscow

A.N. Romannikov, Scientific Supervisor for CTF and plasma technologies, Dr. of Science Degree in Physics and Mathematics, Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research (TRINITI), Troitsk, Moscow

P.V. Romanov, Advisor to the Division Head, PhD in Engineering, State Corporation «Rosatom», Moscow

V.Yu. Sergeev, Dr. of Science Degree in Physics and Mathematics, Professor, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg

A.V. Spitsyn, Laboratory Head, Senior Research Scientist, PhD in Physics and Mathematics, NRC «Kurchatov Institute», Moscow

I.L. Tazhibayeva, Deputy Director, Dr. of Science Degree in Physics and Mathematics, Professor, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Centre, Kurchatov City, Kazakhstan

P.P. Khvostenko, Dr. of Science Degree in Engineering, Scientific Director of the Complex, NRC «Kurchatov Institute», Moscow

V.I. Khripunov, Leading Research Scientist, PhD in Engineering, NRC «Kurchatov Institute», Moscow

V.M. Chernov, Principal Research Scientist, Dr. of Science Degree in Physics and Mathematics, Professor, A.A. Bochvar High-Technology Research Institute for Inorganic Materials, Moscow

Editor Karpova Tatyana Yurievna

karpova.tat@fc.iterru.ru, tel.: 7-499-196-98-31

Co-founders: Autonomous non-profit organization Coordinating center «Controlled Thermonuclear Fusion — International Projects» (CTF-Center); Federal state budgetary National Research Centre «Kurchatov Institute»

The journal (established in 1978) is filed in the registry of the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media PI № FS77-73164 of 02 June 2018; electronic periodical is filed in the registry El. № FS77-73162 of 22 June 2018

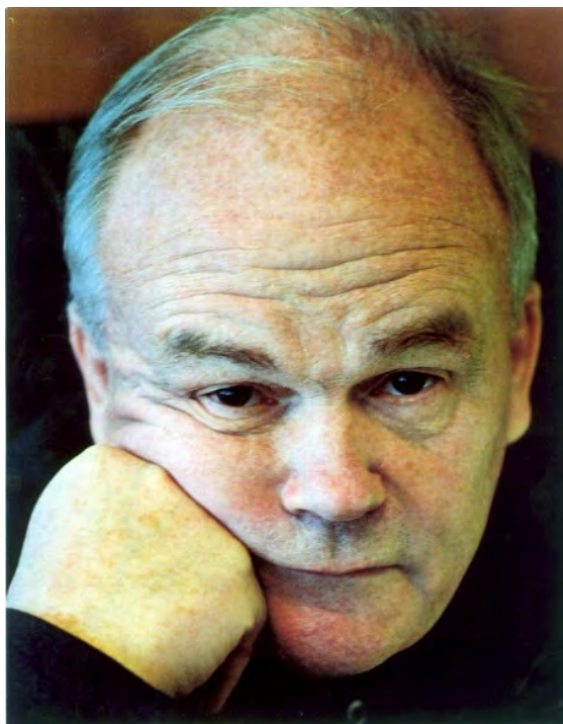
Subscription index in the catalogue of periodicals of the «Ural-Press» agency № 70541

The journal is included into the list of the Supreme Certification Commission key journals. Its indexes are available in the databases Scopus, the Ulrich's Periodicals Directory and the Russian Science Citation Index (RSCI) on the Web of Science platform. The papers published in it have digital object identification (DOI). The abstracts of the papers published in it are available in the abstract journal of the VINITI RAS. All the free access full-text electronic versions of the papers are available on the site <http://iterru.ru> and on the platform of the Russian Scientific Electronic Library <http://www.elibrary.ru>

The two-year impact factor of the journal in RSCI: 0,620

ПАМЯТИ ЕВГЕНИЯ ПАВЛОВИЧА ВЕЛИХОВА

02.02.1935—05.12.2024



Журнал «Вопросы атомной науки и техники. Серия Термоядерный синтез» потерял своего основателя и бессменного главного редактора Евгения Павловича Велихова — всемирно известного учёного, Героя Социалистического Труда и Героя Труда Российской Федерации, Полного кавалера ордена «За заслуги перед Отечеством», академика Академии наук (АН) СССР и Российской академии наук (РАН), инициатора крупнейшего в истории международного научно-технического проекта — Интернационального термоядерного экспериментального реактора ITER, строящегося во Франции странами с большинством населения планеты. В научной биографии Е.П. Велихова управляемый термоядерный синтез (УТС) был лишь одним из многих направлений.

Евгений Павлович Велихов родился 2 февраля 1935 г. в Москве в семье инженера путей сообщения. Научная карьера выпускника физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по специальности «Теоретическая физика» (1958 г.) развивалась стремительно: в 30 лет доктор наук, минуя кандидата, в 33 года член-корреспондент, ещё не было сорока лет — академик, самый молодой вице-президент Академии наук (1978 г.). С 1961 г. он работал в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова, где прошёл путь от младшего научного сотрудника до директора и президента НИЦ «Курчатовский институт».

В 1956 г. студент физического факультета МГУ Е.П. Велихов был направлен на дипломную работу в Лабораторию измерительных приборов АН СССР (ныне НИЦ «Курчатовский институт») в теоретический сектор академика М.А. Леонтовича, входивший в Отдел плазменных исследований академика Л.А. Арцимовича. Научным руководителем Евгения Павловича стал С.И. Брагинский, предложивший ему исследовать устойчивость течения идеально проводящей жидкости вдоль магнитного поля в связи с проблемой генерации земного магнетизма. Дипломная работа студента Велихова получила высокую оценку и была опубликована в ведущем физическом журнале ЖЭТФ (1959 г.). Другая статья этого же года в ЖЭТФ о магниторотационной неустойчивости стала одной из самых цитируемых российских работ в астрофизике.

Став сотрудником сектора М.А. Леонтовича и активно участвуя в работах по УТС, Е.П. Велихов поступает в 1961 г. в аспирантуру и в соавторстве с А.А. Веденовым и Р.З. Сагдеевым публикует в УФН обзор по устойчивости плазмы, а также статью в журнале «Nuclear Fusion» о нелинейных колебаниях разреженной плазмы. Эти работы и их доклад «Квазилинейная теория колебаний плазмы» на конференции

МАГАТЭ в Зальцбурге стали фундаментальной основой современной теории плазмы, включая теорию её слабой турбулентности.

Увлечение Евгения Павловича со студенческих времён магнитной гидродинамикой (МГД) стало мотором для многих его практических начинаний. При поддержке академика М.Д. Миллионщикова он развивает экспериментальные, теоретические и расчётные работы по мощным МГД-генераторам электричества на жидких металлах и на благородных газах с добавкой цезия и становится научным руководителем быстро растущей лаборатории в Троицке.

Увлечённый разработкой МГД-генераторов, Е.П. Велихов несколько задержался с кандидатской диссертацией, на защите которой в 1964 г. Учёный совет Курчатовского института столь высоко оценил его результаты, что присудил соискателю сразу степень доктора физико-математических наук.

Уникальная нацеленность Евгения Павловича на доведение достижений теоретической и экспериментальной физики до практической реализации привела его в новую область, связанную с мощными лазерами. Ещё будучи студентом МГУ, Е.П. Велихов мастерит мазерный спектрометр и знакомится с будущим Нобелевским лауреатом А.М. Прохоровым, который в конце 1970-х гг. будет создавать уникальный лазер на неодимовом стекле с питанием именно от велиховского МГД-генератора. Став в 1966 г. профессором МГУ, Е.П. Велихов руководит на физическом факультете МГУ созданием мощных CO_2 -лазеров, активно подключается к разработке «стратегических» лазеров, для питания которых был необходим мощный источник энергии. Под его руководством разработана серия мощных МГД-генераторов на основе пороховых твёрдых топлив.

В 1968 г. Е.П. Велихова избирают членом-корреспондентом АН СССР.

В 1970 г. он становится руководителем Отдела плазменной энергетики Института атомной энергии (ИАЭ) им. И.В. Курчатова в Троицке, преобразованного в 1971 г. в филиал Курчатовского института (ФИАЭ). В том же году директор ИАЭ академик А.П. Александров назначает Евгения Павловича своим заместителем по научной работе с возложением на него обязанностей по научному руководству и координации институтских исследований в области физики плазмы и УТС. После кончины Л.А. Арцимовича с 1973 г. Е.П. Велихов стал научным руководителем исследований по УТС в СССР и представителем нашей страны в Международном совете по УТС при МАГАТЭ.

В 1974 г. Е.П. Велихов избирается действительным членом АН СССР.

В 1970—1980-х гг. Е.П. Велихов становится лидером инновационных разработок в области МГД-генераторов и лазеров, включая создание целого поколения МГД-генераторов мощностью 10—1000 МВт с временем работы 1—100 с, использование их для зондирования структуры земной коры (до глубин 100—150 км), накачку сверхмощных лазеров, создание мощных компактных электростанций на удалённых территориях, разработку стратегических (например, уникальный CO_2 -лазер мощностью 1 МВт) и технологических лазеров.

В 1976 г. были начаты работы по сверхглубинному зондированию земной коры на Кольском полуострове с использованием МГД-установки «Хибины» мощностью до 70 МВт. Аналогичные исследования были проведены в Прикаспийской низменности, на среднем Урале, Памире и в Тянь-Шане. Е.П. Велихову с коллегами за разработку и создание компактной импульсной МГД-энергетики в 1977 г. присуждена Государственная премия СССР.

За создание мощных газоразрядных лазеров Е.П. Велихов с коллегами в 1984 г. награжден Ленинской премией. Позже по его инициативе в Шатуре создаётся Научно-исследовательский центр по технологическим лазерам (с 1998 г. — Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН), ставший одним из ведущих по разработке мощных технологических CO_2 -лазеров.

Ещё одним крупнейшим направлением работы Е.П. Велихова стали информационные технологии. В своём маленьком кабинете в Президиуме АН он с 1981 г. каждую среду собирал камерный семинар, где обсуждались проблемы искусственного интеллекта, компьютеризации, микроэлектроники. Евгений Павлович — инициатор создания (1983 г.) и многолетний академик-секретарь Отделения информатики, вычислительной техники и автоматизации в АН СССР, ныне — Отделение нанотехнологий и информационных технологий РАН. Под его руководством в Курчатовском институте было создано уникальное производство сверхбольших интегральных схем и микропроцессоров, обеспечено участие России в глобальном информационном проекте GLORIAD (оптоволоконное кольцо сетевой связи, охватывающее весь земной

шар) для предоставления мировому научному сообществу сетевых услуг, в том числе связанных с проектом ITER. Всеми признана роль Е.П. Велихова в создании (1990 г.) на базе ИАЭ им. И.В. Курчатова первой в СССР и РФ массовой компьютерной сети РЕЛКОМ, ознаменовавшей появление интернета в СССР и дальнейшее возникновение Рунета. Символично и то, что, как и для мирового интернета, зародышем этого в Курчатовском институте стали передовые научные исследования по физике ядер и высоких энергий.

Важной вехой в жизни Е.П. Велихова стала ликвидация последствий аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.). Многочисленные облёты места аварии, невероятные нагрузки оперативной работы в коллективе и личные инициативы Евгения Павловича вошли в героическую историю борьбы за минимизацию последствий аварии.

Е.П. Велихов, став директором (1989 г.) и позднее президентом Курчатовского института (1992 г.), в крайне тяжёлые для страны 1990-е гг. сделал всё возможное для его выживания.

События в стране с середины 1980-х гг. открыли новые возможности для международного сотрудничества по УТС, в котором с 1973 г. лидером с нашей стороны неизменно выступал Е.П. Велихов. В 1985 г. по инициативе Евгения Павловича был дан старт беспрецедентному международному научному сотрудничеству в рамках нового термоядерного проекта, названного ITER. С 1992 по 2001 г. Е.П. Велихов был председателем Совета по техническому проектированию Международного проекта ITER, охватившего в итоге Европейский Союз, Индию, Китай, Республику Корея, Россию, США и Японию, в 2006 г. стал членом Международного совета ITER от России, а с 2010 по 2012 г. — председателем Международного совета ITER. В 2006 г. Е.П. Велихову вместе с французом Р. Аймаром и японцем М. Ёсикавой присуждена международная премия «Глобальная энергия» за «разработку научно-технических основ для создания международного термоядерного реактора (ITER)». Евгений Павлович считал ITER главным проектом своей жизни.

Не ослабевало внимание Е.П. Велихова и к национальной программе УТС. Он был научным руководителем создания уникальных индуктивных накопителей энергии, в частности, крупнейшего в мире энергокомплекса с индуктивным накопителем в 900 МДж для питания импульсных термоядерных и моделирующих установок, в том числе крупнейшей в Европе и Азии установки Ангара-5-1 в Троицке. По инициативе Е.П. Велихова и М.В. Ковальчука в 2010—2020 гг. был создан токамак Т-15МД — прототип термоядерного источника нейтронов (ТИН) и начато проектирование демонстрационного ТИН для внедрения стационарных гибридных систем типа «синтез—деление» на основе токамаков в атомную энергетику. Под руководством М.В. Ковальчука в 2021 г. состоялся физический пуск токамака Т-15МД, а в 2023 г. — энергетический пуск.

Напомним, что первый проект токамака был предложен в 1950-е гг. в нашей стране именно как проект ТИН. Осознание необходимости ближайшей практической ориентации работ по магнитному УТС на замыкание топливного цикла действующей атомной энергетики на тепловых нейтронах дало импульс инновационному подходу на основе использования ториевого бланкета для производства топлива для АЭС на «тепловых» нейтронах. Е.П. Велихов, соединяя и умножая научное наследие академиков А.П. Александрова и Л.А. Арцимовича, стал научным руководителем российских исследований в поддержку Международного проекта по инновационным ядерным реакторам и ядерной энергетике (ИНПРО), учреждённого в МАГАТЭ как отклик мирового ядерного сообщества на Инициативу Президента РФ В.В. Путина по энергообеспечению устойчивого развития человечества на основе инновационной ядерной энергетики, выдвинутую на Саммите Тысячелетия ООН в сентябре 2000 г. В 2002—2014 гг. Евгений Павлович был организатором и председателем российского Совета директоров предприятий — участников ИНПРО.

Ещё одним важным направлением развития наследия А.П. Александрова стала идея Е.П. Велихова о создании компании «Росшельф» (он был и её президентом в 1992—2001 гг.) на базе компании ПАО «Газпром» и предприятий атомного судостроения для разведки и добычи углеводородов на Арктическом шельфе России. При активной поддержке Е.П. Велихова проектировалась и создавалась первая в мире морская ледостойкая стационарная платформа, работающая с 2013 г. на нефтяном месторождении «Приразломное» в Баренцевом море.

Международная деятельность Евгения Павловича охватила и такие проблемы, как контроль ядерных взрывов и глобальные стратегические вопросы. В 1980-е гг. он организовал взаимодействие советских и американских учёных и политических деятелей по проверке эффективности сейсмической регистрации

подземных ядерных взрывов. После успешных модельных испытаний на ядерных полигонах в СССР и в США был подписан советско-американский договор о прекращении ядерных испытаний (не ратифицирован, но соблюдается до настоящего времени). С 1981 по 1988 г. Евгений Павлович был сопредседателем совместной комиссии АН СССР и Национальной академии наук США по стратегическим вопросам.

Активная защита и продвижение фундаментальной науки (с 1978 по 1996 г. Е.П. Велихов — вице-президент Академии наук СССР и РАН) получили отклик и за рубежом: Евгений Павлович — почётный член Шведской королевской академии инженерных наук, иностранный член Национальной инженерной академии США, почётный профессор университетов Нотр-Дам, Тафт, Дрексель (США), Лондонского университета (Великобритания), Дрезденского университета (Германия), член Европейской академии наук, иностранный член Американской ассоциации содействия развитию науки (AAAS). Он стал инициатором создания (2011 г.) и председателем президиума Российской ассоциации содействия науке (РАСН).

Из обширной образовательной университетской деятельности упомянем, что в 1973—1988 гг. Е.П. Велихов возглавлял кафедру атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета МГУ, а в 1984 г. он организовал факультет проблем физики и энергетики в Московском физико-техническом институте и до 1986 г. был деканом и научным руководителем этого факультета.

В 1991 г. Е.П. Велихов основал в России отделение Международной общественной организации «Достижения молодых», с 2003 г. был членом Международного совета этой организации. Он также являлся инициатором создания (1987 г.) и президентом Международного общественного фонда «За выживание и развитие человечества». Венцом многогранной общественной деятельности Е.П. Велихова стала его работа первым в истории нашей страны секретарём Общественной палаты Российской Федерации (2005—2015 гг.), затем — её почётным секретарём.

Е.П. Велихов — автор более 200 публикаций, включающих монографии, книги и статьи. К своему 80-летию Евгений Павлович выпустил книгу воспоминаний «Я на валенках поеду в 35-й год», где очень ярко описал свою биографию как отражение истории нашей страны и отечественной науки.

Список наград и премий Е.П. Велихова производит неизгладимое впечатление: Герой Социалистического труда СССР (1985 г.), Герой Труда Российской Федерации (2020 г.), полный кавалер ордена «За заслуги перед Отечеством» (2000—2015 гг.), лауреат Ленинской премии СССР (1984 г.), Государственных премий СССР (1977 г.) и Российской Федерации (2002 г.), три ордена Ленина (1971, 1981, 1985 гг.), орден Трудового Красного Знамени (1975 г.) и орден Мужества (1997 г.) за участие в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Из международных наград — премия Сцилларда Американского физического общества, премия «Наука за мир» Всемирной федерации учёных (Швейцария), премия им. А.П. Карпинского (1986 г.), международная премия «Глобальная энергия» (2006 г.), премия КНР за международную кооперацию в области науки и технологий (2016 г.). В 2022 г. Е.П. Велихов и М.В. Ковальчук были награждены Золотой медалью им. И.В. Курчатова РАН за цикл работ «Разработка, создание и использование ядерно-физических мегаустановок для междисциплинарных исследований и энергетики».

Создание Евгением Павловичем в 1978 г. журнала «Вопросы атомной науки и техники. Серия Термоядерный синтез» стало одной из важных вех его плодотворной деятельности по проблеме УТС.

Евгений Павлович Велихов, несомненно, был одним из тех немногих людей, жизнь и деятельность которых имеют цивилизационный масштаб, видение и движение к целям «дальше жизни» одного поколения. Он всегда был неотъемлемой частью жизни Курчатовского института и Академии наук СССР, затем РАН. В Международной организации ИТЭР в связи с кончиной Евгения Павловича её флаг был приспущен на неделю. Его уход — невосполнимая потеря для отечественной и мировой науки, для всех, кому посчастливилось работать и общаться с этим выдающимся человеком.

Друзья и коллеги из НИЦ «Курчатowski институт» и Российской академии наук, редколлегия журнала «Вопросы атомной науки и техники. Серия Термоядерный синтез»

УДК 533.9+621.039.6

ПРОГРАММА ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД

Е.П. Велихов¹, М.В. Ковальчук¹, И.О. Анашкин¹, Г.М. Асадулин¹, Е.Е. Баркалов¹, К.Е. Баркалов¹, А.М. Белов¹, А.А. Борщеговский¹, В.П. Будаев^{1, 2}, В.А. Вериков¹, А.В. Горбунов¹, Ю.В. Готт¹, С.А. Грашин¹, А.М. Губин³, Е.З. Гусаков⁴, Е.Д. Длугач¹, М.А. Драбинский¹, В.В. Дьяченко⁴, М.А. Ирзак⁴, А.В. Карпов^{1, 2}, А.Г. Качкин¹, Н.А. Кирнева^{1, 5}, Д.А. Кислов¹, С.В. Коновалов¹, В.А. Крупин¹, Л.К. Кузнецова¹, Б.В. Кутеев^{1, 5}, В.Э. Лукаш¹, А.В. Лутченко¹, Е.Д. Маренков^{1, 5}, А.В. Мельников^{1, 5}, А.Б. Минеев^{3, 6}, Н.А. Мустафин¹, А.Р. Немец¹, С.В. Неудачин¹, Г.Е. Ноткин¹, М.Р. Нургалиев¹, И.С. Образцов¹, А.А. Панасенков¹, И.С. Пименов¹, А.А. Пшенов¹, И.Н. Рой¹, Д.В. Рыжаков¹, П.В. Саврухин¹, Д.В. Сарычев¹, Д.С. Сергеев¹, Н.А. Соловьев¹, А.В. Сушков¹, Ю.И. Толпегина¹, Г.А. Трошин⁴, Р.Р. Хайрутдинов⁷, Э.Н. Хайрутдинов¹, А.П. Хвостенко¹, П.П. Хвостенко¹, В.И. Хрипунов¹, А.С. Черненко¹, Д.А. Шелухин¹, Е.А. Шестаков¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

² НИУ МЭИ, Москва, Россия

³ АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

⁴ ФБГУН ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁵ НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

⁶ СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

⁷ АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, Россия

18 мая 2021 г. в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» состоялся физический пуск токамака Т-15МД, в котором по приглашению президента Центра принял участие председатель правительства Российской Федерации М.В. Мишустин. В марте 2023 г. состоялся энергетический пуск токамака. В настоящее время установка выходит на проектные параметры, идёт развитие диагностического комплекса и систем дополнительного нагрева. Целью работ на установке токамак Т-15МД является создание экспериментальной базы гибридного реактора и работы в поддержку Международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР. В этом выпуске журнала представлена программа физических исследований на установке Т-15МД, направленных на достижение цели. Токамак Т-15МД — инновационная установка, не имеющая аналогов в мире по параметрам: тороидальное поле на оси плазмы 2 Тл при аспектном отношении 2,2. Установка будет оборудована системой дополнительного нагрева плазмы и неиндукционного поддержания тока суммарной мощностью 24 МВт (к 2030 г.), которая позволит достичь высокой температуры плазмы ($T_i \sim T_e \sim 5\text{—}9$ кэВ) и плотности плазмы ($n_e \sim 10^{20} \text{ м}^{-3}$) в разрядах с длительностью импульса до 30 с. Для нагрева плазмы и генерации тока будут использованы ВЧ- и СВЧ- методы (ионно-циклотронный, нижнегибридный и электронно-циклотронный), а также инжекция быстрых атомов. Поддержание квазистационарного устойчивого режима улучшенного удержания в плазме с длительностью разряда от нескольких до сотен секунд с помощью систем дополнительного нагрева плазмы является основным направлением работы установки на весь период её работы. Диагностический комплекс токамака Т-15МД позволит провести исследования, необходимые для подготовки базовых режимов установок следующего поколения, а также позволит осуществлять безопасное функционирование установки. Токамак Т-15МД с мощной системой дополнительного нагрева плазмы, позволяющей достигать термоядерных параметров плазмы, с диагностическим комплексом, не уступающим лучшим мировым аналогам, станет новым инструментом для научных исследований, с помощью которого будут возможны решение широкого спектра физических проблем и дальнейшее развитие технологий, необходимых для надёжного обоснования параметров энергетического термоядерного реактора и гибридного реактора типа синтез—деление.

Ключевые слова: токамак Т-15МД, программа физических исследований, гибридный реактор, термоядерный реактор, дополнительный нагрев плазмы, неиндукционное поддержание тока плазмы, Международный экспериментальный термоядерный реактор ИТЭР, дивертор, омический нагрев, электронно-циклотронный нагрев, ионно-циклотронный нагрев, инжекция пучков быстрых атомов, нижнегибридный нагрев и поддержание тока, режимы улучшенного удержания, устойчивость, магнитная конфигурация, граничные локализованные моды, лимитер, капиллярно-пористые структуры, диагностика плазмы токамака.

PHYSICAL RESEARCH PROGRAM ON THE T-15MD TOKAMAK

E.P. Velikhov¹, M.V. Kovalchuk¹, I.O. Anashkin¹, G.M. Asadulin¹, E.E. Barkalov¹, K.E. Barkalov¹, A.M. Belov¹, A.A. Borshchegovsky¹, V.P. Budaev^{1,2}, V.A. Vershkov¹, A.V. Gorbunov¹, Yu.V. Gott¹, S.A. Grashin¹, A.M. Gubin³, E.Z. Gusakov⁴, E.D. Dlugach¹, M.A. Drabinsky¹, V.V. Diachenko⁴, M.A. Irzak⁴, A.V. Karpov^{1,2}, A.G. Kachkin¹, N.A. Kirneva^{1,5}, D.A. Kislov¹, S.V. Konovalov¹, V.A. Krupin¹, L.K. Kuznetsova¹, B.V. Kuteev^{1,5}, V.E. Lukash¹, A.V. Lutchenko¹, E.D. Marenikov^{1,5}, A.V. Melnikov^{1,5}, A.B. Mineev^{3,6}, N.A. Mustafin¹, A.R. Nemets¹, S.V. Neudachin¹, G.E. Notkin¹, M.R. Nurgaliev¹, I.S. Obraztsov¹, A.A. Panasenkov¹, I.S. Pimenov¹, A.A. Pshenov¹, I.N. Roy¹, D.V. Ryzhakov¹, P.V. Savrukhin¹, D.V. Sarychev¹, D.S. Sergeev¹, N.A. Solovyov¹, A.V. Sushkov¹, Yu.I. Tolpegina¹, G.A. Troshin⁴, R.R. Khayrutdinov⁷, E.N. Khayrutdinov¹, A.P. Khvostenko¹, P.P. Khvostenko¹, V.I. Khripunov¹, A.S. Chernenko¹, D.A. Shelukhin¹, E.A. Shestakov¹

¹ NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

² NRU MPEI, Moscow, Russia

³ JSC NIIIEFA, St. Petersburg, Russia

⁴ Ioffe Institute of Physics and Technology, St. Petersburg, Russia

⁵ NRNU MEPhI, Moscow, Russia

⁶ SPbSU, St. Petersburg, Russia

⁷ JC «SSC RF TRINITY», Moscow, Russia

On May 18, 2021, the physical start-up of the T-15MD tokamak took place at the National Research Centre “Kurchatov Institute”. Russian Prime Minister M.V. Mishustin took part in the event at the invitation of the President of the “Kurchatov Institute” M.V. Kovalchuk. The energy start of the tokamak was held in March, 2023. The facility is currently reaching its design parameters, and the diagnostic complex and auxiliary heating systems are being developed. The main goals of the T-15MD tokamak facility operation are the creation of an experimental base for a hybrid reactor and research in support of the international experimental thermonuclear reactor ITER. This issue presents a program of physical research on the T-15MD facility aimed at achieving the goal. The T-15MD tokamak is an innovative facility that has no analogues in the world in terms of parameters: a toroidal field on the plasma axis of 2 T with an aspect ratio of 2.2. The facility will be equipped with the systems of auxiliary plasma heating and noninductive current drive with a total power of 24 MW (by 2030), which will allow achievement of high plasma temperature ($T_i \sim T_e \sim 5\text{—}9$ keV) and plasma density ($n_e \sim 10^{20} \text{ m}^{-3}$) in discharges with a pulse duration of up to 30 s. HF methods (by ion-cyclotron, lower hybrid and electron cyclotron waves) and neutral beam injection will be used for plasma heating and current drive. Maintaining a stable quasi stationary discharge with improved plasma confinement and a duration from several to hundreds of seconds using auxiliary plasma heating systems is the main focus of the facility for the entire period of its operation. The T-15MD plasma diagnostic complex will make it possible to carry out a wide range of studies necessary for preparing basic scenarios for the creation of next-generation installations, and will also ensure the safe operation of the tokamak complex. The T-15MD Tokamak with a powerful system of auxiliary plasma heating, allowing to achieve the thermonuclear plasma parameters, with a diagnostic complex, competitive in comparison with the best world analogues, will become a new instrument of scientific research, with the help of which it will be possible to solve a wide range of physical problems and further develop technologies necessary for reliable justification of the parameters of the thermonuclear power plant and a hybrid nuclear fusion-fission reactor.

Key words: T-15MD tokamak, physics research program, hybrid reactor, fusion reactor, auxiliary plasma heating, noninductive current drive, international experimental thermonuclear reactor, ITER, divertor, ohmic heating, electron cyclotron heating, ion cyclotron heating, neutral beam injection, lower hybrid heating and current drive, improved confinement regimes, stability, magnetic configuration, edge localized modes, limiter, capillary-porous structures, tokamak plasma diagnostics.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	13
Введение.....	13
Раздел 1. Создание квазистационарной плазмы с реакторными параметрами — экспериментальной базы гибридного реактора	
Введение.....	17
1.1. Получение устойчивой высокотемпературной плазмы с высоким энергетическим удержанием. Исследование режимов улучшенного удержания	18
1.2. Получение и исследование режимов с высокой долей неиндукционного тока. Получение устойчивых режимов с высокими бета	26
1.3. Получение устойчивых режимов с высокой плотностью плазмы	31
1.4. Исследование двухкомпонентной плазмы — источника термоядерных нейтронов гибридного реактора	32
1.5. Получение и исследование длинного импульса, оптимизация взаимодействия плазма—стенка	36
Список литературы к разделу 1	39
Раздел 2. Исследования в области актуальных проблем физики плазмы токамака	
2.1. Изучение механизмов переноса	43
2.2. Исследование механизмов дополнительного нагрева плазмы и генерации тока	52
2.3. Оптимизация старта разряда	62
2.4. Изучение механизмов срывов и развития МГД-неустойчивостей	63
Список литературы к разделу 2	65
Раздел 3. Исследование взаимодействия плазма—стенка и физики дивертора	
Введение	69
3.1. Конструкция дивертора и первой стенки Т-15МД	70
3.2. Оптимизация работы дивертора токамака Т-15МД в режимах с дополнительным нагревом плазмы	70
3.3. Переход от углеродной к металлической первой стенке и дивертору	72
3.4. Использование жидких металлов в первой стенке и диверторе	73
Заключение	74
Список литературы к разделу 3	74
Раздел 4. Расчётно-теоретические исследования и развитие численных кодов в поддержку Т-15МД	
Список литературы к разделу 4	81
Раздел 5. Комплекс дополнительного нагрева и генерации тока	
5.1. Система инъекции для нагрева плазмы токамака Т-15МД	82
5.2. Системы нагрева и генерации тока в ионно-циклотронном диапазоне частот	93
5.3. Система нагрева и генерации тока в диапазоне частот нижнегибридного (НГ) резонанса для токамака Т-15МД	99
5.4. Система СВЧ-нагрева установки токамак Т-15МД	102
Список литературы к разделу 5	110
Раздел 6. Диагностический комплекс	
Введение	112
6.1. Электромагнитные диагностики	113
6.2. СВЧ-диагностики	118
6.3. Диагностики ИК, видимой и УФ областей света	123

6.4. Лазерные диагностики	136
6.5. Диагностики ионизирующих излучений	142
6.6. Корпускулярные диагностики	152
6.7. Диагностики плазма—стенка	155
6.8. Операционные диагностики установки	159
Заключение	165
Список литературы к разделу 6	168

Раздел 7. Прикладные задачи

Введение	174
7.1. Разработка и тестирование теплотехнических технологий	174
7.2. Отработка технологий топливного цикла, включая методы инъекции топлива	177
7.3. Разработка и апробация систем дистанционного обслуживания	177
7.4. Безопасность	179
Список литературы к разделу 7	180
Заключение	182

ПРЕДИСЛОВИЕ

Токамак Т-15МД — инновационная установка, не имеющая аналогов в мире по параметрам: тороидальное поле на оси плазмы 2 Тл при аспектном отношении 2,2. Параметры плазмы: большой радиус 1,48 м, малый радиус 0,67 м, вытянутость 1,7—1,9 и треугольность 0,3—0,4, ток плазмы 2 МА. Установка будет оборудована системой дополнительного нагрева плазмы и поддержания тока суммарной мощностью 24 МВт (к 2030 г.), которая позволит одновременное достижение высокой температуры плазмы ($T_i \sim T_e \sim 5\text{—}9$ кэВ) и плотности плазмы ($n_e \sim 10^{20}$ м⁻³) в разрядах с длительностью импульса до 30 с. Программа научных исследований на токамаке Т-15МД направлена на получение физической и технологической баз данных в обоснование создания стационарных термоядерных реакторов и термоядерных источников нейтронов перспективных гибридных систем на основе токамаков. На токамаке Т-15МД будут проводиться эксперименты в поддержку Международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР. Поддержание квазистационарного устойчивого режима улучшенного удержания в плазме с длительностью разряда от нескольких до сотен секунд с помощью систем дополнительного нагрева плазмы является основным направлением работы установки на весь период её работы. Токамак Т-15МД с мощной системой дополнительного нагрева плазмы, позволяющей достигать термоядерные параметры плазмы, с диагностическим комплексом, не уступающим лучшим мировым аналогам, станет новым инструментом для научных исследований, с помощью которого будут возможным решение широкого спектра физических проблем и дальнейшее развитие технологий, необходимых для надёжного обоснования параметров энергетического термоядерного и гибридного реакторов.

ВВЕДЕНИЕ

Основной тенденцией развития общества в XXI веке является непрерывное энергопотребление, связанное как с ростом народонаселения, так и с нарастанием потребности в энергии стран третьего мира, что необходимо для их развития. Возможности удовлетворения возрастающих потребностей в энергии как за счёт топлива органического происхождения, так и за счёт возобновляемых источников ограничены вследствие их естественных пределов.

Базовым источником энергии в долгосрочной перспективе может служить ядерная энергия деления, если в топливный цикл будут включены весь природный уран и торий. С этой целью разрабатываются ядерные реакторы на быстрых нейтронах. В настоящее же время ядерная энергетика базируется в основном на реакторах с тепловыми нейтронами, проблема которых заключается в исчерпаемости топливных ресурсов в течение XXI века. Кроме того, в тепловых реакторах образуется большое количество высокоактивного отработанного топлива, которое требует специального обращения и оборудования специальных хранилищ.

Термоядерная энергия, основанная на синтезе ядер дейтерия и трития, обладает принципиальными преимуществами по сравнению с ядерной. Во-первых, она имеет практически неисчерпаемые топливные ресурсы. Во-вторых, она не имеет высокоактивных отходов и практически безопасна при любых мыслимых авариях активной зоны, в том числе не требует эвакуации населения. В-третьих, при использовании малоактивируемых конструкционных материалов термоядерный реактор проще выводится из эксплуатации.

Основным носителем энергии термоядерного синтеза служат нейтроны. Энергия их преобразуется в тепло в blankets термоядерного реактора, а затем в другие виды энергии. Другой путь использования потоков термоядерных нейтронов заключается в создании термоядерных источников нейтронов (ТИН) для гибридных (синтез—деление) реакторов, blankets которых содержат уран-238, торий-232 или минорные актиниды из отработанного ядерного топлива. Гибридные реакторы могут использоваться для наработки ядерного топлива тепловых реакторов (плутоний-239 и уран-233), для трансмутации долгоживущих высокоактивных отходов, а также для выработки энергии в подкритических системах. Требования к плазменной части и нейтронным потокам для гибридных реакторов на порядок ниже, чем к чисто термоядерным реакторам, что может существенно сократить время их внедрения.

В 2009 г. по инициативе академика Е.П. Велихова была создана комиссия под руководством профессора С.В. Мирнова для анализа состояния и перспектив работ по физике и технологии токамаков в России.

Одними из основных принятых решений комиссии стали: «Комиссия считает крайне актуальной скорейшую демонстрацию положительного практического выхода программы УТС и отмечает, что реальной возможностью этого в ближайшее время может стать разработка и создание ТИН — «гибридной» системы УТС, объединяющей преимущества реакций синтеза и деления и нацеленной на решение проблем, стоящих перед атомной энергетикой. Комиссия рекомендует приступить к работам по созданию водородного (без нейтронного) прототипа термоядерного источника нейтронов ТИН-0 на базе токамака Т-15МД и одновременно приступить к эскизному проектированию демонстрационного ТИН-1, чтобы, по возможности, ускорить внедрение управляемого термоядерного синтеза в атомную энергетику».

Работы по созданию ТИН планируется выполнить в три этапа:

1-й этап (2021—2030). Создание и исследование физического прототипа ТИН-0 — установки Т-15МД; разработка технологий, обеспечивающих стационарную работу токамака; разработка и испытания бланкетов для ТИН;

2-й этап (2021—2035). Разработка и создание демонстрационного ТИН-1 со стационарной нейтронной нагрузкой на бланкет $0,1—0,2$ МВт/м², термоядерная мощность 10—20 МВт. Отработка ядерных и термоядерных технологий наработки ядерного топлива (несколько десятков кг урана-233 или плутония) и трансмутации минорных актинидов (МА);

3-й этап (2021—2045). Разработка и создание опытно-промышленного ТИН-2 для наработки ядерного топлива со стационарной нейтронной нагрузкой на бланкет $0,3—0,5$ МВт/м² для обеспечения топливом 1—2 ВВЭР-1000 и для трансмутации МА от работы 3—6 ВВЭР-1000 (до 250 кг/год МА).

В 2009 г. сотрудники Института физики токамаков РНЦ «Курчатовский институт» под руководством Э.А. Азизова разработали концепцию компактного токамака, основанную на использовании вытянутой одно- и двухнулевой диверторной конфигурации плазменного шнура с аспектным отношением в диапазоне 2,2—3,1, удлинением до 1,9, с «тёплой» электромагнитной системой, способной создавать тороидальное магнитное поле на оси шнура 2 Тл, мощными квазистационарными системами дополнительного нагрева и современной инженерной инфраструктурой. При этом ток в плазме должен достигать 2 МА при длительности плато разряда 10 с. На базе этой концепции НИИЭФА совместно с НИЦ «Курчатовский институт» разработали технический проект токамака, получившего название Т-15МД, который был утверждён ГК «Росатом»*. На рис. 1 показано размещение установки в экспериментальном зале.

Основные параметры токамака Т-15МД:

Ток плазмы I_p , МА ...	2
Аспектное отношение, А ...	2,2
Большой радиус тора R_0 , м ...	1,48
Малый радиус плазмы a , м ...	0,67
Вытянутость сечения k_{95} ...	1,7—1,9
Треугольность δ_{95} ...	0,3—0,4
Тороидальное поле на оси плазмы B_T , Тл ...	2,0
Длительность плато тороидального поля 2 Тл, с ...	10
Длительность плато тока плазмы 2 МА, с ...	$\leq 1,5$
Мощность нагрева плазмы $P_{\text{доп.}}$, МВт ...	24
Предел Гринвальда для плотности $n_{e,G}$, 10^{20} м ⁻³ ...	1,4
Суммарный запас потока $\Delta\psi_{cs}$, Вб ...	6

Токамак Т-15МД представляет собой инновационную установку, не имеющую аналогов в мире по параметрам: тороидальное поле $B = 2$ Тл при аспектном отношении 2,2 [1]. Низкое аспектное отношение позволяет получать более высокие значения бэта (отношение газокINETического давления плазмы к давлению тороидального магнитного поля) по сравнению с токамаками, имеющими аспектное отношение 3—4. Мощность реакций синтеза $P_{\text{синтеза}} \sim \beta^2 B^4$, поэтому очень важно иметь высокие значения бэта и тороидального поля. Кроме того, стоимость токамака растёт примерно как R^3 , где R — большой радиус тора, и, следовательно, компактные токамаки более перспективны с точки зрения экономики.

*Хвостенко П.П., Анашкин И.О., Бондарчук Э.Н. и др. Экспериментальная термоядерная установка токамак Т-15МД. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 1, с. 15—38.

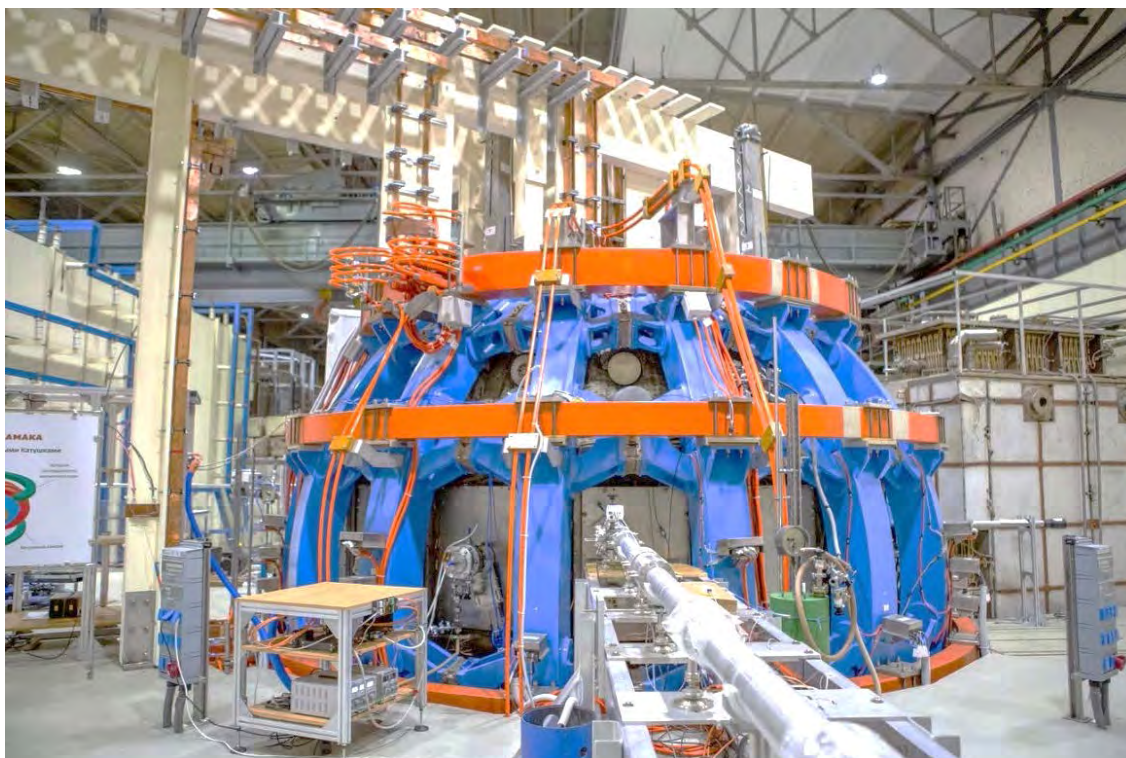


Рис. 1. Токамак Т-15МД в экспериментальном зале

В своих выступлениях, интервью и публикациях президент НИЦ «Курчатовский институт» Михаил Валентинович Ковальчук неоднократно подчёркивал, что стратегической целью работ по программе исследований управляемого термоядерного синтеза на ближайший период времени в нашей стране является создание гибридного реактора по наработке топлива для тепловых атомных реакторов. Источником термоядерных нейтронов, необходимых для получения топлива (уран-233 или плутоний-239), должен стать токамак — термоядерный источник нейтронов (ТИН), генерирующий нейтроны с энергией 14,1 МэВ в реакциях синтеза изотопов водорода дейтерия и трития. Совместная работа гибридного реактора и атомных станций в перспективе полностью решит энергетические потребности человечества.

Целью научных исследований на токамаке Т-15МД должно быть получение физической и технологической баз данных в обоснование создания стационарных термоядерных источников нейтронов гибридных реакторов на основе токамаков. На токамаке Т-15МД будут проводиться также эксперименты в поддержку Международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР. Поддержание квазистационарного устойчивого режима улучшенного удержания в плазме Т-15МД с длительностью разряда от нескольких до сотен секунд с помощью систем дополнительного нагрева плазмы является основным направлением работы установки на весь период эксплуатации. Эта задача включает в себя решение фундаментальных и прикладных задач, направленных на:

- исследование режима улучшенного удержания и разработку алгоритмов контроля в таких режимах;
- изучение физических механизмов переноса энергии и частиц, включая анализ изменения турбулентности плазмы, влияние вращения плазмы, роль электрического поля;
- анализ процессов создания безындукционного тока в плазме с помощью различных методов нагрева и поддержания тока плазмы и их комбинации;
- исследование взаимодействия пучков быстрых атомов с плазмой;
- исследование физики взаимодействия ВЧ- и СВЧ-волн с плазмой;
- исследование взаимодействия плазмы с первой стенкой токамака, выбор материала первой стенки и определение методов снижения нагрузки на первую стенку, включая применение литиевых технологий;
- изучение устойчивости плазмы и разработка алгоритмов управления её устойчивостью.

В токамаке Т-15МД инжекция быстрых атомов водорода будет осуществляться тремя инжекторами, каждый из которых имеет по два источника положительных ионов. Суммарная мощность инжектированных в токамак стационарных пучков быстрых атомов составит 6 МВт при энергии до 60 (75) кэВ. Начало экспериментов с системой инжекционного нагрева — 2026—2027 гг.

Нагрев электронной компоненты будет осуществляться системой СВЧ-нагрева плазмы, состоящей из пяти гиротронов (на конец 2025 г.), генерирующих СВЧ-излучение на частотах ($f = 82,6$ и 105 ГГц), с суммарной вводимой в плазму мощностью 5 МВт и длительностью 30 с. К 2030 г. планируется ввести в работу ещё три гиротрона, доведя суммарную СВЧ-мощность нагрева до 8 МВт.

Система ионно-циклотронного нагрева плазмы мощностью 6 МВт, генерирующая ВЧ-излучение на частотах 15—60 МГц, планируется быть введённой в работу в 2027 г.

Система нижнегибридного нагрева и поддержания тока плазмы на частоте 2,45 ГГц и мощностью 4 МВт также должна быть введена в работу в 2027 г.

Таким образом, суммарная мощность дополнительного нагрева плазмы к 2030 г. составит 24 МВт.

18 мая 2021 г. состоялось знаменательное событие для всего коллектива, принимавшего участие в проектировании, строительстве и подготовке технологических систем к работе токамака Т-15МД. В этот день состоялся физический пуск токамака Т-15МД, в котором по приглашению президента НИЦ «Курчатовский институт» М.В. Ковальчука приняли участие председатель Правительства Российской Федерации М.В. Мишустин и члены Правительства Д.Н. Чернышенко и В.Н. Фальков (рис. 2).

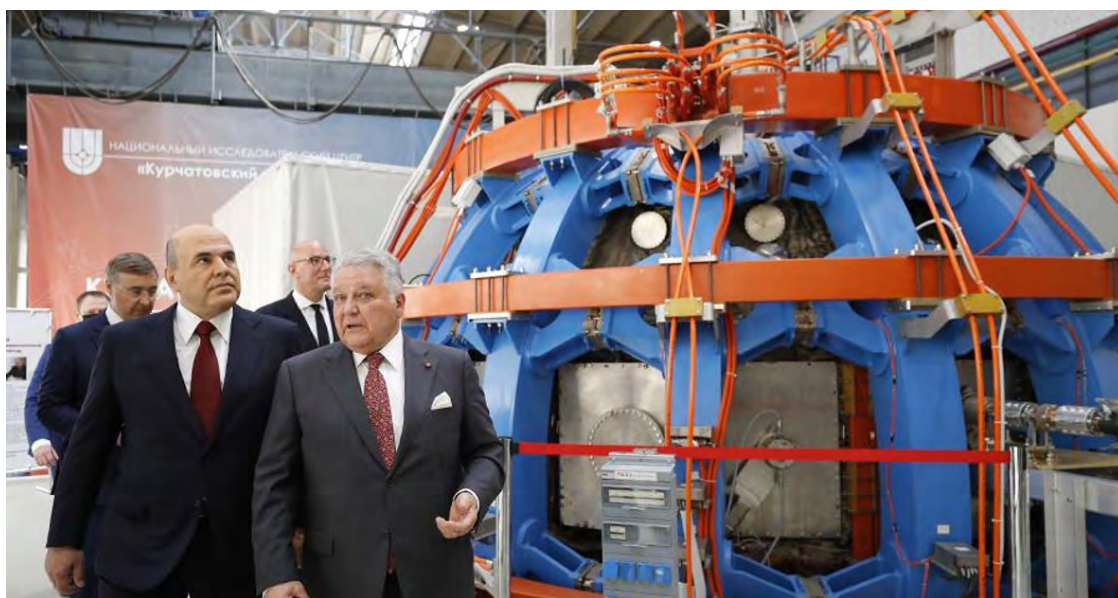


Рис. 2. М.В. Ковальчук, М.В. Мишустин, В.Н. Фальков и Д.Н. Чернышенко на токамаке Т-15МД

Установка токамак Т-15МД с мощной системой дополнительного нагрева плазмы, позволяющей достигать термоядерные параметры плазмы (температура порядка 100 млн градусов), с диагностическим комплексом, не уступающим лучшим мировым аналогам, станет новым инструментом для научных исследований, с помощью которого в рамках НИОКР будут возможны решение широкого спектра физических проблем и дальнейшее развитие технологий, необходимых для надёжного обоснования параметров энергетического термоядерного и гибридного реакторов.

РАЗДЕЛ 1

СОЗДАНИЕ КВАЗИСТАЦИОНАРНОЙ ПЛАЗМЫ С РЕАКТОРНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ — ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ ГИБРИДНОГО РЕАКТОРА

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развитие термоядерных исследований идёт по двум основным направлениям. Первое — это создание энергетически выгодного термоядерного реактора на основе синтеза лёгких ядер изотопов водорода (для краткости будем называть его «чистым» термоядерным реактором). Второе — создание гибридной установки, в которой термоядерный источник нейтронов служит для наработки топлива ядерного реактора.

Требования к плазменному разряду в гибридном и в термоядерном реакторе несколько отличаются. Основная задача термоядерного реактора — достижение условий горения, т.е. самоподдерживающейся термоядерной реакции, в результате которой коэффициент воспроизводства энергии

$$Q = \frac{P_{\text{fus}}}{P_{\text{in}}} \rightarrow \infty, \quad (1.1)$$

где P_{fus} — термоядерная мощность; P_{in} — полная мощность нагрева плазмы, включая омический нагрев.

Достижение горения требует выполнения условия

$$n(0)T_i(0)\tau_E > 2 \cdot 10^{21} \text{кэВ} \cdot \text{с}/\text{м}^3. \quad (1.2)$$

Здесь n — плотность плазмы; T_i — температура ионов; τ_E — энергетическое время жизни плазмы. Для получения экономически выгодного реактора достаточно выполнения более мягкого условия

$$Q = \frac{P_{\text{fus}}}{P_{\text{in}}} \sim 10. \quad (1.3)$$

Термоядерная мощность зависит от плотности плазмы как

$$P_{\text{fus}} \sim n^2 T_i^2. \quad (1.4)$$

Для термоядерного источника нейтронов, входящего в состав гибридного реактора, ключевым параметром является нейтронный выход Y_n . Он зависит от состава плазмы, температуры ионов и их функции распределения. В предположении максвелловской функции распределения ионов нейтронный выход из единицы объёма связан с параметрами плазмы как

$$Y_n \sim n^2 \langle \sigma v \rangle, \quad (1.5)$$

где $\langle \sigma v \rangle$ — скоростной коэффициент термоядерной реакции — сильная функция от температуры плазмы.

Если нейтроны образуются в результате взаимодействия высокоэнергетичных ионов пучка, вводимого в плазму, и ионов самой плазмы, то скоростной коэффициент будет зависеть от энергии пучка. В области высоких энергий порядка МэВ, предполагаемых для реактора, он будет превосходить коэффициент, соответствующий максвелловскому распределению [1], т.е. при высоких энергиях пучка реакции синтеза будут идти преимущественно на быстрых ионах, создаваемых при ионизации атомов пучка в плазме.

Таким образом, из соотношений (1.1)—(1.5) видно, что для получения плазмы с реакторными параметрами как в «чистом» термоядерном реакторе, так и в гибридном реакторе необходимо обеспечить высокую температуру ионной компоненты плазмы и высокую плотность плазмы. В «чистом» реакторе необходимо выполнение условия (1.2), поэтому требуется достижение высокого энергетического времени удержания.

Достижимые значения плотности и температуры плазмы в токамаке ограничены пределами по плотности и давлению. Выбор оптимальной рабочей области по этим параметрам требует специального внимания к сценарию разряда и созданию алгоритмов контроля плазмы.

Для реакторной установки, вообще говоря, предпочтительна стационарная непрерывная работа, когда длительность импульса $t_{\text{имп}} \rightarrow \infty$. Для источника нейтронов, по-видимому, допустимы импульсные режимы, но длительность импульса должна существенно превосходить характерные плазменные времена — энергетическое время жизни, характерное время установления профиля тока и время насыщения первой стенки. Для обеспечения необходимой длительности импульса требуется, с одной стороны, разработка энергетически эффективных сценариев с неиндукционным поддержанием тока, с другой — следует оптимизировать взаимодействие плазмы с элементами первой стенки, чтобы снизить поступление примесей в разряд и увеличить срок службы стенки в энергонапряжённых режимах.

1.1. ПОЛУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ С ВЫСОКИМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ УДЕРЖАНИЕМ. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ УЛУЧШЕННОГО УДЕРЖАНИЯ

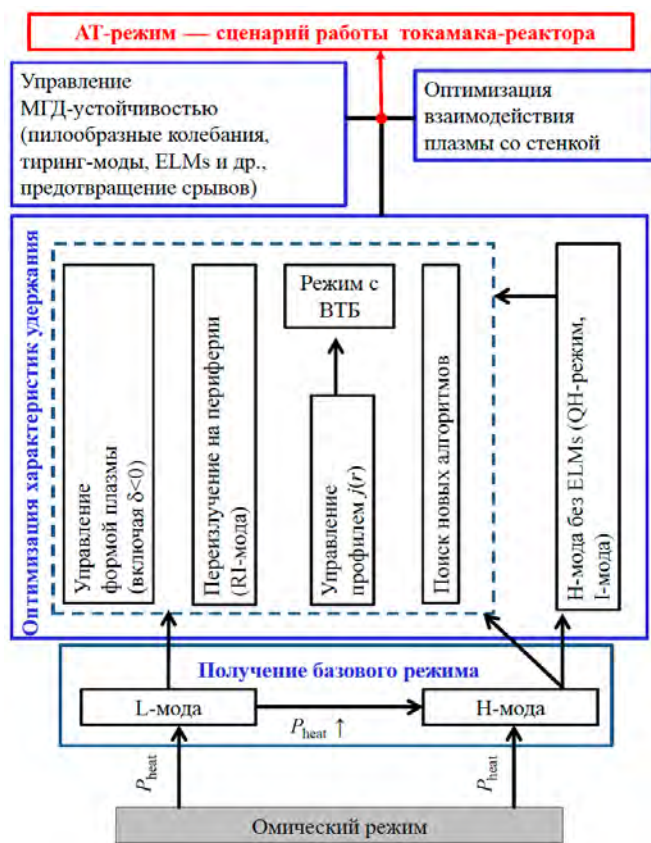


Рис. 1.1.1. Схематическое изображение идеологии экспериментов для получения сценария с высокими характеристиками удержания плазмы, применимого в установке реакторного типа

Для получения высоких времён удержания плазмы, высокой температуры и плотности необходимо переходить в режим улучшенного удержания. Исторически первым таким режимом является H-мода, экспериментально обнаруженная в 1984 г. [3]. Характерная особенность H-моды — формирование пьедестала, т.е. области повышенного градиента давления вблизи сепаратрисы (рис. 1.1.2).

Одной из основных целей Т-15МД является подготовка сценариев разряда, которые могли бы стать базовыми для гибридного реактора и для чистого термоядерного реактора. Это может быть один сценарий, одновременно удовлетворяющий требованиям обеих установок (см. ранее), или же разные сценарии, адаптированные под задачи каждой из них. В настоящее время ни на одной экспериментальной установке нет надёжного рецепта получения таких режимов. Для Т-15МД это тоже является поисковой задачей, для решения которой в качестве исходных будут использованы известные, отработанные режимы, L- и H-режимы [2], а их модификации позволят получить искомый результат. Схематично это показано на рис. 1.1.1.

Обычный режим работы токамака с дополнительным нагревом плазмы L-режим (L-мода¹) характеризуется высоким аномальным переносом электронов и ионов плазмы, умеренным нормализованным градиентом ионной и электронной температуры в градиентной зоне $\frac{R}{T_e} \frac{dT_e}{dr} < 10$ (R — большой радиус плазмы,

r — текущая радиальная координата) и плоским профилем давления вблизи крайней замкнутой магнитной поверхности.

Эксперименты показывают, что для получения

¹ Режим удержания часто называют модой удержания.

Энергосодержание плазмы, а значит, и термоядерная мощность растут с увеличением высоты пьедестала. Однако рост градиента давления ограничен развитием периферийных неустойчивостей — граничных локализованных мод (ELMs). Граничные локализованные моды приводят к возрастанию потоков тепла и частиц на диверторные пластины и, как следствие, снижению времени жизни материальных элементов, обращённых к плазме. Из-за этого, хотя H-мода в настоящее время и выбрана как основной рабочий режим токамака-реактора [2], ведутся поиски альтернативного режима улучшенного удержания.

В качестве альтернативы рассматриваются следующие режимы:

— QH-мода — «спокойная» H-мода — режим [4], в котором при высоком градиенте давления на границе плазмы вместо ELMs наблюдается развитие мелкомасштабной МГД-неустойчивости с тороидальным волновым числом $n = 1—10$;

— супер-H-мода [5, 6] — режим, получаемый в конфигурации с высокой треугольностью плазмы и высокой плотностью (высокой столкновительностью) в области пьедестала;

— RI-мода [7] — режим, в котором при инжекции примесей на периферию плазмы наблюдаются характеристики удержания такие же, как в H-моде, однако градиенты температуры и плотности плазмы соответствуют L-моду, поэтому отсутствуют граничные локализованные моды;

— I-мода [8] — режим улучшенного удержания, в котором пьедестал формируется на профилях ионной и электронной температуры, а профиль плотности сохраняет форму, присущую L-моду. В этом режиме вместо ELMs вблизи сепаратрисы развивается мелкомасштабная высокочастотная (200—400 ГГц) неустойчивость. В I-моду наблюдается более слабая деградация удержания с ростом мощности по сравнению с L- и H-модой.

В 1986 г. был обнаружен режим улучшенного удержания с внутренним транспортным барьером (ВТБ, [9]). В режиме с ВТБ область повышенных градиентов (температуры, плотности, скорости вращения) формируется во внутренней части плазмы, $\rho < 0,8$. Внутренний барьер может формироваться как на фоне L-моды, так и на фоне H-моды. Во втором случае прирост энергии плазмы усиливается по сравнению с чистой H-модой.

В 2007 г. на установке TCV [10] в L-моду в конфигурации с отрицательной треугольностью было продемонстрировано снижение электронного переноса. В разрядах с $\delta = -0,4$ для достижения тех же температур требовалась вдвое меньшая мощность дополнительного нагрева, чем в импульсах с $\delta = +0,4$. Позднее в разрядах с отрицательной треугольностью в токамаке DIII-D без развития пьедестала на периферии плазмы были получены энергетические характеристики удержания, соответствующие H-моду [11]. Степень деградации удержания в L-моду с отрицательной треугольностью на DIII-D оказалась ниже, чем предсказывается скейлингами ИТЭР для L- и H-моды [11].

Цель физического эксперимента на установке T-15МД в рамках этого пункта программы — поиск такого режима удержания (выбор из известных или создание нового), который позволил бы получить наилучшие энергетические характеристики плазмы (W , τ_E) при временах существования режима, превышающих энергетическое время жизни и резистивное время плазменного шнура. Во всех экспериментах, рассмотренных в рамках п. 1.1 Программы, будут проведены анализ изменения коэффициентов переноса с помощью различных методик (из энергобаланса, по анализу малого возмущения) и сравнение с современными теоретическими моделями.

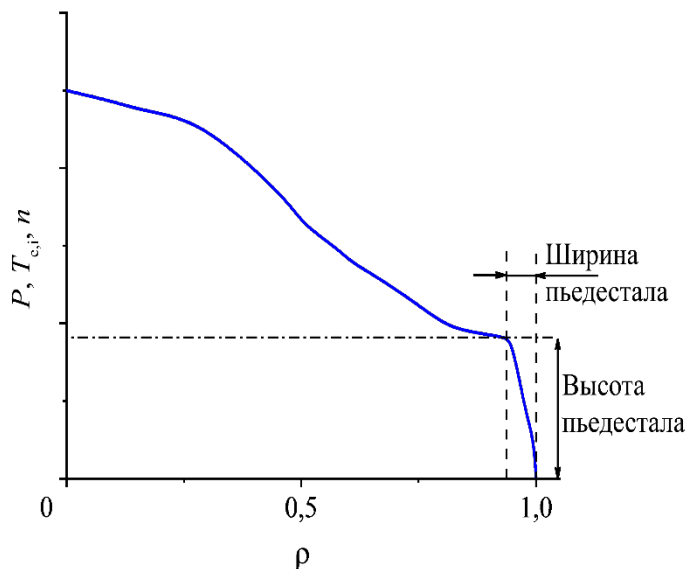


Рис. 1.1.2. Типичное распределение температуры, плотности давления плазмы в H-моду

1.1.1. L-режим

Исходный режим работы установки Т-15МД — L-режим (L-мода) удержания. Этот режим является опорным для сопоставления с ним характеристик удержания, которые будут получены в улучшенных режимах. Эксперименты в L-моде проводятся при разном соотношении электронного и ионного нагрева: $P_e > P_i$, $P_i > P_e$ и $P_i \sim P_e$ (P_i — мощность, идущая в ионную компоненту, P_e — мощность, идущая в электронную компоненту). В L-моде целесообразно проведение следующих экспериментов:

- определение диапазона устойчивых магнитных конфигураций в условиях лимитерной и диверторной плазмы: по вытянутости $k = 1, \dots, 1,8$, треугольности $\delta = 0, \dots, 0,4$. При наличии возможности — расширение рабочей области на $\delta < 0$;
- для выбранных магнитных конфигураций (два—три значения k , три значения δ для каждого k ($\delta \sim 0, \pm\delta_{\max}/2, \pm\delta_{\max}$)) определяем:
- зависимость удержания от плотности плазмы вплоть до предельной плотности при фиксированном значении q_95 при разных значениях P_i/P_e ;
- зависимость удержания от мощности дополнительного нагрева и соотношения P_i/P_e .

1.1.2. H-режим

Вводные замечания. Переход в H-моду — эффект пороговый по мощности. Приняты следующие скейлинги для оценки пороговой мощности:

$$P_{L-H} = 0,049 \bar{n}_e^{-0,72} B_T^{0,8} S^{0,94}; \quad (1.1.1)$$

$$P_{L-H} = 0,072 \bar{n}_e^{0,7} B_T^{0,7} S^{0,9} \left(\frac{z_{\text{eff}}}{2} \right)^{0,7} \left(\frac{0,1A}{1 - \sqrt{\frac{2}{1+A}}} \right)^{0,5}; \quad (1.1.2)$$

$$P_{L-H} = 0,098 \bar{n}_e^{-0,72} B_T^{0,8} S^{0,94} \frac{1}{M_{\text{eff}}}. \quad (1.1.3)$$

Здесь P_{L-H} — пороговая мощность L—H-перехода, МВт; \bar{n}_e — средняя плотность плазмы, 10^{20} м^{-3} ; B_T — тороидальное магнитное поле, Тл; S — площадь поверхности плазменного шнура, м^2 ; $A = R/a$ — аспектное отношение; z_{eff} — эффективный заряд плазмы; $M_{\text{eff}} = \frac{n_H + 2n_D + 3n_T}{n_H + n_D + n_T}$ — эффективное массовое число; n_H, n_D, n_T — концентрация ядер водорода, дейтерия, трития.

Скейлинг (1.1.1) обсуждается в работе [12], скейлинги (1.1.2) и (1.1.3) — в работах [13] и [14] соответственно. Как показали эксперименты на различных установках, зависимость пороговой мощности от плотности описывается скейлингами (1.1.1)—(1.1.3) при $\bar{n}_e > n_{\text{cr}}$ [15]. При $\bar{n}_e < n_{\text{cr}}$ пороговая мощность L—H-перехода возрастает. Величина критической плотности соответствует скейлингу

$$n_{\text{cr}} = 0,07 I_p^{0,34} B_T^{0,62} a^{-0,95} A^{0,4}, \quad (1.1.4)$$

где I_p — ток плазмы, МА; R, a — пространственные размеры, м; n_{cr} , 10^{20} м^{-3} .

На рис. 1.1.3 приведены оценки величины пороговой мощности L—H-перехода, выполненные по скейлингам (1.1.1)—(1.1.3) для установки Т-15МД для режимов с различными параметрами. Диапазон по плотности ограничен значениями критической плотности (1.1.4) и плотности Гринвальда [16]. Расчёты сделаны для высокой, практически максимальной вытянутости плазмы, $k = 1,81$. Снижение k до $k = 1,5$ приведёт к уменьшению пороговой мощности на $\sim 12\%$.

Графики, представленные на рис. 1.1.3, позволяют сделать следующие выводы:

- в установке Т-15МД в режиме с низким магнитным полем (см. рис. 1.1.3, а) L—H-переход может происходить уже при омическом нагреве, без ввода дополнительной мощности. Действительно, оценки по классической проводимости Спитцера при $T_e = 1$ кэВ и $z_{\text{eff}} = 2$ дают значение омической мощности

$P \sim 1$ МВт. Это не противоречит моделированию, проведённому по коду ASTRA [17] в [18]. Омическая Н-мода наблюдалась на многих установках, например, [19—21];

— при мощности дополнительного нагрева, превышающей 5 МВт, L—H-переход может быть получен в установке Т-15МД при $B_T \leq 1,5$ Тл во всём рабочем диапазоне значений плотности плазмы.

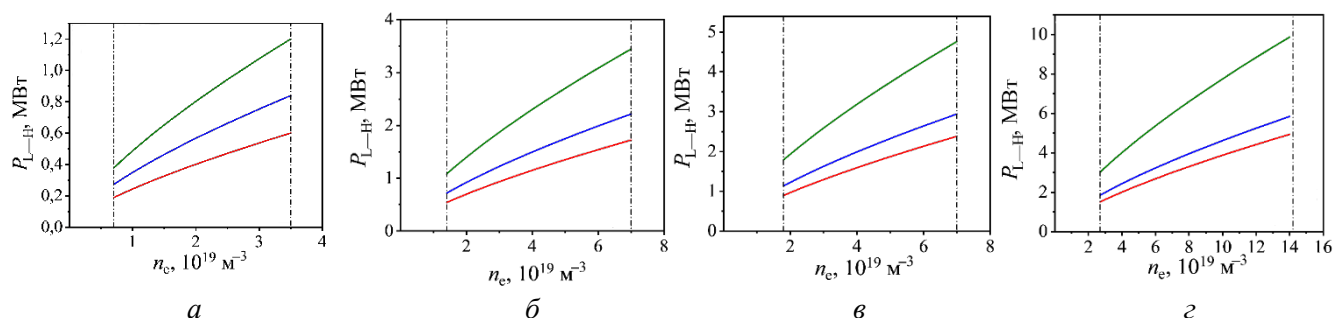


Рис. 1.1.3. Оценка пороговой мощности L—H-перехода для различных режимов Т-15МД, выполненная по скейлингам (1.1.1)—(1.1.3) для водородной плазмы ($M_{\text{eff}} = 1$) и конфигурации с $R = 1,5$ м, $a = 0,67$ м, $k = 1,81$: красная кривая — скейлинг (1.1.1), синяя — (1.1.2), зелёная — (1.1.3). Величины магнитного поля и тока плазмы указаны в поле каждого рисунка. Вертикальные штрих-пунктирные линии означают критическую плотность (слева) и плотность Гринвальда (справа). $B_T = 0,5$ Тл, $I_p = 0,5$ МА (а); $B_T = 1$ Тл, $I_p = 1$ МА (б); $B_T = 1,5$ Тл, $I_p = 1$ МА (в); $B_T = 2$ Тл, $I_p = 2$ МА (г)

Эксперименты по исследованию Н-моды в Т-15МД. Цель — получение и исследование физики Н-моды и получение реперного режима по характеристикам удержания для создания базового режима установки-реактора.

Экспериментальные задачи:

— определение пороговой мощности L—H-перехода в водороде и гелии и исследование основных зависимостей от параметров плазмы (включая геометрию шнура) и рабочего газа;

— изучение влияния соотношения ионного и электронного нагрева P_i/P_e на пороговую мощность L—H-перехода и на характеристики Н-моды (энергосодержание, прирост времени жизни, характеристики пьедестала);

— определение влияния тороидального вращения плазмы на пороговую мощность L—H-перехода и характеристики Н-моды;

— при фиксированном соотношении P_i/P_e и суммарной мощности нагрева от импульса к импульсу снижается доля ионного нагрева, обеспечиваемого инжекцией быстрых атомов (заменяется ВЧ-нагревом ионной компоненты);

— зависимость характеристик Н-моды от направления тороидального вращения — по току и против тока. Суммарная мощность фиксируется. Доля инжекции быстрых атомов варьируется от одного до трёх инжекторов. Для каждой мощности инжекции эксперимент проводится с прямым и обратным направлением тока плазмы (необходимо контролировать направление градиентного дрейфа — должно быть одинаковым относительно X-точки);

— определение роли диверторной конфигурации в формировании Н-моды. При одинаковых геометрических параметрах плазмы сравнить условия получения L—H-перехода и характеристики Н-моды в лимитерной плазме (возможно ли?) и в плазме с диверторной конфигурацией;

— определение характера ELMs и их зависимости от параметров разряда, мощности нагрева и геометрии плазменного шнура (k , δ , R/a);

— влияние аспектного отношения на характеристики Н-моды. Для этого потребуется получить разряд с меньшим значением малого радиуса при неизменном R , но с теми же параметрами формы (вытянутость, треугольность);

— влияние напуска инертных газов (Ne, Ar) на характеристики Н-моды и характер ELMs;

— изучение свойств пьедестала, его влияния на энергетические характеристики разряда и зависимости давления в пьедестале от параметров разряда. Влияние формы плазмы на параметры пьедестала;

— изучение особенностей «глобальных» и «полуглобальных» переходов [22, 23].

Требуемый результат: получение зависимости (Н-фактор, нагрузка на стенку, длительность режима по МГД-активности) от условий разряда и выбор оптимальной точки по этим параметрам.

Попытка получения QH-моды. Отличительной особенностью режима является отсутствие ELMs, но наличие специфической МГД-активности с $n = 1—10$, локализованной вблизи сепаратрисы. Наблюдаемая неустойчивость облегчает контроль плотности и препятствует накоплению примесей. Для получения режима необходимо осуществлять инжекцию пучков быстрых атомов в направлении, противоположном току плазмы. Кроме того, в соответствии с опытом DIII-D [4] важным элементом является наличие криооткачки в диверторе. Особенности требования к геометрии плазменного шнура не отмечались.

Получение режима. В соответствии со сказанным выше, по-видимому, необходима инжекция быстрых атомов в направлении, противоположном току плазмы. При полной мощности нагрева, превышающей пороговую мощность L—H-перехода, необходимо изменение доли инжекционного нагрева за счёт включения от одного до трёх инжекторов. Параметры исходного режима выбираются для обеспечения запаса устойчивости на границе $q_a = 3,5—6$.

В случае успешного эксперимента по созданию режима будут проведены исследование области его существования и сравнение характеристик QH-моды с обычной H-модой. Основными критериями для сравнения являются энергосодержание плазмы, контролируемость режима с точки зрения МГД-устойчивости и интенсивность взаимодействия плазма—стенка.

Супер-H-мода. В соответствии с результатами, представленными в [5, 6], для получения режима необходимо увеличивать столкновительность в области пьедестала (увеличение плотности) при высокой треугольности плазмы. Достигается переход во вторую зону устойчивости, что препятствует развитию ELMs. Для анализа возможности получения супер-H-моды в T-15МД целесообразно провести предварительные расчёты, аналогичные представленным в [3]. На основании расчётов может быть определена граница МГД-устойчивости пьедестала.

Если эксперименты по созданию режима будут успешными, то будут исследованы его характеристики и определена область существования, проведено сравнение с обычной H-модой.

1.1.3. I-режим

Вводные замечания. I-мода впервые была получена в токамаке Alcator C-mod [8], позднее наблюдалась в ASDEX Upgrade [24] и EAST [25]. В этом режиме улучшенное удержание наблюдается благодаря созданию на периферии пьедестала на профилях ионной и электронной температуры. Градиент плотности остаётся таким же, как и в L-моды. Плотность контролируется с помощью криооткачки в диверторе так же, как и в случае QH-режима. Энергосодержание плазмы соответствует ожидаемому в H-моды с теми же параметрами разряда и может быть даже несколько выше [8]. Переход в I-моду сопровождается снижением широкополосной турбулентности в области частот 60—150 кГц на периферии плазмы и появлением слабокогерентной неустойчивости в высокочастотной области ($f \sim 200—400$ кГц). Эта неустойчивость препятствует накоплению примесей в центральной области шнура. Ключевая особенность I-моды — более слабая, чем в H-моды, деградация удержания с мощностью. В соответствии с результатами Alcator C-mod [26] энергосодержание плазмы W в режиме I-моды растёт с мощностью нагрева как

$$W \sim I_p P_{\text{heat}}^{0,7}. \quad (1.1.5)$$

Соотношение (1.1.5) показывает, что ожидаемое в I-моды энергетическое время жизни зависит от мощности нагрева как $\tau_E \sim P_{\text{heat}}^{-0,3}$, в то время как в L- и H-моды наблюдается более сильная деградация удержания с мощностью $\tau_E \sim P_{\text{heat}}^{-0,7}$ [2].

Длительность существования режима значительно превышает энергетическое время жизни плазмы и ограничивается длительностью импульса систем нагрева и токамака. В длинных импульсах ($\tau_{\text{imp}} \gg \tau_E$) I-мода может спонтанным образом переходить в H-моду.

Для достижения I-моды необходимо создать условия, в которых дрейф $\mathbf{V} \times \nabla B$ направлен в сторону от X-точки. На Alcator C-mod подавляющее большинство (95%) экспериментов по получению I-моды проводилось с верхней X-точкой, градиентный дрейф был направлен вниз. В токамаке ASDEX Upgrade эксперименты были проведены как для конфигурации с верхней X-точкой, так и для конфигурации с нижней

X -точкой. В обоих случаях направление магнитного поля задавало дрейф в сторону от X -точки. Неблагоприятное направление дрейфа позволяет избежать перехода в H -моду.

Пороговая мощность L — I -перехода оказывается выше, чем пороговая мощность L — H -перехода. ASDEX Upgrade при плотностях $n > n_{cr}$ демонстрировал увеличение мощности L — I -перехода на ~30% над порогом L — H -перехода. В работе [24] это интерпретировалось как следствие неблагоприятного направления градиентного дрейфа.

В Alcator C-mod I -мода получалась при ионном циклотронном нагреве, в ASDEX Upgrade L — I -переход осуществлялся при использовании различных систем нагрева: электронно-циклотронном, ионно-циклотронном, инжекционном.

Эксперименты по исследованию I -моды. Получение режима. В условиях T-15МД эксперименты будут проводиться в диверторной конфигурации с нижней X -точкой. Мощность дополнительного нагрева должна превышать значения, показанные на рис. 1.1.3 красной кривой, не менее чем на 30%.

В случае успешного создания режима I -моды:

- определение области существования режима по параметрам плазмы, геометрии плазменного шнура, соотношения P_i/P_e ;
- определение условий I — H -перехода;
- исследование энергетических характеристик режима, особенностей переноса тепла и частиц, параметров пьедестала.

1.1.4. Режим улучшенного удержания при радиационном охлаждении периферии

Вводные замечания. Режим улучшенного удержания при радиационном охлаждении периферии (RI -мода) впервые был получен в лимитерных разрядах токамака TEXTOR [7]. Благодаря напуску неона на периферию плазмы в условиях ионного нагрева при инжекции пучков быстрых атомов удалось получить режим с фактором улучшения удержания, сравнимым с H -модой. Радиационные потери, связанные с неоном ($P_{rad}/P_{tot} \sim 0,5—0,95$), были локализованы в узком слое вблизи границы плазмы, в центр шнура примесь не проникала. Значительное переизлучение способствовало снижению плотности потока мощности на первую стенку. Изменение плотности плазмы в этом режиме продемонстрировало благоприятную зависимость $\tau_E \sim \bar{n}_e^{1,17}$ [2]. Создание RI -моды не имеет порога по мощности и не приводит к специфической МГД-активности типа ELMs.

Эксперименты с напуском неона, азота или гелия в установке T-10 в режимах омического и электронно-циклотронного нагрева продемонстрировали формирование радиационного слоя на периферии и рост энергосодержания плазмы [27].

Эксперименты, проведённые на EAST [28], показали, что напуск неона в диверторную область в режиме H -моды с ELMs приводит к смягчению граничных локализованных мод — снижению их амплитуды и увеличению частоты. Увеличение напуска неона приводило к переходу в режим без ELMs (ELM-free).

В JET напуск неона в режим H -моды с ELM I типа приводил к заметному улучшению удержания [29]: увеличению H -фактора, росту давления плазмы и увеличению нейтронного выхода по сравнению с исходным режимом и режимом с напуском азота.

Эксперименты по исследованию RI -моды в T-15МД. Задача — при изменении интенсивности напуска неона (количество частиц, напущенных в вакуумную камеру) определить область экспериментальных параметров и условия, позволяющие получить наибольший прирост энергосодержания при отсутствии накопления примесей в центральной плазме.

Конфигурация плазмы:

- рассматриваются 2 типа конфигураций — лимитерная и диверторная;
- в лимитерных режимах проводятся разряды с круглым поперечным сечением плазменного шнура (прямое сравнение с TEXTOR) и с умеренной вытянутостью/треугольностью ($k \sim 1,5$, $\delta \sim 0,3$);
- эксперимент в диверторной плазме проводится при умеренной вытянутости/треугольности ($k \sim 1,5$, $\delta \sim 0,3$). В случае успеха возможны сканы по форме плазменного шнура.

Нагрев плазмы: во всех случаях эксперимент проводится при разном соотношении P_i/P_e . Ионный нагрев обеспечивается высокочастотным методом либо с помощью инъекции нейтральных частиц. Направление инъекции меняется — по и против тока плазмы. Представляется целесообразным провести эксперименты при разном соотношении высокочастотного и инжекционного нагрева в общем вкладе мощности в ионную компоненту.

Макроскопические параметры разряда: при проведении экспериментов снимаются сканы (при фиксированной интенсивности напуска неона) по плотности, току плазмы, величине мощности нагрева, соотношению мощностей нагрева компонент, магнитному полю.

1.1.5. Режимы с внутренним транспортным барьером

Вводные замечания. Экспериментальный опыт показывает, что для формирования внутренних транспортных барьеров (ВТБ), особенно при низкой мощности нагрева и в случаях преобладающего электронного нагрева, необходимым условием является создание оптимальной магнитной конфигурации [30, 31]. Благоприятной является магнитная конфигурация с низким магнитным широм ($s = \frac{r}{q} \frac{dq}{dr} \sim 0$, q —

локальное значение фактора запаса устойчивости, r — текущий радиус магнитной поверхности) вблизи рациональной поверхности. В случаях мощного ионного нагрева это, по-видимому, оказывается обязательным [31].

Создание режима с ВТБ позволяет заметно (на 30% и даже выше) увеличить энергетическое время жизни плазмы по сравнению с исходным режимом.

Поскольку создание ВТБ характеризуется локальным повышением градиента давления плазмы и ростом плазменного β (β — отношение давления плазмы к давлению магнитного поля), то это приводит к росту бутстреп-тока в области барьера. С одной стороны, это благоприятно, поскольку повышает долю неиндукционного тока, снижая нагрузку на внешние источники поддержания тока плазмы. С другой стороны, может приводить к развитию неустойчивостей [32], следовательно, требует развития алгоритмов контроля за положением транспортного барьера и величиной градиента давления.

Поскольку в области транспортного барьера ионный транспорт может снижаться до неоклассического уровня [13], это может приводить к накоплению примесей в разряде. Перенос лёгких и тяжёлых примесей в области ВТБ может меняться по-разному. Следовательно, важными задачами для режимов с внутренним транспортным барьером являются изучение механизмов переноса примеси и разработка методов управления концентрацией примесей в разряде.

Следует также отметить, что при формировании ВТБ в H-моды с ELMs периферийная неустойчивость может затрагивать область внутреннего барьера, приводя к его разрушению [33].

Интерес представляют также разряды с широкой областью слабого шира ($s \sim 0$) в центральной части плазменного шнура, в которых $q(0)/q_{\min} \sim 1$ (q_{\min} — минимальное по профилю значение фактора запаса устойчивости) — так называемые гибридные режимы. Эксперименты на токамаках JET [34] и ASDEX [35] показали, что в таких режимах удаётся получить высокие энергетические характеристики плазмы, существенно превышающие параметры H-моды с традиционным (близким к параболическому) распределением $q(r)$ и монотонно растущим положительным широм. Формирование ВТБ в гибридных режимах не было зарегистрировано, поэтому однозначного понимания природы улучшения удержания в таких режимах нет. Профиль $q(r)$ с $q_{\min} > 1$ позволял избегать развития пилообразных колебаний.

Изменение профиля $q(r)$ с созданием благоприятной магнитной конфигурации может быть обеспечено с помощью мощного нагрева плазмы на стадии нарастания тока разряда или на любой стадии разряда (стадия роста тока или плато тока плазмы) при использовании неиндукционных методов генерации тока. В то же время эффективность генерации тока неиндукционными способами падает при увеличении плотности плазмы. Это создаёт трудности в создании необходимой для формирования ВТБ магнитной конфигурации. Для увеличения плотности плазмы в режиме со сформированным ВТБ может быть использована инъекция пеллет, как это было сделано на токамаке JET [33]. Кроме того, есть экспериментальные свидетельства того, что инъекция пеллет может приводить к формированию ВТБ в режимах с традиционным (близким к параболическому) профилем фактора запаса устойчивости [36].

Эксперименты по исследованию ВТБ в Т-15МД. Задача — изучение физики ВТБ и гибридных режимов, создание эффективных механизмов контроля.

Конфигурация плазмы: эксперименты могут проводиться как в лимитерной, так и в диверторной конфигурации.

Используемые системы активного влияния на плазму: ЭЦР-нагрев/генерация тока, инжекция быстрых атомов, ИЦР-нагрев/генерация тока, генерация тока нижегибридными волнами, инжекция пеллет.

Нагрев плазмы: во всех случаях эксперимент проводится при разном соотношении P_i/P_e . Ионный нагрев обеспечивается высокочастотным методом либо с помощью инжекции нейтральных частиц. Для сравнения проводятся эксперименты с инжекцией по и против тока плазмы. Целесообразно провести эксперименты при разном соотношении высокочастотного и инжекционного нагрева в общем вкладе мощности в ионную компоненту. Изменение магнитного шира в центральной области плазмы обеспечивается с помощью методов неиндукционной генерации тока и включения дополнительного нагрева/генерации тока на разных стадиях разряда, в том числе на стадии формирования плазменного шнура и нарастания тока плазмы.

Макроскопические параметры разряда: при проведении экспериментов снимаются зависимости по плотности, току плазмы, величине мощности нагрева, соотношению мощностей нагрева компонент, вносимому тороидальному вращению, магнитному полю, положению вкладываемой мощности и распределению тока, генерируемого неиндукционным способом, и пр.

Экспериментальные задачи:

- получение ВТБ при разных методах нагрева плазмы — определение критической магнитной конфигурации для получения ВТБ при разных методах нагрева;
- определение роли магнитного шира в процессе создания ВТБ при различном соотношении P_i/P_e ;
- определение роли q_{\min} в формировании, устойчивости и характеристиках режима с ВТБ;
- исследование гибридных режимов: анализ причин улучшения удержания, зависимость глобальных характеристик удержания от q_{\min} ;
- определение факторов, влияющих на прирост градиента давления (температуры и/или плотности) плазмы в режиме с ВТБ, — зависимость от положения и формы барьера (параболический барьер, box-type [37]), величины магнитного шира, P_i/P_e , плотности плазмы (при неизменной магнитной конфигурации);
- особенности режимов (устойчивость, удержание, характер переносов, взаимодействие с периферией) с экстремально высоким обратным широм в центре плазменного шнура, режимы с $I_p \sim 0$ в центральной зоне как предельный случай режимов с отрицательным широм;
- определение связи положения ВТБ с положением рациональной поверхности;
- изучение особенностей МГД-активности в плазме с ВТБ и положения магнитных островов относительно положения барьера (см. [38]);
- изучение переноса тепла и частиц, включая примеси, разработка алгоритмов управления концентрацией примесей в режиме с ВТБ без потери энергосодержания;
- поиск режима с одновременным существованием внутреннего и внешнего транспортного барьера с высоким значением H-фактора;
- увеличение плотности плазмы в режиме с ВТБ с помощью инжекции пеллет.

1.1.6. Режимы с отрицательной треугольностью

Вводные замечания. В работе [39] было показано, что существующая электромагнитная система установки Т-15МД позволяет получать разряды с отрицательной треугольностью. Для подготовки эксперимента необходимо с помощью имеющихся компьютерных кодов провести расчёты сценариев получения устойчивых магнитных конфигураций с отрицательной треугольностью в Т-15МД и получить расчётную рабочую область режимов с $\delta < 0$. Поскольку в качестве кандидатного механизма, объясняющего переход в режим улучшенного удержания при отрицательной треугольности, рассматриваются неустойчивости на запертых частицах [10], необходимо проанализировать возможность получения конфигурации с отрицательной треугольностью в плазме с увеличенным аспектным отношением (за счёт уменьшения малого радиуса). Это позволит экспериментально оценить возможную роль запертых частиц.

Эксперименты по исследованию удержания в режимах с отрицательной треугольностью. Задача состоит в экспериментальном определении рабочей области Т-15МД в конфигурации с $\delta < 0$ и определении области наилучшего удержания по δ .

Конфигурация плазмы: эксперименты могут проводиться в лимитерной и в диверторной конфигурации.

Нагрев плазмы: используются все доступные системы нагрева и генерации неиндукционного тока.

Экспериментальные задачи:

- определение рабочего диапазона установки по δ при различных A ;
- определение зависимости удержания (энергосодержания, времени жизни) от мощности при двух значениях аспектного отношения (низкое $A \sim 2,2$ и высокое $A \sim 4$) и двух значениях треугольности (минимально возможная и в середине рабочей области) для каждого аспектного отношения. Сравнение с аналогичными разрядами с положительной треугольностью;
- получение Н-моды в режиме с $\delta < 0$, определение величины пороговой мощности и характеристик Н-моды (определение качественных и количественных отличий от аналогичных режимов с $\delta > 0$);
- при двух значениях A сравнение зависимости характеристик удержания от P_e/P_i .

1.1.7. АТ-режим — прообраз режима работы будущего реактора

Согласно [40] усовершенствованный режим работы токамака (Advanced Tokamak regime — АТ-режим) включает улучшенные характеристики удержания (высокий Н-фактор, который может существенно превышать предсказания скейлинга Н-моды), высокое β , близкое к операционным пределам, высокую долю бутстреп-тока при полностью неиндукционном поддержании тока.

Ключевыми условиями создания и поддержания стационарного АТ-режима являются контроль эволюции профилей тока и давления в токамаке с целью обеспечения магнитогидродинамической устойчивости и поддержания высоких характеристик удержания и оптимизация работы дивертора для снижения теплового потока на диверторные пластины и обеспечения контроля плотности основной плазмы и примесей [40].

Одним из условий создания АТ-режима является оптимизация формы сечения плазмы [40, 41] с высокими значениями вытянутости и треугольности.

Таким образом, задача создания АТ-режима объединяет результаты исследований режимов улучшенного удержания, устойчивости плазмы, взаимодействия плазмы со стенкой и методов поддержания неиндукционного тока плазмы. Поскольку параметры плазмы близки к операционным пределам, важную роль играет разработка алгоритмов управления параметрами разряда в режиме реального времени.

Эксперименты по созданию АТ-режимов в Т-15МД предполагают получение режима с высокими характеристиками удержания и высокой долей неиндукционного тока (вплоть до 100%) вблизи предела по β_N ($\beta_N = \beta a B / I_p$, β — отношение газокINETического давления плазмы к давлению магнитного поля).

Эксперименты могут проводиться во всём доступном (с точки зрения системы управления) разнообразии магнитных конфигураций и вариаций формы поперечного сечения плазменного шнура. Следует рассмотреть возможность проведения экспериментов в режимах с отрицательной треугольностью, а также при разных аспектных отношениях: $R/a \sim 2,2$ (проектное значение для Т-15МД) и $R/a \sim 3,2$ (значения, выбранные для ИТЭР и ДЕМО-ТИН).

Будут использованы все доступные системы нагрева и генерации неиндукционного тока. Доля мощности, включённая в алгоритмы контроля МГД-устойчивости, и доля мощности, задействованная в поддержании полного тока плазмы, определяются экспериментально.

1.2. ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ С ВЫСОКОЙ ДОЛЕЙ НЕИНДУКЦИОННОГО ТОКА. ПОЛУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВЫХ РЕЖИМОВ С ВЫСОКИМИ БЕТА

В этом разделе рассматриваются экспериментальные исследования, направленные на получение устойчивых режимов с полностью неиндукционным поддержанием тока. Конкретные планы экспериментов будут разрабатываться и уточняться по мере развития комплексов дополнительного нагрева, технических систем установки, приобретения опыта работы в различных операционных режимах на ней, совершенствования расчётных кодов.

В случае «традиционного» подхода к работе токамака нередко рассматриваются сценарии с высоким энергетическим выходом, в которых используются индукционное возбуждение и поддержание тока. Это приводит к ограничениям разряда по длительности и периодичности, определяемым преимущественно конструкцией центрального соленоида. Так, например, такие операционные сценарии, как стандартная Н-мода, способны обеспечить требуемый энергетический выход в условиях высокого энергетического удержания, но при этом могут быть ограничены по длительности из-за индукционной составляющей тока. Для коммерческого термоядерного реактора, однако, гораздо более выгодным является сценарий непрерывного плазменного разряда. Для обеспечения этого разрядный ток в токамаке должен полностью поддерживаться неиндукционными способами.

Для того чтобы проанализировать/определить, какие параметры плазмы критичны для получения режимов с полностью неиндукционным поддержанием тока, рассмотрим следующий формализм ([42]).

Коэффициент воспроизводства энергии

$$Q = \frac{P_{\text{fus}}}{P_{\text{aux}}} \sim \langle p \rangle \tau \sim nT\tau, \quad (1.2.1)$$

где P_{fus} — мощность, выделяемая в результате реакций синтеза; P_{aux} — мощность внешних источников, вводимая в плазму; $\langle p \rangle$ — усреднённое по объёму давление; τ — глобальное энергетическое время жизни; $nT\tau$ — «тройное произведение».

Дополнительная мощность необходима для компенсации потерь энергии за счёт транспорта и излучения — P_{H} и для поддержания неиндукционного тока — P_{CD} . Таким образом, $P_{\text{aux}} = P_{\text{H}} + P_{\text{CD}}$.

Следует отметить, что могут быть достигнуты условия (достаточно хорошее удержание, высокое Q), когда для компенсации энергетических потерь уже не требуется вводить дополнительную мощность, кроме той, которая необходима для поддержания неиндукционного тока:

$$Q = \frac{P_{\text{fus}}}{P_{\text{CD}}}. \quad (1.2.2)$$

В терминах безразмерного параметра β (отношение газокINETического давления к давлению магнитного поля)

$$\langle p \rangle \tau \sim \beta_{\text{N}} \frac{IB_{\text{T}}}{a} H\tau_{\text{scaling}}, \quad (1.2.3)$$

где β_{N} — β , нормированная на I/aB_{T} , определяющая близость параметров плазмы к идеальным МГД-пределам:

$$\beta_{\text{N}} = \frac{100\beta_{\text{T}}(\%) }{\frac{I}{aB_{\text{T}}}} = 100 \frac{2\mu_0 \langle p \rangle}{B_{\text{T}}^2 \frac{I}{aB_{\text{T}}}}; \quad (1.2.4)$$

$\beta_{\text{T}} = 2\mu_0 \langle p \rangle / B_{\text{T}}^2$, $\beta_{\text{p}} = 2\mu_0 \langle p \rangle / B_{\text{p}}^2$ — отношение газокINETического давления соответственно к тороидальному или полоидальному магнитному полю, $H = \tau / \tau_{\text{scaling}}$.

В условиях полностью неиндукционного тока $f_{\text{bs}} + f_{\text{CD}} = 1$, где f_{bs} — доля неоклассического бутстреп-тока в полном токе плазмы, f_{CD} — доля тока, генерируемого внешними источниками:

$$f_{\text{bs}} \sim \beta_{\text{p}} \sim C_{\text{bs}} \beta_{\text{N}} q_{95}. \quad (1.2.5)$$

Эффективность генерации тока в схемах, где частицы, переносящие ток, распределены вблизи тепловых скоростей:

$$\zeta \sim \frac{n_{\text{e}} I_{\text{CD}} R}{P_{\text{CD}} T}. \quad (1.2.6)$$

Тогда долю генерируемого тока можно записать в виде

$$f_{\text{CD}} \sim \zeta \frac{P_{\text{CD}} T}{n_{\text{e}} I R} \sim C_{\text{CD}} \frac{P_{\text{CD}} \beta_{\text{N}} B_{\text{T}}}{n_{\text{e}}^2}. \quad (1.2.7)$$

Из уравнения баланса токов $1 - f_{bs} - f_{CD} = 0$:

$$P_{CD} = (1 - C_{bs}\beta_N) \frac{n_e^2}{C_{CD}\beta_N B_T}. \quad (1.2.8)$$

Отсюда

$$Q \sim \frac{P_{fus}}{P_{CD}} \sim \frac{\beta_N^3 B_T^3 I^2}{n_e^2} \frac{C_{CD}}{1 - C_{bs}\beta_N q_{95}}. \quad (1.2.9)$$

Таким образом, наиболее критическую роль играет давление плазмы, представленное параметром β_N . Рост β определяет увеличение доли бутстреп-тока и, следовательно, уменьшение необходимой доли f_{CD} . Увеличение β_N способствует как обеспечению неиндукционного поддержания тока, так и росту энергетического выхода.

Таким образом, одной из основных задач экспериментов по созданию квазистационарной плазмы являются получение и исследование устойчивых режимов с возможно большими β_N в условиях доступного тороидального поля.

Другим важным параметром является q_{95} . Увеличение q_{95} способствует росту f_{bs} , снижая мощность, необходимую для нагрева плазмы и генерации тока. Однако высокие q_{95} приводят к снижению энергетического выхода из-за низких значений тока плазмы. С другой стороны, неустойчивость срыва носит более жёсткий характер при низких q_{95} (высоких значениях тока плазмы). Вероятность срыва тока в токамаке, как правило, падает с ростом q_{95} .

Таким образом, выбор оптимального q_{95} в различных условиях является отдельной задачей и требует учёта множества факторов.

Ещё одним значимым фактором является плотность плазмы. Низкая плотность, как правило, является фактором, способствующим росту доли тока, генерируемого внешними источниками — f_{CD} . С другой стороны, увеличенные градиенты плотности при высокой плотности способствуют росту бутстреп-тока. Кроме того, управление плотностью и её профилем требует оптимизации работы дивертора.

Фактор H ($\tau = H\tau_{scaling}$), характеризующий качество энергетического удержания, не входит в выражение (1.2.9), определяющее величину выхода Q в условиях полного замещения разрядного тока, что следует из (1.2.2). Иначе говоря, в условиях полностью неиндукционного тока существует верхний предел для энергетического удержания, ниже которого оно ещё определяет величину Q . Тем не менее роль транспортных процессов велика, так как они определяют профиль бутстреп-тока в токамаке. Кроме того, они важны в условиях, когда дополнительная мощность ещё необходима для компенсации потерь энергии ($P_H \neq 0$).

Рассмотрим, какие операционные режимы являются перспективными для реализации сценария с полностью неиндукционным поддержанием тока в токамаке-реакторе. В настоящее время экспериментальные сценарии с полностью неиндукционным поддержанием тока были реализованы в многочисленных экспериментах на целом ряде установок. Условно их можно разделить на следующие категории — так, как рассмотрено в п. 1.2.1—1.2.4.

1.2.1. Режимы с сильным отрицательным магнитным широм (высоким β_p)

Улучшенное удержание энергии и частиц характерно для таких режимов. Это объясняется формированием сильных транспортных барьеров (что связывается с сильным обратным широм) во внутренних областях плазменного шнура. Следствием этого является рост доли бутстреп-тока, который генерируется преимущественно в районе транспортного барьера. При этом профиль полного тока широкий. Рациональные поверхности низших порядков отсутствуют в таких режимах в условиях высоких q_{min} , что предотвращает развитие крупномасштабных тиринг-мод. В ряде случаев формируется конфигурация с нулевым током в центре плазменного шнура. Отметим, что при высоких β_p и, следовательно, высоких q_{95} снижается вероятность срыва тока. В экспериментах на установке ДШ-Д величина q_{min} обычно находится в диапазоне $q_{min} = 2—5$, в то время как $q_{95} = 10—12$, $f_{bs} \approx 0,7$ [43]. На установке JT-60U были получены режимы, в которых доля бутстреп-тока превышала 80%, $q_{min} \approx 4$, $q_{95} \approx 8$ [44].

1.2.2. Режимы с низким магнитным широм и высоким q_{\min}

Такие сценарии можно разделить на два типа: 1) режимы со слабоотрицательным магнитным широм, в которых используется нецентральная генерация тока; 2) режимы с низким магнитным широм, такие как режим с высоким β_p на установке JT-60U [45]. В сценариях с высоким q_{\min} на установке DIII-D эта величина обычно находится в диапазоне 1,4—2,3, в то время как q_{95} — в диапазоне 5—7 [46, 47]. В таких режимах также формируются широкие профили тока плазмы, но несколько менее широкие, чем в режимах с сильным отрицательным магнитным широм. Доля бутстреп-тока не превышает, как правило, 65%. Низкий магнитный шир обеспечивает уменьшение турбулентного транспорта в центре плазменного шнура. Такие режимы характеризуются широкими профилями давления. Плазма с $\beta_N = 3,7—4$ оказывается вблизи границы устойчивости винтовой моды с $n = 1$ (из-за недостаточно широких профилей давления и тока), и в ряде случаев необходимо использование активного контроля (Resistive wall modes — RWM).

1.2.3. Гибридный режим с высоким β

Гибридный сценарий — это режим H-моды с q_{\min} в районе (или чуть выше) единицы с улучшенными энергетическим удержанием и устойчивостью относительно обычной H-моды. Отсутствие пилообразных колебаний в режиме с таким профилем q препятствует дестабилизации неоклассических тиринг-мод 3/2 и 2/1. Гибридный сценарий с токами, меньшими, чем базовый гибридный сценарий ITER, имеет перспективы в качестве квазистационарного режима с высоким β . Оптимизация гибридного сценария на ряде установок (JT60U [45], AUG [48, 49], DIII-D [50, 51]) позволила получить устойчивые режимы с удержанием, значительно улучшенным относительно стандартной H-моды при высоких $\beta_N = 2,5—3,5$. Примерно половину полного тока в таких режимах составляет бутстреп-ток.

1.2.4. Режимы с высоким I_i

Сильное пикирование тока плазмы (с $q_{\min} \approx 1$ и $I_i \approx 1$) характерно для режимов с высоким значением внутренней индуктивности I_i [52]. Преимуществом таких режимов является то, что плазма оказывается устойчивой при $\beta_N = 4—5$ относительно идеальных мод с низкими n даже в условиях отсутствия проводящей стенки. Кроме того, плазма оказывается устойчивой относительно идеальных баллонных мод. В таких режимах, однако, может наблюдаться деградация удержания из-за дестабилизации резистивных тиринг-мод (например, 2/1). Высокое энергетическое удержание обусловлено, главным образом, более высоким полоидальным полем во внутренней области плазменного шнура и сильным положительным магнитным широм в районе внешней половины малого радиуса. Необходимость поддерживать высокое I_i накладывает ограничения на долю бутстреп-тока. Таким образом, около половины от полного тока должно быть сгенерировано вблизи оси плазменного шнура при помощи внешних источников. Преимуществом такого режима является возможность достигать высоких β_N в условиях отсутствия угрозы дестабилизации RWM, что вместе с высоким энергетическим удержанием делает его привлекательным с точки зрения стационарного сценария.

В рассмотренных режимах для обеспечения замещения тока плазмы необходимо получение устойчивых разрядов с высокими β_N . Плазма гибридного сценария обычно находится вблизи идеального предела по β , в то время как в случае режима с высокими q_{\min} и в режимах с высокими β_p идеальный предел оказывается значительно превышен. Таким образом, в этих режимах требуется наличие проводящей стенки вблизи границы плазмы для того, чтобы обеспечить устойчивость при высоких β_N . Только лишь в режимах с высоким I_i удаётся достигать высоких β_N без эффекта стабилизации стенкой. Согласно теоретическим предсказаниям получение плазмы с высокой вытянутостью/треугольностью является благоприятным фактором для режимов с высокими β . Величина β при фиксированном q_{95} увеличивается с высокой вытянутостью/треугольностью. Кроме того, предел по β_N в приближении идеальной стенки также увеличивается. Увеличение предела по β_N в приближении идеальной стенки также характерно для широких профилей давления.

Предел Тройона определяется пороговыми β для дестабилизации идеальных винтовых мод. В условиях проводящей стенки с конечной проводимостью инкремент нарастания винтовой моды значительно

уменьшается и неустойчивость развивается с характерными временами проникновения магнитного потока в элементы камеры токамака. Такая мода называется модой резистивной стенки (RWM). Такая неустойчивость может быть стабилизирована вращением со скоростью, составляющей несколько процентов от альфвеновской скорости. Требуемая скорость вращения может быть обеспечена за счёт привнесения момента тороидального вращения при инъекции быстрых атомов. Наличие рассеянных магнитных полей может приводить к замедлению вращения. Отсюда возникает задача их компенсации за счёт корректирующих обмоток. Для контроля RWM применяются также системы обратных связей с использованием магнитных обмоток. В экспериментах с высокими β наилучший результат даёт комбинация стабилизации RWM за счёт вращения и при помощи системы обратных связей. Таким образом, для решения задачи получения плазмы с высокими β на установке T-15МД может потребоваться оборудование магнитных обмоток для системы обратной связи, а также для компенсации рассеянных магнитных полей. Отметим также необходимость контроля неклассических тиринг-мод в условиях высоких β , которая рассматривается в других разделах.

Рассмотрим масштаб характерных времён для режимов T-15МД с мощным дополнительным нагревом, ориентированных на неиндукционное поддержание тока. Времена развития МГД-неустойчивостей ~ 100 мкс, энергетическое время жизни ~ 100 мс, «скиновое» время может достигать нескольких секунд. Исследовать устойчивость магнитных конфигураций относительно высоких β можно на временах, значительно меньших, чем «скиновые» времена. В случае, если конфигурация оказывается устойчивой, можно проводить исследования транспортных процессов во взаимосвязи с устойчивостью соответствующих профилей параметров во времени. Следующей задачей является обеспечение необходимой генерации тока для постоянного поддержания конфигурации, для чего необходимы длительности порядка резистивных. Наибольшие времена необходимы для исследования некоторых процессов взаимодействия плазмы со стенкой. Эти времена могут достигать сотен секунд. Отметим, что длительность плато тока на установке T-15МД в зависимости от параметров разряда может достигать нескольких десятков секунд [53]. Возможности магнитной системы установки накладывают ограничения, в основном, лишь на исследование процессов взаимодействия плазмы со стенкой на временных масштабах нескольких сотен секунд. Отметим, что важнейшую роль в получении стационарной плазмы с полностью неиндукционным поддержанием тока играет совместимость требуемых характеристик внутренних областей плазмы с особенностями работы дивертора и взаимодействия плазма—стенка на больших временных масштабах.

Следует отметить, что особенно важно проводить исследование режимов с полностью неиндукционным током в условиях реакторных параметров, а именно столкновительности, отношении электронной к ионной температуре, вращении, фракции высокоэнергетичных частиц, что будет определять структуру, величину и каналы турбулентного транспорта, а также пороги и особенности развития МГД-неустойчивостей.

Таким образом, описаны типы режимов, которые рассматриваются как режимы-кандидаты для получения квазистационарной плазмы с реакторными параметрами. Именно в этих классах режимов представляет интерес широкий спектр физических исследований, направленных на создание стационарного токамака-реактора. В дальнейшем при подготовке планов работы установки стоит задача моделирования различных типов операционных режимов, перспективных для получения квазистационарных разрядов с полностью неиндукционным поддержанием тока в условиях T-15МД. Детали сценариев получения таких режимов в условиях T-15МД будут зависеть от множества факторов: параметров и особенностей комплексов дополнительного нагрева, которые будут созданы на установке T-15МД, возможностей и особенностей работы различных технических систем установки, реализации технических решений по обеспечению взаимодействия плазмы с поверхностью, создания систем контроля МГД-неустойчивостей. Первые результаты работ по моделированию таких режимов на установке T-15МД приведены в работах [53, 54]. Большой интерес представляет не только изучение способов получения, контроля обеспечения устойчивости плазмы с неиндукционным поддержанием тока, но и проведение исследований в различных областях физики токамака именно в режимах, перспективных для стационарного токамака-реактора. Особое значение имеют исследования механизмов переноса и особенностей поведения турбулентности, физики магнитогидродинамических неустойчивостей, физики дивертора, взаимодействия плазмы с поверхностью, физики нагрева и генерации тока с помощью различных систем, физики высокоэнергетичных частиц. Проведение широкого спектра физических исследований в таких режимах не только представляет

наибольший интерес, но и является наиболее сложной задачей с технической, организационной, физической точек зрения.

1.3. ПОЛУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВЫХ РЕЖИМОВ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ПЛАЗМЫ

Получение устойчивых разрядов с максимальной плотностью является важной задачей для реакторного режима, так как позволяет увеличить выход термоядерной реакции и нейтронный выход (см. (1.4), (1.5)). Однако достижимые плотности ограничиваются развитием неустойчивости срыва. Следовательно, получение таких режимов должно включать изучение физических механизмов срыва и развитие методов получения устойчивых режимов с максимальной плотностью при сохранении улучшенного удержания.

Исследования физических механизмов развития неустойчивости срыва при критической плотности ведутся широким фронтом на многих токамаках. В настоящее время понятно, что причиной срыва при критической плотности с умеренными значениями предела по винтовой неустойчивости является охлаждение периферии с дестабилизацией низших МГД-мод. Механизм радиационного охлаждения периферии вполне понятен в случае плазмы со значительным уровнем примесей. Однако в случае чистой водородной плазмы излучение водорода не может охладить периферию, тем не менее срывы происходят. Так, на токамаке T-10 в чистой плазме потери с излучением даже на литии составляли не более 45 кВт в омическом режиме с мощностью нагрева 250 кВт. Для чистой водородной плазмы потерями с излучением можно пренебречь. Потери с перезарядившимися нейтралами оцениваются в 15 кВт, что тоже мало. Поэтому механизм охлаждения периферии может включать развитие специфической неустойчивости на периферии, которая значительно увеличивает коэффициенты переноса на периферии. Исследования срывов по критической плотности в чистой плазме предлагается проводить с введёнными в SOL литиевыми капиллярными структурами. На T-10 показано, что в этом варианте удается получить плазму с $z_{\text{eff}} = 1$. При этом увеличение переноса можно оценивать по балансу мощности при измеренных профилях температур и плотности. Наблюдение развития неустойчивостей — по флуктуациям плотности по ленгмюровским зондам, рефлектометрии, пучку тяжёлых ионов и диагностике тангенциального наблюдения свечения водорода при диагностическом напуске рабочего газа.

Наряду с изучением физики срыва необходимо проводить эксперименты по получению разрядов с максимальной плотностью.

В работе [55] показано, что рост плотности плазмы может приводить к ряду неблагоприятных эффектов, которые ведут к ухудшению удержания плазмы и последующему срыву: MARFE, отрыв диверторной зоны (divertor detachment), ухудшение удержания в H-моде, изменение характера ELMs, H—L-переход, полоидальная отслойка (poloidal detachment) и, наконец, развитие МГД-неустойчивости и срыв.

На установках JET, ASDEX и JT-60U [56, 57, 58] было показано, что с ростом плотности в режимах H-моды наблюдается ухудшение удержания плазмы в диапазоне плотностей от $0,6n_{\text{GW}}$ до $\bar{n}_{\text{lim}} \sim n_{\text{GW}}$ (n_{GW} — плотность Гринвальда [16]). Это связывается с ухудшением удержания в области пьедестала. Увеличение треугольности плазмы позволяло восстановить значение H-фактора и вернуться от деградации удержания с плотностью к $H(n_e) = \text{const}$ вплоть до \bar{n}_{lim} .

На установке DIII-D было показано, что удержание плазмы при высоких плотностях зависит от формы профиля плотности: более пикированный профиль (при том же значении средней плотности) приводит к более высоким значениям энергосодержания плазмы [59]. Для получения пикированных профилей плотности используется подпитка плазмы с помощью инъекции пеллет. В экспериментах T-10 также были получены более высокие показатели удержания при инъекции пеллет в плазму с низким $q(a)$ по сравнению с теми же режимами с газонапуском [34].

На установке JET при инъекции пеллет удавалось существенно увеличить плотность в области внутри транспортного барьера [60].

Исследования режимов с высокой плотностью и высокими характеристиками удержания должны проводиться при варьировании мощности дополнительного нагрева плазмы в ионной и электронной компонентах. Подпитка плазмы рабочим газом должна осуществляться с помощью газонапуска, сверхзвуковой молекулярной инъекцией (SMBI — supersonic molecular beam injection), и инъекцией водородных

пеллет. Должны быть исследованы режимы как с положительной, так и с отрицательной треугольностью. Особое внимание должно быть уделено устойчивости разряда при сохранении улучшенного удержания. Для обеспечения работы вблизи предельной плотности необходимо разработать систему подпитки плазмы рабочим газом с обратной связью по датчикам МГД-активности, не допускающей переход разряда в срыв.

1.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ — ИСТОЧНИКА ТЕРМОЯДЕРНЫХ НЕЙТРОНОВ ГИБРИДНОГО РЕАКТОРА

Одним и наиболее актуальным в настоящее время направлением работ в области управляемого термоядерного синтеза в Российской Федерации являются разработка и создание источников термоядерных нейтронов (ТИН) будущих гибридных реакторов на основе токамаков для решения задач атомной энергетики: производство ядерного топлива (^{233}U при облучении нейтронами ^{232}Th или ^{239}Pu из ^{238}U) для тепловых атомных реакторов [61].

В основе концепции ТИН лежит генерация нейтронного потока при взаимодействии пучков быстрых атомов (ионов) с энергией десятки—сотни кэВ и токами в десятки ампер, создаваемых инжекторами и ионами плазмы токамака. Каждый такой быстрый атом, попадая в плазму, ионизируется, и образовавшийся при этом ион, постепенно замедляясь, отдаёт энергию электронам и ионам плазмы. В горячей плазме быстрые ионы образуют ещё более горячую компоненту. В такой двухкомпонентной плазме ядерные реакции идут более интенсивно, так что требование на время удержания плазмы заметно снижается. Наибольшая отдача от такого взаимодействия при инжекции атомов дейтерия (дейтронов) с мощностью в десятки мегаватт в дейтерий-третиевую плазму. В реакторных режимах плотность быстрых инжектированных моноэнергетических дейтронов может составлять $n_i > 0,1n_i$, где n_i — плотность дейтерий-третиевой основной плазмы. Энергия, заключённая в инжектируемых дейтронах, сравнима или больше энергии «тёплой» плазмы, и поэтому плазма в энергетическом смысле становится двухкомпонентной. Величина $n\tau_E$ может быть уменьшена до значения $1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}$ вместо $2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}$, необходимого для синтеза гелия в максвелловской дейтерий-третиевой плазме [62]. Уменьшение $n\tau_E$ связано с общим уменьшением энергетических затрат на получение реакций синтеза в схеме «пучок—плазма», т.е. выделенная в реакции синтеза энергия будет больше энергии, вкладываемой в создание пучка быстрых атомов. С ростом температуры электронов и энергии пучков время существования в плазме быстрых дейтронов будет расти, что приведёт к получению интенсивной D—T-реакции инжектированного пучка (D) на относительно холодных ионах (T) основной плазмы.

При больших энергиях дейтроны пучка тормозятся в основном на электронах плазмы и интенсивность D—T-реакции будет расти при увеличении температуры электронов. Процесс передачи энергии инжектированного пучка (E_{cr}) электронам или ионам плазмы определяется как энергией пучка E_{cr} , так и электронной температурой основной плазмы [63]:

$$E_{\text{cr}} = \left(\frac{3\sqrt{\pi}}{4} \right)^{2/3} \left(\frac{m_i}{m_e} \right)^{1/3} \frac{m_b}{m_i} T_e. \quad (1.4.1)$$

При инжекции протонного пучка (m_b) в водородную плазму (m_i) это равенство можно записать как

$$E_{\text{cr}} = 14,8T_e, \quad (1.4.2)$$

где E_{cr} — энергия пучка, кэВ; T_e — температура электронов, кэВ. При энергии пучков протонов 60 кэВ передача энергии ионам основной плазмы происходит при температуре электронов более 4 кэВ. В двухкомпонентном режиме $T_e < T_i$.

Эксперименты по исследованию двухкомпонентной плазмы проводились на токамаке TFTR при проведении экспериментов с тритием [64] и в наши дни на токамаках Глобус-М2 [65] и ST-40 [66].

В токамаке Глобус-М2 пучок атомов дейтерия с энергией 30 кэВ и мощностью 0,7 МВт инжектировался в дейтериевую плазму. Отрыв ионной температуры от электронной происходил при росте мощности инжекции и плотности плазмы до $(4—5)10^{19} \text{ м}^{-3}$. Однако при больших плотностях это превышение практически исчезало. Интересно было бы проследить динамику отрыва T_i от T_e с ростом мощности нагрева при больших значениях плотности.

На токамаке ST-40 в режимах с инжекционным нагревом наблюдался четырёхкратный отрыв ионной температуры от электронной при плотности плазмы $4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Ионная температура плазмы достигла величины 8 кэВ.

В токамаке T-15МД инжекция быстрых атомов водорода будет осуществляться тремя инжекторами, каждый из которых имеет по два ионных источника. Суммарная мощность инжектированных в токамак стационарных пучков быстрых атомов составит 6 МВт при энергии до 60 кэВ. Начало экспериментов с системой инжекционного нагрева — 2025—2026 гг.

Нагрев электронной компоненты будет осуществляться системой СВЧ-нагрева плазмы, состоящей из пяти гиротронов (на конец 2025 г.), генерирующих СВЧ-излучение на частотах $f = 82,6$ и 105 ГГц с суммарной вводимой в плазму мощностью 5 МВт и длительностью 30 с.

Таким образом, длительность совместной работы систем инжекционного и СВЧ-нагрева будет ограничена временем 30 с. В работе [67] проведены расчёты допустимой длительности разряда T-15МД, исходя из возможности электромагнитной системы установки (из оценки перегрева катушек) и при условии полностью неиндукционного поддержания тока. Расчёты показали, что в этих условиях и при $I_p = 1$ МА, $B_T = 1$ Тл электромагнитная система установки позволяет обеспечить длительность импульса токамака ~ 20 с и ~ 40 с при $I_p = 0,7$ МА, $B_T = 0,7$ Тл.

В экспериментах с инжекцией быстрых частиц в плазму токамака важное значение имеют как поглощение мощности в плазме при её нагреве, так и величина мощности, попадающей на стенку вакуумной камеры. Особое значение это имеет при длительности разрядов в десятки—сотни секунд, когда необходимо будет как адаптировать сценарии разрядов, так и предпринимать технические решения по защите стенки камеры. С помощью ВТР-кода [68] проведены расчёты мощности и профиля энерговыделения на стенке камеры T-15МД в результате пролёта через плазму «насквозь» части инжектированного пучка быстрых атомов водорода при различных энергиях атомов (рис. 1.4.1—1.4.5).

Результаты проведённых расчётов показали, что для плазмы T-15МД инжекция нейтрального пучка с номинальной энергией 60 кэВ и мощностью 2 МВт при ограничении максимальной нагрузки на стенку камеры $0,2 \text{ МВт/м}^2$ (см. [69]) допустима только при плотности плазмы на оси шнура выше $(3—4)10^{19} \text{ м}^{-3}$. В любом случае в месте выхода пучка на стенку камеры необходимо устанавливать либо три отдельных защитных экрана с графитовыми плитками, конструкция которых должна охлаждаться водой, либо полностью закрывать стенку камеры охлаждаемым защитным покрытием.

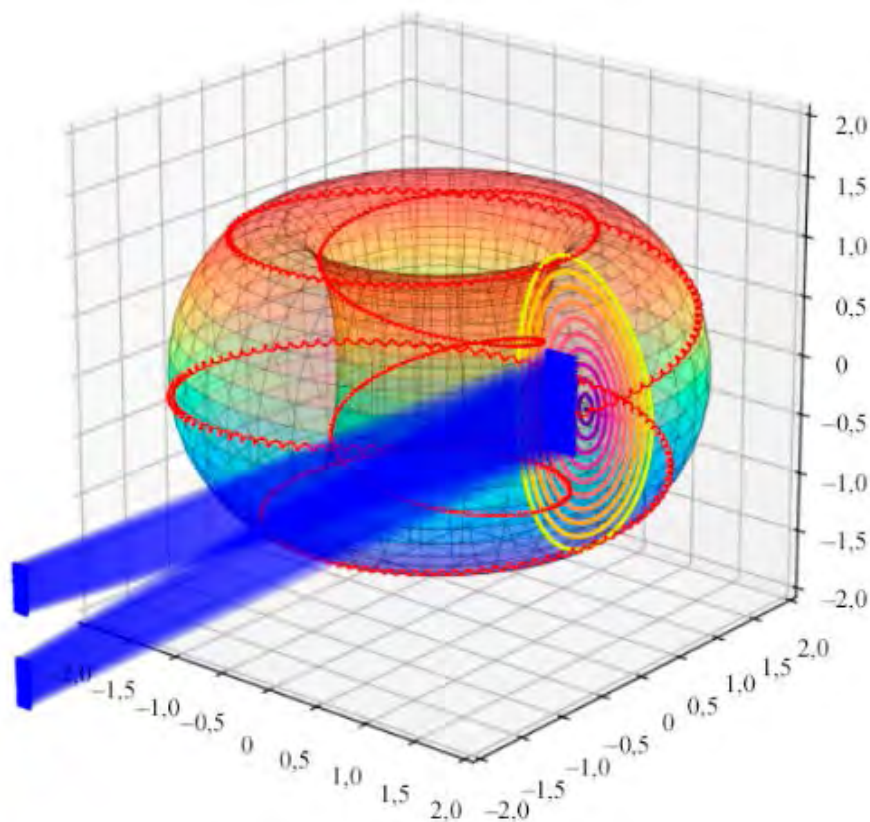


Рис. 1.4.1. Схема инжекции высокоэнергичных пучков в плазму токамака T-15МД от одного инжектора. Красной линией показана условная траектория быстрого иона для достаточно малой поперечной скорости и малого ларморовского радиуса частицы. Синим показаны пучки от каждого ионного источника, входящего в состав инжектора (подробнее о системе инжекции пучком быстрых атомов T-15МД см. раздел 5)

Обобщая представленные расчётные и экспериментальные данные, можно видеть, что в случае экспериментов на Т-15МД более эффективный нагрев ионной компоненты при инжекционном нагреве будет происходить при плотности плазмы $n_e > (3-4)10^{19} \text{ м}^{-3}$, температуре электронов более 3—4 кэВ и при энергии пучков 40—60 кэВ. При проведении исследований необходимо обратить внимание на удержание быстрых ионов (с целью уменьшения их потерь) магнитным полем, на функцию распределения ионов при торможении пучка в плазме, на рост концентрации плазмы при инжекции (на непревышение пороговых значений). Эксперименты на токамаке Т-15МД должны верифицировать расчётные данные, обобщить результаты, полученные на различных установках, с целью создания базы данных для разработки проекта термоядерного источника нейтронов гибридного реактора.

При планировании исследований двухкомпонентной плазмы необходимо учитывать, что одна и та же инжектированная мощность:

- участвует в генерации нейтронов при взаимодействии пучок—плазма;
- поддерживает энергобаланс;
- создаёт и поддерживает ток плазмы.

При этом требуемые параметры плазмы могут отличаться между собой, что заставит искать оптимальные режимы с учётом этих обстоятельств.

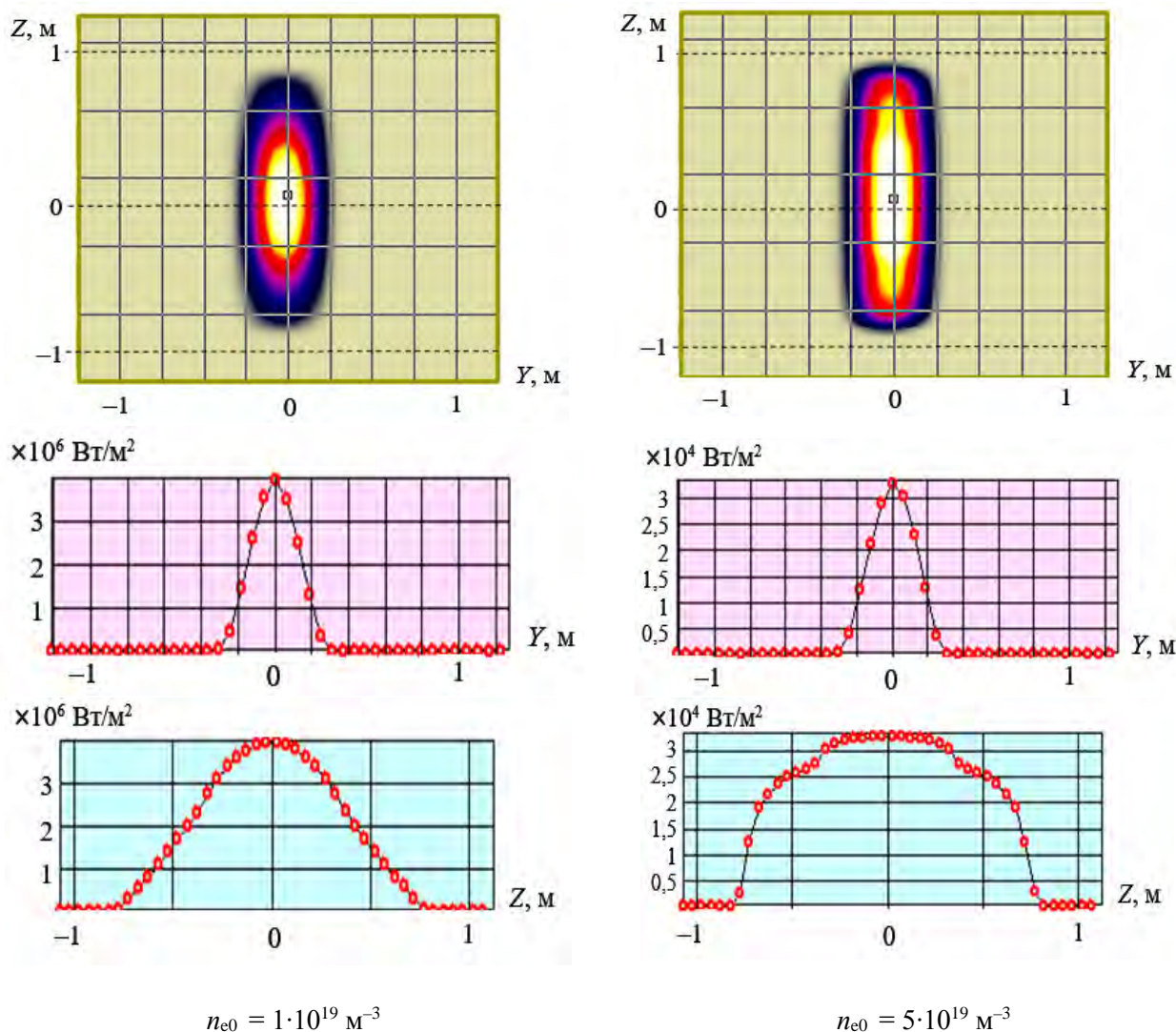


Рис. 1.4.2. Распределение плотности мощности на стенке камеры в зависимости от плотности на оси плазмы при параболическом профиле плотности: энергия ионов $E_b = 50$ кэВ; ток ионов из источника $I_{IS} = 90$ А; мощность инжекции в плазму $P_{inj} = 2,25$ МВт (эффективность нейтрализации 53%); Y и Z — горизонтальная и вертикальная координаты приёмной поверхности; размер сечения пучка на входе в плазму $0,3 \times 0,8 \text{ м}^2$

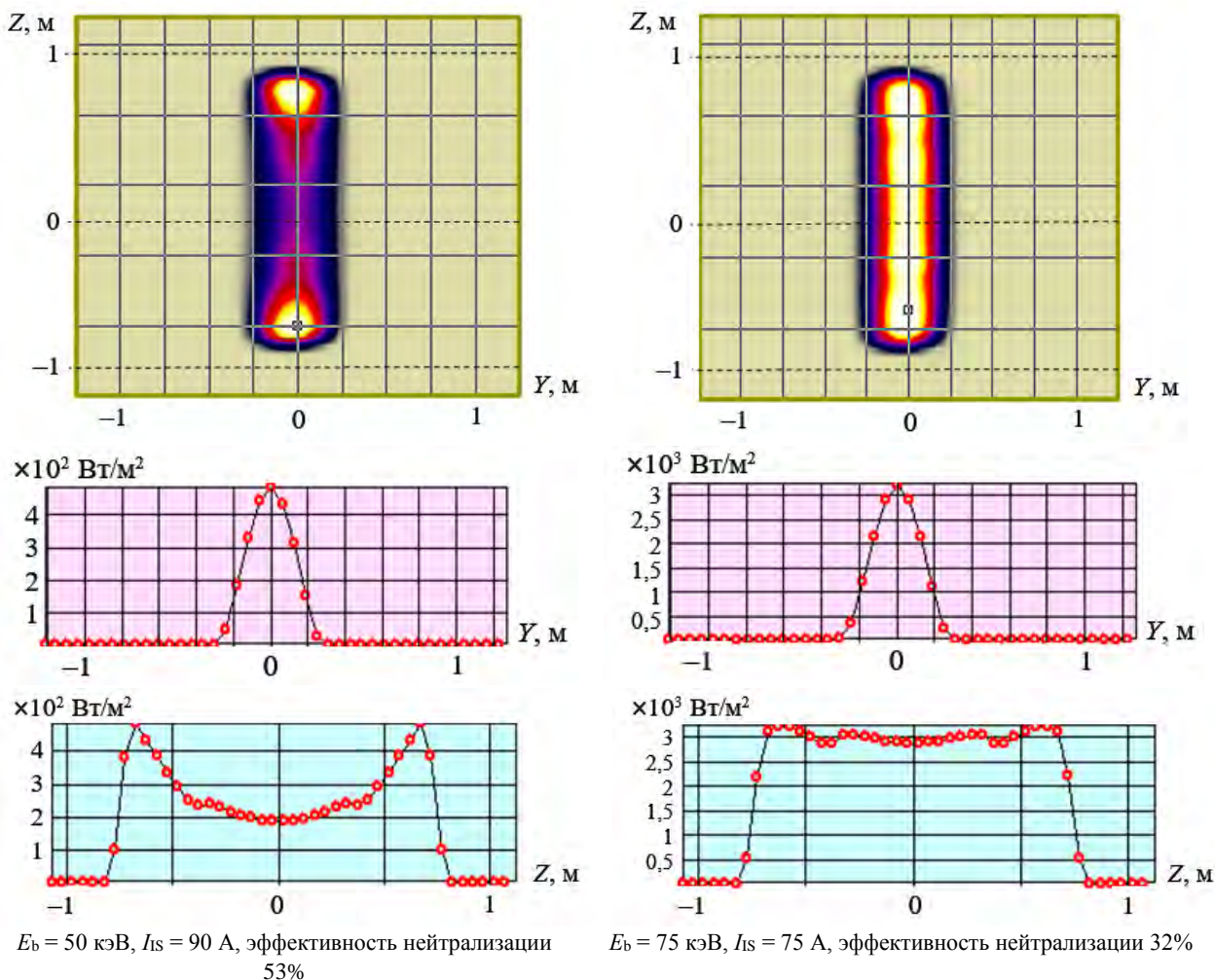


Рис. 1.4.3. Распределение плотности мощности на стенке камеры в зависимости от энергии пучков при параболическом профиле плотности плазмы: плотность на оси $n_{e0} = 9 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$; Y и Z — горизонтальная и вертикальная координаты приёмной поверхности; размер сечения пучка на входе в плазму $0,3 \times 0,8 \text{ м}^2$

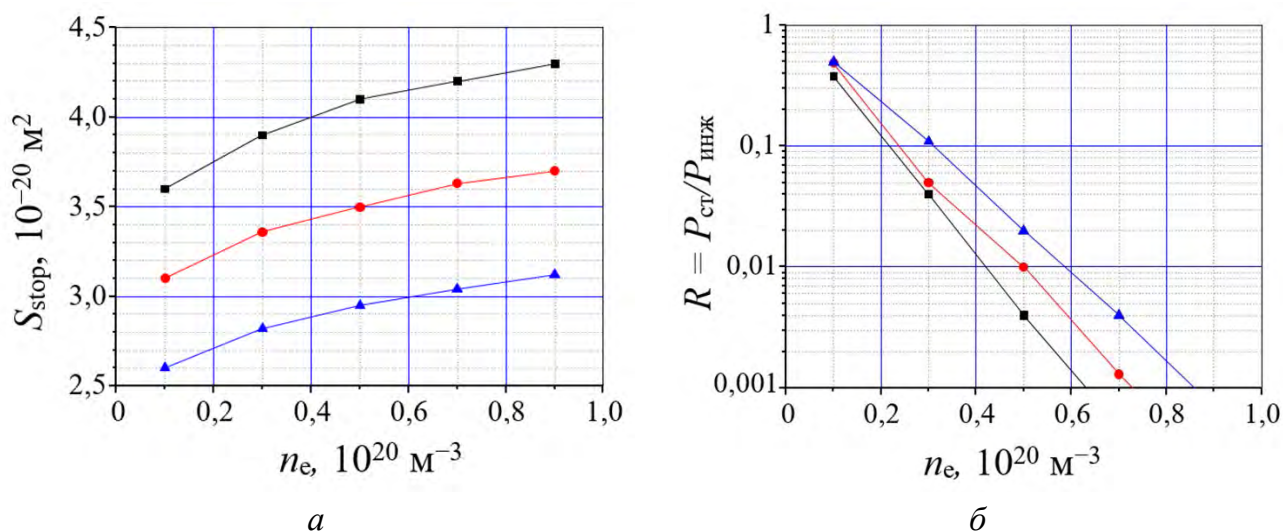


Рис. 1.4.4. Характеристики инжекционного нагрева, зависящие от плотности плазмы: эффективные сечения с учётом ступенчатой ионизации атомов в плазме (а); доля прошедшей на стенку токамака мощности (б). Мощность инжекции 2 МВт: ■ — $E_0 = 50$ кэВ; ● — $E_0 = 60$ кэВ; ▲ — $E_0 = 75$ кэВ

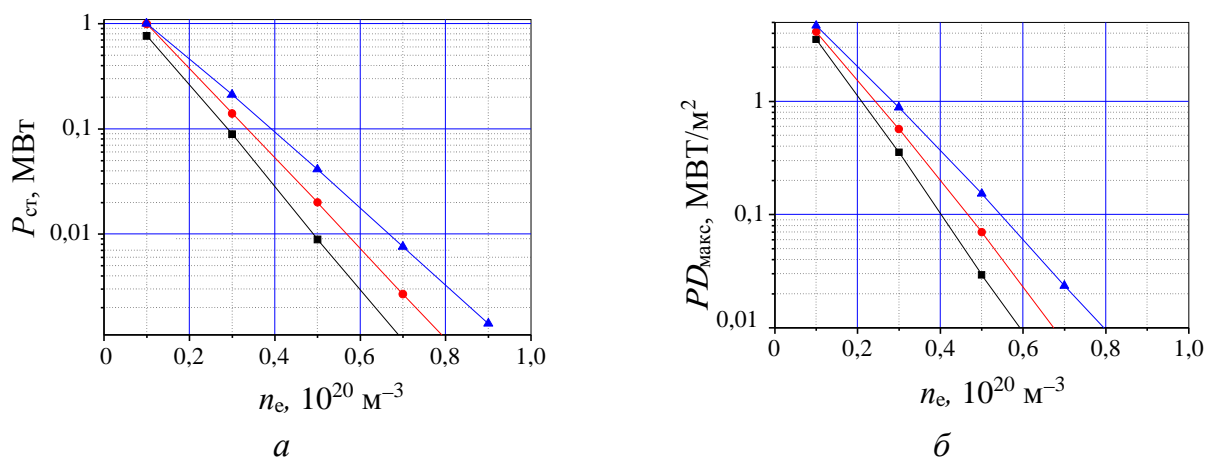


Рис. 1.4.5. Характеристики инжекционного нагрева, зависящие от плотности плазмы: полная прошедшая мощность (а); выделяющаяся на стенке пиковая мощность в профиле пучка при параболических распределениях концентрации и T_e (5 кэВ в максимуме) при различной энергии и токов ионов водорода пучка (б). Мощность инжекции 2 МВт: ■ — $E_0 = 50$ кэВ; ● — $E_0 = 60$ кэВ; ▲ — $E_0 = 75$ кэВ

1.5. ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДЛИННОГО ИМПУЛЬСА, ОПТИМИЗАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМА—СТЕНКА

Понятие «длинный импульс» подразумевает превышение длительности разряда какого-то критерия. Однако таких критериев довольно много. Так, в начале термоядерных исследований критерием длительного разряда считалось достижение условий стационарности параметров самой плазмы. Рассматривались два критерия. Первый — это значительное превышение энергетических времён жизни. Так, для Н-моды энергетическое время можно оценить по скейлингу ИТЭР [2]

$$\tau_E = 0,0562 I_p^{0,98} B_T^{0,15} P_{tot}^{-0,69} \bar{n}_e^{0,41} R^{1,97} \kappa^{0,8} \varepsilon^{0,58} M^{0,19} \quad (\text{с, МА, м, Тл, } 10^{19} \text{ м}^{-3}, \text{ МВт}). \quad (1.5.1)$$

Для режима Т-15МД с параметрами $I_p = 2$ МА; $B_T = 2$ Тл; $P_{tot} = 10$ МВт; $\bar{n}_e = 6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$; $k = 1,5$; $\varepsilon = 2,2$; $M = 1$ скейлинг (1.5.1) даёт $\tau_E = 0,048 \text{ с} = 48 \text{ мс}$.

В качестве второго критерия рассматривалось скиновое время

$$\tau_{\text{ск}} = 10^{-7} \sigma a^2 \quad [\text{с, Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}, \text{ м}], \quad (1.5.2)$$

где σ — проводимость плазмы. Для оценки рассмотрим спитцеровскую проводимость

$$\sigma = 2 \cdot 10^3 \frac{\Lambda}{10} z_{\text{eff}} T_e^{1,5} \quad [\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м, эВ}], \quad (1.5.3)$$

где Λ — кулоновский логарифм. Для температуры 5 кэВ $\sigma = 4,66 \cdot 10^8 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $\tau_{\text{ск}} = 30 \text{ с}$.

Однако следует учитывать, что нагрев включается после достижения стационара в омическом режиме. А для омического разряда с $T_e \sim 1$ кэВ $\tau_{\text{ск}} = 2,7 \text{ с}$.

В настоящее время в связи с развитием техники токамака и систем нагрева и, особенно, в связи с появлением многих полностью сверхпроводящих токамаков акцент в определении длинного импульса сместился с характеристик самого разряда на ограничения длительности из-за взаимодействия плазмы со стенкой. Это, в первую очередь, ограничение по нагреву стенки и пластин дивертора.

Плотность мощности, приходящей на пластины дивертора, может составлять больше 10 МВт/м^2 .

Из теории изменение температуры полубесконечной области при тепловом потоке W

$$T(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{W \sqrt{t}}{c \rho \lambda} \quad [\text{К, Дж, кг}]. \quad (1.5.4)$$

Здесь c — теплоёмкость материала; ρ — плотность вещества; λ — теплопроводность. Типичное значение для графита $c \rho \lambda = 2,3 \cdot 10^8 \text{ Дж}^2 / (\text{м}^4 \cdot \text{с})$. Тогда при потоке тепла 10^7 Вт/м^2 $T(t) = 700 t^{0,5}$, т.е. нагрев графита на 1000 градусов произойдёт за 2 с.

Учитывая, что $W = \lambda dT/dx$, глубину проникновения при этом можно оценить как $dx = dT/(W/\lambda) = 1000/(10^7/10^2) = 1$ см.

Увеличение длительности разряда, ограниченной перегревом неохлаждаемых пластин дивертора, может быть достигнуто либо переходом на охлаждаемые припаянные пластины, либо снижением выходящей мощности за счёт переизлучения на собственных или добавленных примесях.

При нагреве плазмы с помощью инжекции быстрых атомов длительность разряда ограничивается также и уровнем рециклинга. Инжекция нейтральных частиц при высоком рециклинге может приводить к неконтролируемому росту плотности. Так, при мощности инжекции 6 МВт с энергией пучка 60 кэВ в плазму вносится поток частиц $6,25 \cdot 10^{20}$ 1/с. Этот поток частиц должен удаляться из камеры. Полный поток водорода в разряд по оценке Т-10 в омическом режиме равен $2,2 \cdot 10^{21}$ с⁻¹. Если с ростом мощности удержание частиц ухудшается как $(P_{\text{heat}}/P_{\text{oh}})^{-0,69}$, то поток частиц в режиме с дополнительным нагревом будет $7,6 \cdot 10^{21}$ 1/с, т.е. рециклинг должен быть меньше, чем 0,92. Это можно сделать либо применением криооткачки, либо геттерированием, например, литием. На Т-10 при распылении лития получали рециклинг до 0,85. Однако на Т-10 рециклинг значительно ухудшался через пять омических импульсов. На основании этих оценок можно ожидать, что в условиях Т-15МД придётся возобновлять напыление через один-два импульса.

Эксперименты на токамаках показали, что даже при условии обеспечения охлаждения пластин дивертора и контроля частиц в шнуре разряд прерывается через какое-то время. Подборка экспериментов с максимальными достигнутыми длительностями разрядов с улучшенным удержанием была приведена в работе [69]. Оказалось, что все результаты хорошо группируются по удельной мощности, выходящей на стенку. График зависимости длительности разряда от удельной мощности из этой работы приведён на рис. 1.5.1.

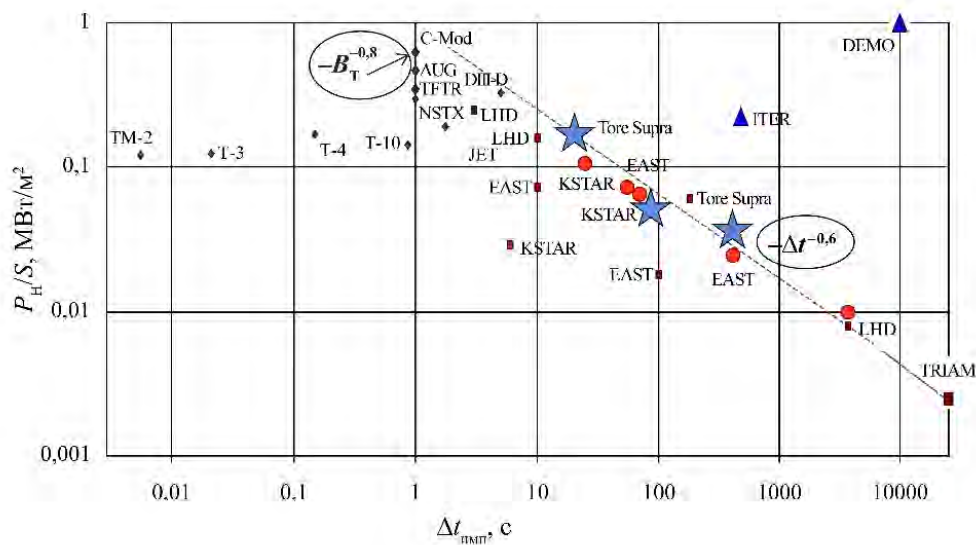


Рис. 1.5.1. Зависимость предельной длительности разряда от плотности мощности на стенку [69] с нанесёнными тремя режимами Т-15МД (отмечены звёздочкой): ▲ — установки следующего поколения со сверхпроводящими обмотками; ■ — действующие токамаки со сверхпроводящими обмотками; ◆ — токамаки с медными обмотками

В этой работе ограничение длительности объясняется распылением в ходе разряда материала стенки с сорбированным рабочим газом. При этом, когда происходит накопление критической величины, происходит срыв разряда. Близкий график зависимости тройного произведения $n_i(0)T_i(0)\tau_E$ от длительности разряда приведён в работе [70].

Для Т-15МД рассматриваются три режима с разной максимальной длительностью разряда:

- 1) $B_T = 1,5$ Тл, $I_p = 1$ МА, $\bar{n}_e = 3 \cdot 10^{19}$ м⁻³, $P_{\text{heat}} = 13$ МВт, длительность 20 с;
- 2) $B_T = 0,5$ Тл, $I_p = 0,5$ МА, $\bar{n}_e = 2 \cdot 10^{19}$ м⁻³, $P_{\text{heat}} = 3,8$ МВт, длительность 80 с;
- 3) $B_T = 0,4$ Тл, $I_p = 0,25$ МА, $\bar{n}_e = 1,3 \cdot 10^{19}$ м⁻³, $P_{\text{heat}} = 2,6$ МВт, длительность 400 с.

Так как площадь поверхности, обращённой к плазме, $S = 73 \text{ м}^2$, то в первом режиме параметр $P_{\text{heat}}/S = 0,18 \text{ МВт/м}^2$.

Во втором режиме параметр $P_{\text{heat}}/S = 0,052 \text{ МВт/м}^2$, в третьем режиме параметр $P_{\text{heat}}/S = 0,035 \text{ МВт/м}^2$.

На рис. 1.5.1 точки, соответствующие этим трём режимам T-15МД, нанесены на график из работы [69].

Видно, что рассматриваемые режимы хорошо попадают на пунктирную прямую аппроксимации максимальных достигнутых длительностей, т.е. получение этих режимов представляется вполне возможным в рамках уже существующих технологий без привлечения новых концепций для реакторных разрядов. Для этого нужно обеспечить эффективное охлаждение припаянных диверторных пластин и принять меры по контролю плотности в разряде. Охлаждение облицовки камеры можно делать через охлаждение крепёжных конструкций без припайки.

Однако тот факт, что необходимые длительности разряда могут быть получены в рамках существующих технологий, не означает, что на T-15МД не следует развивать новые концепции для реакторных режимов. Дело в том, что если ограничения разряда связаны с накоплением продуктов распыления материалов, взаимодействующих с плазмой, тогда в случае, если будет доказан эффективный контроль даже на меньших временах, можно будет утверждать, что и при больших временах не возникнет проблем. Одним из способов решения этой задачи может быть применение жидкометаллических технологий, в частности, литиевых.

Первым шагом для реализации программы длинного импульса должен стать выбор магнитной конфигурации. Дело в том, что необходимо выбрать тип разряда с отсутствием быстрых мощных выбросов энергии на диверторные пластины и стенку и наименьшими плотностями мощности на поверхность диверторных пластин. Также необходимым требованием для реакторного режима является улучшенное удержание энергии при отсутствии накопления тяжёлых примесей в центре токамака. Эксперименты показывают, что этим требованиям удовлетворяет только режим с отрицательной треугольностью в L-моде [71]. В нём отсутствуют выбросы энергии, связанные с ELM, и одновременно достигается такое же время удержания энергии, как в H-моде. При этом отсутствует накопление примесей. Снижение потоков энергии на диверторные пластины при отрицательной треугольности происходит из-за увеличения площади при смещении «усов» сепаратрисы наружу по большому радиусу. Следует отметить, что при отрицательной треугольности с двухнулевым дивертором может реализоваться режим со стабилизацией турбулентности в SOL, что уменьшит потоки частиц и энергии на стенку.

Вторым шагом должен стать выбор конфигурации диверторных пластин и стенки. В настоящее время представляется оптимальным решение, основанное на концепции замкнутой циркуляции лития с использованием капиллярных структур [69]. В этой концепции используются два литиевых элемента. Один, введённый на большую глубину, является источником потока лития (эмиттер). Второй, расположенный в SOL, собирает поток лития и не даёт литию напыляться на стенку (коллектор). Это особенно эффективно при стабилизации турбулентности в SOL в режиме с отрицательной треугольностью и двухнулевым дивертором. В настоящее время уже разработан макет коллектора для T-15МД, показанный на рис. 1.5.2. Он сделан на основе капиллярной структуры и располагается в экваториальной патрубке токамака. Поверхность литиевого элемента охлаждается, температура поддерживается на уровне ниже $200 \text{ }^\circ\text{C}$ для обеспечения сбора лития. Глубина ввода литиевых элементов регулируется для достижения максимальной эффективности сбора.

Экспериментально необходимо подобрать количество таких коллекторов. Но для гарантии отсутствия образования магнитных островов таких систем должно быть больше двух, равномерно распределённых по тору.

В качестве эмиттера возможно рассмотреть два варианта. Первый вариант — с использованием одного экваториального элемента, введённого в SOL плазмы на расстоянии 1 см от сепаратрисы и имеющего температуру $T \sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$. В этой конфигурации поток плазмы в диверторе будут воспринимать графитовые пластины. Будет необходимо исследовать возможность блокировки распыления графита потоками лития. Во втором варианте предлагается использовать литиевый элемент, который вводится в наружный ус дивертора. Схема такого элемента показана на рис. 1.5.3.

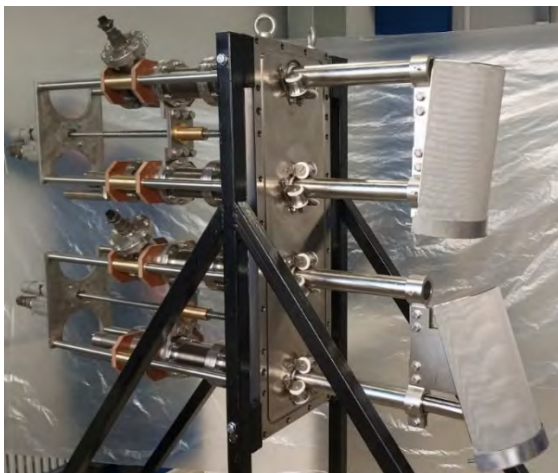


Рис. 1.5.2. Макет коллектора лития для T-15MD

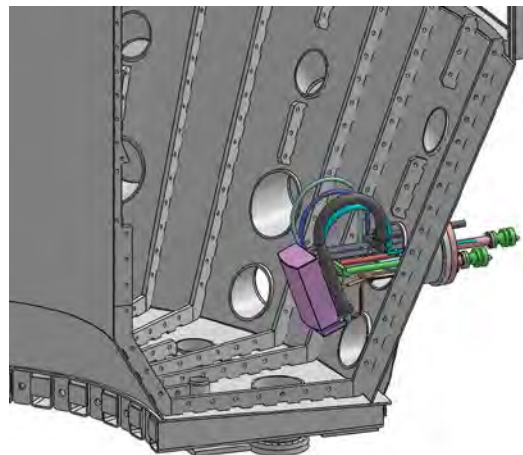


Рис. 1.5.3. Расположение литиевого эмиттерного элемента на нижнем патрубке T-15MD

Литиевый элемент имеет регулировку по глубине ввода и углу наклона в полоидальной плоскости для обеспечения требуемого температурного режима элемента. Элемент имеет эффективное охлаждение и в настоящее время может работать вплоть до максимальной плотности мощности 5 МВт/м^2 . Поскольку в режимах с мощностью нагрева до 15 МВт плотность мощности, выходящей на пластины дивертора, в чистых режимах может значительно превосходить указанную величину, то можно снизить эту мощность двумя способами. Первый — переизлучение мощности на добавленных примесях неона или аргона. Второй — обеспечение возможности работы в чистых режимах вблизи критической плотности, когда происходит сужение малого радиуса плазменного шнура. Второй способ предполагает проведение дополнительных исследований. Следует иметь в виду, что из опыта T-10 и FTU литиевый элемент переходит в режим сильного испарения после достижения температуры $400 \text{ }^\circ\text{C}$. Поэтому необходим контроль температуры путём эффективного охлаждения литиевого элемента и снижения потока тепла из плазмы. Помимо лития, необходимо рассмотреть вопрос возможности использования олова либо сплава олова с литием в качестве вещества капиллярных структур. Кроме того, в дальнейших экспериментах должны быть рассмотрены возможности использования закрытых диверторных конфигураций с применением капиллярных структур.

Полученный длительный режим должен быть оптимизирован не только по взаимодействию плазма—стенка, но и обладать улучшенным удержанием и большими эквивалентными нейтронными выходами, т.е. меры по уменьшению потоков тепла на диверторные пластины не должны сопровождаться деградацией удержания энергии в плазме.

Поскольку время установления температурного режима капиллярных структур должно быть в пределах нескольких секунд, то демонстрация возможности стационарного режима возможна уже при длительности разряда $10\text{—}20 \text{ с}$.

Важным вопросом является выбор материалов диверторных пластин и стенки. Эксперименты по выбору магнитной конфигурации и циркуляции лития в SOL можно проводить на графитовых стенках и диверторных пластинах. В случае получения режимов с капиллярными структурами, являющимися элементами диверторных пластин, необходимо рассмотреть вопрос о замене графита на металлическую стенку. В качестве металла могут рассматриваться вольфрам, молибден либо ванадиевые или нержавеющей стали.

Безусловно, для получения длительного режима необходимы источники нагрева и поддержания тока разряда. Однако эти вопросы рассматриваются в других разделах Программы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗДЕЛУ 1

1. Долганов В.В., Чирков А.Ю. Особенности реакций синтеза при столкновениях ускоренных дейтронов в плазме. — Инженерный журнал: наука и инновации, 2016, № 8, с. 1—13; doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-08-1523>.

2. **ITER Phys. Bas.** — Nucl. Fusion, 1999, vol. 39, p. 2137—2664.
3. **Wagner F., Becker G., Behringer K., et al.** Regime of Improved Confinement and High Beta in Neutral-Beam-Heated Divertor Discharges of the ASDEX Tokamak. — Phys. Rev. Letters, 1982, vol. 49, p. 1408—1412; doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1408>.
4. **Burrell K.H., Austin M.E., Brennan D.P. et al.** Quiescent H-mode plasmas in the DIII-D tokamak. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2002, vol. 44, p. A253—A263; doi: [10.1088/0741-3335/44/5A/325](https://doi.org/10.1088/0741-3335/44/5A/325).
5. **Snyder P.B., Solomon W.M., Burrell K.H. et al.** Super H-mode: theoretical prediction and initial observations of a new high performance regime for tokamak operation. — Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, 083026 (8 p.); doi: [10.1088/0029-5515/55/8/083026](https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/8/083026).
6. **Snyder P.B., Hughes J.W., Osborne T.H. et al.** High fusion performance in Super H-mode experiments on Alcator C-Mod and DIII-D. — Nucl. Fusion, 2019, vol. 59, 086017 (10 p.); doi: [10.1088/1741-4326/ab235b](https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab235b).
7. **Ongena J. et al.** Improved confinement at high density with an all silicon wall in TEXTOR. — In: Proc. 20th EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Phys. Lisbon, 1993, vol. 17 C, Part I, p. 127—130.
8. **Whyte D.G., Hubbard A.E., Hughes J.W. et al.** I-mode: an H-mode energy confinement regime with L-mode particle transport in Alcator C-Mod. — Nucl. Fusion, 2010, vol. 50, 105005 (11 p.); doi: [10.1088/0029-5515/50/10/105005](https://doi.org/10.1088/0029-5515/50/10/105005).
9. **Koide Y., Kikuchi M., Mori M. et al.** Internal transport barrier on $q = 3$ surface and poloidal plasma spin up in JT-60U high- βp discharges. — Phys. Rev. Letters, 1994, vol. 72, p. 3662—3665; doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.72.3662>.
10. **Camenen Y., Pochelon A., Behn R. et al.** Impact of plasma triangularity and collisionality on electron heat transport in TCV L-mode plasmas. — Nucl. Fusion, 2007, vol. 47, p. 510—516; doi: [10.1088/0029-5515/47/7/002](https://doi.org/10.1088/0029-5515/47/7/002).
11. **Marinoni A., Austin M.E., Hyatt A.W. et al.** Diverted negative triangularity plasmas on DIII-D: the benefit of high confinement without the liability of an edge pedestal. — Nucl. Fusion, 2021, vol. 61, 116010 (11 p.).
12. **Martyn Y.R., Takizuka T. et al.** Power requirement for accessing the H-mode in ITER. — J. Phys. Conf. Ser., 2008, vol. 123, 012033 (11 p.); doi: [10.1088/1742-6596/123/1/012033](https://doi.org/10.1088/1742-6596/123/1/012033).
13. **Progress in the ITER Phys. Bas.** — Nucl. Fusion, 2007, vol. 47, p. S1—S413.
14. **Birkenmeier G., Solano E.R., Carvalho I.S. et al.** The role of isotope mass and transport for H-mode access in tritium containing plasmas at JET with ITER-like wall. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2003, vol. 65, 054001 (10 p.); doi: [10.1088/1361-6587/acc423](https://doi.org/10.1088/1361-6587/acc423).
15. **Ryter F., Barrera Orte L., Kurzan B. et al.** Experimental evidence for the key role of the ion heat channel in the physics of the L—H transition. — Nuclear Fusion, 2014, vol. 54, 083003 (9 p.); doi: [10.1088/0029-5515/54/8/083003](https://doi.org/10.1088/0029-5515/54/8/083003).
16. **Greenwald M., Terry J.L., Wolfe S.M. et al.** A new look at density limits in tokamaks. — Nuclear Fusion, 1988, vol. 28, p. 2199—2207; doi: [10.1088/0029-5515/28/12/009](https://doi.org/10.1088/0029-5515/28/12/009).
17. **Pereverzev G.V., Yushmanov P.N.** ASTRA — Automated System for Transport Analysis. IPP 5/98, Garching, Germany, 2002. 146 p.
18. **Кирнева Н.А., Борщеговский А.А., Куянов А.Ю. и др.** Возможность использования частоты 140 ГГц для ЭЦР-нагрева плазмы в токамаке T-15МД. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 3, с. 24—36; doi: [10.21517/0202-3822-2021-44-3-24-36](https://doi.org/10.21517/0202-3822-2021-44-3-24-36).
19. **Lebedev S.V., Andrejko M.V., Askinazi L.G. et al.** Ohmic H-mode studies in TUMAN-3. — Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, vol. 36, p. B289—B299; doi: [10.1088/0741-3335/36/12B/024](https://doi.org/10.1088/0741-3335/36/12B/024).
20. **Martin Y.R. and TCV team.** H-mode threshold power in TCV Ohmic plasmas. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2002, vol. 44, p. A143—A150; doi: [10.1088/0741-3335/44/5A/310](https://doi.org/10.1088/0741-3335/44/5A/310).
21. **Osborne T.H., Brooks N.H., Burrell K.H. et al.** Observation of the H-mode in ohmically heated divertor discharges on DIII-D. — Nucl. Fusion, 1990, vol. 30, p. 2023—2028; DOI: [10.1088/0029-5515/30/10/004](https://doi.org/10.1088/0029-5515/30/10/004).
22. **Neudatchin S. V., Takizuka T., Shirai H. et al.** Dynamics and interplay of L-H-L transitions and ITB events in reversed shear plasmas with internal barriers in JT-60U. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2002, vol. 44, p. A383—A389; doi: [10.1088/0741-3335/44/5A/341](https://doi.org/10.1088/0741-3335/44/5A/341).
23. **Borschegovskiy A., Neudatchin S., Pimenov I. et al.** Optimization of HF-injection at the 2nd harmonic of ECRH on T-10 tokamak in order to obtain high energy content in plasma. — EPJ Web of Conferences, 2019, vol. 203, 02004 (5 p.); doi: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201920302004>.
24. **Ryter F., Fischer R., Fuchs J.C. et al.** I-mode studies at ASDEX Upgrade: L-I and I-H transitions, pedestal and confinement properties. — Nucl. Fusion, 2017, vol. 57, 016004 (23 p.); doi: [10.1088/0029-5515/57/1/016004](https://doi.org/10.1088/0029-5515/57/1/016004).
25. **Liu Y.J., Liu Z.X., Liu A.D. et al.** Power threshold and confinement of the I-mode in the EAST tokamak — Nucl. Fusion, 2020, vol. 60, 082003 (8 p.); doi: [10.1088/1741-4326/ab88e0](https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab88e0).
26. **Hubbard A.E., Whyte D., Dominguez A. et al.** Progress in Performance and Understanding of Steady ELM-free I-modes on Alcator C-Mod. — In: Proc. 24th Intern. Conf. on Fusion Energy. San Diego, 2012, EX/1-3; www-naweb.iaea.org/naweb/physics/FEC/FEC2012/index.htm.

27. **Razumova K.A.** Features of self-organized plasma physics in tokamaks. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2018, vol. 60, 014037 (8 p.); doi: 10.1088/1361-6587/aa9099.
28. **Yang Q.Q., Lin X., Xu G.S. et al.** Impacts of recycling impurity on the background ELM behavior during repetitive radiative divertor experiments in EAST. — *Nucl. Fusion*, 2023, vol. 63, 096026 (11 p.); doi: 10.1088/1741-4326/ace8a7.
29. **Giroud C., Brezinsek S., Pitts R.A. et al.** High Performance ITER-Baseline Discharges in Deuterium with Nitrogen and Neon-Seeding in the JET-ILW. — In: *Proc. of IAEA Fusion Energy Conf. Nice, France, 10—15 May, 2021*, CN-286/P3-977; <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Shared%20Documents/FEC%202020/fec2020-preprints/preprint0977.pdf>.
30. **Connor J.W., Fukuda T., Garbet X. et al.** A review of internal transport barrier physics for steady-state operation of tokamaks. — *Nucl. Fusion*, 2004, vol. 44, p. R1—R49; doi: 10.1088/0029-5515/44/4/R01.
31. **Sakamoto Y., Suzuki T., Ide S. et al.** Properties of internal transport barrier formation in JT-60U. — *Nucl. Fusion*, 2004, vol. 44, p. 876—882; doi: 10.1088/0029-5515/44/8/006.
32. **Challis C.D.** The use of internal transport barriers in tokamak plasmas. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2004, vol. 46, p. B23—B40; doi: 10.1088/0741-3335/46/12B/003.
33. **Litaudon X.** Internal transport barriers: critical physics issues? — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2006, vol. 48, p. A1—A34; doi: 10.1088/0741-3335/48/5A/S01.
34. **Joffrin E., Sips A.C.C., Artaud J.F. et al.** The 'hybrid' scenario in JET: towards its validation for ITER. — *Nucl. Fusion*, 2005, vol. 45, p. 626—634; doi: 10.1088/0029-5515/45/7/010.
35. **Sips A.C.C., Conway G.D., Dux R. et al.** Progress towards steady-state advanced scenarios in ASDEX Upgrade. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2002, vol. 44, p. A151—A157; doi: 10.1088/0741-3335/44/5A/311.
36. **Pavlov Yu.D., Dnestrovskij Yu.N., Borshegovskij et al.** Enhanced Energy Confinement at Deuterium Pellet Injection into ECR Heated Plasma on T-10. — In: *Proc. of 28th EPS Conf. on Control. Fusion and Plasma Phys. Funchal, 18—22 June, 2001*, ECA, vol. 25A, p. 1409—1412; <https://www.ipfn.tecnico.ulisboa.pt/cfn/EPS2001/fin/authors/nav/AutP01fr.html>.
37. **Shirai H., Kikuchi M., Takizuka T. et al.** Reduced transport and E_r shearing in improved confinement regimes in JT-60U. — *Nucl. Fusion*, 1999, vol. 39, p. 1713—1722; doi: 10.1088/0029-5515/39/11Y/311.
38. **Razumova K.A., Andreev V.F., Eliseev L.G. et al.** Physical processes determining plasma confinement in tokamaks with transport barriers from the point of view of self-organization. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2021, vol. 63, 055003 (15 p.); doi: 10.1088/1361-6587/abe023.
39. **Gorbun M.S., Melnikov A.V., Sychugov D.Yu.** Negative-Triangularity Magnetic Configurations in T-15MD Tokamak. — *Computational Mathematics and Modeling*, 2021, vol. 32, p. 1—6; doi: 10.1007/s10598-021-09512-3.
40. **Goldston R.J., Bathen S.H., Bulmer R.H. et al.** Advanced tokamak physics-status and prospects. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 1994, vol. 36, p. B213—B227.
41. **Humphreys D.A., Ferron J.R., Garofalo A.M. et al.** Advanced tokamak operation using the DIII-D plasma control system. — *Fusion Eng. and Design*, 2003, vol. 66—68, p. 663—667; doi: [https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(03\)00322-3](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(03)00322-3).
42. **Luce T.C.** Development of Steady-State Advanced Tokamak Research in the DIII-D Tokamak. — *Fusion Sci. Technol.*, 2005, vol. 48, p. 1212—1225; doi: [doi:10.13182/FST05-A1072](https://doi.org/10.13182/FST05-A1072).
43. **Garofalo A.M., Gong X., Grierson B.A. et al.** Compatibility of internal transport barrier with STEADY-state operation in the high bootstrap fraction regime on DIII-D. — *Nucl. Fusion*, 2015, vol. 55, 123025 (12 p.); doi: 10.1088/0029-5515/55/12/123025.
44. **Fujita T., Ide S., Kamada Y. et al.** Quasisteady High-Confinement Reversed Shear Plasma with Large Bootstrap Current Fraction under Full Noninductive Current Drive Condition in JT-60U. — *Phys. Rev. Lett.*, 2001, vol. 87, 085001 (4 p.); doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.085001>.
45. **Kamada Y., Isayama A., Oikawa T. et al.** Long sustainment of JT-60U plasmas with high integrated performance. — *Nucl. Fusion*, 1999, vol. 39, p. 1845—1853; doi: 10.1088/0029-5515/39/11Y/325.
46. **Ferron J.R., Holcomb C.T., Luce T.C. et al.** Progress toward fully noninductive discharge operation in DIII-D using off-axis neutral beam injection. — *Phys. Plasmas*, 2013, vol. 20, 092504 (14 p.); doi: <https://doi.org/10.1063/1.4821072>.
47. **Holcomb C.T., Ferron J.R., Luce T.C. et al.** Steady state scenario development with elevated minimum safety factor on DIII-D. — *Nucl. Fusion*, 2014, vol. 54, 093009; doi: 10.1088/0029-5515/54/9/093009.
48. **Sips A.C.C., Conway G.D., Dux R. et al.** Progress towards steady-state advanced scenarios in ASDEX Upgrade. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2002, vol. 44, p. A151—A157; doi: 10.1088/0741-3335/44/5A/311.
49. **Sips A.C.C., Hobirk J., Peeters A.G.** Chapter 4: Advanced Tokamak Studies in ASDEX Upgrade. — *Fusion Sci. Technol.*, 2003, vol. 44, p. 605—617; doi: [doi:10.13182/FST03-A402](https://doi.org/10.13182/FST03-A402).
50. **Turco F., Petty C.C., Luce T.C. et al.** The high- β_N hybrid scenario for ITER and FNSF steady-state missions. — *Phys. Plasmas*, 2015, vol. 22, 056113 (13 p.); doi: <https://doi.org/10.1063/1.4921161>.

51. **Petty C.C., Kinsey J.E., Holcomb C.T. et al.** High-beta, steady-state hybrid scenario on DIII-D. — *Nucl. Fusion*, 2016, vol. 56, 016016 (16 p.); doi: 10.1088/0029-5515/56/1/016016.
52. **Ferron J.R., Holcomb C.T., Luce T.C. et al.** High internal inductance for steady-state operation in ITER and a reactor. — *Nucl. Fusion*, 2015, vol. 55, 073030 (13 p.); doi: 10.1088/0029-5515/55/7/073030.
53. **Хвостенко П.П., Анашкин И.О., Бондарчук Э.Н. и др.** Экспериментальная термоядерная установка токамак T-15MD. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2019, т. 42, вып. 1, с. 15—38; doi: 10.21517/0202-3822-2019-42-1-15-38.
54. **Леонов В.М.** Исследование условий получения квазистационарных режимов в токамаке T-15MD. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2016, т. 39, вып. 3, с. 73—79; doi: 10.21517/0202-3822-2016-39-3-73-79.
55. **Greenwald M.** Density limits in toroidal plasmas. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2002, vol. 44, R27—R80.
56. **JET Team.** Physics of high performance JET plasmas in DT. — *Nucl. Fusion*, 1999, vol. 39, p. 1227—1245.
57. **Stober J., Gruber O., Kallenbach A. et al.** Effects of triangularity on confinement, density limit and profile stiffness of H-modes on ASDEX upgrade. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2000, vol. 42, p. A211—A217.
58. **Neyatani Y. and the JT-60 Team.** Improved confinement with plasma profile and shape controls in JT-60U. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 1996, vol. 38, p. A181—A191; doi: 10.1088/0741-3335/38/12A/014.
59. **Mahdavi M.A., Osborne T.H., Leonard A.W. et al.** High performance H mode plasmas at densities above the Greenwald limit. — *Nucl. Fusion*, 2002, vol. 42, p. 52—58.
60. **Frigione D., Garzotti L., Challis C.D. et al.** Pellet injection and high density ITB formation in JET advanced tokamak plasmas. — *Nucl. Fusion*, 2007, vol. 47, p. 74—84; doi: 10.1088/0029-5515/47/2/002.
61. **Велихов Е.П., Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф.** Заметки о будущем ядерной энергетики. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2019, т. 42, вып. 1, с. 5—14; doi: 10.21517/0202-3822-2019-42-1-5-14.
62. **Пистуневич В.И.** Некоторые задачи токамака с инжекцией быстрых нейтронов. — *Физика плазмы*, 1976, т. 2, вып. 1, с. 3—23.
63. **Wesson J.** Tokamaks. — Oxford: Clarendon Press, 2004. 248 p.
64. **Bell M.G., McGuire K.M., Arunasalam V. et al.** Overview of DT results from TFTR. — *Nucl. Fusion*, 1995, vol. 35, p. 1429—1436; doi: 10.1088/0029-5515/35/12/I02.
65. **Kurskiev G.S., Miroshnikov I.V., Sakharov N.V. et al.** The first observation of the hot ion mode at the Globus-M2 spherical tokamak. — *Nucl. Fusion*, 2022, vol. 62, 104002 (4 p.); doi: 10.1088/1741-4326/ac881d.
66. **McNamara S.A.M., Asunta O., Bland J. et al.** Achievement of ion temperatures in excess of 100 million degrees Kelvin in the compact high-field spherical tokamak ST40. — *Nucl. Fusion*, 2023, vol. 63, 054002 (6 p.); doi: 10.1088/1741-4326/acbec8.
67. **Хвостенко П.П., Бондарчук Э.Н., Кавин А.А. и др.** Расчёты уставок в схемах защит и блокировок системы электропитания электромагнитных обмоток и длительности плазменных разрядов в токамаке T-15MD. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2020, т. 43, вып. 3, с. 60—70; doi: 10.21517/0202-3822-2020-43-3-60-70.
68. **Blougach E.D.** BTR code for NBI design and study. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2021, т. 44, вып. 1, с. 68—79; doi: 10.21517/0202-3822-2021-44-1-68-79.
69. **Mirnov S.V.** Tokamak evolution and view to future. — *Nucl. Fusion*, 2019, vol. 59, 015001 (15 p.); doi: 10.1088/1741-4326/aaee92.
70. **Kikuchi M., Takizuka T., Medvedev S. et al.** L-mode-edge negative triangularity tokamak reactor. — *Nucl. Fusion*, 2019, vol. 59, 056017 (9 p.); doi: 10.1088/1741-4326/ab076d.
71. **Marinoni A., Sauter O., Coda S.** A brief history of negative triangularity of tokamak plasmas. — *Reviews of Modern Plasma Physics*, 2021, vol. 5, № 6 (44 p.); <https://doi.org/10.1007/s41614-021-00054-0>.

РАЗДЕЛ 2

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА

2.1. ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕНОСА

Изучение физики токамака продолжается уже более 60 лет. За это время достигнут большой прогресс в понимании пределов устойчивости, физических механизмов переноса и их зависимости от параметров токамака. Результатом этого явилась демонстрация на установках TFTR и JET реакторных режимов на смеси дейтерия и трития с выходом термоядерных нейтронов на уровне десятка мегаватт. Это позволило перейти непосредственно к строительству прототипа реактора на основе токамака — Международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР. В процессе исследований наряду с традиционным подходом «чистого» термоядерного реактора была развита концепция гибридного термоядерного реактора в виде термоядерного источника нейтронов (ТИН), согласно которой термоядерные нейтроны используются для наработки топлива для реакторов деления и дожигания отходов атомных реакторов. При этом требования к параметрам плазмы в ТИН могут быть значительно снижены. Однако несмотря на это, необходимо решить ещё много как технических, так и физических проблем. Последние связаны как с традиционными исследованиями по оптимизации процессов переноса, так и с приобретающими всё большее значение в последнее время специфическими проблемами реакторной плазмы.

Несмотря на большие успехи в получении реакторной плазмы, в ходе исследований не удалось создать полного описания турбулентного переноса плазмы, учитывающего реальную магнитную конфигурацию, роль рациональных магнитных поверхностей, шира магнитного и скоростей, роль магнитных флуктуаций в переносе плазмы. Важной проблемой является возбуждение неоклассических тиринг- и альфвеновских мод. Следует особо отметить необходимость исследования различия механизмов переноса электронов и ионов и оптимизации соотношения мощностей их нагрева, а также влияние магнитной конфигурации на перенос плазмы.

Реакторные проблемы включают в себя ухудшение удержания из-за возбуждения альфвеновских мод быстрыми частицами, необходимость отбора улучшенных режимов для обеспечения минимального взаимодействия со стенкой, т.е. обеспечения высокой стабильности разряда относительно как глобального, так и периферийных срывов, а также максимального снижения потоков тепла и частиц на стенку путём радиационного охлаждения периферии плазмы напуском примесей при сохранении хорошего удержания и предотвращении аккумуляции примесей в центре. Второй круг проблем включает в себя развитие методов длительного нагрева и поддержания тока плазмы. Однако ключевой проблемой создания реактора является выбор магнитной конфигурации плазмы, дивертора и материалов стенки и дивертора, обеспечивающих стационарное восприятие больших потоков тепла и частиц и удаление продуктов эрозии и накопленного рабочего газа из камеры токамака.

В настоящее время показано, что перенос как электронов, так и ионов значительно выше неоклассических величин, что обусловлено турбулентностью плазмы. Исключением являются зоны транспортных барьеров, где перенос ионов уменьшается до неоклассических величин. Исследования физики турбулентного переноса должны включать изучение зависимости переноса ионов и электронов от параметров разряда и методов нагрева, экспериментальное определение спектральных и корреляционных характеристик турбулентности, вращения плазмы, потенциала, профиля тока и сравнение экспериментальных данных с предсказаниями теории. Таким образом, для обеспечения этих исследований необходимо развить методы диагностики профилей плазмы для определения переносов ионов и электронов из уравнений энергобаланса, а главное — диагностики турбулентности, измерения потенциала, вращения плазмы, профиля тока. Безусловно, эти исследования не дадут результата без постоянного сравнения эксперимента с предсказаниями адекватных теоретических моделей. Таким образом, для реализации программы необходимы развитие диагностики характеристик плазмы, турбулентности и создание адекватных верифицированных теоретических моделей.

Возможности диагностик для изучения флуктуаций будут приведены в разделе 6 («Диагностический комплекс»), однако здесь необходимо кратко отметить ряд особенностей. Для исследования флуктуаций с размерами порядка ионного ларморовского радиуса на Т-15МД предполагается создать комплекс диагностик турбулентности. Он включает корреляционную рефлектометрию, флуктуации ЭЦ-излучения, методику тяжёлого пучка, флуктуации свечения водорода на нагревном и диагностическом пучке, измерения ленгмюровскими и магнитными зондами, а также наблюдение быстрой камерой флуктуаций свечения спектральных линий напущенного водорода. Следует подчеркнуть, что важна не только регистрация радиальной зависимости амплитуды спектров мощности флуктуаций, но и их корреляционные полоидальные, радиальные и тороидальные характеристики. Так, для изучения корреляций вдоль магнитных силовых линий внутри одной или между разными диагностиками необходимо расположить эти диагностические в нескольких сечениях вдоль тора. К сожалению, практически каждая диагностика имеет свои ограничения. Так, у корреляционной рефлектометрии ограничен доступ со стороны слабого поля из-за поглощения на второй гармонике циклотронной частоты. Наблюдение сверху по вертикали решает эту проблему, но возникает ряд вопросов при работе в плазме некруглой формы из-за вариации наклона отражающей поверхности. Лучший доступ к центральным областям возможен со стороны сильного магнитного поля, однако турбулентность на стороне сильного поля не представительна для переноса плазмы из-за баллонных эффектов. То же касается флуктуаций ЭЦ-излучения. Наиболее представительны измерения тяжёлым пучком и флуктуации свечения водорода на нагревном и диагностическом пучке. Однако тяжёлый пучок имеет ограниченный доступ к центральным областям при больших тороидальных полях, а последняя требует работы нагревного или диагностического пучка. Ленгмюровские и магнитные зонды и свечение водорода дают результаты только для периферии плазмы. Для измерения мелкомасштабной турбулентности порядка электронного ларморовского необходимо развивать диагностику рассеяния на микроволновом или лазерном пучке.

2.1.1. Изучение переноса основной и периферийной плазмы

Перенос основной плазмы в токамаке. Целью исследований переноса основной плазмы является получение режимов с улучшенным удержанием, являющихся прототипом для токамака-реактора. Это можно осуществить только на основе полного понимания физических механизмов аномального турбулентного переноса плазмы.

В настоящее время существуют проекты реализации реактора не только на основе классических токамаков ($R/a > 2,5$), но и на основе сферических токамаков ($R/a < 2$). Исследования показали, что зависимости энергетического времени удержания от параметров различны для этих двух вариантов токамака. Так, для классических токамаков получен скейлинг Н-моды IPB98(y, 2) [1]:

$$\tau_E = 0,0562 H I_p^{0,98} B_0^{0,15} P_{tot}^{-0,69} n_{19}^{0,41} R^{1,97} \kappa^{0,8} \varepsilon^{0,58} M^{0,19} \quad (\text{с, МА, м, Тл, м}^{-3}, \text{МВт}).$$

Для сферических токамаков реализуется скейлинг Валовича τ_V [2]:

$$\tau_V = 0,252 \alpha_{th} I_p^{0,59} B_0^{1,4} P_{tot}^{-0,73} n_{19}^{0,4} R^{1,97} \kappa^{0,78} \varepsilon^{0,58} M^{0,19} \quad (\text{с, МА, м, Тл, м}^{-3}, \text{МВт}).$$

Здесь $\varepsilon = a/R$; M — массовое число (для D—Т-плазмы (1:1) оно равно 2,5); κ — вытянутость плазмы; n_{19} — плотность плазмы в единицах 10^{19} м^{-3} ; H — фактор превышения энергетического времени жизни в скейлинге IPB98(y, 2); $\alpha_{th} = W_{th}/W_{tot}$ — доля энергии, приходящейся на тепловой компонент. Принципиальное различие этих скейлингов состоит в различной зависимости удержания от величин тороидального магнитного поля и тока плазмы. Так, для традиционных токамаков удержание слабо зависит от магнитного поля, но растёт линейно с ростом тока. В случае сферических токамаков зависимость от тока слабее, но возникает сильная зависимость от магнитного поля как $B_0^{1,4}$.

Можно ожидать различие физических механизмов переноса. Поскольку у Т-15МД аспектное отношение $R/a = 2,2$ имеет величину промежуточную между классическими и сферическими токамаками, то это открывает большие возможности по изучению различия физических механизмов переноса. Кроме того, приведённые скейлинги для интегрального удержания энергии не отражают большого различия в удержании электронной и ионной компонент. Такие исследования должны быть сделаны на Т-15МД. В этих исследованиях большое значение будут иметь измерения радиального распределения потенциала плазмы с

помощью диагностики тяжёлого пучка. Следует отметить, что большой радиус плазмы на T-15МД и T-10 совпадает. Это позволяет использовать данные, полученные на T-10, как референсную базу классического круглого токамака для сравнения полученных данных.

Таким образом, в первую очередь необходимо исследовать зависимости удержания энергии от магнитного поля и тока. Следует также отметить, что T-15МД может работать при достаточно большом магнитном поле 2 Тл, характерном для классических токамаков, т.е. возможно будет наблюдать переход от одной зависимости к другой.

При этом должны быть исследованы не только скейлинги интегрального времени удержания, но и переносов электронов и ионов, причём в корреляции с изменениями характеристик турбулентности.

Эксперименты должны проводиться как в омической плазме, так и в разрядах с дополнительным нагревом. В последнее время появилось много работ, показывающих, что нагрев электронов может существенно ухудшать удержание ионов. Поэтому особое внимание следует уделить сравнению режимов с нагревом электронов и ионов и выбору их оптимальной комбинации в условиях установки с малым аспектным отношением.

Исследования на сферических токамаках показывают, что не удаётся реализовать разряды с низкими $q \sim 2$. В работе [3] это объясняется значительным влиянием запертых частиц в сферических токамаках на обострение профиля тока из-за неоклассического ухудшения проводимости. Выяснение этого вопроса необходимо будет провести на T-15МД, для чего необходимо создать диагностики измерения профиля тока, такие как MSE (Motion Shtark Effect).

Многочисленные эксперименты на токамаках указывают на существование самосогласованных (канонических) профилей температур и давления. Одним из механизмов формирования таких профилей является концепция критических градиентов. В рамках этой концепции перенос плазмы и уровень турбулентности резко растут, когда градиенты параметров превосходят критические величины. Эта концепция исследуется в многочисленных экспериментах на токамаках. И аналогичные работы нужно проводить и на T-15МД, так как критические градиенты индивидуальны для каждой установки. Их нахождение позволит провести сравнение эксперимента с предсказаниями теории.

Важным вопросом является исследование вклада магнитных флуктуаций в перенос тепла электронами. Этот вопрос до сих пор не получил однозначного ответа. Результаты последних гирокинетических расчётов показывают, что магнитные возмущения могут давать значительный вклад в электронный перенос в режимах с большими бета [4]. Однако магнитные флуктуации могут играть роль и в омических режимах. Так, например, на T-10 были обнаружены магнитные флуктуации у квазиогерентных колебаний в омических режимах. В мировом сообществе в настоящее время существует мнение, что рост удержания энергии с ростом плотности может быть полностью объяснён переносом из-за неустойчивости на запертых электронах в гирокинетических расчётах [5, 6]. Однако, к сожалению, достоверность этих расчётов недостаточно высока, и роль магнитных флуктуаций может быть недооценена. Поэтому следует провести систематические эксперименты по удержанию надтепловых электронов, как это было сделано в экспериментах на установке ASDEX [7].

Особое внимание в исследованиях необходимо уделять экспериментам по получению режимов с улучшенным удержанием. В этих исследованиях необходимо исследовать роль магнитного шира в получении гибридных режимов с плоским распределением тока и $q(0) > 1$. Также должны проводиться эксперименты по выяснению роли рациональных поверхностей и магнитного шира в формировании внутренних транспортных барьеров (ITB — Internal Transport Barrier). В настоящее время показано сильное влияние отрицательной треугольности на величину и порог возникновения периферийного транспортного барьера. В экспериментах на токамаке T-15МД необходимо выяснить влияние треугольности на характеристики ITB.

Необходимо подчеркнуть, что все предложенные экспериментальные исследования смогут выявить физические механизмы переноса только при условии постоянного сопоставления с передовыми теоретическими моделями. В первую очередь необходимо развивать детальные гирокинетические коды. Эти коды должны включать не только электростатические неустойчивости, но и магнитные в реальной конфигурации токамака. Сопоставлять с моделями нужно не только экспериментально измеренные результирующие переносы электронов и ионов, но, самое главное, свойства непосредственно наблюдаемых эксперимен-

тально и расчётных полей флуктуаций. Здесь в первую очередь необходимо показать существование зональных течений и их важность в регулировании амплитуды флуктуаций. Для этого необходимо изучать дальние корреляции флуктуаций в области низких частот. Главную роль в таких исследованиях может играть диагностика измерения потенциала плазмы тяжёлым пучком.

На токамаке T-10 в конце 1990-х гг. была начата программа изучения дальних корреляций вдоль магнитно-силовой линии турбулентных флуктуаций плотности с помощью корреляционной рефлектометрии (Long Range Correlations — LRC). Последние результаты этих исследований приведены в работе [8]. Показано, что такие измерения могут давать информацию о профиле тока, который является важной характеристикой разряда токамака. Измерения позволили выявить такую новую важную для понимания физических механизмов турбулентности характеристику, как корреляционная длина вдоль силовой линии. Так, оказалось, что квазикогерентные флуктуации имеют большую корреляционную длину порядка обхода по большому радиусу. В то же время широкополосные флуктуации (Broad Band — BB) полностью декоррелированы уже на расстоянии 2 м. Предполагается, что их корреляционная длина может быть около 0,5 м, т.е. эти флуктуации носят более локализованный характер.

На T-15МД будут поставлены соответствующие наборы антенн для определения корреляционных длин менее 0,5 м. Выявлены также проблемы со значительной вариацией амплитуды корреляций квазикогерентных флуктуаций во время разряда, т.е. амплитуда корреляций имеет характер отдельных всплесков во времени. Возможная причина может быть связана с тем, что максимум корреляции не находится на поверхности постоянной плотности, но сдвинут радиально на 1—2 см по радиусу, как показано в работе [9]. Это может быть указанием на то, что поверхности одинаковой плотности отклоняются от магнитных на величину порядка 1 см, что должно быть предметом специального исследования на T-15МД. В статье [9] также показано, что при дальних корреляциях спектр когерентности разбивается на несколько спектральных эквидистантных максимумов, что, возможно, связано с одновременным возбуждением с основной модой $q = m/n$ гармоник $m = \pm 1, \pm 2$. Все эти исследования необходимо продолжить на T-15МД. Необходимо развить методику определения профиля тока с помощью корреляций вдоль силовой линии. Исследования корреляционных длин различных типов флуктуаций и их отклонений от поверхностей постоянной плотности даст информацию, существенную для понимания природы флуктуаций.

Для выяснения физических механизмов турбулентности важную роль может иметь сравнение характеристик флуктуаций и зависимостей переносов от параметров в токамаке и стеллараторе. Дело в том, что в стеллараторе в отличие от токамака магнитная конфигурация создаётся внешними полями. Поэтому должны отсутствовать неустойчивости, связанные с током по плазме. Так, например, в стеллараторах пока не наблюдали квазикогерентные флуктуации, т.е. это, возможно, вместе с обнаружением магнитной компоненты является указанием на то, что квазикогерентные флуктуации могут быть связаны с возмущениями тока при развитии микро-тиринг-неустойчивости. В этой связи представляется интересным исследовать зависимость характеристик квазикогерентных флуктуаций от магнитного шира. Большой интерес также представляет сравнение поведения плазмы в режимах с максимальными плотностями. Поскольку первой стадией срыва по критической плотности в токамаке является охлаждение периферии, вызванное радиационным охлаждением или неустойчивостью периферии, то эта стадия должна быть одинакова на токамаке и стеллараторе. Но изучать физику охлаждения периферии на стеллараторе проще, так как за этой стадией не следует срыв. Сравнение удержания и характеристик турбулентности в токамаке и стеллараторе может выявить роль неустойчивостей, связанных с током. В настоящее время такая работа проводится и результаты показывают близкое удержание в обеих установках [10]. Это может являться указанием на то, что флуктуации магнитного поля не дают существенный вклад в перенос.

В настоящее время существует некоторая неопределённость в экспериментальных результатах на разных установках относительно квазикогерентных флуктуаций. Так, на T-10 было показано, что существуют два типа квазикогерентных флуктуаций — низкочастотные и высокочастотные. Причём первые имеют свойства ионной температурно-градиентной (ИТГ), а вторые — неустойчивости на запёртых электронах (ТЕМ) [11, 12]. И эта концепция была первоначально подтверждена в экспериментах на немецком токамаке TEXTOR [13] и итальянском FTU [14].

Однако впоследствии существование квазикогерентных флуктуаций было подтверждено на многих токамаках, но сформировалось мнение, что имеется только один тип квазикогерентных флуктуаций и он

существует только при низких плотностях и ассоциируется с ТЕМ. И это несмотря на то, что на T-10 они наблюдаются при всех плотностях. Эту неопределённость необходимо разрешить в экспериментах на T-15МД с использованием диагностик рефлектометрии, ЭЦИ и тяжёлого пучка. Необходимо установить частотную структуру квазикогерентной моды колебаний и её связь с другими типами турбулентности и характеристиками режима.

Перенос периферийной плазмы. Исследования периферийной плазмы имеют исключительно важное значение для выработки режима термоядерного реактора. С одной стороны, периферийная плазма определяет процессы, ведущие к распылению стенки, такие как Edge Localized Modes (ELM). С другой стороны, рост величины пьедестала периферийного транспортного барьера (ЕТВ) уменьшает уровень турбулентности и улучшает удержание основной плазмы. Но одновременно формирование стационарного пьедестала приводит к аккумуляции примесей.

Структура ЕТВ является достаточно сложной. Её исследование требует измерений вращений, потенциалов, температур, плотности и турбулентности плазмы с миллиметровым радиальным разрешением.

В настоящее время известно много вариантов реализации периферийного барьера, различающихся величинами пьедесталов на плотности, электронной и ионной температурой, наличием и свойствами ELM. Кроме того, в ряде случаев регистрируется существование когерентных флуктуаций в области от десятков до сотен кГц в области пьедестала. Помимо исследований сложных физических механизмов периферийного барьера, ведутся эксперименты по активному внешнему влиянию на него с помощью резонансных магнитных возмущений и синхронизации ELM инжекцией пеллет. Таким образом, исследования физики ЕТВ ведутся широким фронтом. В настоящее время известно, что локальное уменьшение переносов связано с подавлением турбулентности из-за шира скоростей, который в стационарных условиях поддерживается большими градиентами давления. Однако сейчас нет ясности, что является триггером возникновения ЕТВ, поскольку градиенты давления возникают позже шира скоростей. Для выяснения этого необходимы измерения полоидальных и тороидальных скоростей плазмы с разрешением по времени лучше 100 мкс.

Второй областью исследований переносов периферийной плазмы на T-15МД должно стать изучение влияния отрицательной треугольности на характеристики ЕТВ для получения режимов с улучшенным удержанием, но без ELM и без накопления примесей.

2.1.2. Перенос частиц и разработка методов удаления примесей из шнура

Изучение физических механизмов изменения распределения частиц основной плазмы и примесей по сечению шнура — одна из фундаментальных задач физики плазмы токамаков, которая не потеряла своей актуальности, несмотря на более чем полувековые исследования. Распределение плотности напрямую влияет на энергетический выход термоядерной реакции. В работе [15] показано, что увеличение пикированности профиля плотности от $n_e(0)/\langle n_e \rangle \sim 1$ до $n_e(0)/\langle n_e \rangle \sim 1,4—1,6$ ($\langle n_e \rangle$ — средняя плотность) может привести к 30%-ному увеличению энергетического выхода термоядерной реакции. Более того, величина градиента плотности влияет на величину и плотность бутстреп-тока $j_{bs} \sim \text{grad}(n_e)$. Следовательно, форма профиля плотности влияет на долю неиндукционного тока плазмы и опосредованно оказывает влияние на возможность управления МГД-устойчивостью плазмы. Можно ожидать развития цепочки обратной связи: изменение градиента плотности плазмы — изменение величины и распределения бутстреп-тока — изменение МГД-устойчивости плазменного шнура — изменение градиента давления и градиента плотности из-за развития или стабилизации неустойчивостей. Пикирование (увеличение отношения $n_e(0)/\langle n_e \rangle$) профиля плотности основной плазмы обычно сопровождается изменением распределения примесей, что влечёт за собой отклик проводимости плазмы и, как следствие, изменение профиля тока и устойчивости плазменного шнура. Тяжёлые и лёгкие примеси по-разному могут реагировать на изменение условий, как показано, например, на токамаке JT-60U [16].

Таким образом, экспериментальное определение закономерностей изменения профиля плотности основных ионов и примесей в различных рабочих режимах должно позволить идентифицировать механизмы переноса плотности и разработать физически обоснованные алгоритмы управления профилем плотности плазмы.

Теоретическое описание переноса частиц. Перенос частиц, как и теплоперенос, в большинстве современных экспериментов существенно превышает предсказания неоклассической теории. Анализируя уравнения переноса частиц, вклад неоклассического переноса обычно выделяют в пинчевом слагаемом ($\Gamma_{\text{neo}} \sim n_e$).

Вклад неоклассического пинча в формирование профиля плотности обычно мал. Однако в некоторых экспериментах его величина оказывается достаточной для описания высоких значений фактора пикированности профиля плотности. Примером могут служить эксперименты, выполненные на токамаке ASDEX Upgrade [17]. В то же время на установке Tore Supra (Франция) было показано [18], что в разрядах с полнотью неиндукционным поддержанием тока плазмы ($U_L = 0$) для описания экспериментально наблюдаемых радиальных распределений плотности требуется предположить существование аномального пинча, существенно превышающего неоклассический.

Уравнение баланса частиц принято записывать в виде [19]

$$\Gamma = -Dn_e \left(\frac{\nabla n_e}{n_e} + C_q \frac{\nabla q}{q} - C_T \frac{\nabla T_e}{T_e} \right) + \nu_{\text{neo}} n_e,$$

где первое слагаемое — аномальная диффузия; второе — вклад так называемого турбулентного равновесия [20]; третье слагаемое — термодиффузия; четвёртое слагаемое — неоклассический пинч частиц.

Турбулентный перенос частиц в большинстве работ связывается с развитием неустойчивостей дрейфового типа, ионной температурной градиентной модой (ITG) и неустойчивостью на запертых электронах (ТЕМ). Как показывает теория [19], метод нагрева влияет на результирующий профиль плотности, поскольку приводит к преобладанию той или иной неустойчивости. Теория предсказывает уплощение профиля плотности, т.е. снижение фактора пикированности, с ростом отношения мощности электронного нагрева к мощности ионного нагрева. Эксперименты показывают, что при преобладающем электронном дополнительном нагреве частицы теряются из области нагрева. При вкладе мощности в центре плазменного шнура это соответствует уплощению профиля плотности. Эффект носит название density pump-out. В теории [19] уплощение профиля плотности интерпретируется как результат развития ТЕМ и, следовательно, является результатом возрастания термодиффузии, направленной наружу.

Управление профилем плотности основной плазмы и примесей. Проблема управления переносом частиц основной плазмы и примесей наиболее остро возникает в режимах улучшенного удержания, когда появляются области с подавленным турбулентным переносом.

Эффективный метод, который применяется для снижения пикированности профиля плотности примесей, — инжекция ВЧ- и СВЧ-мощности в плазму [1].

На установке DIII-D в режиме с пикированными профилями плотности (в режиме улучшенного удержания с внутренним транспортным барьером) включался дополнительный электронно-циклотронный нагрев [21]. Это приводило к уплощению градиентов плотности. Следует отметить, что при включении электронного циклотронного нагрева в режимах с ионным внутренним транспортным барьером (т.е. со снижением ионного теплопереноса) могут ухудшаться характеристики транспортного барьера и, как следствие, уменьшаться время жизни плазмы.

Экспериментальные исследования механизмов переноса частиц в токамаке T-15МД. Для экспериментального исследования переноса частиц обычно используются следующие методы:

- импульсный напуск газа;
- инжекция тестовой пеллеты (основного иона, иона примеси);
- инжекция материала в плазму с периферии за счёт распыления импульсом лазера — Laser Blow-off;
- ввод малой добавки вещества с помощью инжекции пучка быстрых атомов (NBI);
- анализ баланса частиц.

Все эти методы могут быть использованы на установке T-15МД.

Исследование фундаментальных механизмов переноса частиц целесообразно проводить на всех стадиях работы установки, начиная с омического режима, включая режимы с мощным дополнительным нагревом и режимы улучшенного удержания.

Важным представляется сопоставление транспорта частиц в режимах с различным соотношением ионного и электронного нагрева, а также в зависимости от эффективной столкновительности, $v_{\text{eff}} = 0,1Rn_e Z_{\text{eff}} / T_e^2$.

В качестве метода контроля и управления содержанием примесей в установке Т-15МД будет использован электронно-циклотронный нагрев. Будет изучена зависимость переноса частиц основной плазмы и примесей от полной мощности ЭЦ-нагрева, от вклада мощности и доли ЭЦ-мощности от полной мощности нагрева в разряде.

В качестве лёгких примесей будут рассмотрены гелий и углерод. В качестве тяжёлой примеси могут быть рассмотрены аргон, калий. Инжекция примесей будет осуществляться с помощью напуска газа, инжекции пеллет, а также с помощью инжекции пучков быстрых атомов (пучок водорода в гелиевую плазму).

Для определения роли неоклассического пинча будут проведены исследования переноса частиц в режимах с полностью неиндукционным поддержанием тока.

2.1.3. Исследования влияния магнитной конфигурации. Отрицательная треугольность

Изменение переносов при переходе от круглой к вытянутой и диверторной конфигурации. Известно, что в случае круглой магнитной конфигурации реализуются пикированные профили электронной плотности. Причём в омических режимах радиальный профиль относительной плотности совпадает с $\sqrt{T_e(r)}$ [22]. Пикированный профиль плотности при периферийном притоке частиц предполагает наличие аномального пинчевания плазмы. Однако в случае диверторной конфигурации на установке JET профиль плотности в центральных областях значительно уплощается в омическом режиме при сохранении пикированного профиля температуры [23]. Это показывает, что магнитная конфигурация может влиять на аномальный перенос плазмы. Представляет интерес исследовать изменения переноса плазмы и турбулентности при последовательном переходе от круглой к вытянутой и диверторной конфигурациям.

В последнее время в связи с экспериментами на TCV и DIII-D [24] возрос интерес к исследованию свойств плазмы при отрицательной треугольности. В этих экспериментах было показано, что в разрядах с отрицательной треугольностью наблюдаются пять основных эффектов:

1. Рост порогов перехода в H-моду. При этом режим остаётся или в L-моду, либо в H-моду с уменьшенным пьедесталом на плотности и отсутствием ЭЛМ. Одновременно исчезает накопление примесей, присущее H-моду без ЭЛМов. Оба последних факта исключительно важны для реактора;
2. Падение уровня турбулентности и аномального переноса, что приводит к улучшению удержания и, в итоге, удержание в L-моду становится таким же, как и в H-моду с положительной треугольностью;
3. Ухудшение удержания с ростом мощности нагрева становится меньше, чем при положительной треугольности. Поэтому основное преимущество по удержанию получается при максимальной мощности;
4. Уменьшение падения удержания с уменьшением тока, т.е. реактор может работать при низких токах, которые легче поддерживать;
5. Стабилизация неустойчивости «blobs» в SOL при двухнулевом диверторе, что уменьшает потоки частиц на стенку [25].

Следует отметить, что улучшение удержания при отрицательной треугольности может иметь пороговый характер и достигаться только при превышении порога порядка 0,2. Поэтому отрицательную треугольность надо делать заведомо больше 0,2.

Улучшение удержания происходит из-за стабилизации неустойчивости на запертых электронах, и поэтому можно ожидать, что наибольший выигрыш будет в крутых токамаках (как Т-15МД), где много запертых частиц. Однако последние работы по гирокинетическому моделированию [26 (рис. 6)] показывают, что при уменьшении аспектного отношения $R/a < 3$ происходит резкое ухудшение переноса электронов. При этом наибольший выигрыш в удержании должен наблюдаться при $R/a = 3$. Экспериментальная проверка этого моделирования может быть проведена на Т-15МД. Поскольку стабилизация неустойчивости на запертых частицах уменьшает перенос, в первую очередь, электронов, то это должно повышать эффективность ЭЦ-нагрева плазмы, что особенно важно для режимов со значительной мощностью гиротронного нагрева. Такое повышение продемонстрировано в экспериментах на TCV [27].

Так, для одинакового нагрева плазмы при отрицательной треугольности была необходима мощность 0,58 МВт, а при положительной — 1,26 МВт. Стабилизация TEM-неустойчивости была проанализирована с помощью гирокода в работе [28].

Видно, что переход от положительной к отрицательной треугольности приводит к изменению базовых свойств удержания и изучение этих изменений позволит выяснить физические механизмы удержания плазмы в токамаке и выбрать кандидатные конфигурации для реактора.

2.1.4. Изучение физики быстрых частиц и их взаимодействия с плазмой

Ускорение частиц нагревного пучка с помощью ИЦР-нагрева. Цель эксперимента — лабораторное моделирование термоядерных альфа-частиц с помощью комбинированного инжекционного и ИЦР-нагрева (ИЦРН), исследование удержания и потерь альфа-частиц.

Метод: комбинация инжекционного и ИЦР-нагрева гелиевой плазмы. Гелиевый нагревный пучок ускоряется третьей гармоникой ИЦРН до МэВ-ных энергий, и осуществляется лабораторное моделирование альфа-частиц, т.е. ядер ${}^4\text{He}$ МэВ-ного диапазона. Важно, что при этом отсутствуют нейтроны [29].

Исследование влияния быстрых частиц на турбулентность плазмы. Цель эксперимента — установление причинно-следственной связи между геодезическими акустическими модами (ГАМ) и турбулентностью с помощью генерации ГАМ посредством быстрых частиц е-ГАМ.

Метод: поиск ГАМ, порождённых быстрыми частицами е-ГАМ, исследование их свойств и радиальной локализации, влияние на характеристики турбулентности, спектральный и биспектральный анализ. Сравнение свойств ГАМ, порождённой турбулентностью, и е-ГАМ. Сравнение свойств е-ГАМ в режимах с инжекционным и ИЦРН при наличии и отсутствии дополнительного ЭЦРН.

Исследование энергетических спектров быстрых частиц. Цель эксперимента — установление характеристик взаимодействия быстрых частиц с плазмой.

Метод: исследование спектров быстрых частиц в режимах с инжекционным и ИЦРН при наличии и отсутствии дополнительного ЭЦРН при изменении столкновительности.

2.1.5. Альфвеновские моды и их роль в удержании

Получение и исследование альфвеновских мод в конфигурации с малым аспектным отношением и сильным полем. Цель: описание свойств и классификация АЕ (Alfven eigenmodes), внешние и внутренние измерения АЕ.

Метод: исследование полоидального и тороидального модовых чисел, скорости полоидального и тороидального вращения, турбулентного потока, переносимого различными типами АЕ. Установление радиальной локализации различных типов АЕ.

Влияние профилирования параметров плазмы, в первую очередь коэффициента запаса устойчивости q на свойства АЕ. Цель: исследование возможностей подавления АЕ-мод (ТАЕ — toroidal Alfven eigenmodes и проч.) с помощью ЭЦРН.

Метод: генерация ТАЕ и других типов мод с помощью различных методов нагрева. Сравнение свойств АЕ и их интенсивности в режимах с инжекционным и ИЦРН при наличии и отсутствии дополнительного ЭЦРН. Контроль радиальной локализации различных типов АЕ (они могут перемещаться при внешнем воздействии) при вариации локализации и мощности нагрева и изменении плотности.

Исследование влияния различных типов АЕ на удержание. Цель: сравнение АЕ-мод с непрерывной частотой и чирпинг-мод.

Метод: генерация чирпинг-мод путём профилирования q (current ramp-up, ramp-down) и вариации столкновительности (плотности плазмы, мощности ЭЦР). Сравнение полоидального и тороидального модовых чисел, скорости полоидального и тороидального вращения, турбулентного потока, переносимого различными типами АЕ с непрерывной частотой и чирпинг-мод. Спектральный и биспектральный анализ турбулентности. Генерация мод, порождённых быстрыми электронами.

2.1.6. Изотопный эффект (при возможности работы с дейтерием)

Реакторная установка будет работать на смеси дейтерия и трития, скорее всего равнокомпонентной. Однако набор экспериментальных данных, накопленных в условиях, близких к реакторным по составу

плазмы (50%D + 50%T), ограничен результатами установок TFTR и JET [30], большинство современных установок работает с дейтериевой плазмой.

В то же время перенос энергии и частиц в плазме зависит от массы основных ионов M_i , т.е. изотопа. В [30] приведён подробный обзор влияния массы изотопа на различные аспекты организации плазменного разряда, включая транспорт, режимы удержания, устойчивость и взаимодействие плазмы со стенкой. В том числе:

- указано, что энергетическое время жизни зависит от A_i как

$$\tau_E \sim M_i^\alpha, \quad (2.1.1)$$

где $\alpha \sim 0,3—0,65$ в зависимости от режима удержания и используемого скейлинга;

- показано, что из-за более пикированного профиля плотности и меньшего коэффициента диффузии в дейтериевой плазме (по сравнению с водородной) наблюдается более сильное накопление примесей в центре плазменного шнура [30];

- отмечается, что флуктуации плотности плазмы имеют различный характер в водородной и дейтериевой плазме и это различие не находится в полном согласии с теоретическими предсказаниями;

- сравнение транспорта тепла и частиц в водородной, дейтериевой и гелиевой плазме показало, что перенос усиливается как $(M_i/Z)^{-1/2}$ (Z — заряд основного иона);

- изотопный эффект влияет на характеристики ионного переноса. Более высокие потоки частиц в водородной плазме по сравнению с дейтериевой могут приводить к более высокой скорости вращения плазмы на периферии. Это, в свою очередь, влияет на возможность перехода в H-моду. В разделе 1 указывалось, что пороговая мощность перехода в H-моду также зависит от компонентного состава плазмы:

$$P_{L-H} \sim M_i^{-1}. \quad (2.1.2)$$

В [31, 32] отмечается, что несмотря на некоторое качественное согласие в описании экспериментальных данных с помощью giroкинетических кодов, до сих пор нет удовлетворительного описания всех экспериментальных проявлений изотопного эффекта в плазме токамака.

Установка T-15МД будет работать на водороде и с использованием водородных пучков для нагрева плазмы. Из соображений радиационной безопасности на начальных этапах установки использование дейтерия не рассматривается. Однако на более поздних этапах работы установки биозащита экспериментального зала может быть усилена (см. раздел 7), что позволит проводить эксперименты в дейтериевой плазме.

Интерес представляют следующие задачи:

- изучение переносов;
- формирование режимов улучшенного удержания;
- МГД-устойчивость плазмы;
- эффекты, связанные с вращением плазмы;
- генерация пучков быстрых ионов;
- взаимодействие плазмы со стенкой;
- эффективность нагрева ионной компоненты.

Для сравнения с результатами основных экспериментов целесообразно проводить исследования в следующих условиях:

- в дейтериевой плазме;
- в водородной плазме с различной фракцией дейтерия (две-три точки по относительной концентрации);
- в гелиевой плазме (для проверки соотношения $(M_i/Z)^{-1/2}$).

2.1.7. ИТЭРоподобные разряды с аналогичными безразмерными параметрами

Принцип подобия в анализе размерностей предполагает, что плазма с одинаковыми значениями безразмерных параметров, но с разными значениями размерных параметров демонстрирует одно и то же физическое поведение аналогично испытаниям в аэродинамической трубе с использованием масштабных моделей.

Если турбулентный перенос зависит только от безразмерных параметров, то нормированные коэффициенты диффузии и теплопроводности должны быть одинаковыми.

Набор безразмерных параметров для анализа характеристик удержания был предложен Б.Б. Кадомцевым [33] — это ϵ , β , ρ^* , v^* .

Как правило, параметром ϵ пренебрегают, поскольку его вариация ограничена возможностями камеры установки. Остаются три параметра — β_N , ρ^* , v^* . Они будут применены для сравнения результатов T-15МД с другими действующими установками и ИТЭР.

Эти параметры отражают соотношения, напрямую влияющие на свойства турбулентности и транспорта:

v^* — эффект столкновений и захвата запертых частиц в магнитные пробки;

β — электростатическая и электромагнитная турбулентность (E×B-транспорт или магнитный флаттер);

ρ^* — коротковолновая и длинноволновая турбулентность.

Полностью воспроизвести ИТЭРоподобный разряд по всем трём параметрам невозможно, для этого потребуется установка масштаба и энергетики ИТЭР. Однако на T-15МД можно получить ИТЭРовские или близкие к ним разряды по каждому из трёх параметров в отдельности, а также по паре параметров одновременно.

Цель работы: проверка принципа подобия в области параметров плазмы T-15МД, получение режимов с ИТЭРовскими значениями параметров β (β_N), ρ^* , v^* и исследование характеристик удержания и турбулентности в этих разрядах.

Отдельная важная задача: проверка применимости ИТЭРовского скейлинга для L-моды и H-моды для T-15МД.

Размерный скейлинг $\tau_{98y2} = 0,0562I^{0,93}B^{0,15}n^{0,41}P^{-0,69}R^{1,97}\kappa^{0,78}\epsilon^{0,58}M^{0,19}$.

Безразмерный скейлинг $\Omega_i\tau_{98y2} \sim \rho^{*-2,70}\beta^{-0,90}v^{*-0,01}q^{-3,0}\kappa^{3,3}\epsilon^{0,73}M^{0,96}$.

Способы получения сравнимых режимов при изменении параметров:

— $\beta_T = 2\mu_0\langle p \rangle / B_T^2$. Снижение тороидального магнитного поля и ECR-нагрев максимальной мощности в плотной плазме, скан по температуре и плотности $\rho^* = \rho_i / a$. Рост магнитного поля, изменение ионной температуры — ионный нагрев (NBI + ICRH) различной мощности вплоть до максимальной;

— $v^* = (4\pi^{1/2}/3)\ln(\Lambda)e^4 a n q / \epsilon^{5/2} T^2$. Снижение плотности при росте электронной температуры, что достигается ECR-нагревом максимальной мощности при уменьшении радиуса плазмы для получения реакторных значений столкновительности (бесстолкновительная плазма).

Сканирование безразмерных параметров (изменение одного параметра при неизменных других) — сложный эксперимент. Его детали зависят от будущих возможностей установки по получению режимов плазмы различных поперечных размеров и величин достигнутой введённой дополнительной мощности ECRH, ICRH, NBI. Они будут разработаны по мере введения в строй и развития методов нагрева.

2.2. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ И ГЕНЕРАЦИИ ТОКА

Невозможность получения высоких температур при омическом нагреве приводит к необходимости поиска других способов нагрева плазмы в тороидальных установках типа токамак. В настоящее время нашли широкое применение корпускулярный и высокочастотный методы нагрева, позволяющие существенно увеличить энергосодержание плазмы за счёт увеличения ионной T_i и электронной T_e температур. В данном разделе приводятся обоснования возможности применения следующих методов нагрева и генерации безындукционного тока, а также предложения по экспериментам для исследования физических механизмов нагрева плазмы:

1. Электронно-циклотронный резонансный нагрев (ЭЦРН);
2. Инжекция быстрых атомов (NBI);
3. Нижнегибридный нагрев (НГ);

4. Ионно-циклотронный резонансный нагрев (ИЦРН).

ЭЦР-нагрев уже применяется на установке токамак Т-15МД. Другие указанные методы также планируются для использования в этой установке.

Каждый из указанных способов нагрева имеет свои преимущества и недостатки, которые отражены в сводной табл. 2.2.1.

Таблица 2.2.1. Достоинства и недостатки существующих методов нагрева плазмы

Способ нагрева	Диапазон частот, ГГц	Достоинства	Эффективность генерации тока, $10^{19} \text{ A}/(\text{Вт}\cdot\text{м}^2)$	Недостатки
ЭЦРН	~100	Локальный вклад мощности Хорошее согласование с плазмой	0,3 (О-мода, первая гармоника, $T_e(0) \sim 4 \text{ кэВ}$ [35]) 0,13 (Х-мода, вторая гармоника, $T_e(0) \sim 4 \text{ кэВ}$ [35])	Ограниченный диапазон плотности плазмы
NBI		Возможность вращения плазмы	1	Наличие источника частиц в центральной зоне. Габариты системы
НГ	~1—10	Высокая эффективность генерации тока	3	Близкое расположение антенны к периферийной области плазмы. Согласование антенна—плазма
ИЦРН	~0,01—0,1	Высокая эффективность генерации тока. Возможность нагрева ионной и электронной компоненты	0,4	Близкое расположение антенны к периферийной области плазмы. Согласование антенна—плазма

Эффективность нагрева (увеличение энергосодержания плазмы) и генерация безындукционного тока являются наиболее актуальными проблемами при использовании рассматриваемых методов. Поэтому первоочередной задачей предстоящих экспериментов по дополнительному нагреву на токамаке Т-15МД является исследование физических явлений, управляющих механизмами нагрева и генерации тока, как в каждом отдельном случае, так и при одновременном применении двух или нескольких методов, приводящих к синергетическим эффектам.

2.2.1. Электронно-циклотронный способ нагрева плазмы

Электронно-циклотронный способ имеет ряд преимуществ по сравнению с другими высокочастотными методами, применяемыми в тороидальных установках:

- простота ввода СВЧ-излучения в плазму;
- локализация области выделения энергии;
- хорошее согласование с плазмой.

Малость длины волны по отношению к характерным масштабам изменения параметров плазмы и магнитного поля позволяет избежать трудностей ввода СВЧ-энергии в плазму, присущих другим диапазонам электромагнитных волн.

Пионерские эксперименты по вводу ЭЦ-волн, проведённые на установке Т-10, показали высокую эффективность ЭЦР-нагрева при однопроходном поглощении в широком интервале изменения электронной температуры — от 1 до 10 кэВ.

Хорошая локализация области нагрева, получаемая с помощью фокусирующей системы СВЧ-ввода, может быть использована для регулирования профиля плотности тока в плазме. ЭЦР-нагрев способствует стабилизации «веерной» неустойчивости, поскольку увеличивает поперечную энергию электронной компоненты.

Использование сверхразмерных волноводов круглого сечения с внутренней гофрировкой, приводящей к малым омическим потерям в передающем тракте, создало условие для транспортировки мощного

СВЧ-излучения на большие расстояния. Это обстоятельство позволило исключить влияние рассеянных магнитных полей токамака на работу гиротронов.

Поглощение ЭЦР-волн в плазме. Согласно [34, с. 10] резонансное взаимодействие электрона, движущегося в постоянном магнитном поле, с плоской электромагнитной волной происходит при выполнении условия доплеровского синхронизма

$$\omega = s\tilde{\omega}_H + k_{\parallel}V_{\parallel}, \quad (2.2.1)$$

в котором ω — частота волны; k_{\parallel} — её продольное по отношению к магнитному полю волновое число;

V_{\parallel} — продольная составляющая скорости электрона; $\tilde{\omega}_H = \frac{eH}{m_0c} \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$ — релятивистская гирочастота

(e — заряд, m_0 — масса покоя электрона, H — напряжённость тороидального магнитного поля, c — скорость света в вакууме); $s = 0, 1, 2, \dots$ — номер гармоники.

При электронно-циклотронном нагреве плазмы в тороидальных системах в направлении, близком перпендикулярному относительно тороидального магнитного поля, интервал углов формально ограничен условием [34, с. 20]

$$\beta_T \ll \left| \frac{\pi}{2} - \theta \right| \ll 1, \quad (2.2.2)$$

где $\beta_T = V_{Te}/c = \sqrt{2T_e/m_0c^2}$; θ — угол между вектором \mathbf{k} и направлением тороидального магнитного поля.

Значения оптической толщины τ для обыкновенной волны на первой гармонике и для необыкновенной волны на второй и более высоких гармониках не зависят от угла распространения в интервале углов, определённом (2.2.2.). При одних и тех же параметрах плазмы оптическая толщина для необыкновенной волны на второй гармонике более чем в 2 раза больше оптической толщины для обыкновенной волны на первой гармонике. Оптическая толщина для необыкновенной волны на первой гармонике и для обыкновенной волны на второй и более высоких гармониках резко падает с приближением θ к $\pi/2$.

ЭЦР-нагрев. Эффективный нагрев плазмы обусловлен поглощением СВЧ-волн в зоне электронно-циклотронного резонанса. Доля энергии излучения, оставшейся в области поглощения, определяется величиной $A = 1 - \exp(-\tau)$, которая показывает степень приближения плазмы к «абсолютно чёрному телу».

Эксперименты по ЭЦР-нагреву успешно проводились на многих отечественных и зарубежных установках, показывая высокую эффективность как при поперечном, так и наклонном по отношению к большому радиусу установки вводе СВЧ-мощности [32]: FT-1, WT-1, WT-2, JFT-2, Tokapole II, TOSKA, ISXB, CLEO, L-2M, T-10, JT-60U, DIII-D, Asdex Upgrade и KSTAR.

Резонансное взаимодействие электрона с плоской электромагнитной волной приводит к перманентному изменению его поперечной энергии, которая может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от соотношения фазы волны и положения частицы на ларморовской окружности. Продольная энергия электрона остаётся практически неизменной. При удачном соотношении фаз после многократного прохождения области воздействия СВЧ-излучения электрон набирает дополнительную поперечную энергию и в конце концов выходит из резонанса вследствие увеличения его релятивистской массы. То же относится и к противоположному случаю, когда энергия электрона убывает. Как показывают эксперименты на установке токамак T-10 [35], при поперечном вводе энергетический спектр остаётся максвелловским. Таким образом, ЭЦР-нагрев непосредственно не приводит к искажению функции распределения электронов по скоростям.

Область применения ЭЦР ограничена электронной плотностью плазмы и связанной с ней областью непрозрачности, которая определяется значением критической плотности n_c [36]. Критическая плотность для второй гармоники ЭЦР в 2 раза больше, чем на первой. Поэтому в большинстве экспериментов по ЭЦР-нагреву предпочтение отдаётся именно второй гармонике.

ЭЦР-генерация тока. В работе [34, с. 253—254] приводятся физические основы генерации неиндукционных токов: «Качественно принцип создания тока безындукционными методами можно понять на следующей упрощённой модели. Пусть в плазму с плотностью n_e и температурой электронов T_e вводится

поток частиц (или волн) с энергией $MV^2/2$ ($\hbar\omega$ для волн) и продольным импульсом MV_{\parallel} ($\hbar k_{\parallel}$). Предположим, что эти частицы (волны) взаимодействуют только с электронами, так что в единицу времени резонансные электроны в единицу объёма поглощают \dot{N} частиц (квантов). Следовательно, в единицу времени в единицу объёма электроны получают суммарный импульс $\dot{P}_{\parallel} = MV_{\parallel}\dot{N}$ ($\hbar k_{\parallel}\dot{N}$). При этом внешний источник совершает работу $\dot{W} = MV_{\parallel}^2\dot{N}$ ($\hbar\omega\dot{N}$). Приобретённый электронами импульс $mn_e u_{\parallel}$ (и связанный с ним электронный ток $J = -en_e u_{\parallel}$) теряется при столкновениях резонансных электронов с ионами, так что баланс импульса определяется уравнением

$$\frac{dJ}{dt} = \frac{e}{m} MV_{\parallel}\dot{N} - \nu_{ei}(V_{\text{res}})J, \quad (1)$$

где $\nu_{ei}(V_{\text{res}})$ — частота электрон-ионных столкновений, зависящая от скорости резонансных электронов. Поскольку удельный продольный импульс $\dot{P}_{\parallel} = MV_{\parallel}\dot{N}$ связан с удельной мощностью источника $P = W$ соотношением $\dot{P}_{\parallel} = (P/V_{\parallel})\left(\frac{k_{\parallel}}{\omega}\dot{P}\right)$, то из уравнения (1) в стационаре непосредственно следует формула для эффективности генерации тока

$$\eta \equiv \frac{J}{P} = \begin{cases} \frac{e}{m\nu_{ei}(V_{\text{res}})V_{\parallel}} & \text{для частиц,} \\ \frac{ek_{\parallel}}{m\nu_{ei}(V_{\text{res}})\omega} & \text{для волн.} \end{cases} \quad (2)\gg$$

В случае ЭЦР-генерации

$$\eta = \frac{e}{m\nu_{ei}(V_{\text{res}})V_e}.$$

В той же работе [34, с. 267] отмечается, что «...эффект создания тока при асимметричном нагреве электронов является следствием зависимости частоты электрон-ионных столкновений от энергии и в этом смысле аналогичен термосиле». В генерации тока также принимает участие несимметричная часть плотности электронов [37], которая образуется из-за разности электрон-ионных столкновений в противоположных продольных направлениях.

Значение $e/m\nu_{ei}(V_{\text{res}})V_e$ используется обычно в качестве масштабной величины, в единицах которой принято измерять эффективность.

Генерация ЭЦР-тока возникает при наклонном (по отношению к полному магнитному полю) вводе СВЧ-излучения вследствие асимметрии нагрева электронов.

Искажение функции распределения электронов по скоростям при ЭЦ-генерации тока, по всей видимости, вызвано спектром электронов, участвующих в резонансном взаимодействии с СВЧ-волной, продольная скорость которых может превышать её поперечное значение. При этом сам по себе резонансный нагрев происходит только в поперечном направлении.

Изучение природы и эффективности ЭЦ-генерации тока является одной из главных предстоящих задач в экспериментах на установке Т-15МД.

На Т-15МД предполагается использовать восемь гиротронов мощностью 1 МВт каждый с длительностью импульса до 30 с, часть из которых будет работать на частотах 82,6 и 105 ГГц. При этом планируется использование как экваториальных, так и вертикальных патрубков установки для ввода СВЧ-мощности с фокусирующими системами формирования излучаемого СВЧ-пучка.

Предполагаемые экспериментальные задачи в отсутствие других дополнительных методов нагрева:

- ЭЦР-пробой на второй гармонике в X-моды;
- изучение эффективности генерации ЭЦР-тока в зависимости от параметров плазмы;

- экспериментальное исследование влияния запертых частиц на эффективность генерации тока;
- экспериментальное определение положения релятивистской отсечки;
- исследование режимов с co+contr-инжекцией;
- нагрев и генерация тока на третьей гармонике Х-моды;
- подавление МГД-неустойчивостей (контроль профиля плотности тока);
- О—Х—В-трансформация;
- изучение распространения СВЧ-пучка с большой плотностью мощности в области непрозрачности;
- сравнение эффективности нагрева плазмы и эффективности генерации ЭЦ-тока при различной геометрии ввода мощности (включая различия вертикального и экваториального вводов при прочих равных условиях).

Круг задач может быть расширен в ходе экспериментов.

2.2.2. Инжекционный нагрев и генерация тока

Инжекция пучков быстрых атомов является одним из ключевых методов нагрева ионной компоненты плазмы и генерации неиндукционного тока. На современных установках применяются пучки водорода, дейтерия, трития и гелия.

Физические принципы инжекционного нагрева. Инжектированные в плазму атомы взаимодействуют с плазмой через ионизацию электронным и ионным ударом, перезарядку, а также в ступенчатом процессе ионизации возбуждённых атомов, что приводит к значительному увеличению сечения взаимодействия.

Ионы пучка, инжектированные в плазму с энергией E , замедляются плазмой по закону [31]:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{2E}{\tau_s} \left[1 + \frac{E_{\text{crit}}}{E} \right]^{3/2}, \quad (2.2.3)$$

где $\tau_s = \frac{3\sqrt{2\pi}T_e^{3/2}}{\sqrt{m_e m_b} A_D}$; $A_D = \frac{n_e^4 \ln \Lambda}{2\pi \epsilon_0^2 m_b^2}$; $E_{\text{crit}} = \left(\frac{3\sqrt{\pi}}{4} \right)^{2/3} \left(\frac{m_i}{m_e} \right)^{1/3} \frac{m_b}{m_i} T_e$; m_b , m_i — масса ионов пучка и плазмы соответственно.

Если энергия пучка удовлетворяет условию $E > 2,41E_{\text{crit}}$, то происходит нагрев электронов, при $E < 2,41E_{\text{crit}}$ идёт передача энергии от атомов пучка ионам плазмы.

Применение инжекционного нагрева чувствительно к плотности плазмы. При низкой плотности высокоэнергетичный пучок проходит сквозь плазму, не поглощаясь. Кроме того, изменение плотности плазмы приводит к изменению локализации вклада мощности. При увеличении плотности область вклада мощности смещается к периферии плазменного шнура.

В отличие от ВЧ- и СВЧ-методов нагрева инжекция быстрых атомов приводит к перераспределению источника частиц в плазме, а также к передаче вращения плазме при вводе пучков под углом к большому радиусу токамака (см. табл. 2.2.1). Это необходимо учитывать при анализе эффектов, наблюдаемых в результате инжекционного нагрева.

Ввод пучка под углом к большому радиусу тора приводит к созданию неиндукционного тока. Генерация тока с помощью пучков быстрых атомов основана на передаче импульса быстрыми частицами электронам плазмы в результате кулоновских соударений. Принята следующая формула для эффективности генерации тока с помощью пучков быстрых атомов [37, 32]:

$$\frac{I_{\text{NI}}}{P_{\text{NBI}}} = \frac{\tau_s u_b Z_b e}{2\pi R_0 (1 + \alpha^2) E_0} \left[1 - \frac{Z_b}{Z_{\text{eff}}} + 1,46\sqrt{\epsilon} \frac{Z_b}{Z_{\text{eff}}} A(Z_{\text{eff}}) + \frac{nu_i}{Z_b n_b v_b} A(Z_{\text{eff}}) \right], \quad (2.2.4)$$

где Z_b — заряд быстрых ионов пучка; u_i — тепловая скорость ионов; E_0 , n_b , u_b — начальная энергия, плотность и скорость ионов пучка; $A(Z_{\text{eff}})$ — функция, значения которой варьируются от 1,67 при $Z_{\text{eff}} = 1$ до 1,18 при $Z_{\text{eff}} = 4$.

Третье слагаемое в выражении (2.2.4) учитывает влияние запертых частиц. Поскольку токамак Т-15МД — установка с малым аспектным отношением, можно ожидать значительного влияния запертых частиц на эффективность генерации инжекционного тока.

Для сравнения эффективности генерации тока, получаемого различными методами и на различных установках, используется значение нормализованной эффективности генерации тока

$$\hat{\eta}_{\text{CD}} = \frac{I_{\text{NL}}}{P_{\text{NBI}}} \bar{n}_e R_0. \quad (2.2.5)$$

Сравнение достигнутых на разных установках величин эффективности генерации тока с помощью инжекционного нагрева с предсказаниями теории позволяет говорить об их хорошем соответствии [32]. Ожидаемые значения эффективности генерации тока могут снижаться из-за влияния МГД-активности и турбулентности плазмы на удержание частиц пучка. Такой эффект наблюдался, например, на DIII-D в разрядах с тиринг-модой [1].

Эксперименты по оптимизации взаимодействия пучков быстрых атомов с плазмой. Основные задачи инжекционного нагрева на T-15MD:

- нагрев ионной компоненты плазмы;
- генерация неиндукционного тока;
- генерация вращения плазмы для создания транспортных барьеров и стабилизации МГД-неустойчивостей.

Будут проведены эксперименты по изучению эффективности нагрева ионной компоненты плазмы и исследованы зависимости:

- ионной температуры плазмы от плотности плазмы и от мощности инжекционного нагрева (1—3 инжектора, что соответствует 2—6 МВт полной подведённой мощности нагрева);
- эффективности нагрева ионной компоненты от энергии частиц при вариации энергии пучка;
- эффективности нагрева ионной компоненты от электронной температуры при совместном использовании инжекционного нагрева и электронно-циклотронного нагрева в области плотностей, доступной для совместной работы двух систем.

Во всех указанных экспериментах необходимо контролировать величину неиндукционного тока, создаваемого при инжекции пучков быстрых атомов.

Будут проведены специальные эксперименты по полностью неиндукционному поддержанию тока с помощью пучков быстрых атомов. Предварительные расчёты, представленные в [38], позволяют ожидать, что имеющаяся система нейтральной инжекции позволяет обеспечить полностью неиндукционное поддержание тока плазмы 250 кА (при $B_T = 0,4$ Тл) в течение 400 с, а полностью неиндукционное поддержание тока 500 кА ($B_T = 0,5$ Тл) в течение ~ 80 с.

Будут исследованы:

- синергетический эффект между электронно-циклотронным нагревом и инжекцией быстрых атомов с целью получения наибольших значений тока, создаваемого при инжекции;
- поведение быстрых ионов и экспериментальный анализ неустойчивостей, связанных с быстрыми ионами, в экспериментах по одновременному нагреву плазмы с помощью ВЧ-волн на частотах ионного циклотронного резонанса и пучков быстрых атомов;
- влияние вращения плазмы, создаваемого при инжекции пучков быстрых атомов, на режим удержания плазмы, турбулентность в периферийной области и устойчивость плазменного шнура.

2.2.3. Нижнегибридный нагрев и генерация тока

На современных установках инжекция в плазму ВЧ-волн в нижнегибридном диапазоне частот (2,45—8 ГГц) используется, в основном, для создания безындукционного тока и попутного нагрева электронов. Помимо этого, НГ-волны могут быть использованы для улучшения состояния стенок вакуумной камеры и для снижения напряжения пробоя.

Широкое распространение генерации тока НГ-волнами объясняется высокой эффективностью генерации НГ-тока, которую будем везде считать как

$$\Gamma_{\text{НГ}} = I_{\text{НГ}} (\text{MA}) \bar{n}_e / P_{\text{НГ}} (\text{MW}), \quad (2.2.6)$$

достигающей величины 0,8—1 даже в плазме с умеренными значениями T_e (в экспериментах Alcator-C-MOD с $B_t = 5$ Тл $\Gamma_{\text{НГ}}$ подрастает до 2 [39]). Высокие значения $\Gamma_{\text{НГ}}$ объясняются тем, что

НГ-антенна (грилл) способна генерировать бегущую волну, создающую (через затухание Ландау) длинное плато на функции распределения электронов по энергии.

Нерезонансный характер поглощения НГ-волн хорошо работает в токамаках среднего размера, но не позволяет генерировать НГ-ток в центральной части плазменного шнура в ИТЭР. Это было показано около 30 лет назад в экспериментах токамака JET с полным замещением индукционного тока НГ-током ($\Gamma_{\text{НГ}} = 0,8$), в которых при повышении T_e и плотности профиль тока становился немонотонным, так как НГ-волны начинали поглощаться, не доходя до центра ([40], с. 146—149). Эти результаты противоречили более оптимистичным прогнозам, полученным из расчётов распространения и поглощения НГ-волн по методу лучевых траекторий [40]. Впрочем, это с очевидностью следует даже из расчётов для токамака T-7 по усечённому полноволновому коду [41], так как дифракция НГ-волн (не учитываемая в методе лучевых траекторий) приводит к уширению спектра НГ-волн в процессе распространения и увеличению поглощения. По-видимому, эти эксперименты и стали причиной отказа от использования НГ-волн в ИТЭРе.

Прогнозы генерации НГ-тока в токамаке T-15МД не отличаются высокой точностью по следующим физическим причинам.

1. Характеристики многоволнового излучателя замедленных волн в нижнегибридном диапазоне частот (грилл), а именно излучаемого гриллом спектра по N_{\parallel} , которое является величиной продольного замедления, и коэффициентов отражения R при различном сдвиге фаз между волноводами $\delta\Phi$ и различной плотности электронов на срезе грилла, обеспечивающие оптимальный спектр замедлений, при котором ток увлечения генерируется наиболее эффективно, рассчитываются с помощью специальных кодов (ALOXА [42], GRILL-3D [43]). Проблема в том, что во всех экспериментах вводимая в плазму мощность ограничивается уровнем 30—40% от максимального уровня, выдаваемого по паспорту системой клистронов. Дело в том, что при повышении вводимой в плазму мощности происходит постепенное развитие различных нелинейных явлений (неустойчивости, выдавливание плотности из среза грилла из-за пondeмоторных эффектов), в финале заканчивающихся пробоями между волноводами. Эти явления не учитываются в программах.

Современные гриллы делятся на FAM (fully active multifunction) и PAM (passiv-active-multifunction). На токамаке EAST недавно заменили FAM-грилл с частотой 2,45 ГГц (клистроны производятся в России) на PAM и показали гораздо более лёгкое обеспечение связи грилл—плазма (необходимо как для НГ-, так и для ИЦ-антенн) [44]. При этом о повышении вводимой в плазму мощности пока не сообщалось (было 1 МВт из общей мощности клистронов 4 МВт для FAM-грилла). Увеличение частоты клистронов позволяет увеличить вводимую в плазму мощность при тех же размерах антенны. На токамаке EAST PAM-грилл с частотой 4,6 ГГц (клистроны разрабатываются в России), стоящий параллельно с описанным, позволяет вводить в плазму 2,2 МВт из общей мощности клистронов 6 МВт [43]. Проблема связи волны с плазмой отработана в EAST напуском газа из нескольких клапанов в области грилла и изменениями положения грилла по большому радиусу в зависимости от геометрии плазмы.

2. Распространение и поглощение НГ-волн. До сих пор распространение и поглощение НГ-волн обычно описывается методом лучевых траекторий (ВКБ) с одномерным кинетическим уравнением по продольной скорости электронов. При этом излучаемый гриллом спектр $P(N_{\parallel})$ разбивается на сотни пакетов с фиксированными начальными значениями тороидального n и полоидального m , и при распространении меняется лишь величина m . В некоторых случаях итоговые результаты заметно зависят и от разбивки пакетов по полоидальному размеру грилла. Немногочисленные расчёты по полноволновым кодам показывают, что дифракция НГ-волн (не учитываемая в методе лучевых траекторий) приводит к дополнительному уширению спектра НГ-волн в процессе распространения и увеличению поглощения, изменяя и уширяя профиль НГ-тока. При заметно неоднородном поглощении, ожидаемом в некоторых режимах T-15МД (особенно при низких значениях B_z), неопределённость возрастает, так как каждое отражение от стенки в расчётах считается идеальным. Но главный источник неопределённости лежит в априори неточном знании уровня потерь энергичных электронов, направленных вдоль B_z , которые определяют как длину, так и наклон плато на функции распределения, уменьшая эффективность генерации НГ-тока. Даже упрощённое моделирование результатов T-7 [45], в котором учитывалось лишь однопроходное поглощение [46, 47], показало, что расчётные значения заметно превышают экспериментальные даже при учёте мягкой веерной неустойчивости. В реальности есть дополнительные потери энергичных

электронов, ограничивающие длину плато. Фактически уровень потерь задаётся в кодах вариацией входных параметров, позволяя решением обратной задачи описать эксперименты. Редким обратным примером является констатация того, что в полтора раза меньшая эффективность генерации НГ-тока на Tore Supra по сравнению с JET ($\Gamma_{\text{НГ}} = 0,4\text{—}0,5$ и $0,8$) не имеет чётких физических оснований [48].

3. Прогнозы. Типичная величина $\Gamma_{\text{НГ}}$ равна $0,7\text{—}0,8$ в экспериментах EAST с полным замещением тока и $B_t = 2,5$ Тл. По-видимому, для аналогичных экспериментов Т-15МД следует ожидать значение $\Gamma_{\text{НГ}}$ не меньше $0,5$ при $B_t = 1,5$ Тл. Даже прогноз для величины $\Gamma_{\text{НГ}}$ в экспериментах Т-15МД с низкими значениями B_t не ясен. В недавних экспериментах на токамаке ГЛОБУС-М2 ($R = 0,36$ м, $a = 0,2$ м) при $B_t = 0,8$ Тл и наклонённом в тороидальном направлении вводом НГ-волн оставалось $U > 0,6$ В [49], что в Т-15МД соответствует $U > 2,5$ В. Про величину $\Gamma_{\text{НГ}}$ при таком большом значении тороидального электрического поля E_z говорить рано, так как даже симметричный спектр НГ-волн (производящий одинаковый ток и противоток при $U = 0$) будет генерировать заметный ток в таких условиях.

4. Текущее состояние комплекса нижнегибридного нагрева и генерации тока. Предполагается, что комплекс НГ-нагрева и генерации тока установки Т-15МД суммарной мощностью до 4 МВт при длительности импульса до 30 с будет обеспечивать генерацию НГ-волн. Конкретный вид гриллов и всего комплекса НГ-нагрева и генерации тока будет определён по завершении стадии концептуального проектирования (конец 2024 г.).

Серия предварительных расчётов с использованием кода GRILL-3D [43] и усовершенствованного кода FRTC [50] позволила оптимизировать РАМ-грилл под размеры патрубка Т-15МД. На рис. 2.2.1 показаны один из пяти рядов волноводов грилла (рис. 2.2.1, а) и возбуждаемый им спектр продольных замедлений при нулевом сдвиге фаз между модулями (рис. 2.2.1, б).

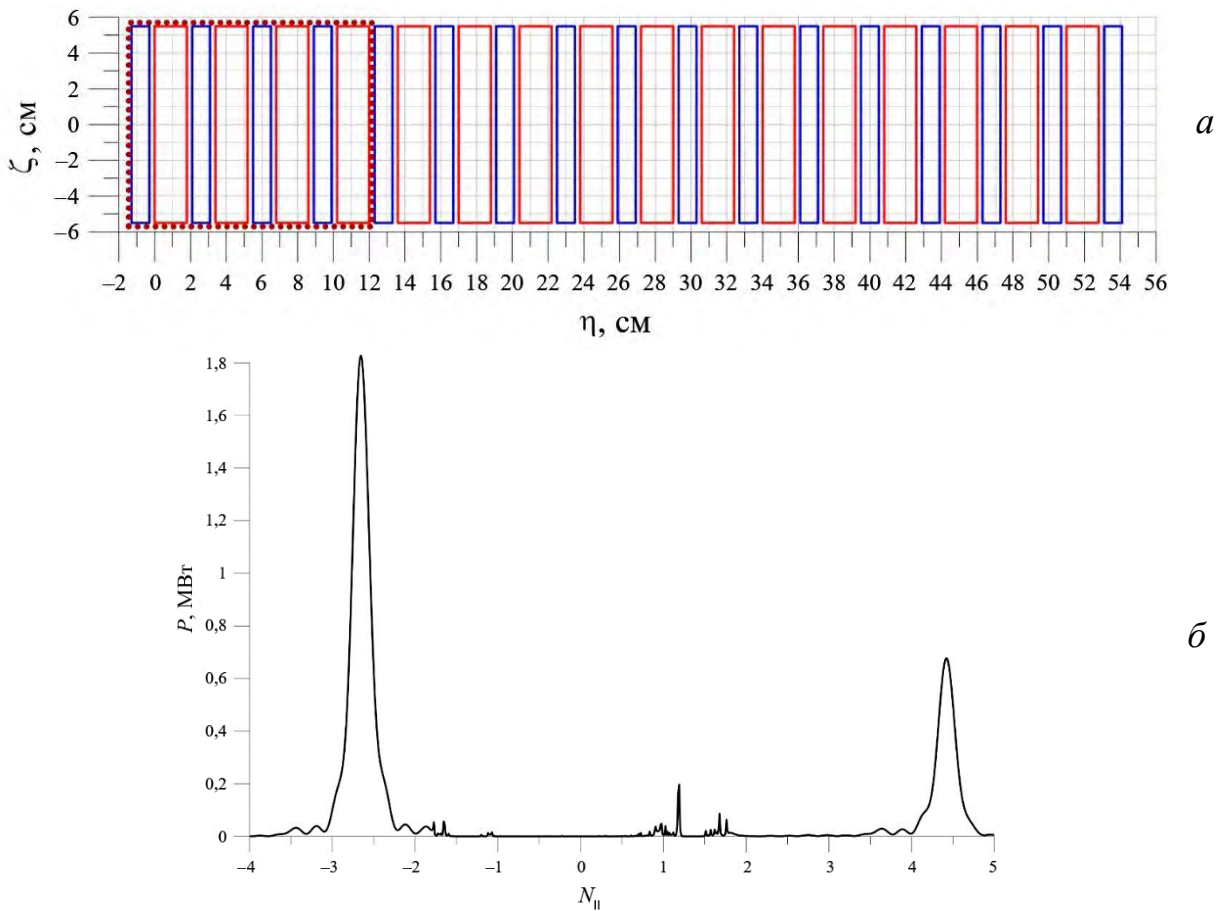


Рис. 2.2.1. Внешний вид на раскрыт РАМ грилла Т-15МД (показан только один ряд волноводов): красным цветом обозначены активные волноводы, синим — пассивные; жирным пунктиром обведён один модуль (а). Спектр продольных замедлений грилла при нулевом сдвиге фаз между модулями: $n_{\text{eb}} = 0,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $\nabla n_e = 0,904 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-4}$, $\alpha_m = -10^\circ$ (б)

Соотношение мощностей в левой и правой частях спектра (соответствующих ко- и контр-току) составляет 65% против 35%. Серия предварительных расчётов с использованием усовершенствованного кода FRTC [50] показывает высокую эффективность генерации НГ-тока лишь при $B_t > 1,4$ Тл. Так, при $B_t = 1,5$ Тл ($I_p = 0,6$ МА, $k = 1,75$, $\delta = 0,35$, $T_e(0) = 4,2$ кэВ, $N_e(0) = 2,5 \cdot 10^{13}$ см⁻³) предсказана генерация $I_{НГ} = 0,95$ МА (при напряжении обхода $U = 0$ В) при вводимой в плазму мощности $P_{НГ} = 1,0$ МВт; и $I_{НГ} = 1,18$ МА ($U = 0$ В) при $P_{НГ} = 1,5$ МВт (т.е. $\Gamma_{НГ} = 1,5$ и $1,2$ соответственно). Данные значения НГ-тока и $\Gamma_{НГ}$ следует рассматривать как верхние значения из-за плохо прогнозируемых аномальных потерь горячих электронов.

Возможные эксперименты на Т-15МД с генерацией тока НГ-волнами при небольшой мощности:

— помощь в создании режимов с обратным широм на стадии подъёма тока и высоким $T_e(0)$ (EAST — $T_e(0)$ до 15 кэВ при одном-двух гиротронах и $P_{НГ} = 2$ МВт [51]). Умеренно оптимистичный прогноз: $I_{НГ} = 0,5$ МА при $\bar{n}_e = 1,5$ и трёх гиротронах при $B_t = 1,5—1,7$ Тл и $T_e(0) = 4—5$ кэВ (эффективность генерации ЭЦ-тока для данного случая взята из [51]);

— при одном гиротроне и вводимой НГ-мощности $P_{НГ} = 1$ МВт исследование глобальных L—H-переходов, подобных полученным на токамаке EAST со скачкообразным удвоением величины τ_E ($I_p = 0,55$ МА, $B_t = 1,7$ Тл, $P_{НГ} = 1$ МВт, $U = 0,5$ В, $f = 2,45$ ГГц и $\Gamma_{НГ} = 1$ [52]), похожих на глобальные L—H-переходы на JET [53] и JT-60U в режимах как с положительным [54], так и с обратным широм [55];

— изучение модификации неустойчивостей и характеристик пьедестала H-моды при различных спектрах НГ-волн;

— изучение синергетики между генерацией тока НГ-волнами и ЭЦ-волнами.

2.2.4. ИЦР-нагрев/генерация тока

На современных установках инжекция в плазму ВЧ-волн в диапазоне частот ионного циклотронного резонанса и его гармоник используется как для нагрева ионной, так и (в определённых условиях) для электронной компоненты плазмы, а также для создания неиндукционного тока [1, 32]. Помимо этого, ионно-циклотронные волны могут быть использованы для улучшения состояния стенок вакуумной камеры и для снижения напряжения пробоя [56].

Условие взаимодействия ионной циклотронной волны с плазмой может быть записано в следующем виде:

$$\omega = p\omega_{cs} + k_{||}v_{||s}, \quad (2.2.7)$$

где p — номер циклотронной гармоники; $s = i, e$; ω_{cs} — циклотронная частота соответствующей группы частиц.

Из-за низкой плотности плазмы в области за сепаратрисой возникает проблема связи волны с плазмой. Один из предлагаемых методов решения этой проблемы — напуск газа на периферии плазменного шнура.

В плазме с одним типом ионов ВЧ-волна не поглощается в районе фундаментального ионно-циклотронного резонанса [56]. Ситуация меняется в плазме с примесями. Так, в плазме, состоящей из дейтерия и водорода, мощность поглощается в районе гибридного резонанса, расположенного между фундаментальными резонансами для дейтерия (ω_{cD}) и водорода (ω_{cH}), частота которого определяется по формуле

$$\omega_{ii}^2 \approx \omega_{cH}\omega_{cD} \frac{n_H\omega_{cD} + n_D\omega_{cH}}{n_H\omega_{cH} + n_D\omega_{cD}}. \quad (2.2.8)$$

При изменении относительной концентрации водорода и дейтерия изменяется положение гибридного резонанса по большому радиусу. Так, в случае малой добавки водорода резонанс располагается вблизи фундаментального резонанса для водорода. Подобный нагрев называют нагревом на малой добавке. Мощность поглощается группой надтепловых ионов примеси, которые затем отдают энергию основной массе электронов и ионов. Энергетичные ионы обычно отдают энергию, в основном, электронам, что приводит преимущественно к электронному нагреву. Отметим, что формирование группы надтепловых ионов со скоростями, многократно превышающими тепловые, способно оказывать сильный стабилизирующий эффект на пилообразные колебания. Применение фазировки антенны позволяет генерировать неиндукционный ток. Этот ток, однако, носит биполярный характер с переворотом направления в районе резонанса,

что приводит к тому, что суммарный генерируемый ток мал. Такой профиль генерируемого тока может быть использован, например, для контроля МГД-неустойчивостей.

Кроме стандартной схемы с малой добавкой (для плазмы с двумя видами ионов), существует ещё так называемый трёхионный сценарий нагрева (для плазмы с тремя видами ионов), для которого характерна высокая эффективность поглощения ВЧ-волны при экстремально низкой концентрации резонансных ионов.

Поглощение быстрой волны на высоких гармониках ионного резонанса возможно при достаточно высокой ионной температуре. Отсутствие эффекта экранирования на высоких гармониках позволяет вести нагрев даже в плазме с ионами одной компоненты. Отмечен синергетический эффект с нагревом инъекцией быстрых атомов. Отметим, что быстрая волна может поглощаться на высокоэнергетичных ионах в районе фундаментального резонанса (из-за доплер-эффекта), например, в плазме с нейтральной инъекцией.

Быстрая волна также способна обеспечить прямой нагрев электронов на эффектах затухания Ландау и времяпролётной магнитной накачки. Обычно прямое поглощение на электронах довольно слабое — от нескольких процентов до 10% за проход, и эффективный нагрев электронов возможен при многопроходном поглощении. Это может быть обеспечено, когда поглощение мощности на каких-либо резонансах в плазме отсутствует или слабо. Температурная зависимость эффекта приводит к пикированию профиля поглощения в центре плазменного шнура. Фазирувка антенны позволяет эффективно генерировать неиндукционный ток. Отмечается синергетический эффект с СВЧ-нагревом.

Широко используется схема, в которой конверсия мод происходит в гибридном ионном слое, когда он относительно удалён от циклотронного слоя. В этом случае в гибридном ионном слое происходит конверсия быстрой волны в бернштейновскую. Такая волна эффективно поглощается на электронах. Эта схема оказывается результативной, когда параметры плазмы подобраны так, что преобладающим механизмом затухания быстрой волны в плазме является конверсия мод. Инжекция волны с асимметричным тороидальным спектром может приводить к генерации тока в режиме конверсии мод. Отмечается синергия нагрева и генерации тока в режиме конверсии мод с нижнегибридным нагревом.

В.Л. Вдовиным было предложено использовать для Т-15МД инновационную концепцию создания неиндукционного тока быстрыми магнитно-звуковыми волнами на высоких (20 и выше) гармониках ионной циклотронной частоты (геликонами) [57]. В условиях экспериментов на установке Т-15МД (тороидальное поле до 2 Тл, рабочий газ — водород) это соответствует диапазону частот от 150 МГц ($f_{сн} = 150$ МГц при $B_T = 0,5$ Тл).

В настоящее время ведётся подготовка комплекса ионно-циклотронного нагрева установки Т-15МД. Предполагается, что он будет обеспечивать подведение к плазме ВЧ-волны суммарной мощностью до 6 МВт при длительности импульса до 30 с. Для этого планируется использовать шесть генераторов колебаний. Рассматривается возможность реализации нагрева и генерации тока ВЧ-волнами в диапазоне в полосе частот от 7 до 70 МГц. Более точно доступный диапазон частот ВЧ-волны будет определён по завершении стадии концептуального проектирования. Анализ применимости различных схем нагрева будет производиться по мере проектирования комплекса. Задача генерации неиндукционного тока с помощью геликонов может быть рассмотрена в перспективе при дальнейшем развитии комплекса ВЧ-нагрева установки Т-15МД.

Предполагаемые экспериментальные задачи. Помимо широкого спектра экспериментальных исследований с использованием ВЧ-волн в ионно-циклотронном диапазоне частот, стоит задача дальнейшего исследования собственно физики нагрева плазмы и генерации тока в различных схемах нагрева:

- изучение эффективности нагрева ионной компоненты плазмы на фундаментальной частоте ионно-циклотронного резонанса и её гармониках;
- изучение эффективности нагрева ионной компоненты плазмы на частоте малой добавки;
- изучение схемы конверсии мод;
- изучение трёхионной схемы нагрева;
- изучение механизма генерации тока быстрыми волнами;
- генерация тока на частоте ионно-циклотронного резонанса;
- изучение синергизма между нагревом/генерацией тока с помощью ионно-циклотронных волн и другими методами нагрева, представленными на установке;

— исследование эффектов, связанных с наличием популяции быстрых частиц, возникающей в результате ИЦР-нагрева.

Важной задачей является обеспечение связи антенны с плазмой в различных экспериментальных условиях.

2.3. ОПТИМИЗАЦИЯ СТАРТА РАЗРЯДА

2.3.1. Оптимизация фазы пробоя

Низкое максимальное значение вихревого электрического поля ($U_{\max} \approx 6$ В) требует оптимизации стадии пробоя. На основании экспериментов, проведённых на Т-10 и ряде зарубежных установок [58—60],

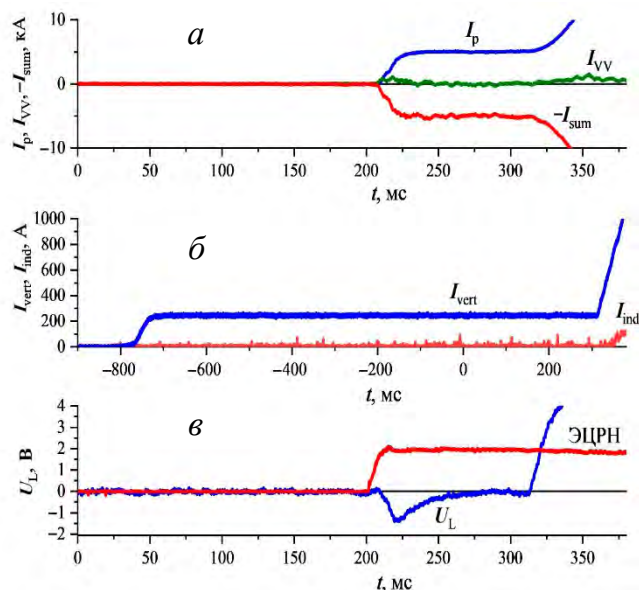


Рис. 2.3.1. Генерация «тока равновесия»: I_p — ток плазмы, I_{VV} — ток по камере, $-I_{sum}$ — суммарный перевернутый (а); I_{vert} — ток обмотки вертикального поля, I_{ind} — ток индуктора (б); U_L — напряжение обхода, ЭЦРН — монитор временного хода работы гиротрона (в)

было принято решение об использовании ЭЦР-предыонизации. Для её реализации в камере создаётся тороидальное магнитное поле, соответствующее выбранной частоте гиротрона, и постоянное вертикальное магнитное поле $B_{\perp} \approx 25—70$ Гс для создания «тока равновесия». Для генерации «тока равновесия» необходимо обеспечить замкнутую обмотку в первичной цепи токамака. На Т-10 эта проблема решалась установкой диода в цепи обмотки «перемагничивания». На Т-15МД «перемагничивание» обеспечивается реверсом в обмотке индуктора, что усложняет генерацию «тока равновесия». Однако выход из этого положения осуществляется за счёт толстой низкоомной ($R \approx 60$ мкОм) камеры токамака. В результате при полях $B_T \approx 1,0—1,1$ Тл и $B_{\perp} \approx 25—40$ Гс были получены «токи равновесия» $\approx 5—8$ кА (рис. 2.3.1).

Осциллограммы, приведённые на рис. 2.3.1, показывают генерацию тока обратного знака в камере токамака.

Оптимизация пробоя требует подбора значений вертикального магнитного поля и начального давления рабочего газа.

2.3.2. Оптимизация фазы роста тока

Основной задачей при организации фазы роста тока является создание потока газа, соответствующего заданной скорости роста тока плазмы. Сложность задачи состоит в том, что требуемый поток состоит из двух частей: потока, создаваемого системой газонапуска, и потока, связанного с взаимодействием плазмы с внутрикамерными элементами.

Следует заметить, что стеночный поток содержит не только водород, сорбированный стенкой и защитными графитовыми тайлами, но также содержащиеся в воздухе азот, кислород и их соединения, связанные с недостаточными мерами по вакуумной очистке (прогрев камеры до 140 °С).

Стеночный поток растёт при увеличении скорости роста тока, и при большом содержании лёгких примесей он превышает допустимый уровень потока газа, обеспечивающий устойчивый рост тока плазмы, таким образом, большое содержание лёгких примесей ограничивает допустимую скорость роста тока плазмы $dI/dt < 200$ кА/с. Для ограничения стеночного потока необходимо в течение всей фазы роста тока обеспечивать его постоянную скорость, центральное положение плазменного шнура и при малой величине стеночного потока обеспечивать требуемый поток из системы газонапуска.

Это требует наладки трёх систем обратной связи:

- по току плазмы;
- по положению плазменного шнура (горизонтальное и вертикальное);
- по электронной концентрации.

2.3.3. Оптимизация старта разряда в режимах с диверторной конфигурацией

После завершения монтажа дивертора и наладки системы управления плазмой основной задачей оптимизации старта разряда будет снижение напряжения обхода при заданной скорости роста тока плазмы за счёт формирования временного хода электронной плотности и формы плазменного шнура, которые обеспечат минимизацию потока примесей в плазму.

Другой задачей оптимизации старта разряда является предотвращение образования пучков ускоренных электронов.

2.4. ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ СРЫВОВ И РАЗВИТИЯ МГД-НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ

2.4.1. Изучение механизмов срывов и методов их контроля и гашения разряда

Развитие магнитогидродинамических (МГД) неустойчивостей и срывов разрядов является одним из основных препятствий для надёжной и экономически эффективной работы стационарного токамака-реактора. Изучение механизмов срывов и предсказание их развития являются важнейшими задачами современных исследований на токамаках. Наряду с этим особое внимание в экспериментах уделяется разработке методов стабилизации МГД-неустойчивостей и задержки срывов, безопасному гашению разрядов и методам восстановления нормальных режимов работы после большого срыва плазмы.

Преыдущие эксперименты показали разнообразные причины развития срыва плазмы, включая, в первую очередь, формирование неустойчивого профиля плотности тока $j(r)$, несбалансированный рост и спад тока плазмы dI_p/dt , нахождение коэффициента запаса устойчивости вблизи резонансов, повышенную плотность и давление плазмы, инжекцию примесей и макрочастиц и рассеянные магнитные поля. В разрядах с вытянутым по вертикали сечением плазмы наиболее опасной является вертикальная неустойчивость, приводящая к резкому смещению шнура по вертикали и наводимым во внутрикамерных элементах токамака неоднородным токам (гало-токам). Такое разнообразие затрудняет предсказание развития срывов плазмы и требует проведения специальных исследований для определения безопасных режимов работы токамака вблизи операционных пределов.

Плазменные режимы с высокими временами удержания энергии ($H_{98(2)} \sim 2$), повышенными значениями газокINETического давления ($\beta_N \sim 3-4$) при средних значениях коэффициента запаса устойчивости ($q_{95} \sim 3-3,5$) активно исследуются в экспериментах на токамаках [1, 61]. Особенностью работы токамака с «улучшенными» параметрами является поддержание устойчивых плазменных разрядов одновременно вблизи нескольких операционных пределов. [1]. В этих условиях даже относительно небольшие возмущения плазмы могут вызывать лавинное развитие разнообразных МГД-неустойчивостей, приводящих как к переходу в режимы с обычным удержанием энергии, так и к окончанию (срыву) плазменного разряда [32, 62—64]. Анализ механизмов зарождения плазменных неустойчивостей и срывов, а также отработка методик их стабилизации в режиме реального времени являются важными направлениями в исследованиях режимов с улучшенными параметрами.

Различные методы управления МГД-возмущениями плазмы используются в исследованиях на токамаках, начиная с первых экспериментов [65, 66]. Наибольшее распространение в настоящее время получили следующие методики управления МГД-возмущениями:

- генерация внешних винтовых и стохастизирующих магнитных полей с использованием дополнительных магнитных обмоток;
- генерация неиндукционных токов в области локализации МГД-возмущений за счёт ввода СВЧ-волн на частотах электронно-циклотронного (ЭЦ) резонанса и ВЧ-волн на частотах нижнегибридного (НГ) резонанса;
- формирование устойчивых профилей тока и давления при дополнительном нагреве плазмы (инжекция нейтральных пучков, нагрев на частотах ЭЦ- и ИЦ-резонансов);

— изменение радиальных распределений скоростей вращения плазмы при инъекции нейтральных пучков и ВЧ-нагреве (ионно-бернштейновские волны);

— изменение функций распределения компонент плазмы (кинетические эффекты, связанные с ускоренными частицами при дополнительном нагреве).

Стабилизация МГД-неустойчивостей обеспечивается, как правило, в импульсном режиме работы токамака, что затрудняет непосредственное использование методик управления в проектах стационарных термоядерных реакторов. Разработка и тестирование в экспериментах систем управления МГД-неустойчивостями, в первую очередь в режиме обратных связей, является важной задачей современных исследований.

Режимы с улучшенными параметрами сопровождаются формированием нестационарных потоков энергии и частиц в периферийных областях плазмы и характеризуются повышенной интенсивностью взаимодействия плазма—стенка. Так, плотность локальных тепловых потоков в базовом квазистационарном режиме ИТЭР (H-мода с ЭЛМ-колебаниями) может достигать 10—20 МВт/м², а в срывах и переходных процессах — 250 МВт/м². Это накладывает серьёзные ограничения на выбор конструкции и материалов элементов первой стенки и дивертора токамака-реактора [1]. В таких условиях развитие МГД-возмущений и срывов плазмы оказывается связанным с физическими процессами в периферийных областях плазмы и с состоянием первой стенки. Поиск новых плазменных режимов с квазистационарным и пространственно-однородным распределением нагрузок на первую стенку и поиск возможных технических решений, уменьшающих вероятность повреждения элементов конструкции плазменных установок, являются ключевыми задачами исследования взаимного влияния МГД-неустойчивостей и процессов взаимодействия плазма—стенка.

Отдельной задачей экспериментов в этих условиях является поиск путей управления в реальном времени потоками энергии и частиц в периферийной плазме, а также обеспечение эффективной откачки продуктов реакций синтеза и ограничение поступления в плазму примесей с высокими Z (Z — зарядовое число химического элемента). Решение таких задач обеспечивается, как правило, с помощью оборудования различных типов диверторных устройств, среди которых «полоидальный дивертор» получил наибольшее распространение и рассматривается в настоящее время в качестве стандартного элемента конструкции токамака-реактора [1]. Это связано, в первую очередь, с высокой эффективностью использования полоидального дивертора в режимах с улучшенными параметрами (H-мода). Тепловой поток из основной плазмы переносится в диверторный объём, главным образом, за счёт теплопроводности в отличие от лимитерной плазмы с доминирующими конвективными потерями. В результате перед поверхностью пластин дивертора происходит снижение температуры плазмы до нескольких эВ, что позволяет значительно снизить эрозию пластин. Дополнительным преимуществом диверторной конфигурации являются пониженное проникновение распыленных частиц в основную плазму и относительно высокое давление нейтральных частиц в диверторном объёме, что обеспечивает повышенную эффективность откачки нейтрального газа и примесей.

В то же время полоидальный дивертор обладает рядом недостатков [67]. В первую очередь это связано с сильной концентрацией тепловых нагрузок в локальных областях диверторных пластин. Несмотря на значительные усилия, предпринимаемые с целью поиска путей уменьшения локализации нагрузок (формирование радиационного дивертора, режим с отрывом (detachment), свипирование X-точки), решение этой проблемы всё ещё требует дополнительных экспериментов. Проблема локализации нагрузок могла бы быть частично разрешена за счёт формирования разветвлённой диверторной конфигурации (Snow-flake divertor), а также при оборудовании одновременно нескольких диверторов. Однако оборудование таких устройств представляется нереальным из-за больших радиальных размеров полоидальных диверторов и необходимости расположения дополнительных внутрикамерных обмоток в области повышенных радиационных полей. В реальных экспериментах с вытянутой по вертикали плазмой, как правило, используются однонулевые и в редких случаях двухнулевые диверторные конфигурации.

Одной из важнейших задач является отработка технологий стационарного поддержания оптимальных параметров периферийной плазмы (включая проблему радиационного дивертора), не приводящих к потере устойчивости, за счёт контролируемого многоклапанного напуска газов, инъекции макрочастиц и

создания периферийных стохастизирующих слоёв. Указанные методы воздействия в комбинации с возможным распылением мишеней лазерным излучением в диверторе могут обеспечить также контролируемое инициирование срыва плазмы и остановки разряда.

Важной задачей исследований срывов является изучение условий формирования пучков ускоренных электронов, развивающихся при перезамыкании магнитных силовых линий и за счёт продольных электрических полей, индуцируемых при резком охлаждении плазмы в момент энергетического коллапса. Возможные повреждения внутрикамерных элементов токамака при воздействии пучков ускоренных электронов требуют отработки безопасных методов управляемого гашения разряда и подавления электронных пучков.

2.4.2. Изучение механизмов развития МГД-неустойчивостей. Разработка алгоритмов контроля МГД-неустойчивостей

Задачи экспериментов по исследованию и стабилизации МГД-возмущений и срывов плазмы в современном токамаке должны объединять весь комплекс систем диагностики и управления плазмой, включая системы генерации винтовых магнитных полей с помощью внутрикамерных обмоток, дополнительный локальный СВЧ-нагрев плазмы и поддержание оптимального профиля тока с помощью неиндукционных методов (СВЧ, нижнегибридные волны) и оптимального профиля вращения плазмы при инъекции быстрых атомов. Одновременно эксперименты должны быть направлены на поиск оптимального управления взаимодействием плазма—стенка для предотвращения поступления примесей в высокотемпературную плазму.

Установка токамак Т-15МД может обеспечить экспериментальную базу для исследований срывов плазмы при оборудовании полномасштабного комплекса диагностик и систем дополнительного нагрева. В первую очередь это относится к исследованию возможностей стационарной работы вблизи операционных пределов в режимах с улучшенными параметрами плазмы и анализу оптимальных условий взаимодействия плазма—стенка. С этой точки зрения эксперименты, предлагаемые на токамаке Т-15МД, могут представлять интерес не только для исследования физических механизмов устойчивости и удержания плазмы, но и для отработки отдельных элементов технологий токамака-реактора:

- управление МГД-неустойчивостями за счёт оптимизации профилей тока и давления как путь к увеличению β_N и времени удержания τ_E ;
- возможность реализации режимов улучшенного удержания с внутренним и внешним транспортным барьером за счёт управления МГД-неустойчивостями (в том числе ЭЛМ-колебаниями);
- оптимизация влияния периферийной плазмы на глобальные характеристики устойчивости плазменного разряда. Поиск плазменных режимов с оптимальным распределением тепловых нагрузок на первую стенку;
- отработка элементов и алгоритмизация систем обратных связей для получения устойчивых стационарных разрядов в режимах с улучшенными параметрами;
- отработка элементов систем дистанционного обслуживания для оперативного контроля первой стенки в режимах со срывом плазмы и возможный оперативный ремонт внутрикамерных элементов;
- отработка систем управления топливным циклом, включая оптимизацию систем ввода топлива и устранения накопления веществ, сорбированных в камере токамака пылевыми частицами, возникающими в процессе эрозии контактных поверхностей;
- отработка систем гашения разряда и решение проблем непрерывного ускорения электронов;
- оптимизация магнитной конфигурации токамака, в том числе с использованием внешних обмоток для компенсации рассеянных полей и внутрикамерных обмоток для контроля МГД-возмущений при высоком давлении (RWM);
- развитие новых плазменных и технологических диагностических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗДЕЛУ 2

1. **Progress** in the ITER Physics Basis. — Nucl. Fusion, 2007, vol. 47, S404—S413.
2. **Valovič M., Akers R., Cunningham G. et al.** Scaling of H-mode energy confinement with I_p and B_T in the MAST spherical tokamak. — Nucl. Fusion, 2009, vol. 49, p. 075016.

3. **Мирнов С.В.** Имеют ли сферические токамаки термоядерное будущее? — *Физика плазмы*, 2012, т. 38, № 12, с. 1011—1021.
4. **Hatch D.R., Pueschel M.J., Jenko F. et al.** Origin of Magnetic Stochasticity and Transport in Plasma Microturbulence. — *Phys. Rev. Lett.*, 2012, vol. 108, p. 235002, doi: 10.1103.
5. **Grierson B.A., Chrystal C., Haskey S.R. et al.** Main-ion intrinsic toroidal rotation across the ITG/TEM boundary in DIII-D discharges during ohmic and electron cyclotron heating. — *Physics of Plasmas*, 2019, vol. 26, p. 042304; doi: 10.1063/1.5090505.
6. **Rice J.E., Citrin J., Cao N.M. et al.** Understanding LOC/SOC phenomenology in tokamaks. — *Nucl. Fusion*, 2020, vol. 60, 105001 (20 p.).
7. **Kwon O.J., Diamond P.H., Wagner F. et al.** A study of runaway electron confinement in the ASDEX tokamak. — *Nucl. Fusion*, 1988, vol. 28, № 11, p. 1931—1943.
8. **Vershkov V.A., Buldakov M.A., Subbotin G.F. et al.** 3D structure of density fluctuations in the T-10 tokamak and new approach for current profile estimation. — *Nucl. Fusion*, 2019, vol. 59, 066021 (14 p.).
9. **Krämer-Flecken A., Soldatov S., Xu Y. et al.** Long-range correlation properties of quasi-coherent modes at TEXTOR. — *New Journal of Physics*, 2017, vol. 17, 073007, doi: 10.1088/1367-2630/17/7/073007.
10. **Stroth U., Fuchert G., Beurskens M.N.A. et al.** Stellarator-tokamak energy confinement comparison based on ASDEX Upgrade and Wendelstein 7-X hydrogen plasmas. — *Nucl. Fusion*, 2021, vol. 61, 016003 (9 p.).
11. **Osipenko M.B.** Transport and turbulence studies in the T-10 tokamak. — *Nucl. Fusion*, 2003, vol. 43, p. 1641.
12. **Vershkov V.A., Shelukhin D.A., Soldatov S.V. et al.** Summary of experimental core turbulence characteristics in ohmic and electron cyclotron resonance heated discharges in T-10 tokamak plasmas. — *Nucl. Fusion*, 2005, vol. 45, S203.
13. **Kramer-Flecken A., Dreval V., Soldatov S. et al.** Turbulence studies with means of reflectometry at TEXTOR. — *Nucl. Fusion*, 2004, vol. 44, p. 1143.
14. **Vershkov V.A., Tudisco O., De Benedetti M. et al.** First results of turbulence measurements in FTU tokamak with heterodyne correlation reflectometry. — In: *Proc. 28th EPS Conf. Controlled Fusion Plasma Physics. Madeira, Portugal, 18—22 June 2001 (ECA)*, vol. 25A, P1.011; <http://epsppd.epfl.ch/Madeira/html/authors/nav/AutV02fr.html>.
15. **Litaudon X.** Internal transport barriers: critical physics issues? — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2006, vol. 48 A1; doi: 10.1088/0741-3335/48/5A/S01.
16. **Takenaga H., Higashijima S., Oyama N. et al.** Relationship between particle and heat transport in JT-60U plasmas with internal transport barrier. — *Nucl. Fusion*, 2003, vol. 43, p. 1235.
17. **Stober J., Fuchs C., Gruber O. et al.** Dependence of the density shape on the heat flux profile in ASDEX Upgrade high density H modes. — *Nucl. Fusion*, 2001, vol. 41, p. 1535.
18. **Hoang G.T., Bourdelle C., Pégourié B. et al.** Particle Pinch with Fully Noninductive Lower Hybrid Current Drive in Tore Supra. — *Phys. Rev. Lett.*, 2003, vol. 90, 55002.
19. **Garbet X., Mantica P., Angioni C. et al.** Physics of transport in tokamaks. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2004, vol. 46, B557.
20. **Яньков В.В.** Пинчевание объясняет механизм турбулентных переносов в токамаке. — *Письма в ЖТЭФ*, 1994, т. 60, с. 169.
21. **Doyle E.J., Casper T.A., Burrell K.H. et al.** Core and Edge Aspects of Quiescent Double Barrier Operation on DIII-D, with Relevance to Critical ITB Physics Issues. — In: *Proc. 19th Intern. Conf. on Fusion Energy. Lyon, France, 2002.* — Vienna: IAEA; CD-ROM file IAEA-CN-94/ EX/ C3-2.
22. **Vershkov V.A., Shelukhin D.A., Subbotin G.F. et al.** Density fluctuations as an intrinsic mechanism of pressure profile formation. — *Nucl. Fusion*, 2015, vol. 55, 063014; doi: 10.1088/0029-5515/55/6/063014.
23. **Clairet F., Sirinelli A., Meneses L. et al.** Plasma turbulence measured with fast frequency swept reflectometry in JET H-mode plasma. — *Nucl. Fusion*, 2016, vol. 56, 126019, doi: 10.1088/0029-5515/56/12/126019.
24. **Marinoni A., Sauter O., Coda S. et al.** A brief history of negative triangularity tokamak plasmas. — *Reviews of Modern Plasma Physics*, 2021, vol. 5, № 6; <https://doi.org/10.1007/s41614-021-00054-0>.
25. **Han W., Offeddu N., Golfopoulos T. et al.** Suppression of first-wall interaction in negative triangularity plasmas on TCV. — *Nucl. Fusion*, 2021, vol. 61, 034003 (6 p.).
26. **Marinoni A., Austin M.E., Candy J.C. et al.** Nonlinear gyrokinetic modelling of high confinement negative triangularity plasmas. — *Nucl. Fusion*, 2024, vol. 64, 086045; <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ad5a1c>.
27. **Camenen Y., Pochelon A., Behn R. et al.** Impact of plasma triangularity and collisionality on electron heat transport in TCV L-mode plasmas. — *Nucl. Fusion*, 2007, vol. 47, p. 510—516.
28. **Merlo G., Huang Z., Marini C. et al.** Nonlocal effects in negative triangularity TCV plasmas. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2021, vol. 63, 044001 (12 p.).
29. **Mantsinen M.J., Mayoral M.L., Kiptily V.G. et al.** Alpha-Tail Production with Ion-Cyclotron-Resonance Heating of 4He-Beam Ions in JET Plasmas. — *Phys. Rev. Lett.*, 2002, vol. 88, № 10, p. 105002-1—105002-4; doi: 10.1103/PhysRevLett.88.105002 S.

30. **Jacquinot J., and the JET team.** Deuterium-tritium operation in magnetic confinement experiments: results and underlying physics. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 1999, vol. 41, p. A13; doi: 10.1088/0741-3335/41/3A/002.
31. **Bessenrodt-Weberpals M., Wagner F., Gehre O. et al.** The isotope effect in ASDEX. — *Nucl. Fusion*, 1993, vol. 33, p. 1205.
32. **ITER Phys. Bas.** — *Nucl. Fusion*, 1999, vol. 39, p. 2183.
33. **Кадомцев Б.Б.** Токамаки и анализ размерностей. — *Физика плазмы*, 1975, т. 1, вып. 4, с. 531—535.
34. **Высокочастотный** нагрев плазмы. — В сб.: *Материалы Всесоюзного совещания. Горький, 21—25 июня 1982 г.* — Горький: Институт прикладной физики АН СССР, 1983.
35. **Esipchuk Yu.V.** Investigation of ECCD on the first and second harmonics ECR. — *Plasma Phys. Control. Fus.*, 1995, vol. 37, A267; doi: 10.1088/0741-3335/37/11A/018.
36. **Erckmann V., Gasparino U.** Electron cyclotron resonance heating and current drive in toroidal fusion plasmas. — *Plasma Phys. Control. Fus.*, 1994, vol. 36, p. 1869—1962.
37. **Колесниченко Я.И., Параил В.В., Переверзев Г.В.** Генерация безындукционного тока в токамаке. — В сб.: *Вопросы теории плазмы. Вып. 17. Под ред. Б.Б. Кадомцева.* — М.: Энергоатомиздат, 1989.
38. **Хвостенко П.П., Бондарчук Э.Н., Кавин А.А. и др.** Расчеты уставок в схемах защит и блокировок системы электропитания электромагнитных обмоток и длительности плазменных разрядов в токамаке Т-15МД. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2020, т. 43, вып. 3, с. 60.
39. **Wallace G.M., Poli F., Chilenski M.A. et al.** LHCD during current ramp experiments on Alcator C-Mod. — *EPJ Web of Conf.*, 2017, vol. 157, p. 03063; doi: 10.1051/epjconf/201715703063.
40. **JET Progress.** Rep. 1994 EUR-JET PR12.
41. **Neudatchin S.V., Parail V.V., Pereverzev G.V. et al.** Influence of toroidal effects on propagation of lower-hybrid waves in plasma. — In: *12-th Eur. Conf. on Ctrl. Fus. and Pl. Phys. Budapest, 1985*, vol. 2, p. 212—215.
42. **Hillairet J., Voyer D., Frincuet B. et al.** Modeling of lower hybrid antennas using the ALOHA code and comparisons with Tore Supra experiments. — *Fusion Eng. and Design*, 2009, vol. 84, p. 953—955.
43. **Irzak M.A., Shcherbinin O.N.** Theory for waveguide antennas for plasma heating and current drive. — *Nucl. Fusion*, 1995, vol. 35, p. 1341—1356.
44. **Wang M., Liu L., Zhao L.M. et al.** Improvement of lower hybrid current drive systems for high-power and long-pulse operation on EAST. — *Nucl. Eng. and Technology*, 2022, vol. 54, p. 4102.
45. **Аликаев В.В., Гвоздииков Ю.В., Дятлов И. и др.** Исследование генерации тока нижнегибридными волнами в токамаке Т-7. — *Физика плазмы*. 1985, т. 11, вып. 1, с. 53.
46. **Neudatchin S.V., Pereverzev G.V.** Numerical simulation of current drive by lower hybrid waves in T-7 tokamak. — In: *Proc. 15th EPS Conf. on Control. Fus. and Pl. Heating. Dubrovnik, 1988*, vol. 12B, part II, p. 847.
47. **Неудачин С.В., Переверзев Г.В.** Численное моделирование генерации тока НГ-волнами в токамаке Т-7: Препринт ИАЭ-4642/6. — М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1988.
48. **Goniche M., Artaud J.F., Basiuk V. et al.** Lower Hybrid Current Drive Efficiency on Tore Supra and JET. EFDA-JET-PR(05)01/04 2005.
49. **Kurskiev G.S., Minaev V.B., Sakharov N.V. et al.** Confinement, heating and current drive in spherical tokamak GLOBUS-M2 with high magnetic field. — In: *Proc. 29-th Fus. Energy Conf. London, 2023. IAEA-CN-316/1638.*
50. **Saveliev A.N.** — *EPJ Web of Conf.*, 2017, vol. 157, p. 03045.
51. **Li M., Xu H., Wang X. et al.** Plasma heating and improvement of lower hybrid current drive efficiency by electron cyclotron waves on EAST. — *EPJ Web of Conf.*, 2023, vol. 277, p. 02003.
52. **Xu G.S., Wang H.Q., Xu M. et al.** Dynamics of L-H transition and I-phase in EAST. — *Nucl. Fusion*, 2014, vol. 54, 103002.
53. **Cordey J.G., Muir D.G., Neudatchin S.V. et al.** The time behaviour of the thermal conductivity during L-H and H-L transitions in JET. — *Plasma Phys. Control. Fus.*, 1994, vol. 36, A267.
54. **Neudatchin S.V., Takizuka T., Shirai H. et al.** Time Behavior of Heat Diffusivity during L—H—L Transitions in JT-60U. — *Japan J. Appl. Phys.*, 1996, vol. 35, p. 3595; doi: 10.1143/JJAP.35.3595.
55. **Neudatchin S.V., Takizuka T., Shirai H. et al.** Dynamics and interplay of L—H—L transitions and ITB events in reversed shear plasmas with internal barriers in JT-60U. — *Plasma Phys. Control. Fus.*, 2002, vol. 44, A383—389.
56. **Becoulet A.** Heating and current drive regimes in the ion cyclotron range of frequency. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 1996, vol. 38, A1; doi: 10.1088/0741-3335/38/12A/002.
57. **Вдовин В.Л.** Генерация тока геликонами и НГ-волнами в современных токамаках и реакторах ИТЭР и ДЕМО. Сценарии, моделирование, антенны. — *Физика плазмы*, 2013, т. 39, № 2, с. 115.
58. **Kirneva N.A., Shelukhin D.A., Borschevskij A.A. et al.** Dependences of ITB characteristics on plasma parameters in T-10 reversed shear plasmas. — In: *Proc. of 34rd EPS Conf. on Plas. Phys. Warsaw, 2007, ECA*, vol. 31F, P-1.164.
59. **Leuer J.A., Cunningham G., Muelleret D. et al.** Solenoid-free startup experiments in DIII-D. — *Nucl. Fusion*, 2011, vol. 51, 063038 (11 p.).

60. **Jackson G.L., Humphreys D.A., Hyatt A.W. et al.** Noninductive plasma initiation and startup in the DIII-D tokamak. — Nucl. Fusion, 2011, vol. 51, 083015 (9 p.).
61. **Taylor T.S.** Physics of Advanced Tokamaks. — Plasma Phys. Contr. Fusion, 1997, vol. 39, p. B47—B74.
62. **Schuller F.C.** Disruptions in tokamaks. — Plasma Phys. Contr. Fusion, 1995, vol. 37, P.A135; doi: 10.1088/0741-3335/37/11A/009.
63. **Мирнов С.В., Семенов И.Б.** Исследование макроскопических неустойчивостей плазменного шнура в токамаке. — Plasma Phys. and Control. Nucl. Fus. Res. (IAEA, Vienna), 1971, vol. II, p. 401.
64. **McGuire K., Kugel H., La Haye R.J. et al.** Workshop on Feedback Stabilization of MHD Instabilities. PPPL, Princeton University, 1997, PPPL-3249.
65. **Мирнов С.В.** Физические процессы в плазме токамака. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
66. **Morris A.W., Hender T.C., Hugill J. et al.** Feedback stabilization of disruption precursors in a tokamak. — Phys. Rev. Lett., 1990, vol. 64, p. 1254—1257.
67. **Stangeby P.C., McCracken G.M.** Plasma boundary phenomena in tokamaks. — Nucl. Fusion, 1990, vol. 30, p. 1225; doi: 10.1088/0029-5515/30/7/005.

РАЗДЕЛ 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМА—СТЕНКА И ФИЗИКИ ДИВЕРТОРА

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения проектирования и создания гибридного термоядерного реактора — термоядерного источника нейтронов ТИН требуется провести цикл экспериментальных исследований и опытно-конструкторских работ, направленных на обоснование выбора материалов и охлаждаемых конструкций теплозащитной облицовки первой стенки и дивертора, стационарной эксплуатации в режимах H-моды с ожидаемыми квазистационарной нагрузкой более 10 МВт/м^2 и экстремально высокими нагрузками при неустойчивостях типа ЭЛМ (ELM — edge localized mode) и других переходных процессах. На основе имеющихся результатов экспериментов на современных токамаках, разработок для первой стенки и дивертора ИТЭР, а также экспериментов на плазменных стендах (см. [1, 2]) всё еще нет однозначных выводов и рекомендаций, которые могут быть положены в разработку конструкции реакторной камеры и режимов эксплуатации термоядерного реактора. Значительную часть таких результатов можно получить, выполнив исследования на установке токамак Т-15МД.

Цель работ по дивертору и первой стенке на токамаке Т-15МД заключается в исследовании периферийной и диверторной плазмы в режимах с улучшенным удержанием плазмы (H-мода) с различной диверторной конфигурацией магнитного поля, испытаниях материалов-кандидатов и охлаждаемых конструкций теплозащитной облицовки первой стенки и дивертора с высокими нагрузками, в том числе при квазистационарных (более 10 МВт/м^2) и экстремальных пиковых нагрузках при переходных процессах, включая срывы и ELM.

Основные задачи исследований направлены на изучение физики дивертора:

— исследование диверторных конфигураций магнитного поля и влияния конструкции дивертора («открытый» и «закрытый» дивертор) на режимы работы токамака;

— управление диверторной плазмой — режим работы дивертора с полным и частичным отрывом плазмы от стенки (детачмент), исследование влияния напуска газа (азота, неона) на детачмент и распределение тепловых нагрузок в диверторе;

— испытание систем активного охлаждения дивертора в задачах стационарной работы токамака;

— исследование влияния материалов дивертора (углерод, вольфрам, литий) на работу дивертора и поступление примесей в основную плазму;

— исследования с жидкометаллическими охлаждаемыми компонентами дивертора (литий, олово).

Задачи, направленные на исследования обеднённого слоя пристеночной плазмы (СОЛ (SOL) — scrape-off-layer) и взаимодействия плазмы со стенкой:

— исследование переноса плазмы в пристеночной зоне СОЛ и диверторе токамака, получение скейлинга для ширины СОЛ, оценка распределения нагрузок на элементы первой стенки;

— влияние боронизации поверхности вакуумной камеры на режимы, разработка технологии достижения эффекта непрерывного/возобновляемого покрытия с бором в квазистационарном импульсе;

— получение и исследование длинного импульса, оптимизация взаимодействия плазма—стенка;

— исследование дуговых процессов на внутрикамерных компонентах, обращённых к плазме, в том числе на антеннах ВЧ-нагрева плазмы, влияния перегрева поверхности и критического увеличения термоэмиссии материалов на режим пристеночной плазмы. Исследование влияния дуговых процессов на МГД-активность.

Одной из основных функций дивертора токамака, кроме утилизации энергии частиц, поступающих из центральной области токамака, является обеспечение вакуумной откачки. Для эффективного управления плотностью разряда, особенно в разрядах с дополнительным инжекционным нагревом (дополнительной центральной подпиткой плазмы частицами) или в случае пеллет-инжекции, скорость откачки должна

не менее чем на порядок превышать скорость увеличения плотности рабочего газа в камере. Традиционная система вакуумной откачки Т-15МД, построенная на турбомолекулярных насосах и криопанелях, расположенных под токамаком в подвальном помещении, не может обеспечить необходимую скорость вакуумной откачки, достаточную для эффективного управления плотностью плазмы в экспериментах с инжекционным нагревом пучками быстрых атомов. Для увеличения скорости откачки в область нижнего дивертора Т-15МД будет установлена кольцевая конструкция криогенной откачки, на порядки увеличивающая скорость откачки в сценариях с диверторной конфигурацией. Таким образом, к задачам работ по дивертору также относятся разработка и эксплуатация системы криогенной откачки, расположенной внутри вакуумной камеры токамака.

3.1. КОНСТРУКЦИЯ ДИВЕРТОРА И ПЕРВОЙ СТЕНКИ Т-15МД

На начальном этапе работы токамака Т-15МД, пока мощность дополнительного нагрева не достигла проектных значений и выполняются работы по наладке основных систем установки, нет необходимости использовать оптимизированный дивертор «закрытого» типа. Более того, «открытый» дивертор позволяет проводить эксперименты одинаково эффективно в режимах с различными диверторными конфигурациями магнитного поля, включая конфигурации с отрицательной треугольностью. В базовом варианте конструкции первой стенки и дивертора предусмотрено водяное охлаждение верхнего и нижнего дивертора с графитовой облицовкой и неохлаждаемыми графитовыми пластинами (тайлами) первой стенки. Общий

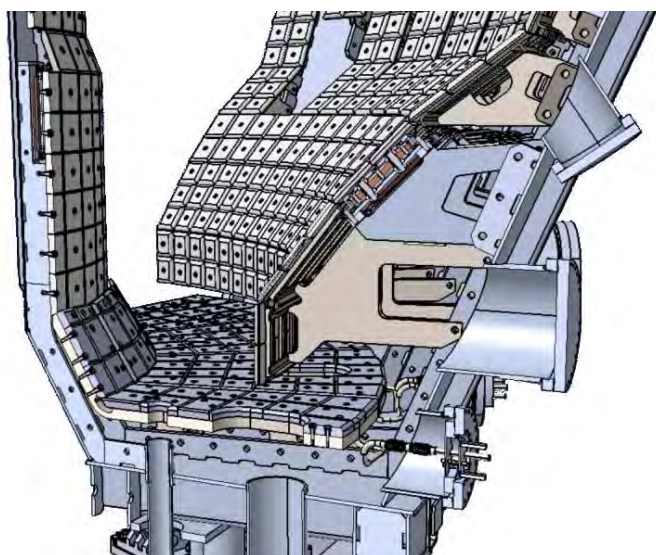


Рис. 3.1.1. Общий вид конструкции нижнего дивертора в токамаке Т-15МД

вид конструкции нижнего дивертора показан на рис. 3.1.1. Все 16 секций нижнего и верхнего диверторов L-типа имеют один контур охлаждения с выводом трубок в индивидуальные горизонтальные диверторные патрубки. В каждой секции дивертора предусмотрен независимый омический прогрев, позволяющий нагревать секции до 400 °С. Для исключения перегрева вакуумных фланцев, через которые проходят кирскабели омического прогрева, в них дополнительно выполнен контур водяного охлаждения.

Графитовые тайлы первой стенки защищают поверхность стальной вакуумной камеры и витки пассивной стабилизации от воздействия плазмы. По внутреннему обходу камеры (сторона сильного магнитного поля) тайлы крепятся на вертикальные, приваренные к камере рёбра жёсткости. По внешнему обходу камеры (сторона слабого магнитного поля) и вокруг экваториальных патрубков тайлы закреплены на стальных кронштейнах, прикрученных к вертикальным рёбрам вакуумной камеры. Такой способ установки графитовых тайлов позволяет в будущем изменять геометрию первой стенки заменой кронштейнов без модификации вакуумной камеры токамака.

В графитовой облицовке дивертора и первой стенки предусмотрены окна для регистрации сигналов из плазмы через диагностические патрубки. При необходимости удалением отдельных тайлов, формирующих первую стенку, могут быть изготовлены дополнительные диагностические отверстия.

3.2. ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА Т-15МД В РЕЖИМАХ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ НАГРЕВОМ ПЛАЗМЫ

В Т-15МД будет использоваться комбинация различных методов дополнительного нагрева: нагрев методом электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), нижнегибридный (НГ) нагрев, нагрев нейтральным пучком (НП) максимальной мощностью 24 МВт [3]. Работа с высокой мощностью дополнительного

нагрева представляет серьёзный вызов для установки, ограничивая окно рабочих параметров дивертора. С одной стороны, возникает необходимость поддерживать высокую мощность потерь на излучение из диверторного объёма и высокую плотность плазмы в диверторе, чтобы снизить нагрузку на приёмные пластины дивертора и обеспечить работу в режиме частичного детачмента [4]. С другой стороны, максимально допустимое количество излучающей примеси в пристеночной плазме ограничено предельно допустимым уровнем загрязнения центральной плазмы, а плотность плазмы ограничена пределом МГД-устойчивости разряда [5]. Кроме того, дивертор должен обеспечивать достаточно высокое давление газа на входе в систему откачки, позволяющее выводить продукты реакции и управлять плотностью плазмы [6].

Для определения и оптимизации окна рабочих параметров диверторной плазмы при проектировании токамаков и планировании экспериментов используются двумерные транспортные расчётные коды [7—9], такие как EDGE2D [10], UEDGE [11], SOLEDGE2D [12], SOLPS [13]. Для токамака Т-15МД проведено предсказательное моделирование работы дивертора в режиме с высокой вложенной мощностью с помощью кода SOLPS4.3 [7]. Был использован скейлинг [14] для длины экспоненциального спада теплового потока в экваториальной плоскости внешнего обвода λ_q при низкой плотности плазмы пристеночного слоя в режиме Н-моды [14] $\lambda_q = 1,5$ мм. Коэффициенты аномального поперечного переноса: $\kappa_{\perp}^{(e,i)} = 2 \text{ м}^2/\text{с}$, $D_{\perp} = 0,5 \text{ м}^2/\text{с}$. Полученные результаты позволили оценить ширину рабочего окна, эффективность откачки и, следовательно, возможности управления плотностью разряда при работе с высокой мощностью дополнительного нагрева. Это позволило выработать рекомендации по оптимизации работы с высокой вложенной мощностью, выявить необходимость установки перегородок (так называемых баффлов) в пространстве между первой стенкой и вакуумной камерой, позволяющих увеличить скорость откачки в несколько раз. В режимах с высокой мощностью дополнительного нагрева необходимо предусмотреть газонапуск лёгкой примеси (азот или неон) в диверторную область, поскольку это обеспечит снижение пиковых нагрузок на диверторные пластины до приемлемого уровня.

С помощью кода SOLPS были рассчитаны зависимости пиковой нагрузки на внутреннюю и внешнюю пластины токамака Т-15МД от плотности плазмы на сепаратрисе (рис. 3.2.1).

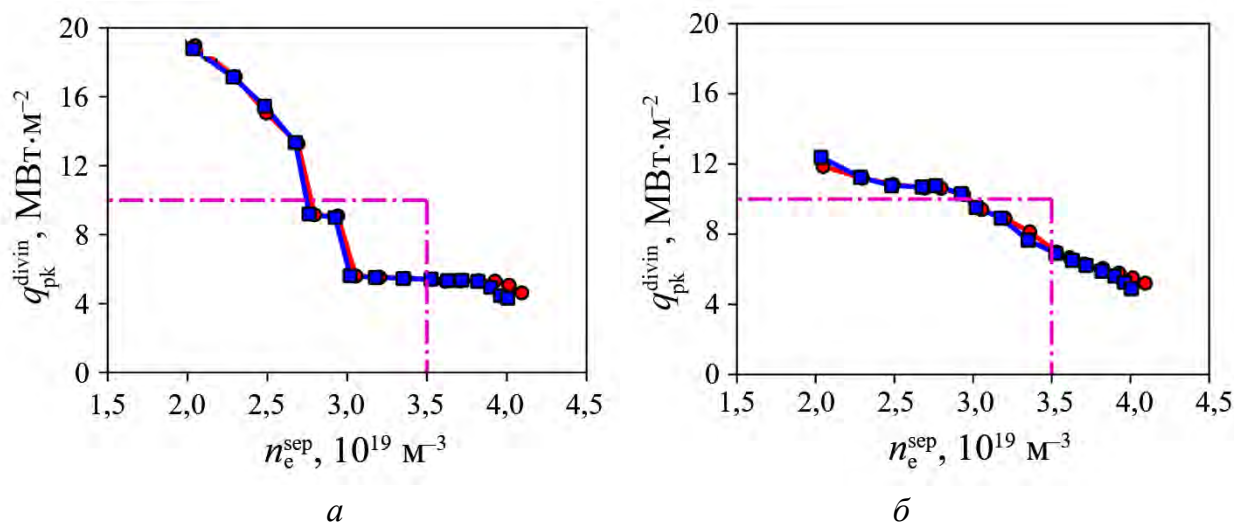


Рис. 3.2.1. Зависимости пиковой тепловой нагрузки $q_{\text{pk}}^{\text{divin}}$ на диверторные пластины в токамаке Т-15МД от плотности плазмы на сепаратрисе в конфигурации с открытым дивертором (●) и с баффлами (перегородками) (■): а — на внутреннюю пластину; б — на внешнюю пластину

На этих рисунках штрих-пунктирными линиями указаны границы рабочего режима (окна) токамака, ограниченного с одной стороны максимально допустимой нагрузкой на диверторные пластины $10 \text{ МВт}/\text{м}^2$ (такая нагрузка принята в проекте ИТЭР с углеродным дивертором [15]), с другой — максимальной плотностью плазмы на сепаратрисе, которая не должна превышать 50% от предела Гринвальда [15, 16]. Видно, что определённый таким образом рабочий режим ограничен, в первую очередь, более нагруженным внешним дивертором и оказывается очень узким, $3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3} < n_e^{\text{sep}} < 3,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

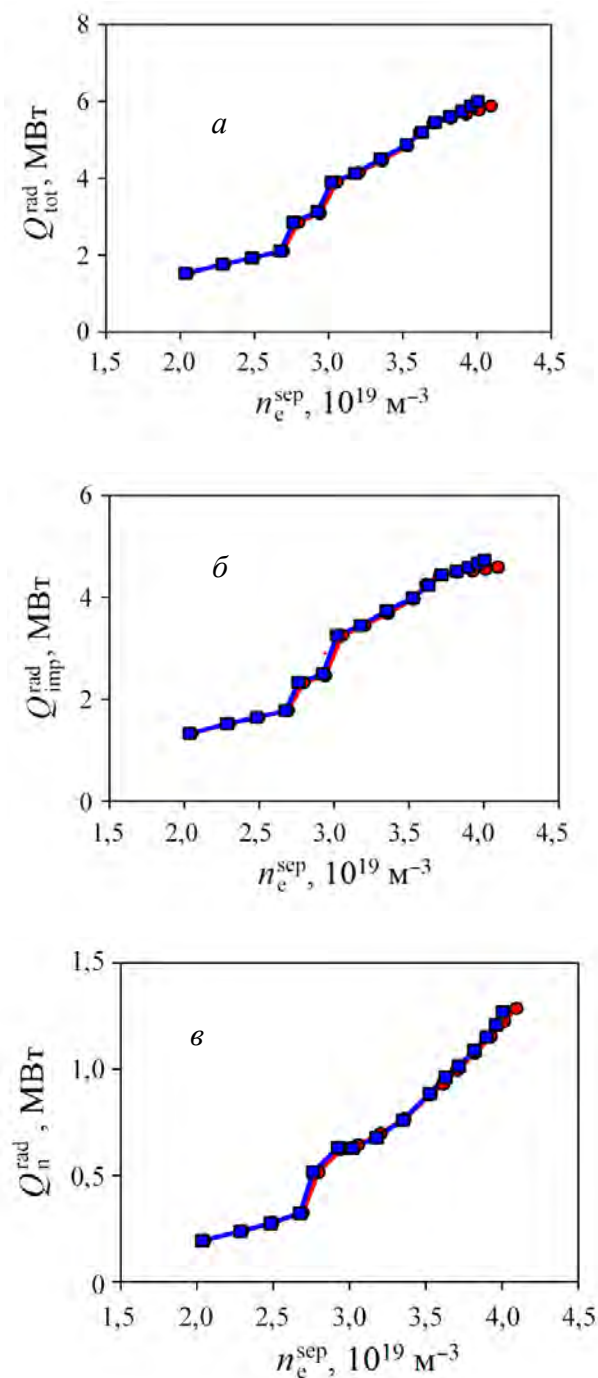


Рис. 3.2.2. Зависимости потери тепла на излучение $Q_{\text{tot}}^{\text{rad}}$ в токамаке Т-15МД от плотности плазмы на сепаратрисе в конфигурации с открытым дивертором (●) и с баффлами (перегородками) (■): полные потери на излучение из пристеночного слоя (а), потери на излучение примеси углерода (б), атомарного водорода (в)

При этом полные потери на излучение $Q_{\text{tot}}^{\text{rad}}$ (рис. 3.2.2) в границах диапазона рабочих параметров составляют $\sim 50\%$ от P_{SOL} . Потери на излучение атомарного водорода не превосходят 1 МВт и в реальности будут даже меньше вследствие запираания излучения водорода в плотной диверторной плазме [17], а большая часть потерь приходится на примесь углерода, поступающую в разряд в результате эрозии первой стенки. При этом известно, что в токамаках с углеродной стенкой возможно достичь переизлучения $\sim 75\%$ P_{SOL} на периферии без угрозы развития радиационно-конденсационной неустойчивости типа MARFE [18].

Поэтому в режимах с высокой мощностью дополнительного нагрева планируется инжекция лёгкой примеси в диверторную область для расширения окна рабочих параметров дивертора и обеспечения сохранности диверторных пластин. В качестве примеси целесообразно использовать азот, хорошо зарекомендовавший себя на машинах сопоставимого размера [19]. Напуск примеси приведёт к увеличению эффективного заряда Z_{eff} плазмы в области удержания. На рис. 3.2.3 видно, что без напуска примеси Z_{eff} не превышает 2 в области рабочего окна, что указывает на наличие достаточного запаса по этому параметру.

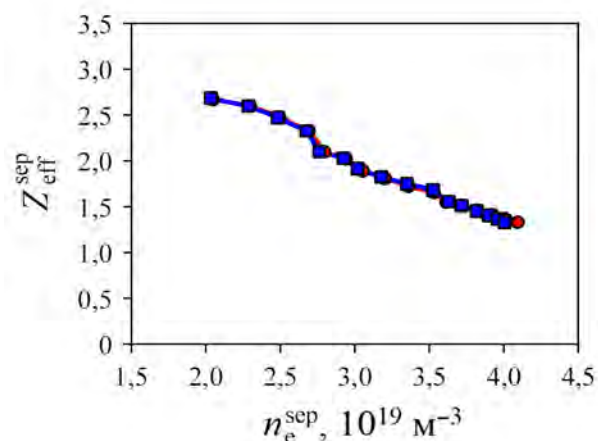


Рис. 3.2.3. Зависимость эффективного заряда плазмы на сепаратрисе $Z_{\text{eff}}^{\text{sep}}$ в токамаке Т-15МД от плотности плазмы в конфигурации с открытым дивертором (●) и с баффлами (перегородками) (■)

3.3. ПЕРЕХОД ОТ УГЛЕРОДНОЙ К МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЕРВОЙ СТЕНКЕ И ДИВЕРТОРУ

Важными вопросами являются выбор и обоснование материалов диверторных пластин и стенки токамака-реактора, в том числе для ТИН. Эксперименты по выбору магнитной конфигурации и циркуляции лития в СОЛ будут проводиться в конфигурации с графитовой облицовкой первой стенки и дивертора.

С целью выбора кандидатных материалов первой стенки для реактора ТИН будет проведён сравнительный анализ испытаний графитовой и вольфрамовой облицовки камеры токамака с использованием полученных результатов с графитовой облицовкой первой стенки и дивертора Т-15МД и проведённых испытаний конструкционных материалов и результатов, полученных на токамаках AUG, WEST, EAST и других плазменных и термоядерных установках [20, 21].

Необходимо рассмотреть вопрос о замене внутрикамерных компонентов из графита на металлические компоненты. Используя опыт экспериментов с металлической стенкой на токамаках AUG, WEST, EAST и разработки внутрикамерных компонентов для ИТЭР, будет рассмотрен вопрос о разработке теплозащитной облицовки с использованием охлаждаемых конструкций из вольфрама и молибдена. В зонах с невысокой тепловой нагрузкой в качестве конструкционных материалов внутрикамерных компонентов планируется использовать нержавеющие стали и перспективные ванадиевые сплавы.

3.4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ В ПЕРВОЙ СТЕНКЕ И ДИВЕРТОРЕ

В токамаке Т-15МД рассматривается возможность проведения экспериментов с использованием жидкометаллических внутрикамерных компонентов из лития в качестве «возобновляемой» первой стенки или элементов дивертора. Перспективной является также разработка жидкометаллических компонентов с использованием олова. Разрабатывается концепция замкнутой циркуляции лития с использованием капиллярных структур. В этой концепции используются два литиевых элемента: один, введённый на большую глубину, является источником потока лития (эмиттер), второй, расположенный в СОЛ, собирает поток лития и не даёт литию напыляться на стенку (коллектор). Это особенно эффективно при стабилизации турбулентности в СОЛ в режиме с отрицательной треугольностью и двухнулевым дивертором. В настоящее время уже разработан макет коллектора для Т-15МД (рис. 3.4.1). Он сделан на основе капиллярно-пористой структуры и может быть размещён в экваториальном патрубке токамака. Поверхность литиевого элемента охлаждается и поддерживается на уровне ниже 200 °С для обеспечения сбора лития. Предусмотрена возможность регулировки глубины ввода литиевых элементов для достижения максимальной эффективности сбора лития.



Рис. 3.4.1. Макет коллектора лития для Т-15МД

В качестве эмиттера возможно рассмотреть два варианта. Первый вариант — с использованием одного экваториального элемента, введённого на большую глубину в плазму и имеющего большую температуру. В этой конфигурации поток плазмы в диверторе будут воспринимать графитовые пластины. Необходимо исследовать возможность блокировки распыления графита потоками лития. Во втором варианте предполагается использовать литиевый элемент, который вводится в наружный «ус» дивертора (рис. 3.4.2).

Литиевый элемент имеет регулировку по глубине ввода и углу наклона в полоидальной плоскости для обеспечения требуемого температурного режима элемента. Элемент имеет эффективное охлаждение и может работать вплоть до максимальной плотности мощности 5 МВт/м². Поскольку в режимах с мощностью нагрева до 15 МВт плотность мощности, выходящей на пластины дивертора, может значительно превосходить эту величину, то можно снизить эту мощность двумя способами. Первый — это переизлучение мощности на добавленных примесях азота или неона. Второй — исследовать возможность работы в режимах вблизи критической плотности, когда происходит сужение малого радиуса плазменного шнура.

Следует иметь в виду, что из опыта работы токамаков Т-10 и FTU литиевый элемент переходит в режим сильного испарения после достижения температуры 400 °С. Поэтому необходим контроль температуры

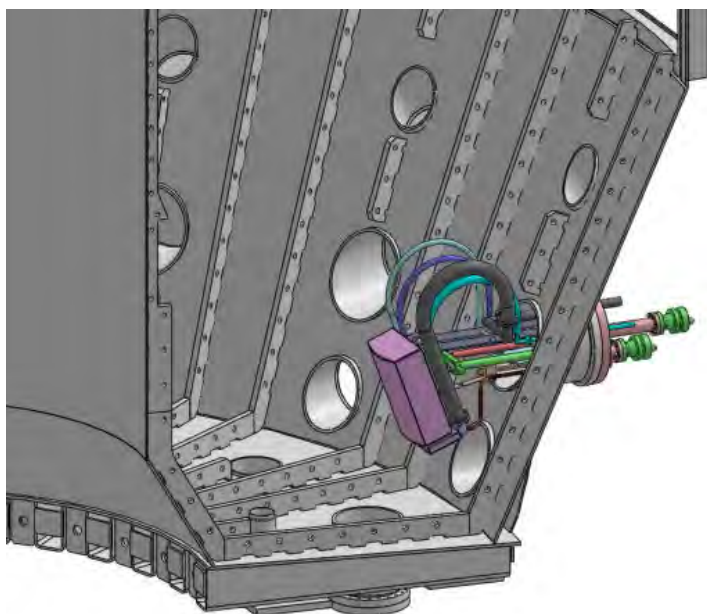


Рис. 3.4.2. Расположение литиевого эмиттерного элемента на нижнем патрубке Т-15МД

плазме. Поскольку время установления температурного режима капиллярно-пористых структур должно быть в пределах нескольких секунд, то демонстрация возможности стационарного режима возможна уже при длительности разряда 10—20 с.

путём эффективного охлаждения литиевого элемента и снижения потока тепла из плазмы. Помимо лития, планируется рассмотреть вопрос возможности использования олова либо сплава олова с литием в качестве вещества капиллярных структур. Кроме того, в дальнейших экспериментах должны быть рассмотрены возможности использования закрытых диверторных конфигураций с применением жидкометаллических компонентов на основе капиллярно-пористых структур.

Полученный квазистационарный режим работы установки должен быть оптимизирован не только по параметрам взаимодействия плазма—стенка, но и обладать улучшенным удержанием и большими эквивалентными нейтронными выходами, т.е. меры по уменьшению потоков тепла на диверторные пластины не должны сопровождаться деградацией удержания энергии в

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установка токамак Т-15МД позволяет проводить широкий набор исследований по тематике взаимодействия плазмы со стенкой и направлению разработки и эксплуатации дивертора — неотъемлемой части будущего токамака-реактора для чистого ядерного синтеза или гибридных технологий. Выбор материалов первой стенки, изучение влияния конструкции дивертора на режимы удержания плазмы, тестирование реакторных технологий — базовые задачи, которые должны быть решены в рамках физических экспериментов на Т-15МД. Применение современных кодов для моделирования взаимодействия плазмы со стенкой и исследования пристеночной и диверторной плазмы (например, SOLPS) требует активного участия теоретиков в подготовке и проведении соответствующих экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗДЕЛУ 3

1. **Budaev V.P.** Results of high heat flux tests of tungsten divertor targets under plasma heat loads expected in ITER and tokamaks (review). — *Phys. Atom. Nuclei*, 2016, vol. 79, p. 1137—1162; <https://doi.org/10.1134/S106377881607005X>.
2. **Pitts R.A. et al.** Physics basis for the first ITER tungsten divertor. — *Nuclear Materials and Energy*, 2019, vol. 20, 100696 (25 p.).
3. **Khvostenko P.P. et al.** The magnet system of the Tokamak T-15 upgrade. — *Fusion Eng. Des.*, 2015, vol. 98—99, p. 1090—1093.
4. **Kallenbach A. et al.** Partial detachment of high power discharges in ASDEX Upgrade. — *Nucl. Fusion*, 2015, vol. 55, 053026 (8 p.).
5. **Greenwald M.** Density limits in toroidal plasmas. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2002, vol. 44, p. R27.
6. **Kukushkin A.S. et al.** Effect of the dome on divertor performance in ITER. — *J. Nucl. Mater.*, 2007, vol. 363—365, p. 308.
7. **Kukushkin A.S. et al.** Finalizing the ITER divertor design: The key role of SOLPS modeling. — *Fusion Eng. Des.*, 2011, vol. 86, p. 2865.
8. **Sang C. et al.** SOLPS analysis of neutral baffling for the design of a new divertor in DIII-D. — *Nucl. Fusion. IOP Publishing*, 2017, vol. 57, № 5, 056043 (15 p.).

9. **Fasoli A. et al.** TCV heating and divertor upgrades. — Nucl. Fusion, 2020, vol. 60, 016019 (10 p.).
10. **Simonini R. et al.** Models and Numerics in the Multi-Fluid 2-D Edge Plasma Code EDGE2D/U. — Contrib. to Plasma Phys., 1994, vol. 34, p. 368.
11. **Rognlien T.D. et al.** A fully implicit, time dependent 2-D fluid code for modeling tokamak edge plasmas. — J. Nucl. Mater., 1992, vol. 196—198, p. 347.
12. **Bufferand H. et al.** Magnetic geometry and particle source drive of supersonic divertor regimes. — J. Nucl. Mater., 2011, vol. 415, p. S589.
13. **Reiter D.** Progress in two-dimensional plasma edge modelling. — J. Nucl. Mater., 1992, vol. 196—198, p. 80.
14. **Eich T. et al.** Scaling of the tokamak near the scrape-off layer H-mode power width and implications for ITER. — Nucl. Fusion, 2013, vol. 53, 093031 (7 p.).
15. **Eich T. et al.** Correlation of the tokamak H-mode density limit with ballooning stability at the separatrix. — Nucl. Fusion, 2018, vol. 58, 034001 (25 p.).
16. **Loarte A. et al.** Progress in the ITER physics basis. Chap. 4. Power and particle control. — Nucl. Fusion, 2007, vol. 47, p. S203.
17. **Pshenov A.A. et al.** On the role of hydrogen radiation absorption in divertor plasma detachment. — Nucl. Fusion, 2019, vol. 59, 106025 (26 p.).
18. **Huber A. et al.** Impact of the ITER-like wall on divertor detachment and on the density limit in the JET tokamak. — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 438, p. S139.
19. **Reimold F. et al.** Divertor studies in nitrogen induced completely detached H-modes in full tungsten ASDEX Upgrade. — Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, 033004 (11 p.).
20. **Stroth U. et al.** Progress from ASDEX Upgrade experiments in preparing the physics basis of ITER operation and DEMO scenario development. — Nucl. Fusion, 2022, vol. 62, 042006 (17 p.).
21. **Brezinsek S. et al.** Plasma—surface interaction in the stellarator W7-X: conclusions drawn from operation with graphite plasma-facing components. — Nucl. Fusion, 2022, vol. 62, 016006 (23 p.).

РАЗДЕЛ 4

РАСЧЁТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗВИТИЕ
ЧИСЛЕННЫХ КОДОВ В ПОДДЕРЖКУ Т-15МД

Расчётно-теоретические исследования в поддержку проектирования и сооружения токамака Т-15МД существенным образом сказались на выборе инженерно-технических решений в конструкции электромагнитной системы (ЭМС), прежде всего центрального соленоида, дивертора, систем дополнительного нагрева и генерации тока. В ходе работ над проектом существенное развитие получили численные алгоритмы для моделирования магнитного и кинетического управления плазмой Т-15МД, инкорпорированные впоследствии в численные коды ДИНА [1] и ASTRA [2]. Были продемонстрированы возможности ЭМС Т-15МД по созданию перспективных равновесных конфигураций, включая конфигурацию с отрицательной треугольностью (рис. 4.1)

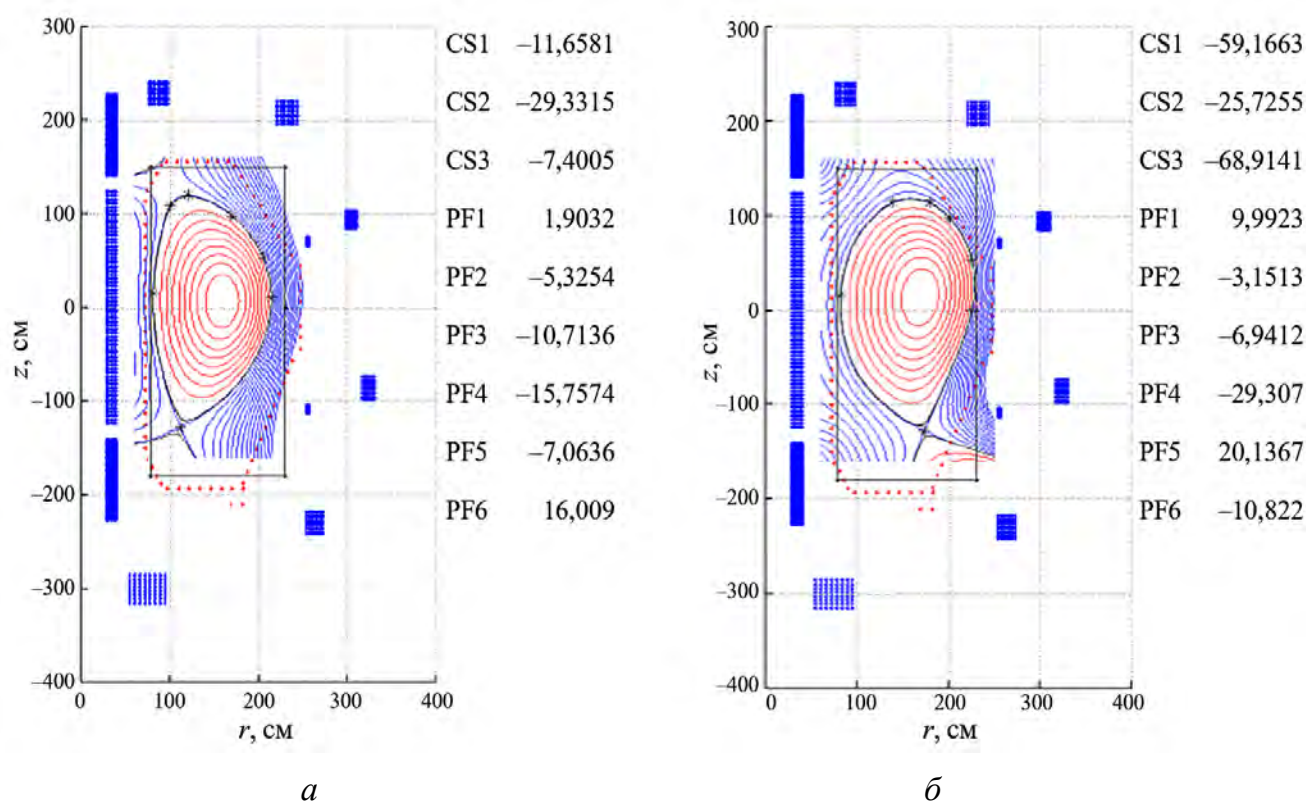


Рис. 4.1. Базовое равновесие в Т-15МД (а) и конфигурация с отрицательной треугольностью $\delta_{dw} = -0,2$, $\delta_{up} = -0,03$ (б), $I_p = 2$ МА, токи в обмотках в кА через виток

Численное моделирование при помощи кода ДИНА было нацелено в том числе на проблемы создания и эволюции диверторных магнитных конфигураций Т-15МД и связанные с этим проблемы магнитного управления формой и положением плазменного шнура. Модернизированный токамак Т-15МД предполагает работу как в омическом режиме, так и в режиме с дополнительным нагревом с использованием системы магнитного управления током, положением плазмы и её формой. В результате были предложены базовые сценарии разряда в плазме токамака Т-15МД с определением возможности их осуществления с учётом физических и технических ограничений, а также возможностей технологических систем и систем управления разрядом. На рис. 4.2 показана эволюция границы плазмы, полученная в результате работы токового контроллера в процессе всех стадий омического разряда.

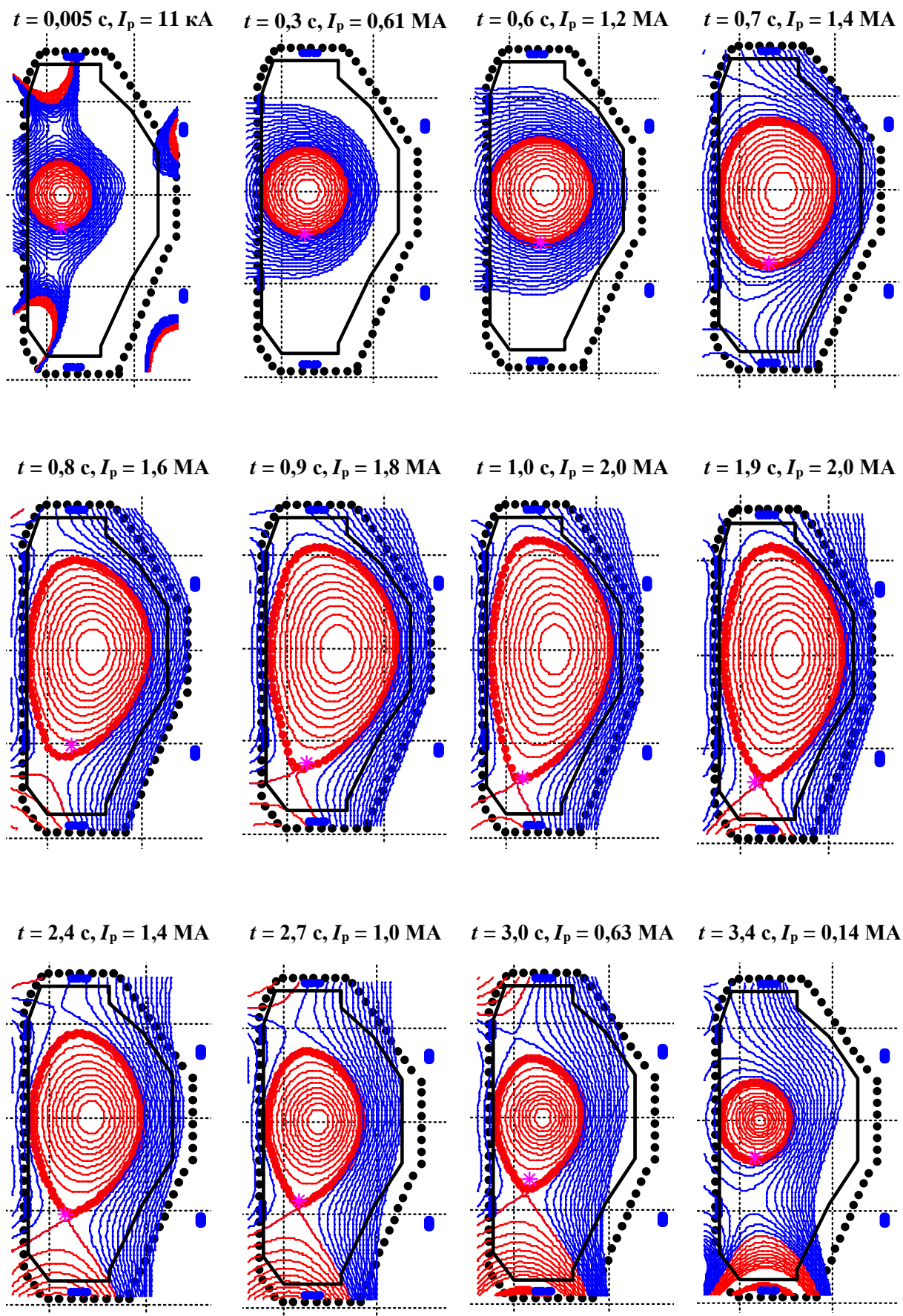


Рис. 4.2. Эволюция границы плазмы, полученная в результате работы токового контроллера в процессе всех стадий омического разряда

Численное моделирование ДИНА фокусировалось на построении сценариев токов в полоидальных катушках (напряжений в системе питания) и алгоритмах надёжного магнитного управления. В свою очередь моделирование при помощи численного кода ASTRA было нацелено прежде всего на определение характеристик плазмы.

Сценарий разряда с дополнительным нагревом в плазме Т-15МД при базовом токе плазмы $I_p = 2$ МА, суммарной мощности нагрева $P_{AUX} = 12$ МВт (6 NB + 6 ЕС), концентрации плазмы на плато разряда $n_e \approx 0,5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ и эффективном заряде плазмы $Z_{eff} = 1,6$ приведён на рис. 4.3.

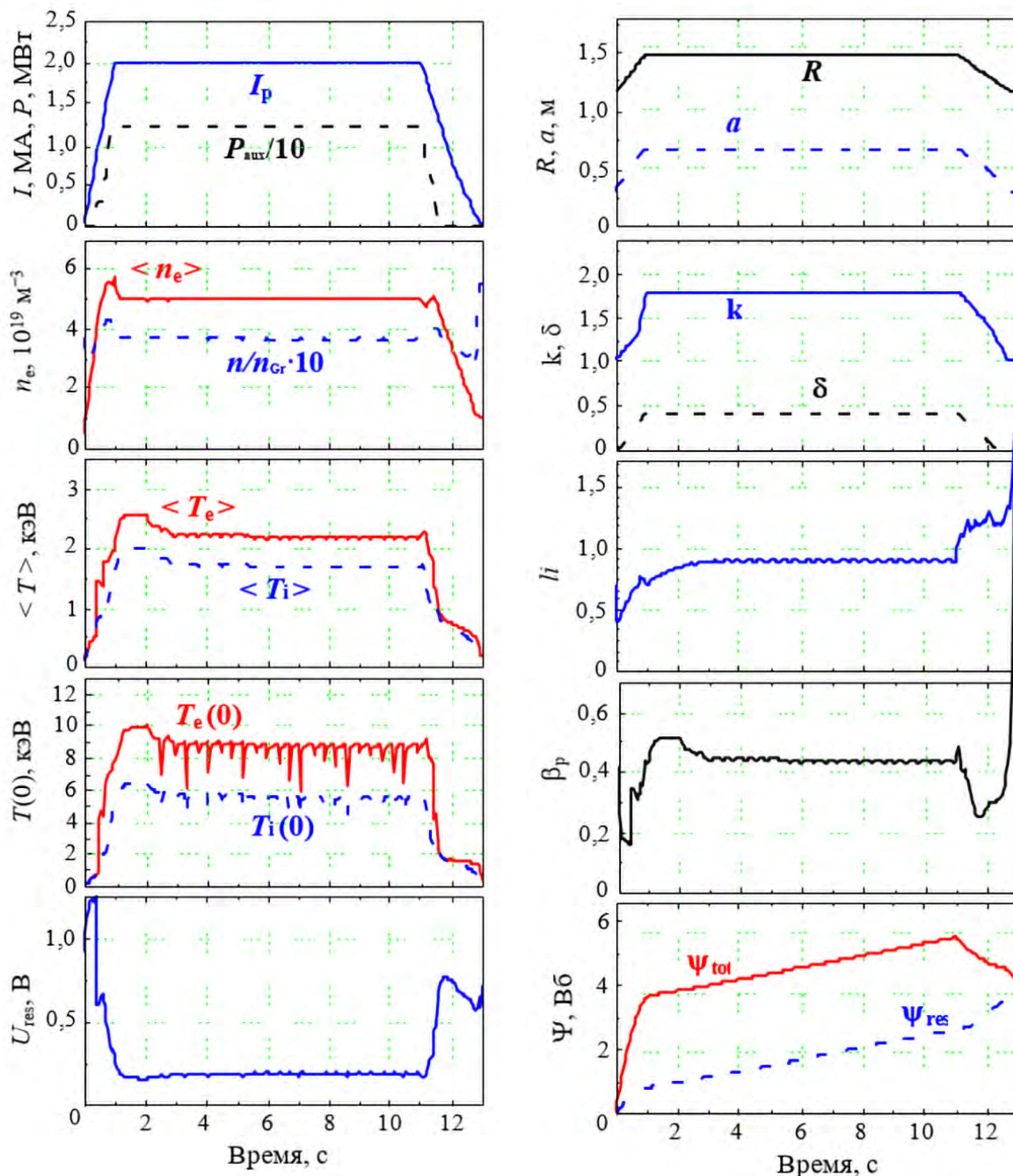


Рис. 4.3. Сценарий разряда токамака Т-15МД с дополнительным нагревом (6 МВт ECR + 6 МВт NBI) при концентрации плазмы на плато разряда $n_e \approx 0,5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$

Важную роль в установлении режима разряда играют примеси. В ASTRA динамика ионизационных состояний, транспорт и излучение примесей рассчитываются при помощи кода ZIMPUR [3], дополненного в недавнее время возможностью использовать в моделировании международную базу данных по атомарным процессам ADAS.

В условиях токамака Т-10 гофрировка тороидального магнитного поля, обусловленная дискретной структурой тороидального магнита, оказывала существенное влияние на характеристики удержания плазмы. Анализ влияния гофрировки на разряды Т-15МД даёт более оптимистичный прогноз.

На рис. 4.4, *а* приведены линии уровня гофрировки, рассчитанные по реальной геометрии проводников тороидального магнита. Однако гофрировочные потери определяются не только распределением амплитуды гофрировки, но и равновесной конфигурацией плазмы. В сценарии разряда с током плазмы $I_p = 2$ МА граница области существования локальных ям (красная кривая на рис. 4.4, *б*) имеет точки перегиба вне плазменного шнура. В такой конфигурации влияние гофрировки на удержание быстрых ионов практически отсутствует, как это и было показано в последующем моделировании при помощи кода DRIFT гофрировочных потерь ионов пучка и надтепловых ионов, полученных в результате ИЦР-нагрева. При этом геометрия инжекции задавалась в точном соответствии с конструкцией инжектора. На рис. 4.5 показан профиль захвата пучка с энергией инжекции 75 кэВ в базовом сценарии Т-15МД.

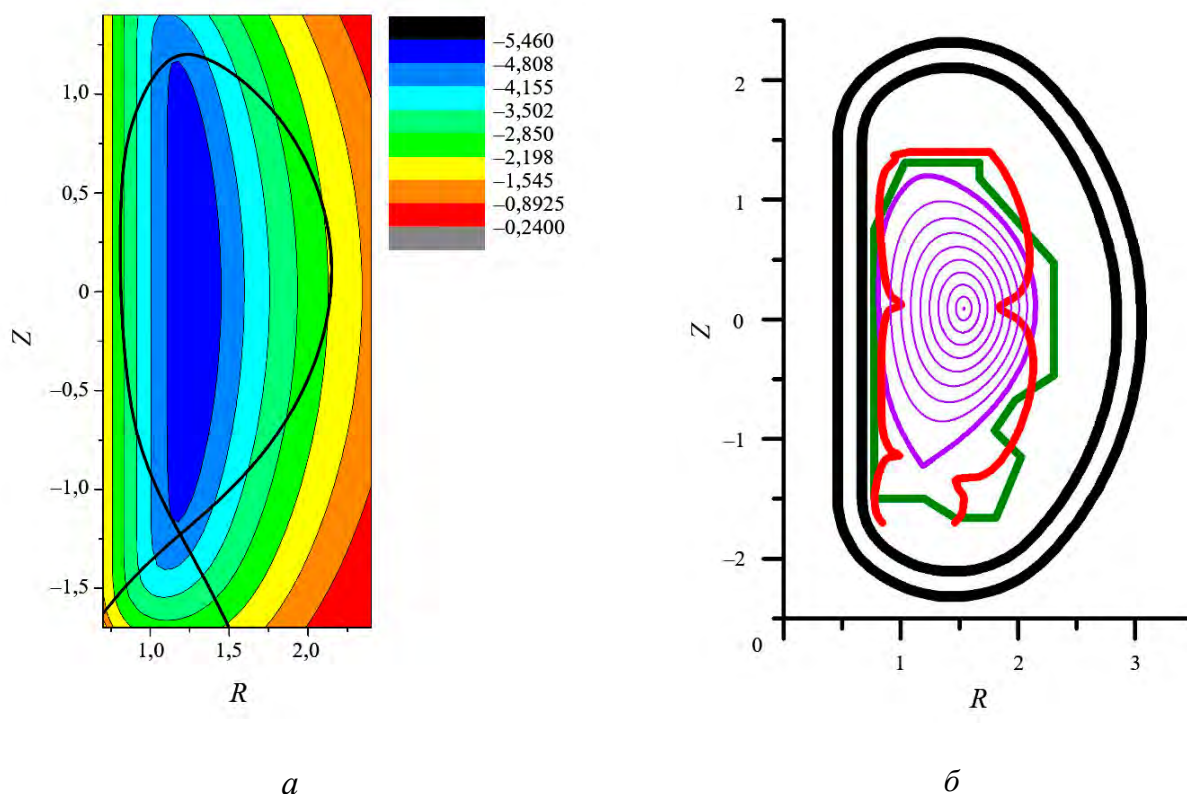


Рис. 4.4. Линии уровня гофрировки магнитного поля Т-15МД (*а*) и граница области существования локальных магнитных ям (красная кривая) в режиме с током плазмы $I_p = 2$ МА (*б*): — — проводник ТК, — — первая стенка, — — плазма, — — локальные гофры

Анализ параметров инжекции (направление, энергия) позволил определить рабочий диапазон, в котором сквозные потери пучка при различных значениях плотности плазмы оказываются в инженерно допустимых пределах. При этом температура плазмы существенного влияния на результат не оказывает.

Значительное внимание, в свою очередь, было уделено анализу МГД-устойчивости плазмы Т-15МД. Прежде всего это относится к МГД-неустойчивостям, ограничивающим предельно достижимое давление плазмы, — неоклассической тиринг-моды и винтовой неустойчивости, инкремент которой обусловлен конечностью проводимости стенки (RWM — Resistive Wall Mode). Для этого были разработаны соответствующие модели, реализованные в численных кодах.

Кроме того, наличие надтепловых ионов в плазме Т-15МД, получаемых в результате пучкового и ИЦР-нагрева, может приводить к раскачке альфвеновских неустойчивостей. Соответствующий анализ, выполненный с самосогласованным использованием кода МГД-устойчивости KINX и орбитального кода VENUS, выявил, что раскачка альфвеновских мод в базовом режиме разряда Т-15МД не приводит к

потерям быстрых ионов, а лишь перераспределяет их в пределах центральной области плазменного шнура.

Одна из наиболее существенных угроз для осуществления термоядерного синтеза на установках токамак ассоциируется со срывами разряда, приводящими к резкому возрастанию тепловых и механических нагрузок на элементы конструкции. Специально для условий токамака Т-15МД был адаптирован симулятор срывов разряда, выполненный на основе кода ДИНА. Одним из наиболее интересных результатов моделирования срывов на Т-15МД стала демонстрация ранее не известного явления о возникновении существенных силовых нагрузок на вакуумную камеру на стадии теплового срыва [5], тогда как ранее считалось, что силовые нагрузки имеют место на стадии срыва тока плазмы.

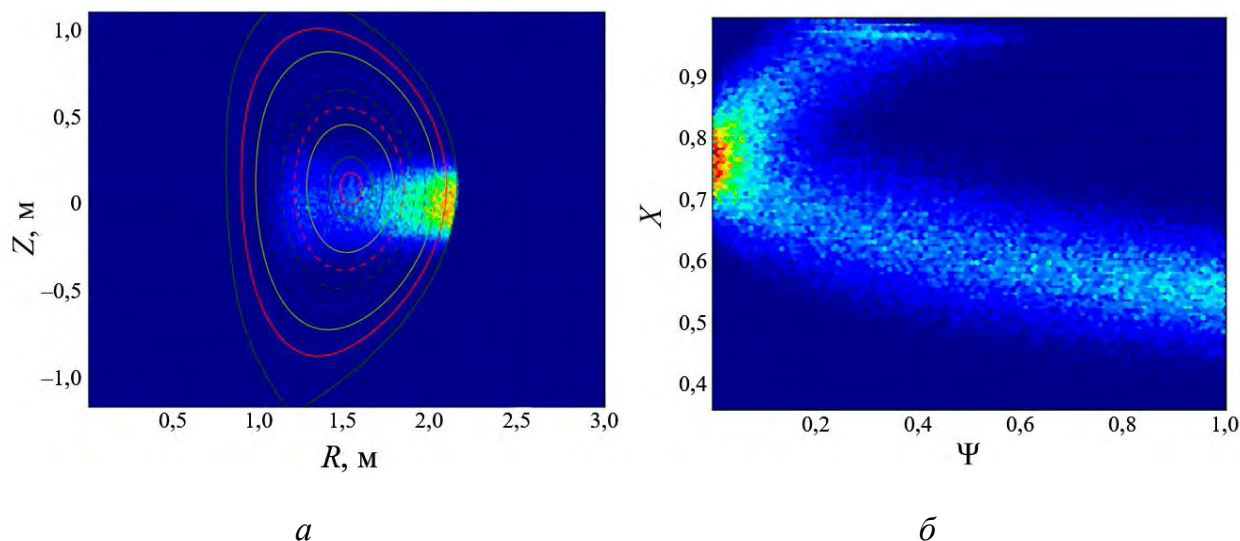


Рис. 4.5. Профили захвата для $E_b = 75$ кэВ и базовой плотности плазмы $g_n = 1,0$ в плоскости RZ (а) и нормированный полоидальный поток Ψ и косинус питч-угла X (б)

Дальнейшие расчётно-теоретические работы в поддержку программы исследований на Т-15МД включают развитие симулятора разрядов Т-15МД на основе кода ДИНА и создание имитационной платформы для отработки алгоритмов управления плазмой. Развитие предполагает существенную переработку кода под стандарты системы интегрированного моделирования разрядов ИТЭР (IMAS — Integrated Modelling Analysis Suit) для как можно более полного использования наработок международного термоядерного сообщества для успеха экспериментальной программы Т-15МД. То же относится к развитию симулятора срывов на основе кода ДИНА.

С переходом на модуль расчёта равновесия со свободной границей SPIDER система транспортного моделирования разрядов ASTRA существенно образом расширяет свои возможности для моделирования эволюции диверторной конфигурации плазмы Т-15МД. Кроме того, особое внимание в развитии ASTRA будет уделяться инкорпорированию имеющихся и разработке новых моделей турбулентного переноса.

До сих пор расчёты режимов работы дивертора Т-15МД осуществлялись в тесном сотрудничестве с разработчиками кода SOLPS (в последней версии SOLPS-ITER) из Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого (СПбПУ) под руководством В.А. Рожанского. Планируются подготовка собственных кадров и развитие альтернативных (упрощённых) моделей пристеночной и диверторной плазмы для проведения быстрого анализа, прежде всего модели DINA-SOL.

Моделирование срывов в том числе с учётом формирования убегающих электронов (DINA-DS — Disruption Simulator) в дальнейшем будет ориентироваться на разработку алгоритмов работы системы смягчения последствий срыва разряда.

К уже имеющимся численным кодам для моделирования дополнительного нагрева и генерации тока плазмы при помощи волн ЭЦР-диапазона и нейтральной инжекции будут добавлены коды для моделирования ИЦР- и нижнегибридного нагрева.

Дальнейшее развитие получают коды для моделирования кинетики быстрых частиц — надтепловых ионов и убегающих электронов.

Принципиальную роль в организации режимов разряда играет перенос излучения плазмы. В НИЦ «Курчатовский институт» имеется существенный задел по моделированию переноса излучения как в основной, так и в диверторной плазме.

Наконец, запланированы работы по созданию синтетических диагностик плазмы T-15МД и их использованию в обработке алгоритмов управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗДЕЛУ 4

1. **Khayrutdinov R.R., Lukash V.E.** Studies of plasma equilibrium and transport in a tokamak fusion device with the inverse-variable technique. — *J. of Comp. Physics*, 1993, vol. 109, № 2, p. 193.
2. **Pereverzev G.V., Yushmanov P.N.** ASTRA Automated System for TRansport Analysis in a Tokamak: Preprint IPP 5/98. Garching, Germany, 2002.
3. **Leonov V.M., Zhogolev V.E.** Simulation of high-Z impurity behavior for ITER operational scenarios using the ZIMPUR impurity code. — *Plasma Phys. Contr. Fusion*, 2005, vol. 47, p. 903.
4. **Konovalov S., Takizuka T., Tani K., Hamamatsu K., Azumi M.** Analysis of high energy ion ripple loss in the up-down asymmetric configuration by OFMC plus Mapping Hybrid code: Preprint JAERI-R94-033. 1994.
5. **Дубров М.Л., Лукаш В.Э., Хайрутдинов Р.Р., Докука В.Н.** Анализ электромагнитных сил в вакуумной камере токамака за счёт индуцированного полоидального тока после теплового срыва. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2019, т. 42, вып. 1, с. 39—50.

РАЗДЕЛ 5

КОМПЛЕКС ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА
И ГЕНЕРАЦИИ ТОКА

На многих экспериментальных термоядерных установках для увеличения энергосодержания плазмы используют как инжекцию нейтральных пучков (NBI), так и высокочастотные методы нагрева, основанные на электронно-циклотронном и ионно-циклотронном резонансе с соответствующими диапазонами частот (ЭЦР $\sim 60\text{—}200$ ГГц, ИЦР $\sim 10\text{—}100$ МГц), а также нижнегибридный нагрев (НГ $\sim 1\text{—}10$ ГГц). Все перечисленные методы дополнительного нагрева плазмы будут реализованы на Т-15МД.

В соответствии с техническим проектом установки Т-15МД комплекс дополнительного нагрева будет состоять из четырёх систем:

- инжекционного нагрева с суммарной подводимой к плазме мощностью $P_{\text{NBI}} = 6$ МВт;
- ионного циклотронного нагрева с подводимой к плазме мощностью $P_{\text{ICRH}} = 6$ МВт;
- нижнегибридного нагрева с подводимой к плазме мощностью $P_{\text{LH}} = 4$ МВт;
- электронно-циклотронного нагрева с подводимой к плазме мощностью $P_{\text{ECRH}} = 8$ МВт.

Перечисленные системы предполагается использовать для нагрева плазмы и создания безындукционного тока.

В данном разделе представлены технические описания каждой системы.

5.1. СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ ДЛЯ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА Т-15МД

Введение

Система инжекционного нагрева (СИН) токамака Т-15МД является глубокой модернизацией предшествующей системы инжекционного нагрева токамака Т-15 [1]. Обновлённая система соответствует современным требованиям, в том числе предусматривает возможность работы в режимах квазистационарных импульсов длительностью 30 с (с увеличением, в перспективе, до 400 с).

Основными устройствами СИН являются три инжектора, каждый из которых содержит по два ионных источника СТИС-1С. Инжекторы обеспечивают тангенциальный ввод в плазму Т-15МД потоков атомов

водорода с энергией до 60 кэВ и суммарной мощностью до 6 МВт для нагрева плазмы в токамаке до $\sim 3\text{—}6$ кэВ и генерации безындукционного тока в плазменном шнуре величиной 100—500 кА. Расположение инжекторов относительно токамака Т-15МД в зале установки показано на рис. 5.1.1.

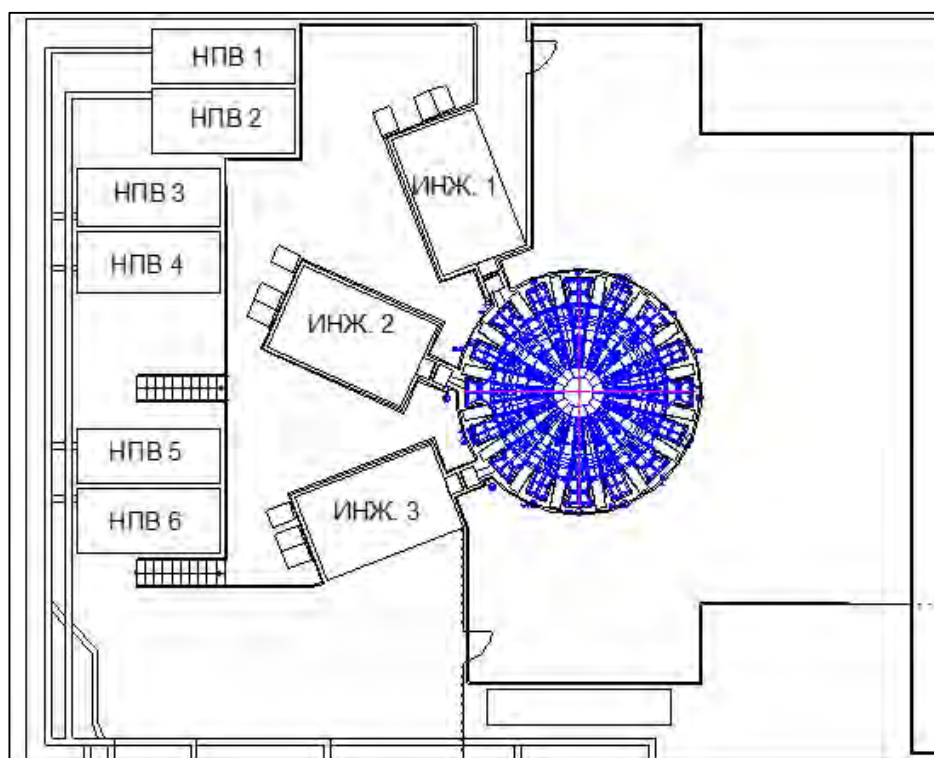


Рис. 5.1.1. План размещения трёх инжекторов, направленных по касательной к оси плазменного шнура Т-15МД, а также части оборудования систем низковольтного электропитания ионных источников (НПВ1—НПВ6)

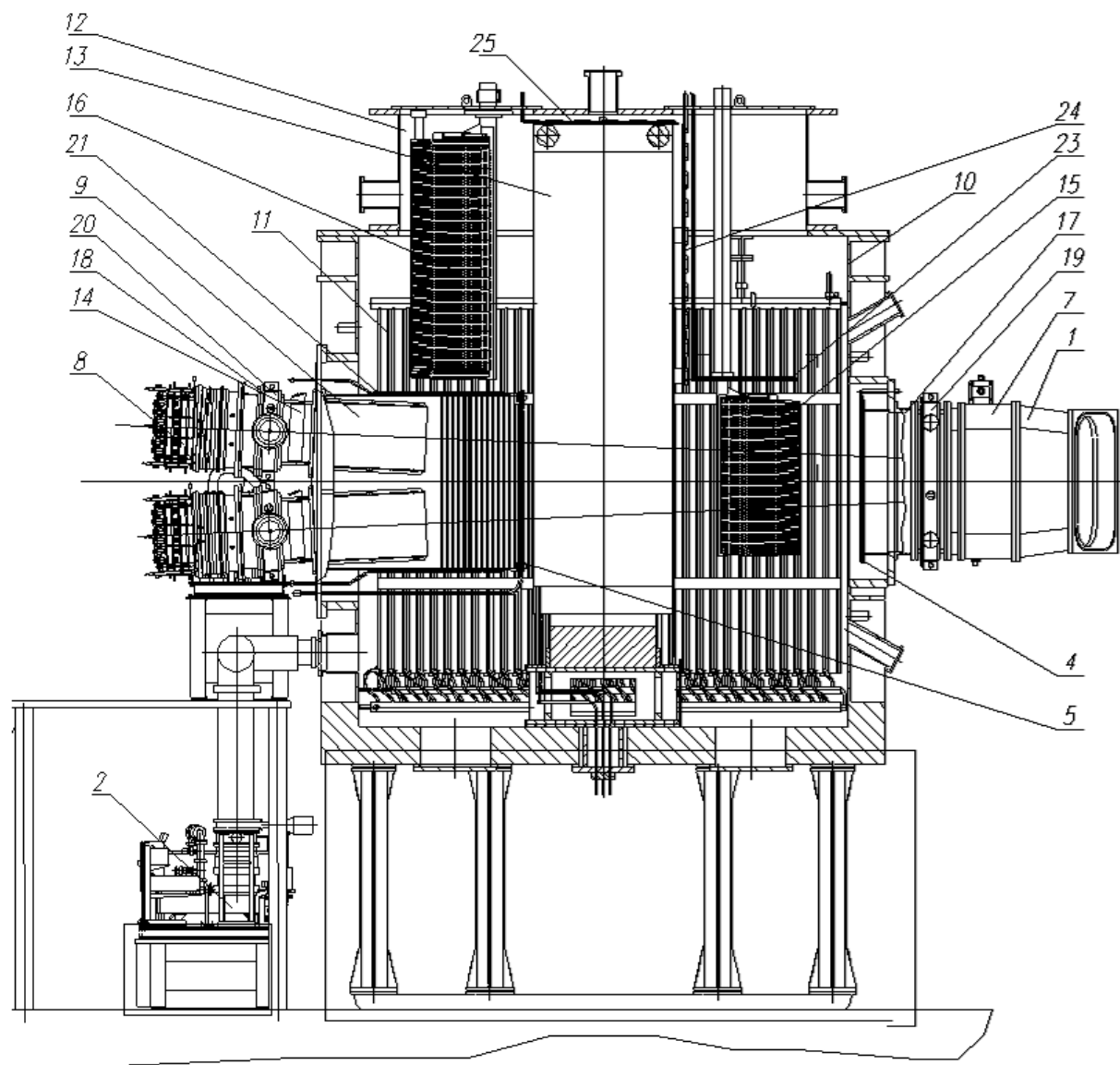


Рис. 5.1.2. Схема инжектора токамака Т-15МД (вид сбоку)

Каждый инжектор имеет в своём составе следующие узлы и компоненты (рис. 5.1.2.):

- вакуумная камера инжектора (ВКИ) (10);
- два ионных источника СТИС-1С (8);
- магнитный экран ионных источников (не показан);
- два юстировочных устройства ионных источников (18);
- два проходных шибера 450×160 мм ионных пучков (20);
- два нейтрализатора ионных пучков (9);
- магнитно-жалюзийный экран (21);
- магнитный экран нейтрализаторов (не показан);
- диафрагма на выходе из нейтрализатора (5);
- электромагнит, отклоняющий остаточные ионы после нейтрализации (13);
- трубчатый приёмник отклонённых ионов (16);
- экранные панели для перехвата потоков вторичных быстрых атомов (23—25);
- раздвижной трубчатый приёмник-калориметр нейтрального пучка (15);
- скрепер на выходе из ВКИ (4);
- встроенный криоконденсационный насос — панели на боковых стенках ВКИ (11);

- атомопровод, соединяющий инжектор с камерой токамака (1);
- проходной шибер 1000×300 мм атомопровода (19);
- пластинчатый сиффон 1000×300 мм атомопровода (17);
- быстродействующая заслонка в атомопроводе (7);
- два медных охлаждаемых лайнера для защиты стенок атомопровода;
- диэлектрическая прокладка, электроизолирующая инжектор от камеры токамака;
- вакуумный пост для откачки камеры инжектора (2);
- вакуумный пост для предварительной откачки ионных источников (не показан).

Геометрия пучкового тракта инжектора с координатами базовых компонентов приведена на рис. 5.1.3. Оси ионных пучков из источников наклонены к оси инжектора под углами $\pm 2,5^\circ$, осевая координата X , мм отсчитывается от проекции выходных электродов ионно-оптических систем (ИОС) ионных источников, Y , мм — горизонтальная и Z , мм — вертикальная координаты.

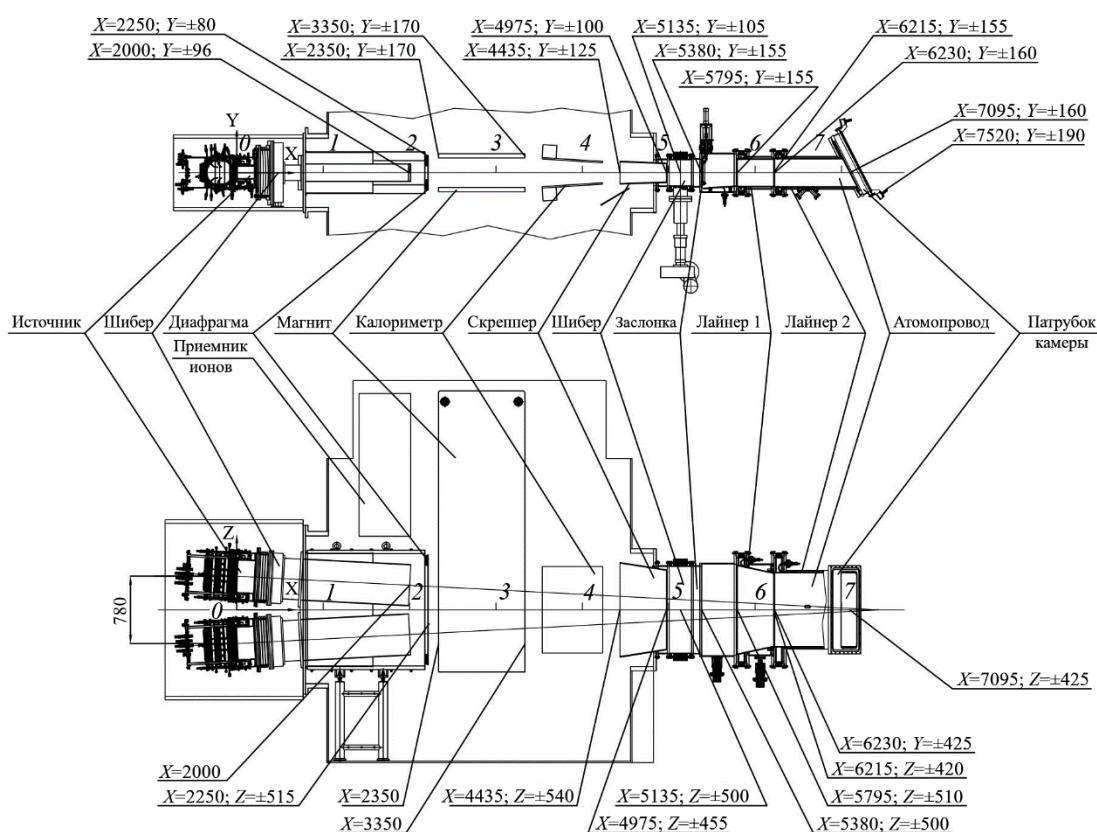


Рис. 5.1.3. Геометрия пучкового тракта с координатами компонентов относительно ионного источника

5.1.1. Основные компоненты и узлы инжектора

Ионный источник СТИС-1С [2]. Ионный источник (ИИ) (рис. 5.1.4) состоит из трёх основных узлов: газоразрядной камеры (ГРК), ионно-оптической системы (ИОС) и высоковольтного изоляторного узла (ВИУ) (рис. 5.1.5, а).

ГРК (рис. 5.1.5, б) предназначена для генерации плазмы с параметрами, обеспечивающими поставку ионов с заданной плотностью тока не менее $0,3 \text{ A/cm}^2$ на эмиссионную границу плазмы при неоднородности менее $\pm 10\%$. Она представляет собой охлаждаемый водой медный цилиндр диаметром 30 см и имеет вырезанное по образующим цилиндра выходное окно размером 20×50 см. В корпусе снаружи фрезеруются 15 продольных пазов, в которые впаяются трубки водяного охлаждения и, для обеспечения хорошего удержания плазмы разряда укладываются линейки постоянных Nd—Fe-магнитов с чередующимися полюсами, создающими «периферийное» знакопеременное магнитное поле, которое составляет около

1 кГс на внутренней стенке камеры и практически экспоненциально спадает по радиусу. Наличие магнитного поля сужает площадь с достаточно однородной плотностью тока ионов до $\sim 450 \text{ см}^2$. Внутри ГРК устанавливается распределённый набор 24 «шпилечных» прямонакальных катодов из вольфрамовой проволоки ВА с общей площадью эмиссии электронов до 110 см^2 , нагреваемых переменным током до рабочей температуры 3000 К. Корпус ГРК является анодом дугового разряда. Максимальный ток разряда до 1,5 кА, энерговыделение на стенках до 150 кВт. Рабочее давление газа (водород) в ГРК составляет около 4 мТорр.

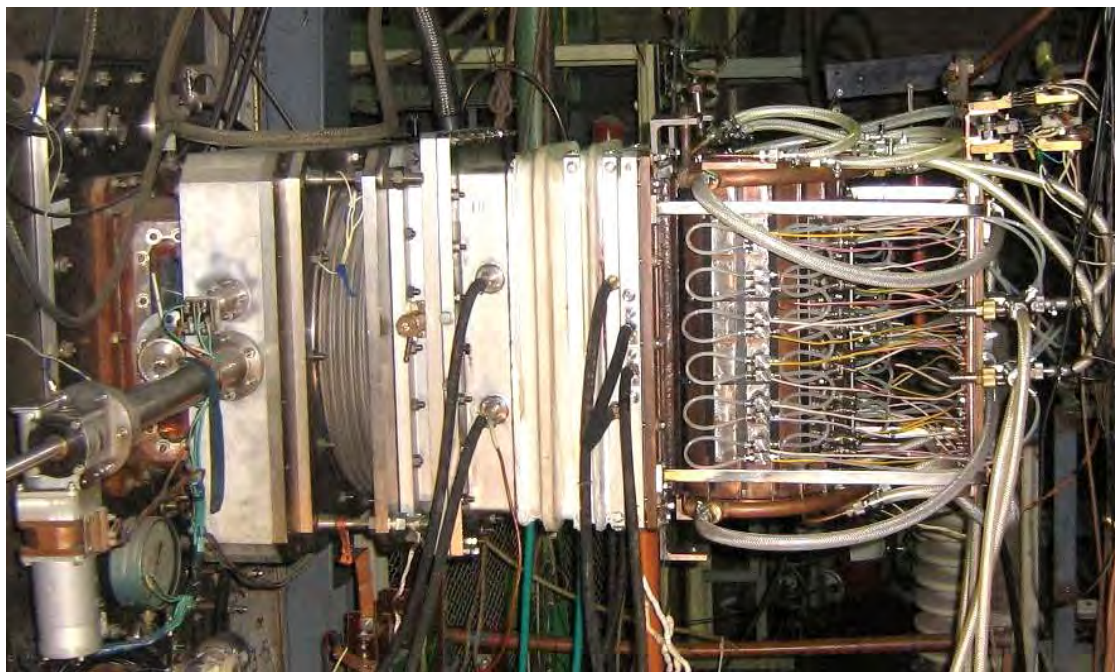


Рис. 5.1.4. Вид ионного источника СТИС-1С, пристыкованного к вакуумной камере инжекторного тест-стенда ИРЕК через юстировочный сильфонный узел и шлюзовой шибер

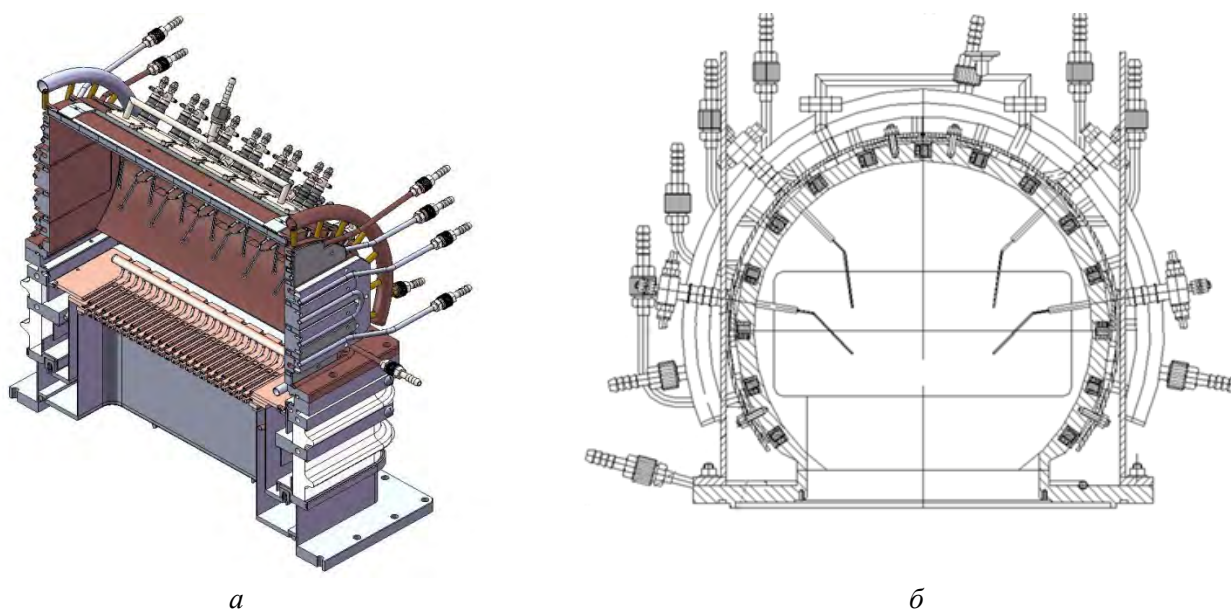


Рис. 5.1.5. Основные узлы ионного источника: *а* — 3D-модель ионного источника СТИС-1С в разрезе; *б* — сечение ГРК

На рис 5.1.6 представлены профили плотности ионного тока на эмиссионной поверхности плазмы вдоль длинной и короткой осей.

Водяное охлаждение ГРК позволяет, в принципе, работать стационарно, за исключением катодов. В процессе работы катодов в разряде происходит уменьшение их диаметров до некоторой критической величины вследствие испарения вольфрама. Для катодов ГРК СТИС-1С расчётное суммарное «время жизни» составляет 40—45 ч, т.е. по истечении этого времени требуется остановить работу инжектора и провести замену катодов в ГРК с последующей тренировкой их и выводением ГРК на рабочий режим.

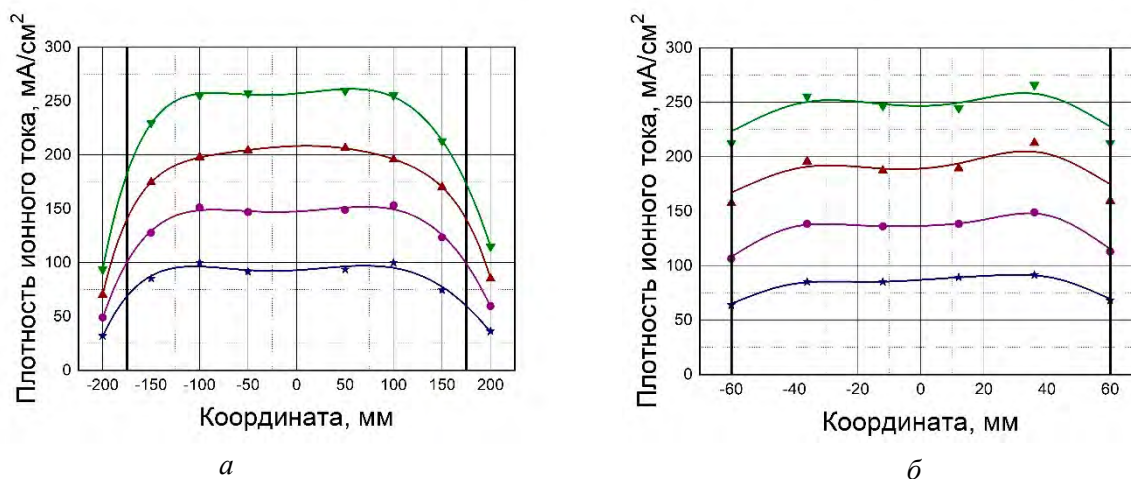


Рис. 5.1.6. Профили плотности ионного тока при токах разряда: ★ — 700 А, ● — 900 А, ▲ — 1100 А, ▼ — 1350 А (вертикальные линии на графиках обозначают границы ИОС); а — вдоль длинной оси эмиссионной поверхности плазмы; б — вдоль короткой оси эмиссионной поверхности плазмы

Многощелевая трёхэлектродная ИОС предназначена для извлечения ионов из плазмы разряда в ГРК, их ускорения и формирования пучка с малым углом расходимости. Она состоит из охлаждаемых водой эмиссионного (ЭЭ), промежуточного ПЭ и заземлённого (ЗЭ) электродов, закрепляемых на соответствующих подставках из нержавеющей стали. Полный комплект электродов с подставками размещается внутри высоковольтного изоляционного узла (ВИУ) источника (рис. 5.1.7). На ЭЭ подаётся положительный потенциал до +60 кВ, а на ПЭ — отрицательный потенциал до –6 кВ для предотвращения потока в сторону ЭЭ электронов из плазмы, образующейся в нейтрализаторе (камере перезарядки ионного пучка в атомы).

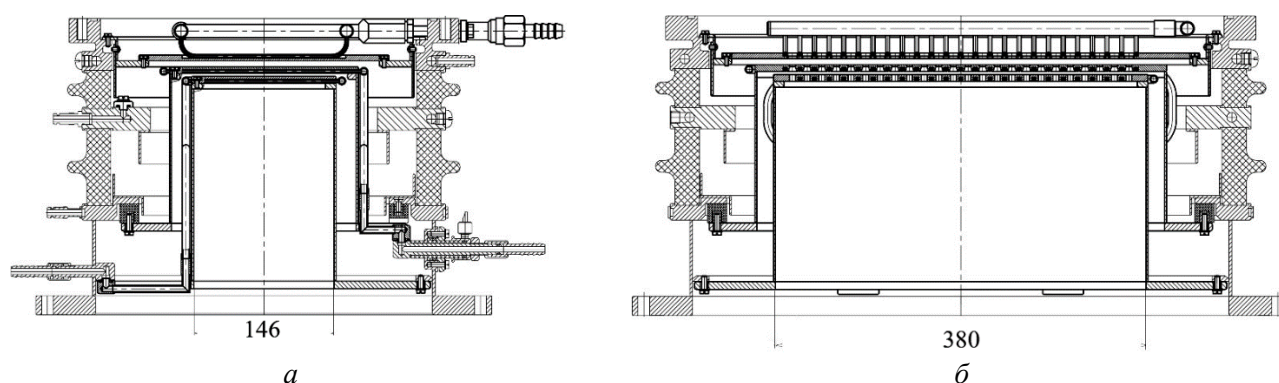


Рис. 5.1.7. Сечения по короткой (а) и длинной (б) стороне установленных в ВИУ на подставках электродов ИОС с трубками водяного охлаждения

Электроды представляют собой пластины из меди, в каждой на площади 120×360 мм фрезеруются с шагом 15 мм по 24 профилированных щели шириной соответственно 6, 6,5 и 7 мм и длиной 120, 125 и 125 мм. Суммарная площадь эмиссионной поверхности щелей в ЭЭ составляет около 173 см². Особые требования предъявляются к точности изготовления щелей ±30 микрон как по ширине, так и по шагу. Каждый электрод имеет систему водяного охлаждения, состоящую из набора 25 медных трубок диаметром 4×0,8 мм, впаянных в коллекторы из нержавеющей стали и припаянных к медной пластине в пазах перемычек между щелями. Паяные поверхности электродов и коллекторов гальванически покрываются

слоем меди толщиной 0,25—0,3 мм. Профили щелей и расположение трубок охлаждения в электродах ИОС приведены на рис. 5.1.8, а расчётные траектории ионов в одной щелевой ячейке — на рис. 5.1.9.

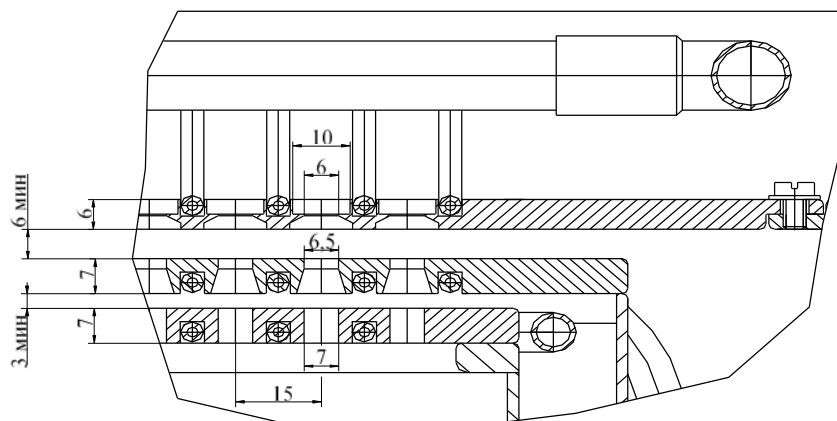


Рис. 5.1.8. Профили щелей и расположение трубок охлаждения в электродах ИОС источника СТИС-1С

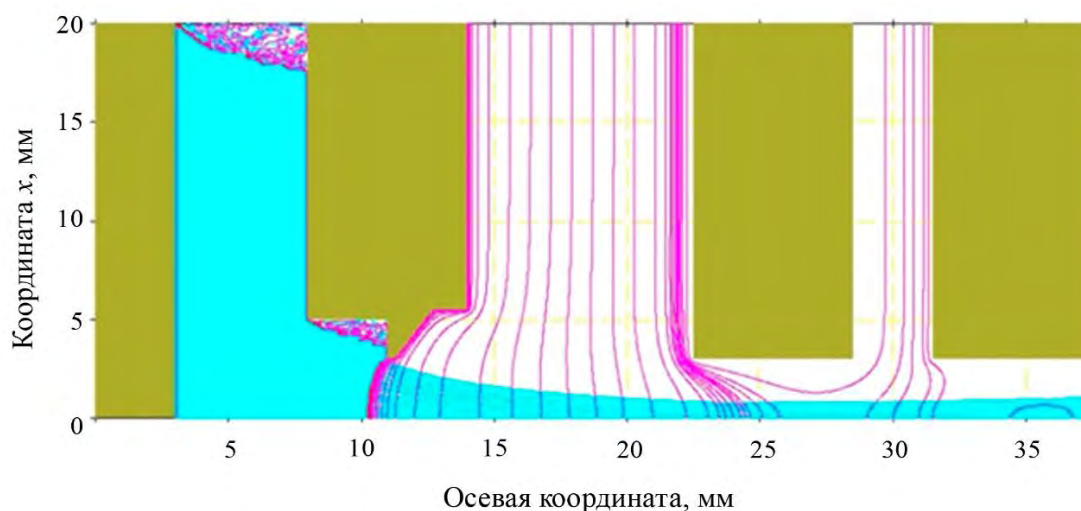


Рис. 5.1.9. Формирование ионного пучка в ячейке ИОС с ускоряющим зазором 8,5 мм при энергии 60 кэВ и оптимальной плотности тока 0,3 А/см². Угол расходимости (RMS) около ±30 мрад (±1,8°) [3]

ИОС устанавливается внутри высоковольтного изоляторного узла (ВИУ). Источник СТИС-1С позволяет получить ионный пучок с током 45 А и энергией до 50 кэВ. Для получения пучков ионов с повышенной (до 75 кэВ) энергией проведена разработка модифицированного источника СТИС-1СВ с изолятором из полиэфирэфиркетона (РЕЕК) и подготовлен комплект конструкторской документации.

Нейтрализаторы. Для каждого источника устанавливается нейтрализатор, который предназначен для создания газовой перезарядной мишени, в которой происходит преобразование ионов пучка в энергичные атомы. Оба нейтрализатора размещаются внутри ВКИ (см. рис. 5.1.2) с наклоном их осей соответственно наклону осей ионных пучков ($\pm 2,5^\circ$). Корпус каждого нейтрализатора представляет собой охлаждаемую трубу из меди прямоугольного сечения с проходным отверстием 160×470 мм, длиной 1,2 м. Доля атомов в пучках на выходе нейтрализаторов определяется сечениями процесса перезарядки ионов и обратного процесса реионизации атомов (рис. 5.1.10).

Эффективность нейтрализации зависит от энергии ионов и соответствующей ей «толщины» мишени (n_0L). Заполнение мишени водородом до нужной концентрации молекул происходит как потоком газа, вытекающего из источника вместе с ионным пучком (до 7 л·Торр/с), так и дополнительным напуском газа в нейтрализатор (до ~8 л·Торр/с). Охлаждение его производится путём прокачки воды по трубкам, припаянным к стенкам.

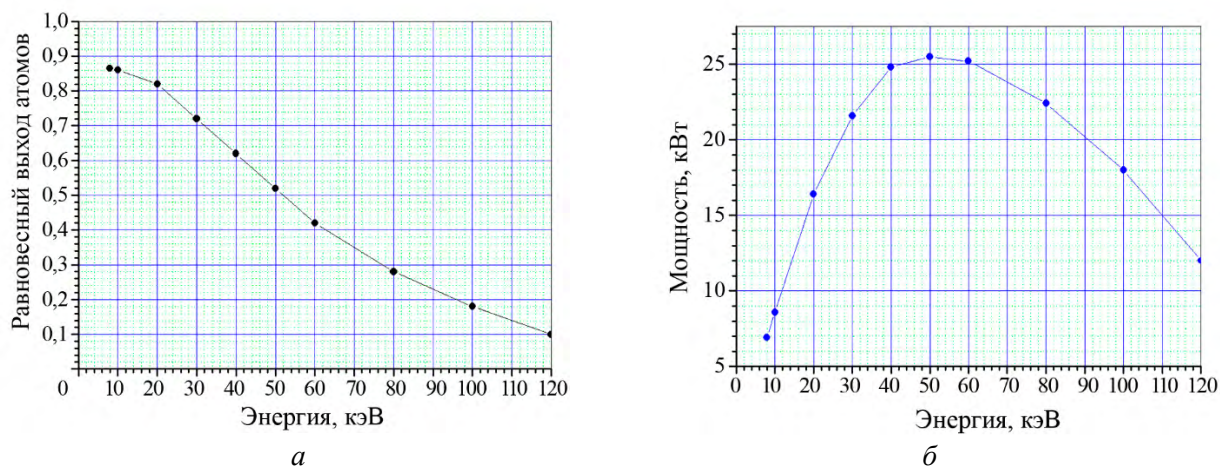


Рис. 5.1.10. Равновесный выход атомов при нейтрализации протонного пучка в водородной мишени (а) и мощность потока атомов на 1 А протонного пучка из источника (б) в зависимости от энергии частиц

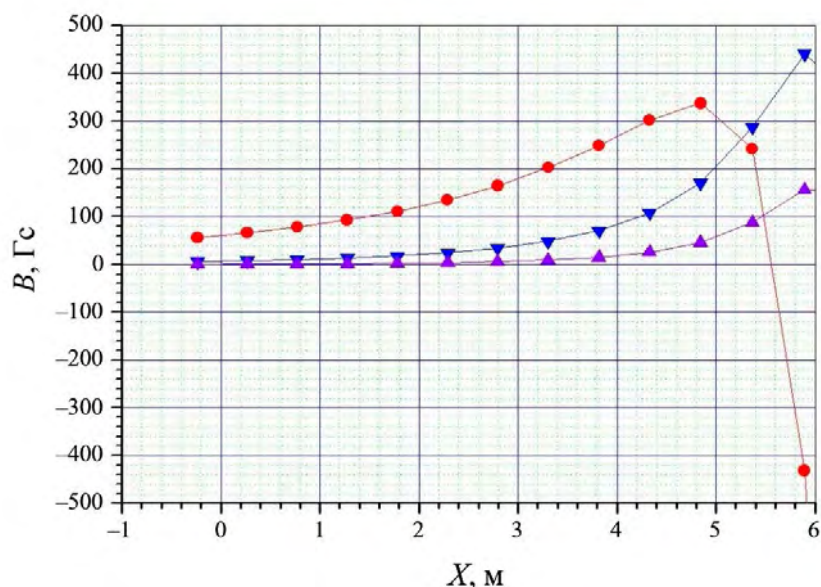


Рис. 5.1.11. Изменение компонентов рассеянного магнитного поля токамака вдоль оси инжекции в токамаке Т-15МД, $Z = 0$, $X = 0$ соответствует выходному электроду ИОС источника: \blacktriangledown — B_x , \blacktriangle — B_y , \bullet — B_z

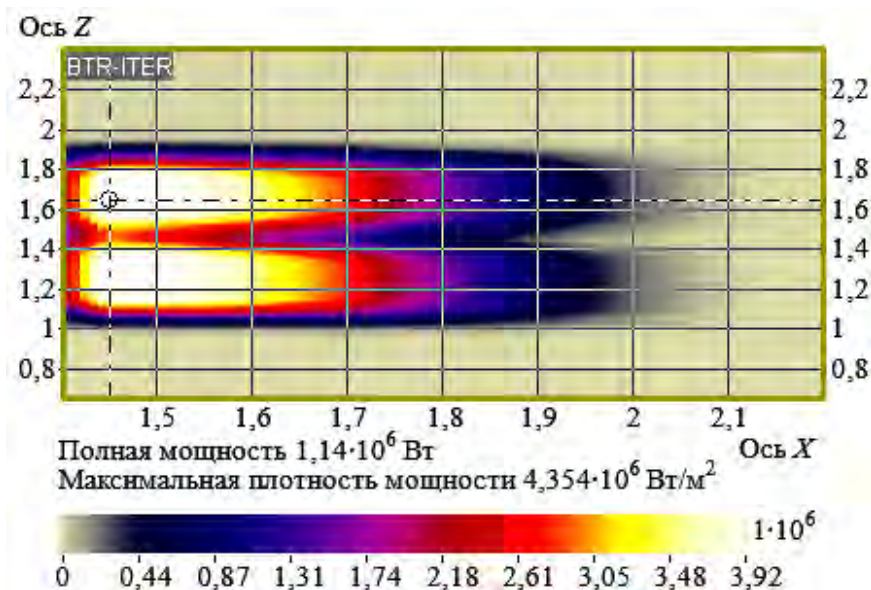
Магнитные экраны. Нейтрализация ионного пучка стартует фактически сразу на выходе ионов из источника, так что реальная длина области нейтрализации от ИОС источника до фланца камеры инжектора (0,8 м) и далее до выхода из нейтрализатора составляет 2 м. Из расчёта профиля компонентов рассеянного магнитного поля (МП) токамака вдоль оси тракта тангенциальной инжекции следует, что в области источников и нейтрализаторов основной компонентой является вертикальная B_z величиной 60—130 Гс (рис. 5.1.11). Такая величина B_z требует существенной экранировки, поскольку каждый ион при своём движении до момента нейтрализации будет отклонён на некоторый угол, что приведёт к увеличению общей расходимости пучка атомов и ухудшению эффективности его транспортировки до плазмы Т-15МД. Как показывают расчёты, в области нейтрализации пучка B_z не должна превышать 1,5 Гс. Соответственно в инжекторе устанавливаются два магнитных экрана, общие для обоих источников: один (МЭИ) в районе источников до торца ВКИ, другой внутри ВКИ в области нейтрализаторов (МЭН). МЭИ представляет собой трубу («короб») из магнитомягкой стали с окном прямоугольного сечения $0,9 \times 2,1$ м, длиной 1,6 м и толщиной стенки 40 мм. Источники с потенциалом до 60 кВ располагаются внутри короба. В стенках короба предусматриваются окна для приводов шиберов, патрубков вакуумных насосов и трубок газонапуска. Короб с массой около трёх тонн устанавливается на подставке на полу зала и крепится к камере инжектора. Подставка имеет регулировку по высоте. МЭН представляет собой «короб» из магнитомягкой стали с окном прямоугольного сечения $0,54 \times 1,38$ м, длиной 1,2 м и толщиной стенки 40 мм. Короб свинчивается на опорной плите подставки с регулировкой по высоте и устанавливается на полу в ВКИ.

на некоторый угол, что приведёт к увеличению общей расходимости пучка атомов и ухудшению эффективности его транспортировки до плазмы Т-15МД. Как показывают расчёты, в области нейтрализации пучка B_z не должна превышать 1,5 Гс. Соответственно в инжекторе устанавливаются два магнитных экрана, общие для обоих источников: один (МЭИ) в районе источников до торца ВКИ, другой внутри ВКИ в области нейтрализаторов (МЭН). МЭИ представляет собой трубу («короб») из магнитомягкой стали с окном прямоугольного сечения $0,9 \times 2,1$ м, длиной 1,6 м и толщиной стенки 40 мм. Источники с потенциалом до 60 кВ располагаются внутри короба. В стенках короба предусматриваются окна для приводов шиберов, патрубков вакуумных насосов и трубок газонапуска. Короб с массой около трёх тонн устанавливается на подставке на полу зала и крепится к камере инжектора. Подставка имеет регулировку по высоте. МЭН представляет собой «короб» из магнитомягкой стали с окном прямоугольного сечения $0,54 \times 1,38$ м, длиной 1,2 м и толщиной стенки 40 мм. Короб свинчивается на опорной плите подставки с регулировкой по высоте и устанавливается на полу в ВКИ.

Диафрагма № 1 тракта инжектора с проходным окном 170×1020 мм предназначена для обрезания «крыльев» пучка, которые могут давать тепловую нагрузку на неохлаждаемые поверхности элементов тракта.

Отклоняющий электромагнит (ОЭМ) с величиной МП до 600 Гс производит сепарацию выходящих из нейтрализаторов смешанных пучков атомов и остаточных ионов, поворачивая ионы из двух источников на угол 180° на приёмник остаточных ионов (ПОИ). Размер полюсов магнита: 1 м вдоль оси тракта и около 3 м по вертикали.

ПОИ. Охлаждаемый водой приёмник предназначен для приёма пучков остаточных ионов из двух источников как в режимах тренировки источников ионов и вывода их на рабочий режим, так и при инжекции нейтрального пучка в токамак. ПОИ принимает пучки, у которых на оси плотность мощности может достигать 30 МВт/м^2 . Такая высокая плотность мощности относится к категории критических тепловых потоков, и для её снижения до приемлемой величины менее 10 МВт/м^2 ПОИ имеет V-образную форму: две его вертикально расположенные панели с наборами трубок водяного охлаждения со шнековыми интенсификаторами теплосъёма наклонены к оси пучка под углами $\pm 14^\circ$ [4]. Для измерения профилей тока принимаемых пучков каждая панель имеет набор линеек зондов, расположенных в тени трубок и измеряющих токи вторично-эмиссионных электронов с поверхностей трубок [5]. На рис. 5.1.12 приведены расчётные профили мощности пучков остаточных ионов на панели ПОИ.



Для измерения профилей тока принимаемых пучков каждая панель имеет набор линеек зондов, расположенных в тени трубок и измеряющих токи вторично-эмиссионных электронов с поверхностей трубок [5]. На рис. 5.1.12 приведены расчётные профили мощности пучков остаточных ионов на панели ПОИ.

Экранные панели. Каждый остаточный ион при своём движении по поворотной траектории в ОЭМ имеет вероятность перезарядиться на фоновом газе, заполняющем объём между полюсами ОЭМ. Получающиеся в результате энергичные атомы в зависи-

Рис. 5.1.12. Расчётный профиль энергывыделения от остаточных ионов на панели ПОИ с информацией о полной мощности и максимальной плотности мощности

мости от точки своего рождения на траектории движутся далее веером по прямолинейным траекториям (рис. 5.1.13), нагружая стенки ВКИ и элементы креплений различных компонентов, в том числе и криопанелей. В длинноимпульсных режимах работы эти потоки могут быть опасны.

Для перехвата таких потоков атомов потребовалось установить в районе ОЭМ четыре водоохлаждаемые экранные пластины: горизонтальные над ПОИ, над магнитом, над приёмником нейтрального пучка и одну вертикальную между полюсами на выходе из магнита. Наиболее нагруженным оказался нижний край вертикальной пластины (при $Z = 0,6 \text{ м}$) с плотностью мощности около $0,5 \text{ МВт/м}^2$.

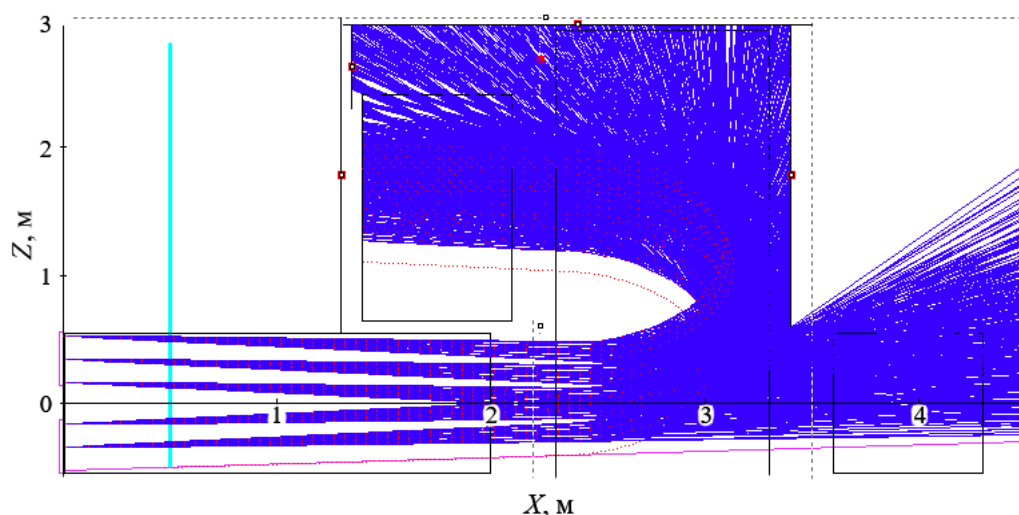


Рис. 5.1.13. «Веер» траекторий энергичных атомов, образующихся в объёме ОЭМ вследствие перезарядки отклоняемых остаточных ионов на фоновом газе

Раздвижной приёмник нейтрального пучка (ПНП). Раздвижной приёмник-калориметр ПНП предназначен (в закрытом состоянии) для приёма пучка атомов в режимах тренировки источников ионов, вывода источников на рабочий режим и для определения параметров нейтрального пучка на выходе из инжектора. Плотность мощности нейтрального пучка на входе в ПНП может достигать 50 МВт/м^2 . Чтобы снизить её на приёмных панелях, ПНП аналогично ПОИ имеет V-образную форму, две его вертикально расположенные панели (створки) наклонены к оси пучка под углами $\pm 14^\circ$. При инжекции нейтрального пучка в токамак створки разворачиваются. Каждая панель состоит из двух слоёв горизонтальных охлаждаемых водой медных трубчатых элементов со шнековыми интенсификаторами теплосъёма. Каждая панель имеет набор линеек зондов вторично-эмиссионных электронов для определения профиля тока в пучке.

Скрепер на выходе из ВКИ. Скрепер имеет вид усечённой пирамиды, он устанавливается на выходе из ВКИ с частичным заходом в переходной патрубок атомопровода, соединяющего ВКИ и камеру токамака. Он предназначен для обрезания крыльев нейтрального пучка до такого уровня, чтобы пучок, проходя через атомопровод, нигде не нагружал никакие его узлы и элементы. Энерговыведение на скрепере составляет около 60 кВт при максимальной плотности мощности до 300 кВт/м^2 , его охлаждение производится прокачкой воды по припаянной к стенкам трубке.

Атомопровод. Атомопровод предназначен для соединения ВКИ с камерой токамака. Основными его компонентами и узлами являются:

- переходной патрубок с проходным окном $300 \times 1000 \text{ мм}$;
- шибер с проходным окном $300 \times 1000 \text{ мм}$, обеспечивающий возможность разделения по вакууму ВКИ и камеры токамака;
- узел быстрой заслонки (БЗ) с окном $300 \times 1000 \text{ мм}$, время открытия БЗ не должно превышать 1 с , она должна открываться перед началом импульса инжекции и закрываться после его прекращения;
- сильфонный узел тарельчатый прямоугольной формы с проходным окном $370 \times 1050 \text{ мм}$, устанавливаемый для компенсации перемещений патрубков при прогреве камеры токамака;
- изолирующая проставка, которая должна развязать гальванически заземлённую камеру инжектора с камерой токамака, потенциал которой может достигать 1 кВ ;
- корпус атомопровода, состоящий из прямого и скошенного патрубков;
- комплект из двух лайнеров, устанавливаемых в патрубки корпуса.

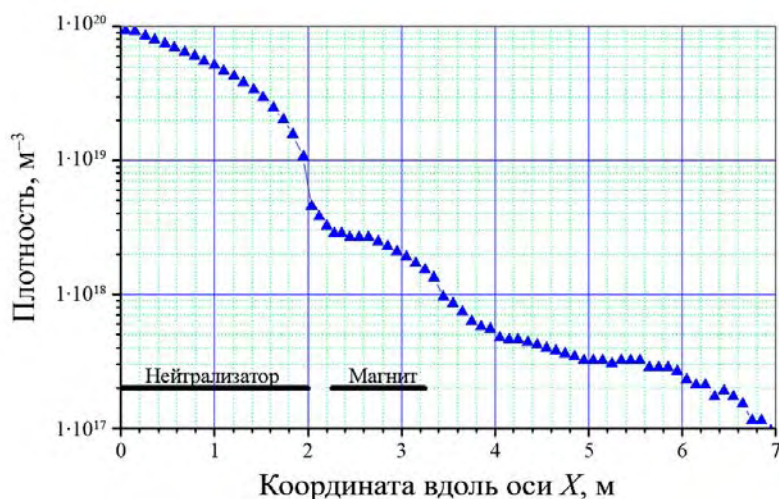


Рис. 5.1.14. Распределение плотности молекул водорода вдоль оси инжекции

лайнера № 2 на входе в камеру Т-15МД составляет $320 \times 850 \text{ мм}$.

Вакуумные условия по тракту пучка. На рис. 5.1.14 представлено рассчитанное с использованием метода Монте-Карло распределение плотности молекул водорода вдоль оси инжекции при напуске в ионные источники и нейтрализаторы суммарного потока водорода $30 \text{ л} \cdot \text{Торр/с}$ и площади криопанелей 15 м^2 .

Каждый лайнер представляет собой медный короб с припаянными трубками водяного охлаждения. Они должны обеспечить приём ионов, образующихся при реионизации быстрых атомов в результате столкновений с молекулами фонового газа и отклоняемых компонентой B_z рассеянного МП токамака сначала на правую стенку до $X = 5,7 \text{ м}$, а после этой координаты, где B_z меняет знак (см. рис. 5.1.11), на левую стенку. Мощностная нагрузка на первый лайнер составляет около 20 кВт с максимальной плотностью мощности порядка 260 кВт/м^2 . Нагрузка на лайнер № 2 порядка 40 кВт с максимальной плотностью мощности до 380 кВт/м^2 . Размер окна

Оценка потерь нейтрального пучка вследствие реионизации атомов после их выхода из нейтрализатора даёт величину около 7%.

Параметры инжектора:

Энергия пучка, кэВ ...	60
Суммарный ток ионов из источников, А ...	80
Суммарная мощность пучков, МВт ...	4,8
Число щелей в ионном источнике ...	24
Площадь эмиссионной поверхности в ЭЭ ИОС, см ² ...	173
Угол горизонтальной расходимости пучка, мрад ...	10
Угол вертикальной расходимости пучка, мрад ...	30
Число ионных источников ...	2
Вертикальные координаты осей пучков при $X = 0$, мм ...	±380
Расстояние до вертикального прицела источников, м ...	7
Нагрузка на нейтрализатор, МВт ...	0,01
Эффективность нейтрализации (с учётом молекулярных ионов в пучке), отн. ед. ...	0,48
Мощность нейтрального пучка после нейтрализатора, МВт ...	2,285
Мощность ионного пучка после нейтрализатора, МВт ...	2,475
Полная нагрузка на атомопровод от прямого перехвата пучка атомов, МВт ...	0,015
Эффективность прохождения пучка по тракту, отн. ед. ...	0,95
Потери на реионизацию пучка атомов (7%), отн. ед. ...	0,16
Инжектируемая мощность нейтрального пучка, МВт ...	2,05
Рабочий газ ...	Водород

5.1.2. Функциональное оборудование СИН

Функциональное оборудование СИН должно обеспечивать работу инжекторов с заданными параметрами в квазистационарных режимах с длительностью импульсов до сотен секунд. К нему относятся следующие системы инжекторов:

- электропитания;
- водяного охлаждения;
- вакуумной подготовки инжекторов и ионных источников;
- криогенного обеспечения;
- газонапуска;
- автоматического управления, сбора и обработки данных.

Для обеспечения стационарного режима работы СИН оснащена специализированными системами электропитания инжекторов.

Для каждого ионного источника это:

- силовой высоковольтный источник питания (СВИП) +(20—60) кВ, 60А;
- система низковольтного электропитания (СНЭП) в составе:
 - устройство питания накала катодов (УПНК) переменным током 1500 А, 60 кВт;
 - устройство питания дуги (УПД) в газоразрядной камере (ГРК) 2000 А, +(30—100) В;
 - модулятор тока дуги (МТД), выполненный на полупроводниковом модуле 600 В/2000 А;
 - устройство защиты от пробоев в ИОС (снаббер и дроссели);
 - защитный разрядник на диапазон 20—80 кВ;
 - устройство электропитания промежуточного электрода под отрицательным потенциалом -(2—8) кВ;
 - система электропитания газовых клапанов ионного источника и нейтрализатора.

Для каждого инжектора источник стабильного тока для питания отклоняющих электромагнитов 800 А, +30 В.

В алгоритме управления всеми системами электропитания инжекторов предусмотрен импульсный режим работы СИН с регулируемой длительностью импульса до 400 °С со сценариями выключения при

аварийных ситуациях и по команде с пульта управления. Система управления СИН обеспечивает практически автономную работу инжекторов.

Система водяного охлаждения инжекторов имеет два контура дистиллированной воды: один с давлением воды 1 МПа охлаждает компоненты инжекторов с высокой плотностью мощности тепловых нагрузок свыше 1 МВт/м² (приёмники пучков ионов и атомов и диафрагмы/скреперы), другой контур с давлением воды 0,5 МПа охлаждает менее нагруженные ионные источники, нейтрализаторы, экранные пластины, лайнеры атомопроводов, отклоняющие электромагниты, а также устройства электропитания, расположенные на высоковольтных платформах.

Суммарный расход воды с давлением 1 МПа в трёх инжекторах составит около 650 м³/ч, а для устройств, охлаждаемых водой с давлением 0,5 МПа, потребуется около 200 м³/ч.

Система вакуумной откачки вакуумной камеры каждого инжектора СИН состоит из двух вакуумных постов производительностью по 2000 л·Торр/с, включающих каждый связку турбомолекулярного (ТМН) и форвакуумного насосов. Для предварительной откачки отсеков ионных источников каждого из инжекторов устанавливается вакуумный пост с форвакуумным насосом и двумя ТМН.

Важным устройством в инжекторе с точки зрения получения необходимых вакуумных условий является встроенный криоконденсационный насос (ВККН), использующий жидкий гелий и жидкий азот. Причина его применения — необходимость откачивать значительный поток водорода в инжектор из двух ионных источников на уровне 30 л·Торр/с. ВККН представляет собой две трёхслойные криопанели, расположенные вдоль боковых стенок корпуса инжектора. Внешние экраны криопанелей питаются жидким азотом с температурой 80 К, а внутренняя конструкция из вертикальных труб — переохлаждённым жидким гелием при температуре около 3,8 К. Азотный экран, обращённый внутрь инжектора, выполнен в виде шеврона для пропуски газа. Внешний экран — сплошной. Внизу и вверху криопанелей имеются соответственно раздающие и собирающие коллекторы азота и гелия. Это обеспечивается режимом работы системы криогенного обеспечения инжекторов. При площади криопанелей 15 м² полная быстрота откачки ВККН составляет около 10⁶ л/с. Такая производительность ВККН необходима, чтобы обеспечить приемлемое давление газа вдоль тракта пучка быстрых атомов, т.е. чтобы не допустить больших потерь пучка из-за реионизации атомов на фоновом газе.

Следует отметить, что в аварийном случае с прорывом атмосферы в ВКИ и быстрым отеплением криопанелей с выделением с них накопленного водорода взрывобезопасный предел парциального давления водорода составляет 15 Торр. Соответственно при объёме вакуумной камеры инжектора около 25 м³ и суммарном напуске водорода в два источника с нейтрализаторами около 30 л·Торр/с допустимое интегральное время импульсов пучка составит около 3,5 ч, после чего потребуется провести регенерацию криопанелей. Минимальная длительность паузы будет определяться параметрами системы откачки.

5.1.3. Контроль параметров инжекционного нагрева в Т-15МД

Для ускорения процесса ввода в строй нагревных инжекторов и оптимизации их работы по нагреву и по созданию токов увлечения необходимо обеспечить диагностирование как характеристик NBI-пучка в инжекторе и в плазме, так и степени подготовки камеры токамака к проведению NBI-нагрева. Для этого будет предпринято:

1. Оснащение конструкции каждого из трёх инжекторов двумя спектральными системами, предназначенными для регистрации в атомопроводах энергии и компонентного состава NBI-пучков (измеряемого по соотношению концентраций атомов пучка с энергиями $E_0 = 40\text{—}60$ кэВ, $E_0/2$ и $E_0/3$ по спектру линии H_α^{beam}). Измерения будут проводиться по двум хордам наблюдения (навстречу и вдогон движению атомов пучка) перед началом разряда токамака в присутствии в камере начального давления водорода $\sim 10^{-4}$ Торр. В состав каждой из трёх схем измерения спектра линии H_α^{beam} войдут по две системы сбора света, 6-канальный кварцевый оптоволоконный коллектор длиной 20—30 м, монохроматор МДР-2 (со спектральным разрешением ~ 2 Å) и TV-камера;

2. Создание спектроскопической системы контроля в сечении № 10 за вводом NBI-пучка в плазму в сечении № 11, которая будет регистрировать следующие параметры пучка и плазмы в разряде:

а) потоки на стенку атомов водорода, создаваемые процессами перезарядки быстрых атомов NBI-пучка на тепловых протонах плазмы и потоки водородных атомов «гало» (всё по интенсивности активной CXRS-линии H_α). Из-за сравнительно малой энергии атомов NBI-пучка Т-15МД (40—60 кэВ) и их большой плотности интенсивность перезарядочных потоков атомов водорода на стенку окажется крайне высокой;

б) ответные потоки атомов водорода в плазму, выбиваемые из стенки потоками атомов перезарядки пучка в районе входа пучка в плазму (по интенсивности пассивной линии H_α);

в) поступление и концентрация $n_z(r)$ примесей как результат введения пучка в плазму (из CXRS, Bremsstrahlung и спектроскопических измерений);

г) профиль источника пучка быстрых протонов $n_p^{\text{fast}}(r)$, который измеряется по кривой ослабления плотности атомов NBI-пучка (из ослабления интенсивности MSE-линий H_α^{beam} вдоль траектории пучка). При проведении NBI-нагрева необходимо избежать появления роста плотности плазмы, вызванного перезарядочным поступлением атомов водорода со стенки в плазму в районе ввода пучка, что может привести к быстрому поглощению потоков атомов пучка на входе в плазму (за счёт ионизации атомов электронами и их перезарядки на протонах) и к нежелательному смещению источников быстрых протонов n_p^{fast} к границе шнура. Очистка стенок от водорода и примесей с усилением откачных (сорбционных) свойств стенок и диверторных пластин позволит осуществить необходимый сдвиг источников быстрых протонов n_p^{fast} к центру плазменного шнура;

д) вклады энергии пучка, идущие в нагрев электронов и ионов плазмы, регистрируются с помощью измерений концентрации $n_p^{\text{fast}}(r)$ и «температуры» $T_p^{\text{fast}}(r)$ быстрых ионов из анализа CXRS-спектра линии H_α и использования кода FIDA. Для проведения данных измерений потребуется обеспечить регистрацию CXRS-спектров быстрых протонов в районах их пересечения с DNB-пучком с нескольких направлений наблюдения;

е) динамика роста температур $T_e(r)$ и $T_i(r)$ в процессе NBI-нагрева — из томсоновских (в сечении № 10) и CXRS (в сечениях № 9 и 10) измерений.

Измерения (а)—(г) проводятся на NBI-пучке, расположенном в сечении № 11, через окна в сечении № 10, измерения (д)—(е) — с помощью томсоновских измерений (в сечении № 10) и CXRS-измерений на DNB-пучке (в сечениях № 8 и 9).

Получаемые данные о работе NBI-пучков в плазме Т-15МД необходимо объединить и описать в модели NBI-нагрева.

5.2. СИСТЕМА НАГРЕВА И ГЕНЕРАЦИИ ТОКА В ИОННО-ЦИКЛОТРОННОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Введение

На современных установках электромагнитные волны на частоте ионного циклотронного резонанса (ИЦР) и его гармоник используются, главным образом, для нагрева ионной компоненты плазмы и генерации тока быстрыми магнитозвуковыми волнами (БМЗ). Как правило, эти задачи реализуются по отдельности, в зависимости от постановки эксперимента, в связи с тем, что поглощение ВЧ-волны в диапазонах ионно-циклотронных резонансов и прямой нагрев электронов плазменного шнура являются конкурирующими эффектами.

Особенностью установки Т-15МД (с точки зрения выбора параметров комплекса ионно-циклотронного нагрева (ИЦРН)) является использование водорода (H) в качестве рабочего газа. Для реализации различных схем ионно-циклотронного нагрева рассматривается использование малых добавок (^3He , ^4He и др.). Возможны также эксперименты в плазме, где основным рабочим газом является ^4He .

Реализация системы ионно-циклотронного резонансного нагрева плазмы имеет как традиционный подход, связанный с применением набора промышленных высокочастотных модулей, построенных на базе многокаскадных ламповых усилителей мощности [6], так и альтернативный — построение однокаскадных автоколебательных систем на основе мощных генераторных триодов [7, 8]. При создании

ИЦР-системы для установки Т-15МД был выбран первый вариант, обладающий рядом очевидных преимуществ, связанных с возможностью оперативного управления частотой и фазой колебаний. Данная система требует выполнения специальных мер по обеспечению согласования с изменяющейся нагрузкой.

5.2.1. Назначение системы ИЦРН токамака Т-15МД

Система ионно-циклотронного нагрева и генерации тока установки Т-15МД должна обеспечивать решение следующих задач:

1. Эффективный нагрев плазмы, прежде всего ионной компоненты, при поглощении ВЧ-волны на частотах ионно-циклотронного резонанса. При этом должна быть рассмотрена реализуемость следующих схем нагрева в зависимости от тороидального поля, рабочего газа плазменного разряда, целей и задач эксперимента:

- нагрев на малой добавке резонансного иона (на малой добавке ^3He или ^4He в водородной плазме);
- нагрев на второй гармонике основной компоненты плазмы (H или He), в том числе с использованием малой добавки;

- трёхионная схема нагрева;

2. Генерация тока быстрыми магнитозвуковыми волнами в центральной области плазменного шнура;

3. Нагрев и генерация тока плазмы в режиме конверсии мод;

4. Кондиционирование первой стенки камеры токамака;

5. Помощь в создании пробоя и инициации разряда.

Эксперименты с использованием системы ионно-циклотронного нагрева и генерации тока проводятся в операционных режимах в диапазоне тороидальных полей от 1 до 2 Тл.

Система ионно-циклотронного нагрева и генерации тока может быть задействована во всех рабочих режимах токамака Т-15МД, включая режимы омического нагрева, L-моду и H-моду с граничными локализованными модами, режимы с высокой суммарной мощностью дополнительного нагрева (>15 МВт). В связи с этим предусмотрена защита внутрикамерных элементов для минимизации поступления примесей в разряд из-за взаимодействия плазмы с антенной в напряжённых режимах. Система устойчива к изменению связи антенна—плазма в периодических процессах (например, при развитии граничных локализованных мод, ELMs), приводящих к быстрому и значительному увеличению тепловых потоков на антенну.

5.2.2. Основные технические характеристики системы ИЦРН

Номинальная выходная мощность комплекса составляет не менее 6 МВт при длительности импульса до 30 с. Система ионно-циклотронного нагрева и генерации тока состоит из шести ВЧ-генераторов, которые создают ВЧ-излучение мощностью порядка 1,0 МВт каждый с возможностью управления фазой колебаний в полосе частот от 15 до 50 МГц и при меньшей мощности (не хуже 60%) — до 60 МГц. Система имеет возможность перестройки частоты внутри рабочего диапазона с точностью не хуже 0,5 МГц.

Основные технические параметры системы ИЦР-нагрева токамака Т-15МД:

Рабочий диапазон частот, МГц ...	15—60
Полная ВЧ-мощность, МВт ...	≥ 6
Длительность ВЧ-импульса, с ...	≤ 30

5.2.3. Состав и структура системы ИЦРН токамака Т-15МД

Система ИЦРН на токамаке Т-15МД включает в себя следующие компоненты:

- ВЧ-генераторы;
- система охлаждения ВЧ-генераторов и источников питания;
- антенные модули с набором излучающих петель, экраном Фарадея, вакуумные передающие линии, включая узел керамического проходного изолятора;
- системы согласования импеданса;
- газонаполненные коаксиальные линии передачи ВЧ-излучения;
- система вакуумной откачки и газонапуска;
- система маслоподготовки;

— автоматизированная система управления (АСУ), управляющая ВЧ-генераторами, обеспечивающая согласование нагрузки, диагностику, сбор, обработку и сохранение в базе данных экспериментальной информации.

Укрупнённая блок-схема части системы ИЦРН связана с одним задающим генератором (рис. 5.2.1). На рис. 5.2.1 видно, что рабочая частота подаётся через управляемые фазовращатели на три ВЧ-усилителя мощности, которые через согласователи импеданса подключены к трёхпетельной антенне.

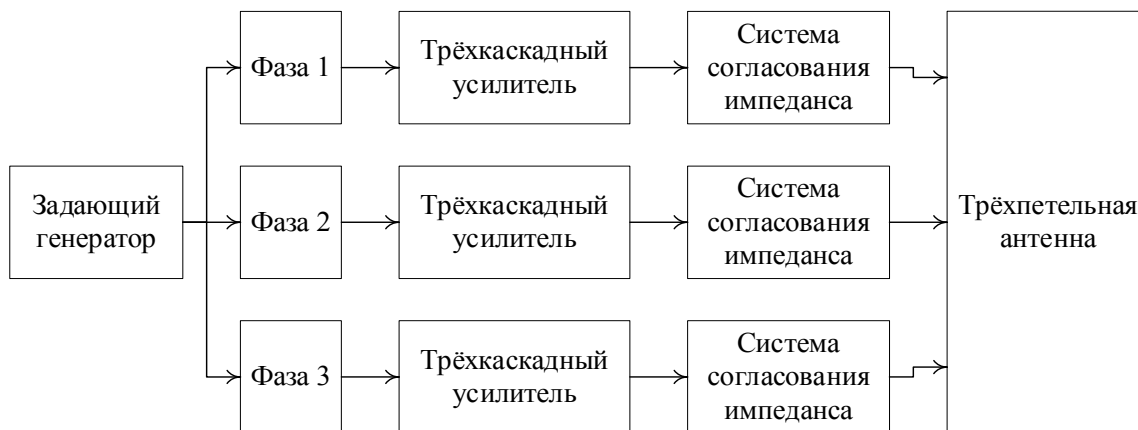


Рис. 5.2.1. Укрупнённая блок-схема системы ИЦРН

Структурная схема одного из шести генерирующих модулей системы ИЦРН показана на рис. 5.2.2.



Рис. 5.2.2. Структурная схема ВЧ-канала системы ИЦР

Силовое электропитание модуля осуществляется от специализированного силового высоковольтного источника питания (СВИП) напряжением до 20 кВ, при токе до 80 А (не входит в систему ИЦРН). Для проведения тренировки генератор может быть подключён к испытательной нагрузке. Для транспортировки ВЧ-излучения используется коаксиальная линия, наполненная сухим азотом.

Частью линии передачи является система согласования импеданса в виде тюнеров с тройными жидкостными заглушками (Triple Liquid Stub Tuners — TLST), предназначенная для передачи высокого

уровня ВЧ-мощности и защиты ВЧ-генератора за счёт уменьшения отражённой мощности от антенны. Сопротивление нагрузки (антенны и связанной с ней плазмы) измеряется с помощью вольтамперных датчиков, установленных в коаксиальной линии передачи между антенной и системой согласования, на его основе рассчитываются оптимальные уровни жидкости в шлейфовых тюнерах. Данная система согласования может работать в реальном времени и обеспечивает стабильную работу ИЦРН-системы в длинных импульсах. Жидкостный тюнер-заглушка представляет собой короткозамкнутую коаксиальную линию передачи переменной длины. Это позволяет использовать различия в длине волны радиочастоты в газе и в жидкости из-за различных относительных диэлектрических постоянных. Жидкость (силиконовое масло) заполняет пространство между внутренним проводником и внешним проводником коаксиальной линии передачи. Параметры этой системы согласования можно регулировать, изменяя уровень жидкости с помощью перекачивающей системы. Жидкостный тюнер-заглушка работает более надёжно, чем обычная механическая система, поскольку в нём отсутствует движущаяся часть, нет скользящего контакта, поэтому она может выдерживать более высокое напряжение при длительной импульсной работе. Поскольку диапазон регулировки у него меньше, чем у обычного тюнера-заглушки, время отклика у него быстрее, чем у обычного тюнера-заглушки. Так же легко можно регулировать скорость изменения уровня жидкости, управляя перекачивающей системой.

Во время плазменного разряда длины жидкостных тюнеров-заглушек системы согласования импеданса, необходимые для достижения идеального соответствия, рассчитываются системой автоматизированного управления ИЦРН (АСУ ИЦРН) в реальном времени. Схематическое устройство системы согласования импеданса представлено на рис. 5.2.3.

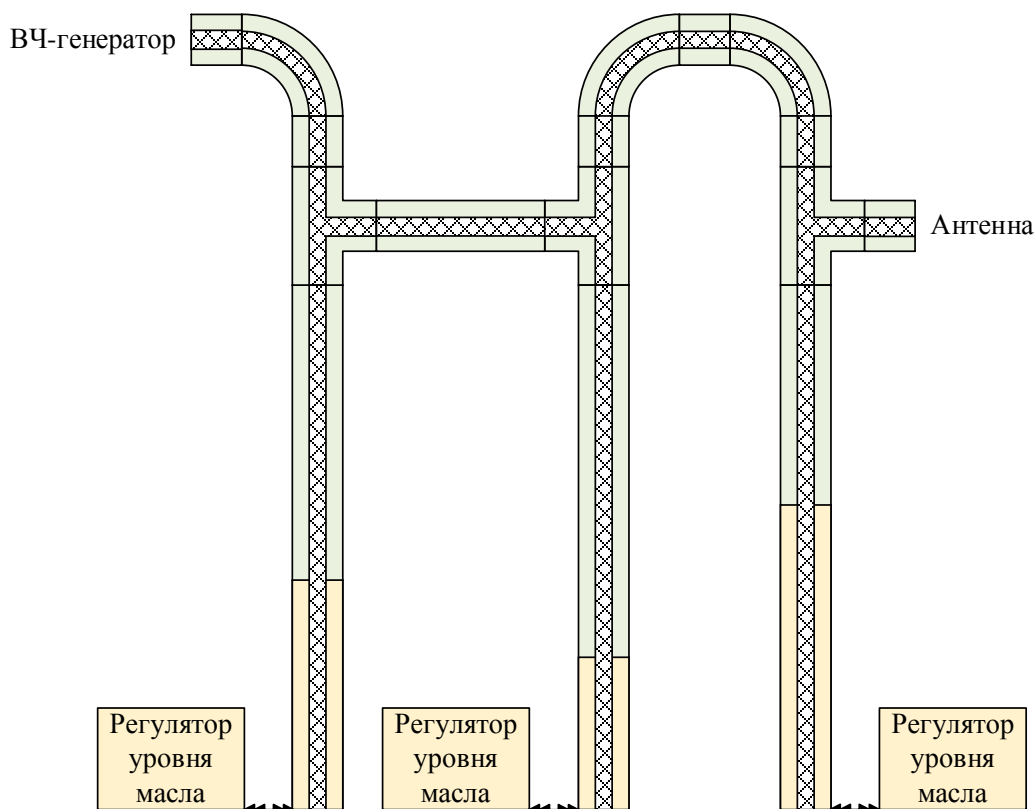


Рис. 5.2.3. Схема согласователя импеданса ИЦР

5.2.4. Конструкция антенного модуля

Загрязнение плазмы примесями и локализованные тепловые нагрузки, связанные с работой антенны ионного циклотронного диапазона частот, являются одними из наиболее сложных проблем для использования ИЦРН. Поток примесей в плазму генерируется взаимодействием ионов, ускоренных в полях, ассоциированных с медленной волной на периферии плазмы, с первой стенкой и поверхностью антенны.

Антенна, ориентированная поперёк магнитного поля (ПА), представляет собой ИЦР-антенну, в которой токовые петли и стороны корпуса антенны перпендикулярны, а стержни экрана Фарадея параллельны общему магнитному полю. При использовании ПА-антенны наблюдается, что примесное загрязнение и источник примеси на антенне уменьшаются по сравнению с использованием типовой антенны, ориентированной по тору (ТА). Общая осаждённая ВЧ-энергия на антенне значительно возрастает, когда антенна ПА работает при монополюсном фазировании петель по сравнению с дипольной фазировкой. ПА-антенна также более толерантна к изменениям нагрузки при возникновении краевых мод (ELM) по сравнению с ТА-антеннами. Стоит отметить, что как при L-, так и при H-модовых разрядах излучаемая мощность для разряда с нагревом ПА-антенны на 20—30% ниже, чем для разряда с нагревом двух ТА-антенн.

Разработка и успешное применение трёхпетельной антенны обеспечили возможность снижения наведённых токов в корпусе антенны и, таким образом, снижение локального высокочастотного потенциала, что продемонстрировало существенное снижение поступления в плазму примесей по сравнению с работой с двухпетельной антенной на токамаке ASDEX [9].

Для размещения антенных модулей для системы ИЦР-нагрева на T-15МД используются экваториальные патрубки шириной 630 мм и высотой 890 мм.

Антенный модуль включает три свёрнутые (folder strap) излучающие петли с вакуумными передающими линиями и узлом проходного керамического изолятора, опорные изоляторы, экран Фарадея, который крепится на кожухе (коробке) антенного модуля. Петли антенного модуля имеют ориентацию по тору.

Роль вакуумного барьера между передающей газонаполненной линией и вакуумной линией антенного модуля осуществляет проходной керамический изолятор, длина изолятора — 146/130 мм, диаметр изолятора — 136/120 мм. В качестве вакуумной линии использована коаксиальная линия с размерами: внешний диаметр — 120 мм, внутренний — 73 мм. На рис. 5.2.4 показан эскиз узла проходного изолятора.

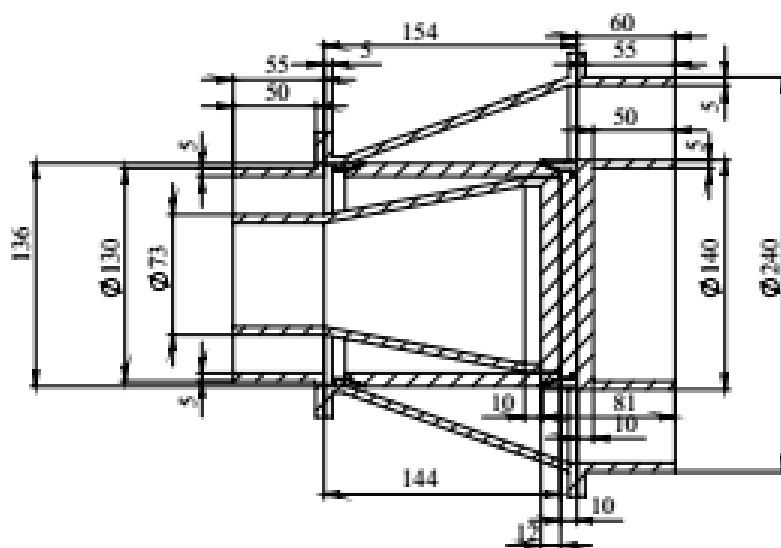


Рис. 5.2.4. Эскиз узла проходного изолятора антенного модуля

Общий вид антенного модуля представлен на рис. 5.2.5, а его разрез — на рис. 5.2.6.

Антенный модуль монтируется в экваториальный патрубок снаружи в сборе с опорными фланцами, петлями, лимитерами и экраном Фарадея. Несущий каркас располагается внутри экваториального патрубка и является опорой для вакуумных линий и внутреннего опорного фланца. Каркас крепится к наружному фланцу, последний осуществляет вакуумноплотное соединение с экваториальным патрубком токамака (на рисунках не показан). Для передвижения антенного модуля вдоль экваториального патрубка предусмотрены сильфонные развязки (узел развязывающего сильфона). Во избежание консольного подвеса несущего каркаса и внутренних элементов антенного модуля и для передвижения на нижнем крае каркаса предусмотрены роликовые опоры (4 шт., на рисунках не показаны), которые опираются на корпус экваториального патрубка.

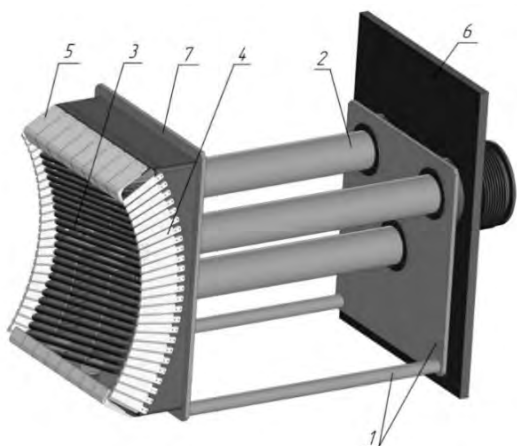


Рис. 5.2.5. Модуль антенный. Общий вид: 1 — несущий каркас (1 шт.); 2 — вакуумная коаксиальная линия (3 шт.); 3 — экран Фарадея (1 шт.); 4 — лимитеры боковые (2 шт.); 5 — лимитеры вертикальные (2 шт.); 6 — фланец опорный наружный (1 шт.); 7 — фланец опорный внутренний (1 шт.)

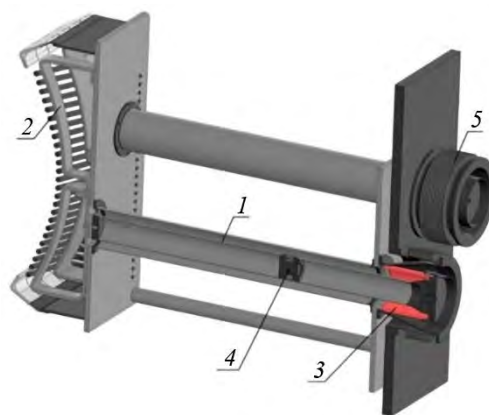


Рис. 5.2.6. Разрез модуля антенного: 1 — несущий каркас (1 шт.); 2 — излучающая петля (3 шт.); 3 — узел проходного изолятора (3 шт.); 4 — сильфонные узлы (3 шт.); 5 — узел развязывающего сильфона (3 шт.)

Вакуумные коаксиальные линии представляют собой меднёные трубы из нержавеющей стали: наружная — диаметр 120 мм, внутренняя — диаметр 73 мм. Проходной изолятор (см. рис. 5.2.4, 5.2.6, 3) отделяет вакуумную часть линии от газонаполненного фидера. Сильфонные узлы (см. рис. 5.2.6, 4) позволяют осуществить безмоментное соединение внутренних труб вакуумных линий, которые жёстко закреплены на фланце каркаса через проходной изолятор и излучающими петлями. Излучающие петли представляют собой подобие восьмёрок с двумя заземлёнными концами на внутренний опорный фланец и центральным подводом к вакуумным коаксиальным линиям. Петли выполнены из отожжённой меди М1. Ввиду смещения оси экваториального патрубка относительно оси плазмы петли выполнены несимметрично, повторяя абрис плазменного пучка, две боковые — одинаковые, а центральная с подключением, развёрнутым на 180° . Контакты земляных концов петель с опорным внутренним фланцем осуществляются по контуру, кромка $\sim 2\text{--}4$ мм.

Экран Фарадея представляет собой наклонённые относительно оси плазмы на 13° трубки, подсоединённые к коллекторам с обеих сторон каждой петли. Коллекторы закреплены на внутреннем опорном фланце. Боковые и вертикальные лимитеры выполнены из молибдена, имеют ряд прорезей вдоль линий поля (боковые) и крепятся к боковым и вертикальным поверхностям крайних коллекторов экранов Фарадея соответственно.

Вакуумная часть антенны выдерживает многократный и длительный нагрев до 200°C с целью обеспечения вакуумной гигиены.

5.2.5. АСУ системы ИЦРН

Автоматизированная система управления ИЦРН решает все задачи, связанные с управлением и диагностикой оборудования системы ИЦРН, обеспечивает выполнение сценария плазменного разряда с участием ИЦРН, управляет высоковольтными источниками СВИП, обеспечивает противоаварийную защиту. Важнейшей функцией АСУ ИЦРН является управление системой согласования импеданса на основании диагностических сигналов линий передачи ВЧ-мощности.

Информация о проходящей и отражённой высокочастотной мощности получается с помощью набора направленных ответвителей, расположенных на передающих линиях. Обработка аналоговых сигналов проходящей и отражённой мощностей позволяет отслеживать коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН) в передающих линиях и формировать необходимые сигналы управления в систему согласования импеданса для поддержания его на заданном уровне от 1 до 1,5 во время передачи энергии в нагрузку. Высокое значение КСВН (более 3) при развитии пробоя в ВЧ-тракте используется для формирования сигнала защиты от возникающих перенапряжений и кратковременного отключения питания ВЧ-генератора.

При работе системы ИЦРН в токамаке нагрузка на антенну меняется во времени, и часто изменение нагрузки может быть большим и быстрым. Хотя ВЧ-генератор может быть терпим к небольшому рассогласованию, обычно ему не разрешается работать, когда рассогласование превышает пороговое значение, предварительно установленное при обнаружении дуги (пробоя). Отключение источника силового питания при обнаружении значительного рассогласования является обязательным во всех системах ИЦР-нагрева. Хотя не все рассогласования вызваны реальными дугами, дуги в точках высокого напряжения в системе почти всегда вызывают рассогласование. В результате большие рассогласования, вызванные изменением нагрузки, не только ограничивают производительность передатчика при высокой мощности, но и могут серьёзно снизить коэффициент полезного действия системы ИЦРН плазмы. Поэтому идеальная система согласования импеданса системы ИЦРН должна преобразовывать нагрузку в антенне в устойчивое и стабильное, почти идеальное соответствие с выходным сопротивлением ВЧ-генератора и должна быть способна обрабатывать изменяющуюся нагрузку на антенну в режиме реального времени практически при любых условиях плазмы. Система согласования также должна быть способна выдерживать высокое ВЧ-напряжение во время работы с высокой мощностью (и длительным импульсом), обеспечивая при этом как можно меньшие дополнительные потери ВЧ-мощности.

Во время работы T-15MD в режиме H-моды АСУ ИЦРН должна обеспечивать эффективное согласование нагрузки антенны в течение индуцированных колебаний на границе плазменного шнура (ELMs) с выходным сопротивлением ВЧ-генератора (Edge Localized Modes — ELMs — сильные МГД-колебания на периферии плазмы).

В контроллере жидкостного тюнера хранятся основные параметры линий передачи (расположение направленных ответвителей, связанных с тюнерами, калибровочные кривые для демодуляторов, измеряющих мощность ВЧ, и т.д.). На основании данных о прямой и отражённой мощности, информации о состоянии жидкостных тюнеров контроллер рассчитывает высоты столбов масла, необходимые для минимизации отражений.

5.3. СИСТЕМА НАГРЕВА И ГЕНЕРАЦИИ ТОКА В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ НИЖНЕГИБРИДНОГО (НГ) РЕЗОНАНСА ДЛЯ ТОКАМАКА T-15MD

Введение

Система нагрева плазмы и генерации тока в диапазоне частот нижегибридного резонанса является одной из систем дополнительного нагрева плазмы токамака T-15MD. Номинальная мощность комплекса нижегибридного нагрева и генерации тока составляет 4 МВт при длительности импульса до 400 с. Генерирующие модули системы НГ созданы на основе клистронов К-2.45-200 российской фирмы «Исток-2» с частотой 2,45 ГГц и мощностью 200 кВт. Возбуждение и ввод в плазму НГ-волн осуществляется многоволноводным излучателем замедленных волн в нижегибридном диапазоне частот («грилл»). В системе НГ использовано 20 клистроновых модулей. С учётом КПД клистронов 45—50% и КПД трансформаторов анодного питания клистронов общая потребляемая комплексом НГ электрическая мощность составляет до 11 МВт. Для охлаждения комплекса НГ требуется около 250 м³/ч воды.

Клистроны с частотой 4,6 ГГц и мощностью 200 кВт лишь разрабатываются и могут рассматриваться как перспективные при модернизации системы в будущем.

5.3.1. Размещение и компоновка системы НГ-нагрева и генерации тока

Основное оборудование системы — генераторы, шкафы усилителей, оборудование контроля и управления. Схема размещения клистронов показана на рис. 5.3.1, а схема шкафа для клистронов — на рис. 5.3.2.

Высоковольтное питание обеспечивается четырьмя модулями СВИП. От одного модуля питается группа из пяти клистронов. Каждый клистрон КУ-2,45-200 располагается в металлическом шкафу размером 2,0×1,0×2,0 м, масса шкафа ≈500 кг. Высокое напряжение подводится к каждому генерирующему модулю отдельным высоковольтным кабелем РК 50-24. Высокочастотное напряжение возбуждения клистронов подводится от общего задающего генератора на частоте 2,45 ГГц, что обеспечивает когерентность

суммарного излучения антенной. Все коммуникации подводятся к модулю снизу. Электрическая схема клистронного шкафа разработана в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Она включает:

- блок накала клистрона, 13 В; 150 Вт; 50 Гц. Изоляция между обмотками 50 кВ. Включение двухступенчатое, в течение 5 мин;
- блок питания электроразрядного насоса, 4 кВ, 100 Вт, регулируемый;
- блок питания соленоида, 120 В, 35 А, DC, регулируемый;
- блок питания усилителя задающего сигнала;
- система управления, блокировок и сигнализации (УБС I) с блоком питания, процессором управления первого уровня и информационным дисплеем;
- электродвигатель (с приводом и управлением) переключателя СВЧ-мощности;
- датчики контроля параметров и состояния систем шкафа. Приборы управления, звуковой и световой сигнализации.

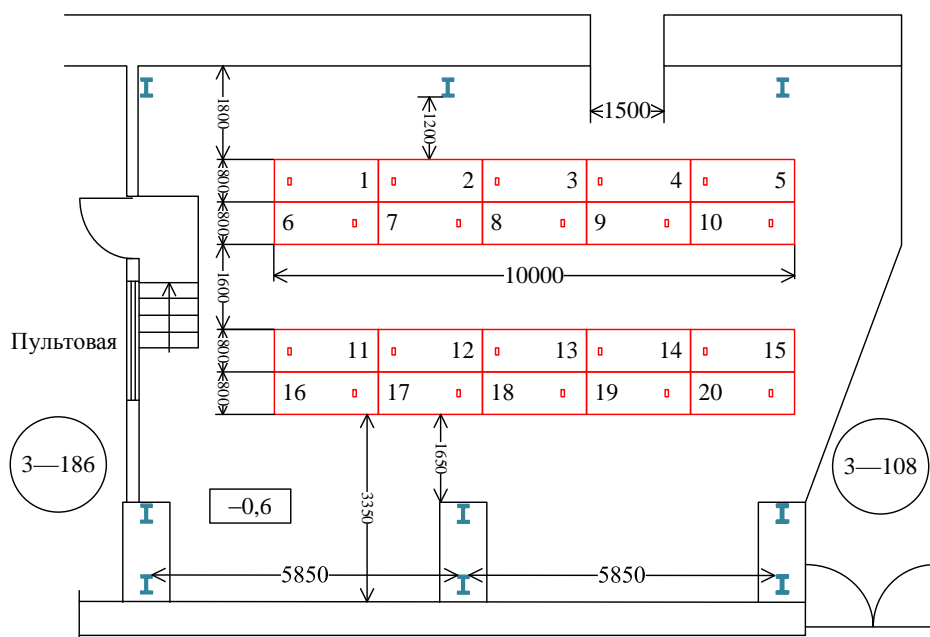


Рис. 5.3.1. Схема размещения 20 клистронных модулей

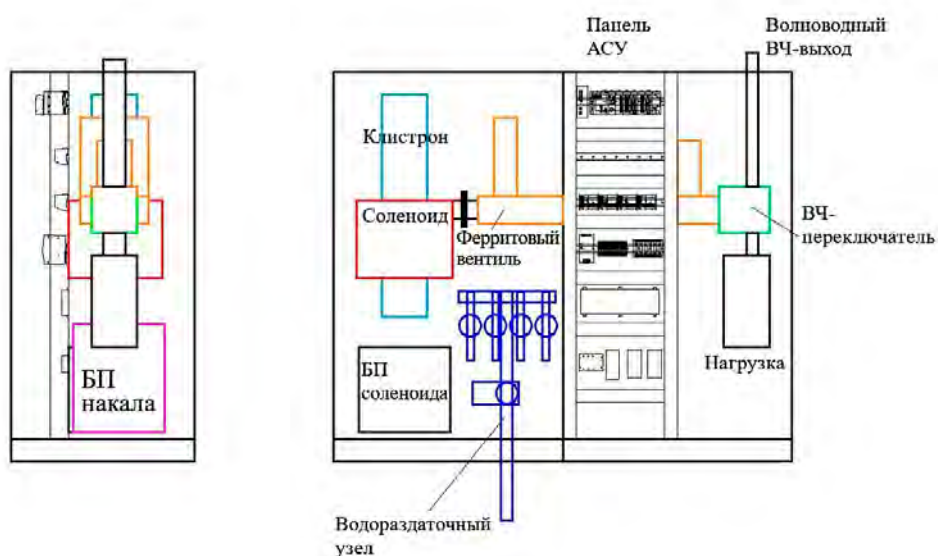


Рис. 5.3.2. Схема клистронного шкафа

Для всех блоков и систем предусмотрено ручное и дистанционное управление. Блок-схема и компоновка шкафа генераторного модуля приведены на рис. 5.3.3.

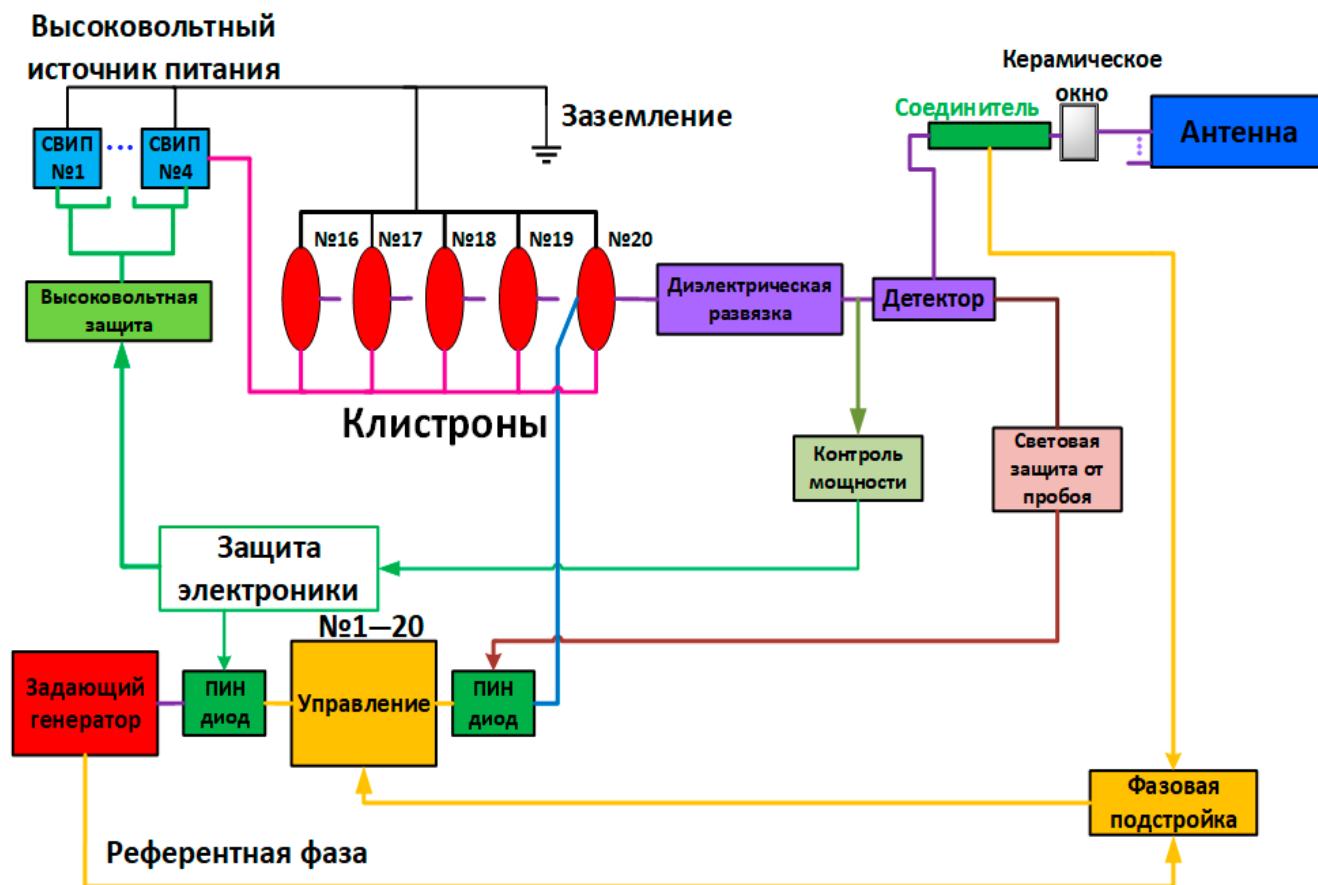


Рис. 5.3.3. Блок-схема системы НГ

Передающие волноводные линии от генераторов до антенны обеспечивают минимальные потери ВЧ-мощности. Потери (для основного типа колебаний) составляют примерно $1 \cdot 10^{-2}$ дБ/м, т.е. при длине волновода 40 м (от генератора до антенны) потери мощности могут составить 3—4%. Волноводные линии снабжены датчиками пробоя и контроля за передаваемой мощностью. Для повышения электрической прочности тракта предусмотрена возможность работы волноводов под повышенным до 2 атм. давлением воздуха.

С помощью волноводов сечением 90×45 мм СВЧ-излучение подводится к общей антенне, расположенной в патрубке № 16 токамака Т-15МД.

5.3.2. Антенна системы НГ-нагрева и генерации тока (грилл)

Антенна системы НГ-нагрева и генерации тока (грилл) размещена в экваториальном патрубке сечения № 16 (690×890 мм). Водяное охлаждение системы подключено к магистралям системы охлаждения Т-15МД, находящимся в подвале под генераторным залом.

Современные конструкции гриллов делятся на два типа. Грилл FAM (fully active multijunction) состоит только из активных волноводов. Более современными считаются ПАМ-гриллы (passive active multijunction) с чередующимися активными и пассивными волноводами. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН разработан ПАМ-грилл мощностью 4 МВт, размером 690×890 мм и, следовательно, с меньшей величиной напряжённости электрических полей, чем у грилла токамака EAST размером 442×776 мм, и это позволяет надеяться на увеличение вводимой в плазму мощности без возникновения электрических дуг, ограничивающих вводимую в плазму мощность в некоторых режимах токамака EAST [10].

5.3.3. Система автоматического управления, блокировок и сигнализации

Автоматизированная система управления ВЧ-системой НГ (АСУ НГ) обеспечивает управление и контроль всего оборудования, входящего в систему НГ, управление высоковольтными источниками СВИП, синхронизацию и сохранение диагностических данных в ИУС Т-15МД.

Нижний уровень включает в себя управление, блокировки и сигнализации (УБС) отдельных генераторных шкафов, дистанционно контролирует основные рабочие параметры системы, отображает и сохраняет в базе данных характеристики СВЧ-импульса, позволяет изменять параметры импульса, организует быструю защиту оборудования при нештатных ситуациях. Верхний уровень контролирует работу всей системы НГ по высокой частоте, включая тракт и антенну с записью всех параметров в собственную базу данных, позволяет осуществлять управление параметрами ВЧ, организует быструю защиту оборудования при нештатных ситуациях, управляет совместной работой высоковольтных источников СВИП и клистронов, обеспечивает совместную работу системы НГ с токамаком Т-15МД.

5.4. СИСТЕМА СВЧ-НАГРЕВА УСТАНОВКИ ТОКАМАК Т-15МД

Введение

Электронно-циклотронный способ нагрева плазмы в тороидальных системах выгодно отличается от других высокочастотных методов простотой системы ввода СВЧ-излучения в плазму, возможностью управлять размерами и положением области выделения энергии в плазме.

Источниками мощного СВЧ-излучения ~ 1 МВт в диапазоне электронно-циклотронных частот и их гармоник являются гиротроны. В состав системы СВЧ-нагрева установки Т-15МД входят три гиротрона с рабочей частотой СВЧ-излучения 82,6 ГГц и два с частотой СВЧ-излучения 105 ГГц, все гиротроны мощностью ~ 1 МВт и длительностью импульса до 30 с [11]. Гиротроны и комплекты дополнительного оборудования разработаны и изготовлены компанией ЗАО НПП «ГИКОМ» (г. Нижний Новгород), системы транспортировки СВЧ-излучения — ИПФ РАН (г. Нижний Новгород). Планируется, что к 2030 г. в состав гиротронного комплекса Т-15МД будут входить восемь гиротронов.

Система СВЧ-нагрева предназначена как для предыонизации рабочего газа на начальной стадии разряда, так и для последующего нагрева электронной компоненты плазмы. СВЧ-пробой и нагрев осуществляются на второй гармонике ЭЦР в Х-моде. В настоящее время рассматриваются различные варианты развития системы СВЧ-нагрева (например, см. [12]).

Для энергетического пуска Т-15МД предыонизация с помощью СВЧ-излучения оказывается наиболее актуальной, так как напряжение обхода на токамаке на стадии пуска не превышает 6 В из-за ограничения в энергопитании установки, что делает невозможным пробой с помощью одного только индуктора. Расчётное минимальное значение напряжения, необходимого для пробоя на Т-15МД, составляет около 16 В. (Напряжение на обходе в токамаке Т-10 во время индукционного пробоя составляло величину 20—25 В.) Эксперименты по СВЧ-пробою проводились как на зарубежных [13—15], так и на отечественных установках [16—18].

С целью организации пробоя гиротроны системы СВЧ-нагрева оборудованы фокусирующими системами ввода СВЧ-излучения [19], которые позволяют локализовать пробой в узкой области зоны электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР).

Установка Т-15МД — токамак с открытым воздушным индуктором, что означает наличие больших рассеянных магнитных полей. Магнитное поле Земли обычно оценивается в 0,5 Гс. Для нормальной работы гиротрона значение рассеянного поля не должно превышать это значение более чем в 3—4 раза. Исходя из этого, критическая величина рассеянного магнитного поля для гиротрона оценивается примерно в 2 Гс. По этой причине, чтобы влиянием рассеянных полей можно было пренебречь, система СВЧ-нагрева расположена на достаточно большом удалении ~ 40 м от установки (в соседнем зале), как показано на рис. 5.4.1.

Система СВЧ-нагрева установки токамак Т-15МД представлена на рис. 5.4.2 и 5.4.3.

Систему СВЧ-нагрева условно можно поделить на три основные части: гиротронный стенд, волноводный тракт и система ввода СВЧ-излучения.

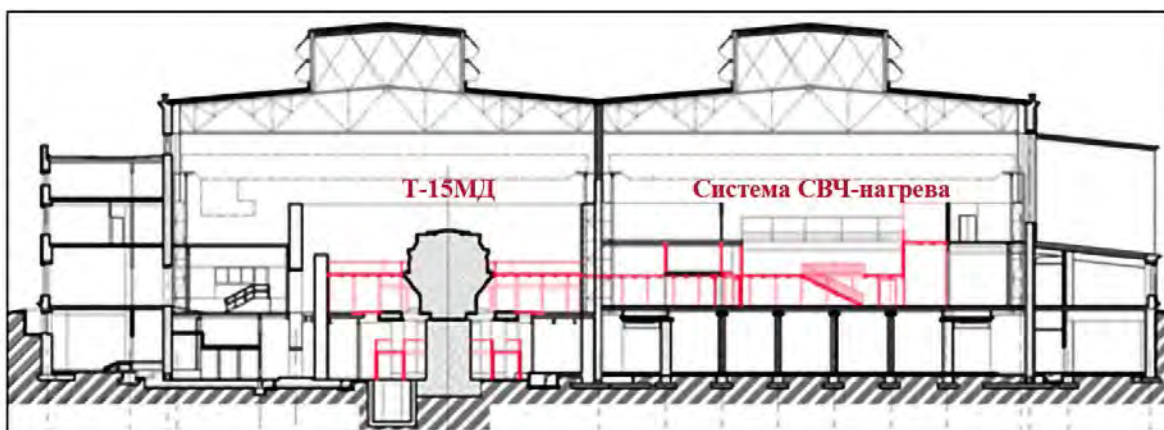


Рис. 5.4.1. Расположение установки токамак Т-15МД и системы СВЧ-нагрева

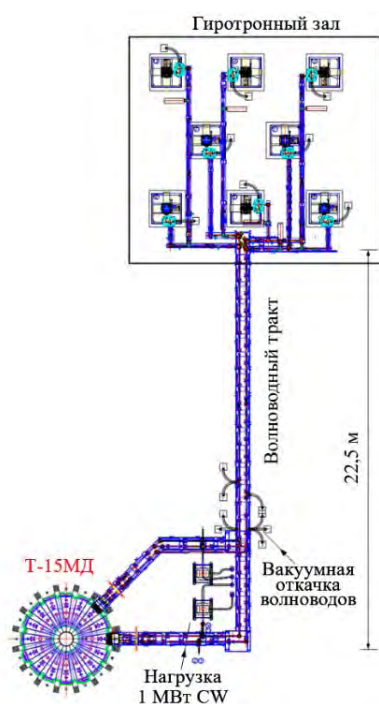


Рис. 5.4.2. Системы СВЧ-нагрева токамака Т-15МД

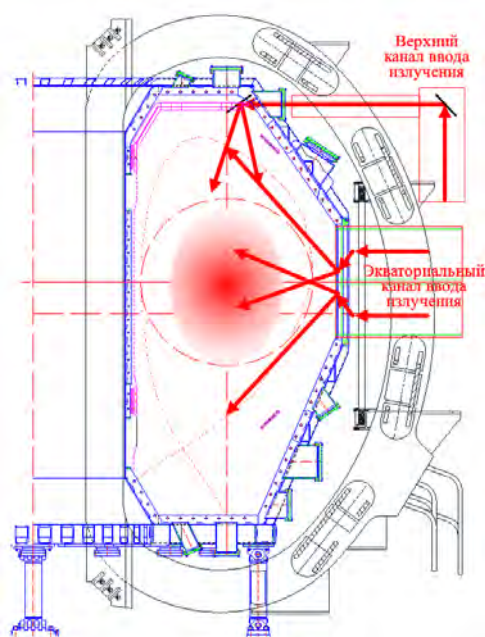


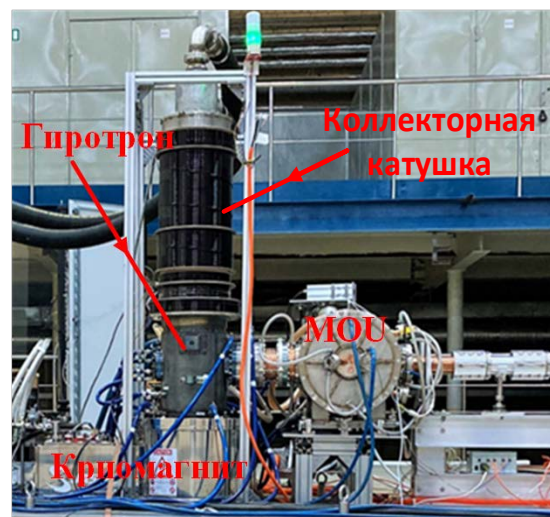
Рис. 5.4.3. Схема ввода СВЧ-излучения в камеру установки Т-15МД

5.4.1. Гиротронный стенд

На рис. 5.4.4 представлен гиротрон с коллекторной магнитной катушкой, установленный в криомагнит. Фланец выходного окна, изготовленного из поликристаллического алмаза, соединён с зеркально-волноводным трактом. Магнитная катушка служит для снижения тепловой нагрузки в результате выхода электронного пучка гиротрона на коллектор.

Гиротрон вместе с системами обеспечения схематически представлен на рис. 5.4.5.

Рис. 5.4.4. Гиротрон Т-15МД: рабочая частота СВЧ-излучения 82,6 ГГц, мощность выходного СВЧ-излучения ~1 МВт, максимальная длительность импульса 30 с



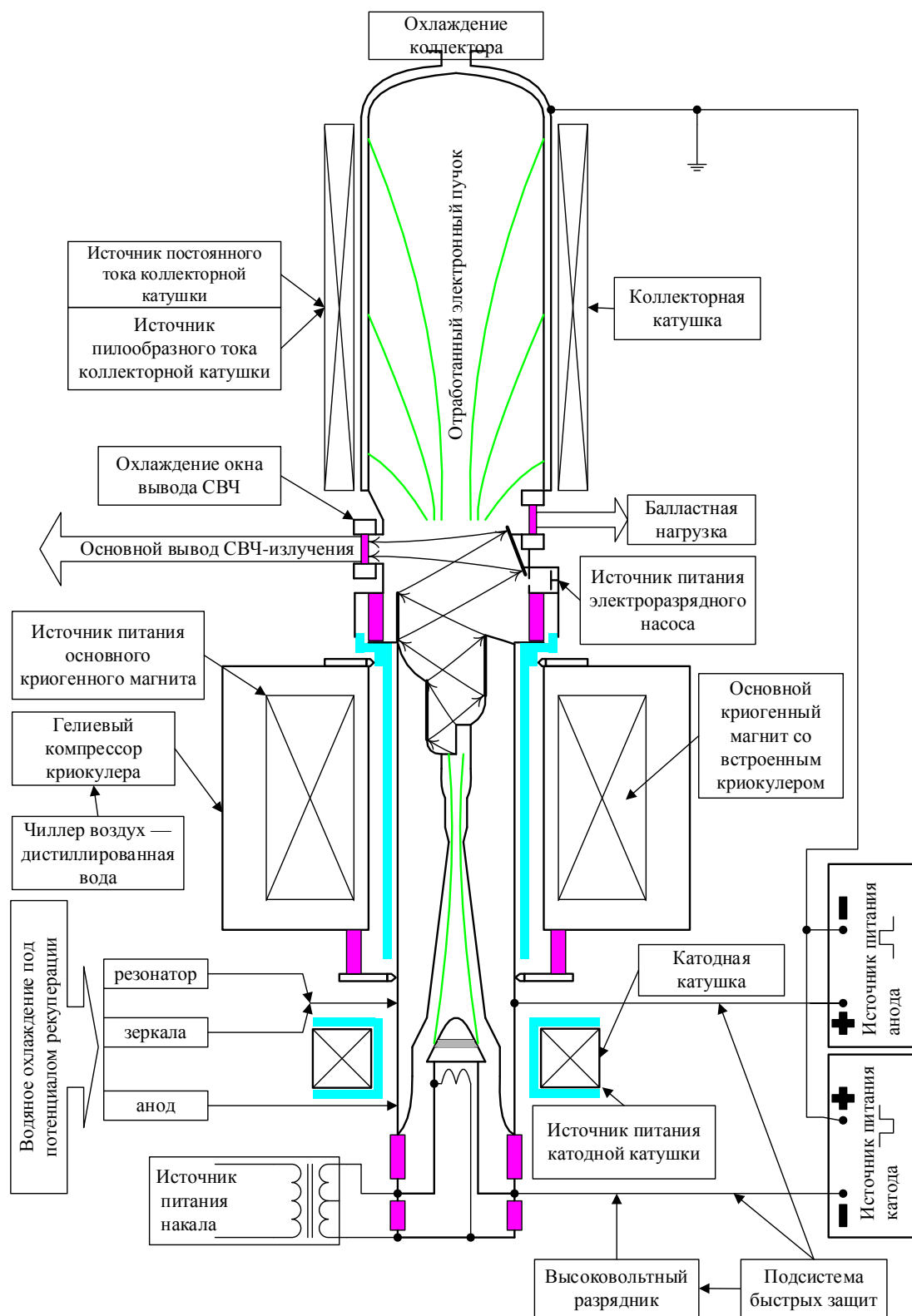


Рис. 5.4.5. Схема гиротрона с комплектом дополнительного оборудования [11]

Основные параметры гиротронов:

Рабочая частота выходного СВЧ-излучения f , ГГц ...	82,6, 105
Катодное напряжение U_k , кВ ...	~ -45
Анодное (рекуперационное) напряжение U_a , кВ ...	~ +25
Катодный ток I_k , А ...	~36
Мощность выходного СВЧ-излучения в виде гауссова пучка P , МВт ...	~1

В состав гиротронного стенда, помимо гиротрона, входят:

- криомагнит с источником питания;
- катодная и коллекторные магнитные катушки с источниками постоянного и пилообразного тока;
- система водяного охлаждения;
- система низковольтного питания накала катода гиротрона;
- быстрая защита от высоковольтного пробоя в гиротроне;
- источник высоковольтного питания анода;
- световая защита от СВЧ-пробоя в передающем тракте;
- система зеркал, согласующих выходное излучение гиротрона с волноводом.

Требования к криомагниту и источнику питания следующие. Распределение магнитного поля соленоида должно удовлетворять техническому заданию завода-изготовителя гиротронов. Стабильность источника питания по выходному току не хуже ± 6 мА/ч. Параметры магнитных (катодной и коллекторной) катушек: величина магнитного поля в центре катодной катушки 300 Гс, максимальный ток 5 А. Коллекторная катушка поделена на две секции с постоянным и переменным током. Значение тока постоянной секции катушки не более 10 А, переменной от 10 до 25 А. При этом длительность нарастания и спада тока 30 мс. Система водяного охлаждения состоит из двух контуров с проточной дистиллированной водой:

— контур охлаждения коллектора гиротрона. Давление на входе — не более 4,5 атм., величина скорости протока не менее 52 м³/ч;

— контур охлаждения внутренних элементов гиротрона, алмазного окна и согласующего блока зеркал. Давление и скорость протока выставляются для каждого элемента индивидуально.

Стабильность низковольтного питания накала катода гиротрона не более 1% при стабильном сетевом напряжении. Время срабатывания быстрой защиты гиротрона (замыкание накоротко высоковольтного источника питания со стороны гиротрона) не более 5 мкс. Система согласующих зеркал (MOU — Matching Optical Unit) и элемент волноводного тракта показаны на рис. 5.4.6 и 5.4.7.

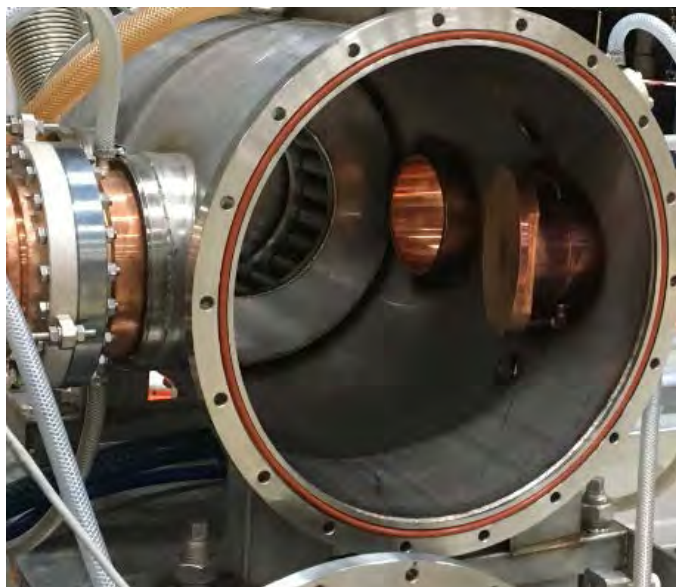


Рис. 5.4.6. Система согласующих зеркал гиротрона

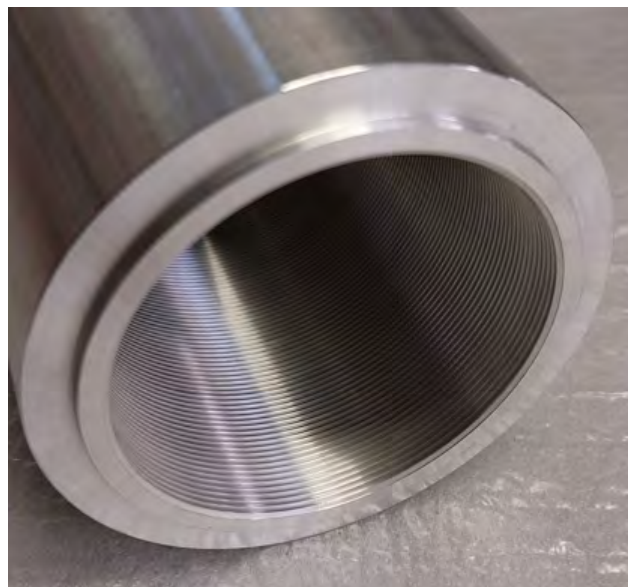


Рис. 5.4.7. Гофрированный волновод с внутренним диаметром 63,5 мм

Выходное излучение формируется специальным преобразователем мод, встроенным в гиротрон, и имеет вид квазигауссова пучка. С помощью двух медных профилированных зеркал СВЧ-излучение преобразуется в гауссов пучок необходимых размеров для прохождения по гофрированному волноводу с внутренним диаметром 63,5 мм. Юстировка излучения, выходящего из гиротрона в MOU, производится заводом-изготовителем гиротрона. Проверка юстировки ввода СВЧ-излучения в волновод на выходе блока согласующих зеркал после сборки осуществляется с помощью фокусирующей тefлоновой линзы,

определяющей соосность СВЧ-пучка с волноводом (при длительности импульса 250 мкс). Местоположение пучка на выходе блока зеркал контролируется посредством жидкого кристалла с поглотителем (при длительности 400 мкс).

Высоковольтное питание гиротрона. Номинальное значение ускоряющего напряжения для электронов, эмитируемых катодом гиротрона, составляет величину 70 кВ. С целью увеличения КПД прибора, а также снижения тепловой нагрузки на коллектор высоковольтное питание осуществляется двумя источниками: основным — катодным (–45 кВ) и анодным (+25 кВ). Таким образом, электронный пучок гиротрона, замагниченный полем соленоида, входит в резонатор, находящийся под потенциалом анода, испытывая ускоряющее напряжение 70 кВ (разность потенциалов между катодом и прилегающим анодом). Далее, следуя магнитным силовым линиям, электроны, подвергаясь торможению, достигают коллектора, который имеет потенциал «земли». При этом анодный источник работает практически с нулевым током, а нагрузка на коллектор гиротрона в значительной степени ослабевает.

Катодный источник питания. Катодный высоковольтный источник питания должен обеспечивать работу гиротрона как в наладочном, так и в рабочем режиме, в режиме с модуляцией. Номинальная мощность СВИП, используемого в качестве катодного источника, составляет 3,6 МВт.

Параметры высоковольтного источника катода:

Величина импульсного напряжения U , регулируемая с точностью 1%, кВ ...	–(20—60)
Максимальный ток в импульсе, А ...	60
Длительность импульса τ , регулируемая плавно в указанном диапазоне, с ...	$3 \cdot 10^{-4}$ —30
Неравномерность амплитудного значения напряжения, % ...	≤ 1
Длительность переднего фронта импульса $\tau_{пф}$, мкс ...	≤ 20
Длительность заднего фронта импульса $\tau_{зф}$, мкс ...	≤ 20
Модуляционный режим работы:	
частота модуляции, кГц ...	–(0—20)
глубина модуляции, % ...	≤ 50

Анодный источник питания. Анодный высоковольтный источник питания должен обеспечивать работу гиротрона как в наладочном, так и в рабочем режиме, в режиме с модуляцией. Номинальная мощность используемого анодного источника 3,5 кВт.

Параметры высоковольтного источника питания анода:

Номинальное выходное напряжение источника, кВ ...	+25
Напряжение источника при возможности плавной регулировки, кВ ...	В диапазоне 5—35
Стабильность в диапазоне выходных напряжений от 20 до 35 кВ, % ...	$\leq 0,5$
Максимальный ток, мА ...	≤ 100
Максимальная длительность импульса, с ...	30
Время нарастания (передний фронт) напряжения, мкс ...	30
Быстродействие световой защиты, нс ...	≤ 100

5.4.2. Волноводный тракт

Волноводный тракт состоит из отрезков гофрированных волноводов длиной 1 м и внутренним диаметром 63,5 мм (см. рис. 5.4.7) и поворотных 90° волноводных уголков. Схема вакуумированного волноводного тракта гиротрона представлена на рис. 5.4.8. На первом уголке изготовлен направленный ответвитель проходящей мощности. Второй выполнен в виде поляризатора.

С одной стороны, волноводная линия пристыкована к блоку согласующих зеркал гиротронного стенда, с другой — к фланцу патрубка токамака, на котором смонтирована система ввода СВЧ-излучения [19]. Длина волноводной линии передачи от гиротрона до установки Т-15МД около 37 м. Измеренные с помощью малой (при коротких импульсах) и большой (при импульсах гиротрона длительностью до 9,4 с) калориметрических нагрузок, установленных в конце тракта, потери в волноводной линии составили около 10% [20, 21].

На конечном участке волноводного тракта установлены диэлектрическая и механическая развязки (рис. 5.4.9). Диэлектрическая вставка обеспечивает гальваническую развязку между волноводом (а также гиротроном) и камерой токамака.



Рис. 5.4.8. Схема волноводного тракта. Общая длина линии СВЧ-передачи около 37 м



Рис. 5.4.9. Конечный участок волноводного тракта. Механическая и диэлектрическая развязки

Механическая развязка служит для компенсации взаимных перемещений волновода и стенок вакуумной камеры, а также для погашения вибраций во время работы установки. При прогреве вакуумной камеры взаимные перемещения могут достигать значений до 15 мм.

После механической развязки перед токамаком располагается вакуумный затвор. В плазменном режиме при работе гиротрона на токамак линия передачи через затвор герметично соединена с объемом вакуумной камеры установки.

Рабочей модой круглого сверхразмерного гофрированного волновода является гибридная мода HE_{11} [22]. Смысл гофрировки сводится к тому, что вблизи стенки волновода амплитуды электрического и магнитного поля волны близки к нулю из-за запредельных размеров шага гофры (для выбранной длины волны). Вследствие этого омические потери в таком волноводе также очень малы. Понятно, что гофрированные волноводы оказываются достаточно широкополосными.

Для обеспечения нужных параметров поляризации вводимой в плазму волны в волноводный тракт встроены СВЧ-поляризаторы (рис. 5.4.10, 5.4.11), который состоит из двух гофрированных зеркал и одного корректирующего. На выходе гиротрона волна имеет линейную поляризацию с горизонтальным направлением электрического вектора E . Вращением гофрированных зеркал (рис. 5.4.12) можно добиться любых параметров поляризации волны (коэффициент поляризации, угол наклона эллипса поляризации, направление вращения вектора E).

Поскольку внутренний объем волновода соединен с вакуумным объемом установки, перед токамаком располагается вакуумный затвор, который открывается при совместной работе с гиротроном. Для откачки волноводного тракта используются две вакуумные ячейки, в каждую из которых входят форвакуумный и турбомолекулярный насосы. Величина давления в тракте поддерживается в среднем на уровне $5 \cdot 10^{-6}$ Торр.

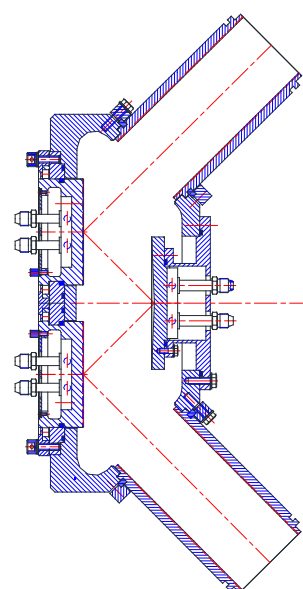


Рис. 5.4.10. Схематическое изображение СВЧ-поляризатора

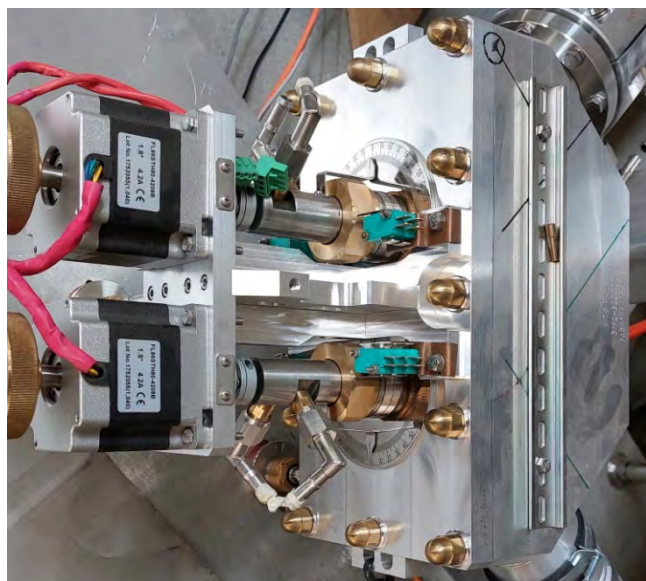


Рис. 5.4.11. Фотография СВЧ-поляризатора

Схема вакуумной откачки линии передачи СВЧ представлена на рис. 5.4.13.

Волноводный тракт оснащён двумя волноводными переключателями, расположенными после первого и последнего поворотных уголков, которые с помощью механических приводов могут, при необходимости, вдвигать зеркало в волновод, отводя СВЧ-излучение из волноводного тракта в измерительную нагрузку. Таким образом, можно оценить мощность излучения в начале и в конце передающей линии (рис. 5.4.14, 5.4.15). СВЧ-излучение после второго переключателя может быть направлено в большую поглощающую нагрузку, способную воспринимать мощное СВЧ-излучение ~ 1 МВт в непрерывном режиме.

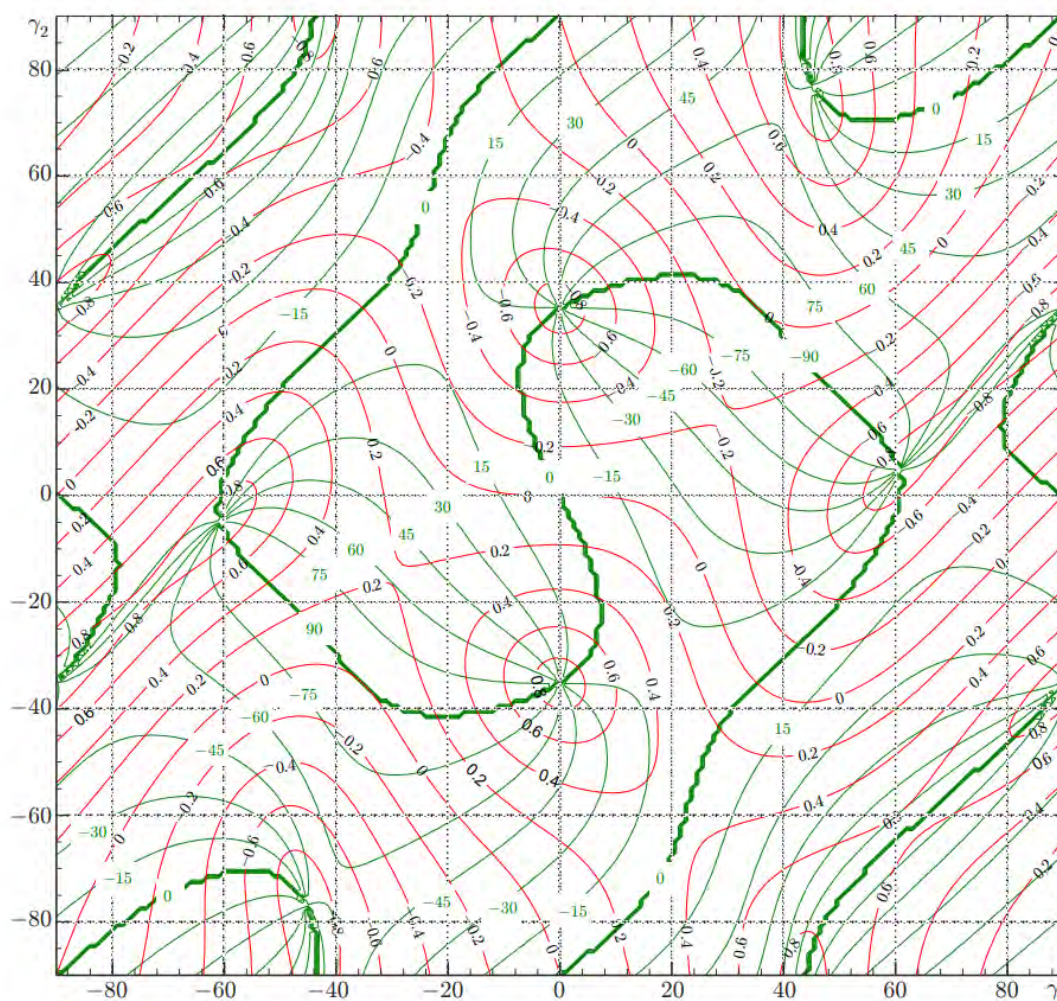


Рис. 5.4.12. Карта параметров выходного излучения на плоскости углов поворота гофрированных зеркал: красный цвет — линии равного уровня отношения осей поляризационного эллипса; зелёный — линии равного уровня угла наклона эллипса поляризации к плоскости падения. На вход поляризатора поступает линейно поляризованная волна. Вектор \mathbf{E} лежит в плоскости падения на зеркала

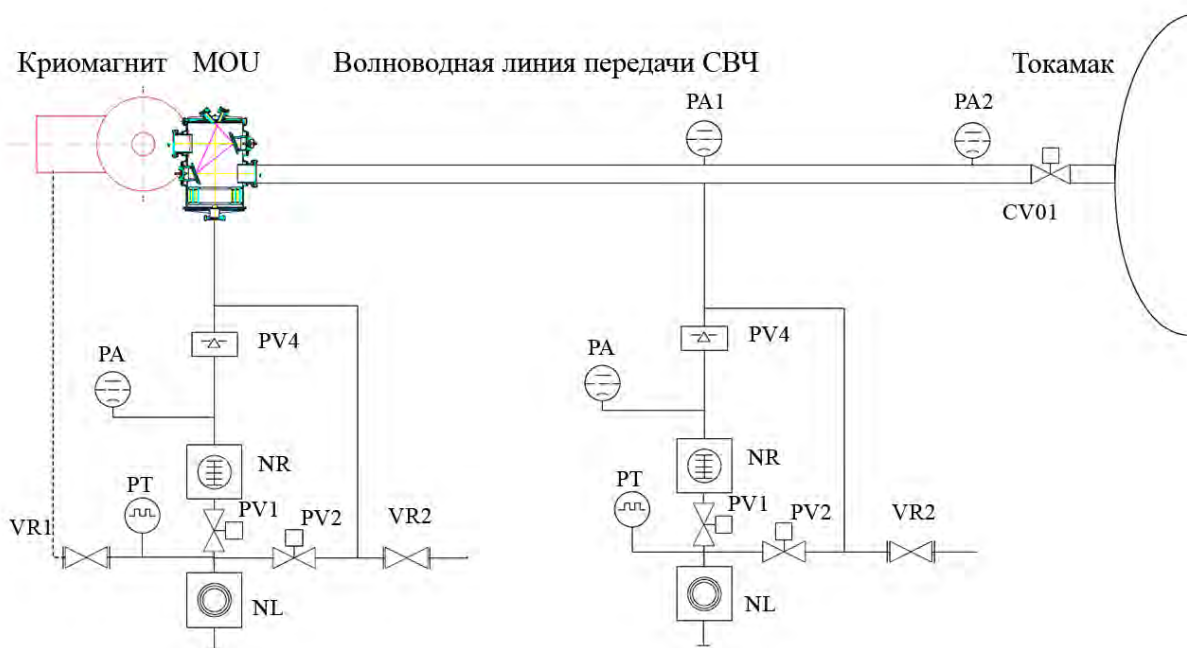


Рис. 5.4.13. Вакуумная схема линии передачи СВЧ: MOU — согласующий зеркальный фильтр, CV — вакуумный затвор пневмоэлектрический, NL — спиральный форвакуумный насос, NR — турбомолекулярный насос, PA — датчик высокого вакуума, PT — датчик низкого вакуума, PV — вакуумный затвор пневмоэлектрический, VR — вакуумный вентиль ручной



Рис. 5.4.14. Калориметрическая нагрузка, расположенная вблизи гиротрона



Рис. 5.4.15. Калориметрическая нагрузка в зале Т-15МД

5.4.3. Система ввода СВЧ-излучения

На установке Т-15МД под ЭЦР-нагрев выделено два сечения — № 5 и № 7. Длины волноводных трактов при сохранении общей компоновки зависят от местоположения гиротронов и расположения входных окон на используемых фланцах указанных сечений.

Взаимное расположение зеркал системы ввода вместе с оконечным участком волновода [19] схематически изображено на рис. 5.4.16. Рабочие поверхности зеркал выполнены в виде эллиптических параболоидов, обеспечивающих нужные параметры фокусировки вводимого в плазму СВЧ-излучения. В частности, плотность мощности в области перетяжки в данной схеме составляет величину 250 кВт/см^2 при уровне вводимой мощности 960 кВт. Как показывают эксперименты, проведенные на установке Т-10

[17, 18], такая плотность мощности обеспечивает нормальное развитие пробоя. Второе (подвижное) зеркало обеспечивает ввод пучка в плазму под различными тороидальными $\beta_{\text{тор}}$ и полоидальными $\alpha_{\text{пол}}$ углами: $\beta_{\text{тор}} = -28,5^\circ \text{ — } +21,5^\circ$, $\alpha_{\text{пол}} = -5^\circ \text{ — } +30^\circ$. Суммарные дифракционные потери на зеркалах $\sim 2\%$.

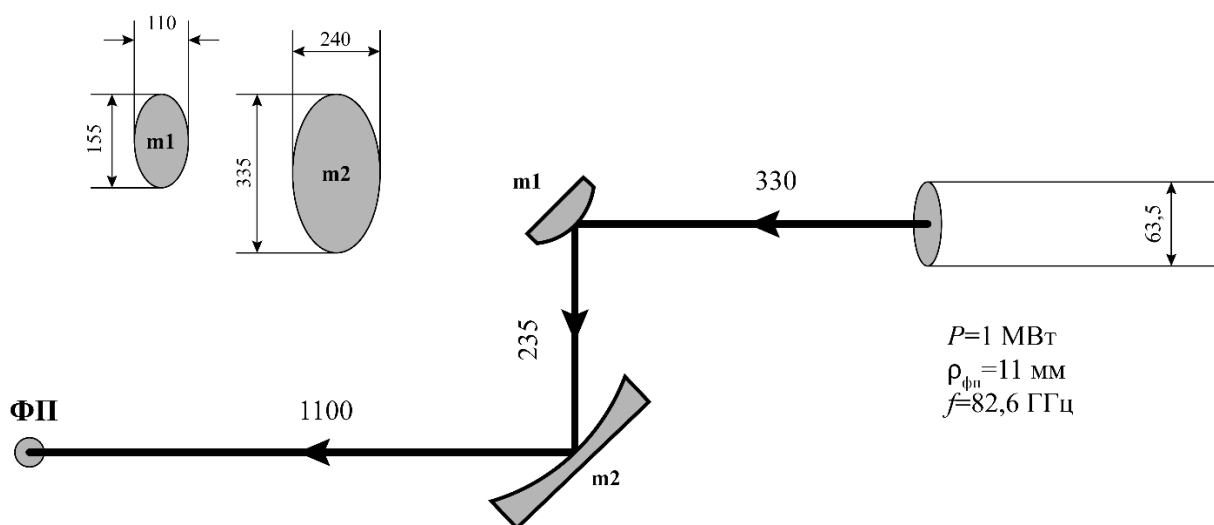


Рис. 5.4.16. Квазиоптическая схема системы ввода СВЧ-излучения установки Т-15МД; m2 — подвижное зеркало



Система СВЧ-ввода, установленная в вакуумной камере токамака, представлена на рис. 5.4.17. Зеркала расположены в тени графитовой первой стенки. Во время плазменного разряда графитовые тайлы защищают поверхность зеркал от прямого воздействия плазмы. На обратной стороне каждого из зеркал установлены термомпары.

Конструкция системы выполнена таким образом, чтобы исключить наличие замкнутых гальванических контуров с целью исключения наводимых токов при изменении значений индукции магнитного поля в области расположения СВЧ-ввода.

Рис. 5.4.17. Система ввода СВЧ-излучения, установленная внутри вакуумной камеры Т-15МД на стадии энергетического пуска в экспериментальных кампаниях 2023 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗДЕЛУ 5

1. **Tilinin G.N., Barsukov A.G., Kulygin V.M., Panasenkov A.A.** Neutral beam heating system (NBHS). — *Plasma Devices and Operations*, 1992, vol. 1, p. 277—288.
2. **Барсуков А.Г., Крылов А.И., Маркелов А.Ю., Панасенков А.А. и др.** Разработка и экспериментальное исследование квазистационарного ионного источника СТИС-1. — В сб.: XL Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 11—15 февраля 2013 г. Тезисы докладов, 2013, с. 45.
3. **Маркелов А.Ю., Панасенков А.А., Смирнов В.А.** Моделирование формирования пучка в щелевой ячейке ионно-оптической системы стационарного источника ионов. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2013, т. 36, вып. 1, с. 58.

4. Баркалов К.Е., Бочарова Е.В., Ерёмин В.А., Никулин В.А. Выбор схемы и расчет параметров приемника нейтрального пучка для инжекторов токамака Т-15МД. — В сб.: LI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород, 18—22 марта 2024 г. Сборник тезисов докладов. — М.: АО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2024, с. 61.
5. Barkalov E.E., Barkalov K.E., Panasenkov A.A. Experimental investigation of a high power long-pulse neutral beam profile diagnostic based on secondary electron emission. — In: 6-th Intern. Symp. on NIBS. Novosibirsk, Russia, 3—7 Sept. 2018. — AIP Conf. Proc., 2018; <https://doi.org/10.1063/1.5083754>.
6. Hoffman D.J., Barber G.G. The technology of the ion cyclotron range of frequencies. — Fusion Technology, 1989, vol. 15, № 2, pt. 2A, p. 719—724.
7. Генератор высокочастотный ВЧГ1-2000/20. Ведомость эксплуатационных документов, 1983, HP2.112.000.000 ЭД.
8. Разработка колебательной системы мощного двухтактного лампового автогенератора для ВЧ-нагрева плазмы в токамаке Т-14. Отчет, 1989, ТЗ № Я0385423-3Я762-01.
9. Bobkov V., Braun F., Dux R. et al. First results with 3-strap ICRF antennas in ASDEX Upgrade. — Nuclear Fusion, 2016, vol. 56, 084001; doi: 10.1088/0029-5515/56/8/084001.
10. Wang M., Liu L., Zhao L.M. et al. Improvement of lower hybrid current drive systems for high-power and long-pulse operation on EAST. — Nucl. Eng. and Techn., 2022, vol. 54, p. 4102.
11. Денисов Г.Г., Малыгин В.И., Цветков А.И. и др. Микроволновый комплекс мегаваттного уровня мощности для системы электронно-циклотронного резонансного нагрева плазмы и поддержания тока в токамаке Т-15МД. — Известия вузов. Радиофизика, 2020, т. 63, вып. 5/6, с. 369.
12. Кирнева Н.А., Борщegovский А.А., Куянов А.Ю. и др. Возможность использования частоты 140 ГГц для ЭЦР-нагрева плазмы в токамаке Т-15МД. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 3, с. 24—36.
13. Jackson G.L., Humphreys D.A., Hyatt A.W. et al. Noninductive plasma initiation and startup in the DIII-D tokamak. — Nuclear Fusion, 2011, vol. 51, 083015.
14. Stober J., Jackson G.L., Ascasibar E. et al. ECRH-assisted plasma start-up with toroidally inclined launch: multi-machine comparison and perspectives for ITER. — Nuclear Fusion, 2011, vol. 51, 083031.
15. Bae Y.S., Jeong J.H., Park S.I. et al. ECH pre-ionization and assisted startup in the fully superconducting KSTAR tokamak using second harmonic. — Nuclear Fusion, 2009, vol. 49, 022001.
16. Shchepetov S.V., Tereshchenko M.A., Vasilkov D.G., Kholnov Yu.V. Second harmonic ECRH breakdown: a theoretical insight and comparison to experimental results from L-2M. — Plasma Phys. Control Fusion, 2018, vol. 60, 125003.
17. Kirneva N.A., Shelukhin D.A., Borschegovskiy A.A. et al. Plasma Start-up Optimization with 2nd Harmonic ECR pre-ionization in T-10 Tokamak. — In: 34th EPS Conference on Plasma Phys. Warsaw, 2—6 July 2007, ECA, vol. 31F, P-1.164.
18. Borschegovskiy A., Dremine M., Pin V., Kirneva N. et al. Optimization of ECR-breakdown and plasma discharge formation on T-10 tokamak, using X-mode second harmonic of ECR. — EPJ Web of Conferences, 2012, vol. 32, 02004.
19. Пименов И.С., Белоусов В.И., Борщegovский А.А. и др. Система ввода СВЧ-излучения гиротронного комплекса токамака Т-15МД на первой стадии работ. — Прикладная физика, 2022, № 1, с. 5—11.
20. Пименов И.С., Борщegovский А.А., Ахмедов Э.Р. и др. Результаты по вводу СВЧ-излучения от гиротрона в вакуумную камеру токамака Т-15МД. — Успехи прикладной физики, 2023, т. 11, № 5, с. 407—415.
21. Пименов И.С., Борщegovский А.А., Ахмедов Э.Р. и др. Первые результаты испытания гиротрона и волноводного тракта установки токамак Т-15МД при большой длительности импульса. — Прикладная физика, 2024, № 3, с. 38—43; doi: 10.51368/1996-0948-2024-3-38-43.
22. Clarricoats P.J.B., Olver A.D., Chong S.L. Attenuation in corrugated circular waveguides. — Proceedings IEE, 1975, vol. 122, № 11; <https://doi.org/10.1049/piee.1975.0291>.

РАЗДЕЛ 6

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

ВВЕДЕНИЕ

Диагностический комплекс установки T-15МД представляет собой совокупность физических инструментов (далее — диагностик) для определения параметров, характеризующих состояние установки и плазменного разряда в ней. Основные задачи, стоящие перед диагностическим комплексом установки, включают в себя:

- реализацию заданных (в том числе на основе предсказаний теоретических моделей) сценариев разряда в безопасном для установки и персонала режиме;
- детальное определение основных макроскопических и микроскопических параметров разряда и их эволюции во времени для понимания физических процессов в плазме и развития теоретических моделей;
- развитие новых методик диагностики плазмы для исследования физических процессов в плазме токамака;
- разработку и модернизацию диагностик для применения в термоядерных установках следующего поколения, в том числе ТИН и ДЕМО.

Следует отметить, что эти задачи не являются изолированными и диагностика может применяться для решения нескольких из них. Остановимся подробнее на каждой из задач.

Проведение заданного сценария разряда в безопасном для установки и персонала режиме обеспечивается системой управления плазмой (СУП) и рядом традиционных диагностик, отвечающих за поддержание заданной циклограммы основных параметров разряда (магнитного поля B_T , полного тока плазмы I_p , средней электронной плотности \bar{n}_e , формы и положения шнура и др.). По мере ввода в строй диагностик и начала их эксплуатации в плановом режиме можно ожидать использование измеренных параметров в системе обратных связей для активного управления плазменным режимом. Не менее важной задачей является обеспечение качественной и безопасной работы установки и персонала: вакуумной чистоты, температурного режима отдельных систем установки, отсутствие ионизирующих излучений на рабочих местах персонала.

Поскольку детальное определение основных макроскопических и микроскопических параметров разряда является одной из приоритетных задач, стоящих перед диагностическим комплексом любой термоядерной установки, для её решения T-15МД планируется оснастить широким набором диагностик. Все диагностики можно разделить на группы по нескольким критериям: типу измерений, области измерений и физическому принципу, лежащему в основе диагностики. По типу измерений на установке T-15МД можно выделить следующие системы:

- обзорные и интегральные диагностики, обеспечивающие измерения в значительной части плазменного шнура и/или вдоль хорды наблюдения без локализации измерений;
- локальные диагностики, которые могут проводить измерения пространственного распределения параметров плазмы в силу геометрии эксперимента (томсоновское рассеяние, активная спектроскопия линий излучения), либо путём обработки интегральных данных (болометрия, томография рентгеновского излучения).

Помимо этого, к типу измерения можно отнести его временное разрешение, проводятся измерения либо среднего по времени значения параметра, либо его флуктуаций. Среднее по времени значение параметра позволяет характеризовать макроскопические параметры разряда и служит основой для исследования глобальных характеристик плазмы. Исследование параметров флуктуации параметра необходимо для определения физических механизмов, лежащих в основе тех или иных плазменных процессов.

Деление диагностик по области измерения связано как с техническими особенностями, необходимыми для проведения измерения в определённой области плазменного шнура, так и с существенно различными требованиями, которые предъявляются к измерениям в части диапазона измеряемых параметров и пространственного разрешения. По области измерения диагностики можно разделить на следующие:

— диагностики центральной части шнура ($\rho < 0,85$). Диагностические системы для этой области, как правило, осуществляют измерения в широкой области параметров в горячей ($T_e, T_i > 100$ эВ) и плотной ($n_e > 10^{19} \text{ м}^{-3}$) плазме. В этой области, как правило, требуется умеренное пространственное разрешение порядка $a/30$, за исключением областей внутренних транспортных барьеров, где требуется пространственное разрешение порядка 1 см;

— диагностики периферии шнура ($0,85 < \rho < 1$). Для этой области характерны умеренные значения температуры ($100 \text{ эВ} < T_e, T_i < 250 \text{ эВ}$) и плотности плазмы ($10^{18} \text{ м}^{-3} < n_e \lesssim 10^{19} \text{ м}^{-3}$). Существенной особенностью диагностик в этой области шнура является пространственное разрешение ~ 1 см в связи с сильной неоднородностью плазмы на краю шнура;

— диагностики области незамкнутых магнитных поверхностей (Scrape-Off-Layer — SOL, $\rho > 1$). Для этой области характерны низкие температуры ($T_e, T_i < 50$ эВ) и плотности плазмы ($n_e < 10^{19} \text{ м}^{-3}$), и к диагностике в этой области предъявляются достаточно высокие требования по пространственному разрешению (1 см и лучше);

— диагностики области дивертора, которая характеризуется сильно неоднородной, плотной (n_e до 10^{20} м^{-3}) и холодной ($T_e, T_i < 50$ эВ) плазмой.

Следует отметить, что ряд диагностик может проводить измерения в нескольких областях одновременно. Например, рефлектометрия для измерения профиля плотности пригодна для измерений от области SOL вплоть до центра шнура.

Отдельно выделяются технологические диагностические системы, обеспечивающие функционирование установки, такие как вакуумметрия, температурные датчики, обзорные камеры, мониторы ионизирующих излучений, система индикации замыканий элементов токамака.

Ещё одной важной частью физической программы установки Т-15МД являются создание новых для коллектива ККТЭиПТ диагностик и модернизация диагностик для применения в термоядерных установках следующего поколения, таких как ТИН и ДЕМО. Установки следующего поколения будут характеризоваться большой длительностью плазменного разряда, необходимостью измерения параметров плазмы и обработки данных в режиме реального времени, а также высокими потоками частиц и излучений. Основной ожидаемой сложностью в реализации этой задачи является необходимость глубокой модернизации системы сбора данных диагностик с обеспечением высокой пропускной способности шины данных от сенсора до базы данных установки. Для обеспечения обработки данных в режиме реального времени, помимо этого, требуются разработка и модернизация численных алгоритмов и их реализация в виде программного кода для многоядерных центральных процессоров (Central Processing Unit — CPU), многоконвейерных графических процессоров (Graphic Processor Unit — GPU) и программируемых логических вентильных матриц (Field Programmable Grid Array — FPGA). В ходе этих работ планируется широкое использование опыта и технических решений, накопленных в ходе создания отечественных и зарубежных диагностик для установки ИТЭР.

6.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ДИАГНОСТИКИ

6.1.1. Диагностики электромагнитных параметров плазмы

Электромагнитные диагностики (ЭМД) токамака Т-15МД представляют собой комплекс бесконтактных диагностик, предназначенных для измерения электромагнитных параметров плазмы и наведённых токов в конструктивных элементах вакуумной камеры (ВК). ЭМД основаны на регистрации переменного значения магнитного поля $\dot{\mathbf{B}}$ в различных частях токамака с использованием индуктивных катушек (далее датчиков) без непосредственного контакта таких катушек с горячей плазмой. В зависимости от расположения датчиков, их размеров, геометрической формы, ориентации в пространстве и других параметров ЭМД может использоваться для измерения и контроля различных параметров плазмы.

На установке Т-15МД используются как одно-, так и многовитковые индуктивные катушки, обеспечивающие как локальные, так и распределённые (усреднённые по значительному пространству, например, петли полоидального потока) значения $\dot{\mathbf{B}}$. Особенностью диагностики является использование значительного количества первичных датчиков — индуктивных катушек, которое составляет ~ 300 шт. (без учёта

зондов Мирнова). Для датчиков, установленных в тонкостенные металлические защитные трубки (зонды Мирнова), возможен ремонт и/или замена без вскрытия установки, для датчиков, установленных на внутренней поверхности ВК (открыты на плазму), ремонт/замена представляет серьёзную технологическую задачу. Все датчики допускают длительный прогрев до температуры вплоть до 250 °С.

Пояса Роговского на Т-15МД предназначены для измерения тока плазмы (I_p), суммы токов, текущих по плазме и ВК ($I_p + I_{ВК}$), и тока по витку пассивной стабилизации ($I_{Вит}$) положения плазменного шнура (со стороны слабого поля).

Пояс Роговского выполнен в виде длинного соленоида с произвольной и практически замкнутой формой, с равномерной намоткой на немагнитном каркасе (сердечнике). Для восстановления значения $I(t)$ по сигналу с пояса Роговского используется аналоговый активный либо цифровой интегратор, определение значения взаимной индуктивности осуществляется калибровкой по известному току в проводнике. Все пояса Роговского изготовлены по идентичной технологии с равномерной двухслойной намоткой витков к витку на немагнитный каркас с использованием одинаковых материалов. Из-за значительных линейных размеров и условий размещения на установке каждый пояс Роговского представляет собой набор из нескольких сегментов (частей) различной длины, соединённых между собой последовательно. Внутренний пояс Роговского (ПРВ) размещён на внутренней поверхности ВК, регистрирует I_p , состоит из трёх сегментов. Наружный пояс Роговского (ПРН) размещён на наружной стороне ВК, регистрирует сумму $I_p + I_{ВК}$, состоит из четырёх сегментов. Пояс на витки пассивной стабилизации (ПРВит) размещён внутри ВК, регистрирует $I_{Вит}$, состоит из двух сегментов. Пояса Роговского, обеспечивающие измерение I_p , $I_p + I_{ВК}$ и $I_{Вит}$, для обеспечения надёжности имеют резервирование (дублирование). Пояса, расположенные внутри ВК, установлены в тонкостенных защитных трубках из нержавеющей стали, открытых на атмосферу. Такое конструктивное решение позволяет проводить оперативный ремонт/замену ПР без нарушения вакуума установки.

ПР являются основной диагностикой, включённой в СУП для управления временным ходом тока плазмы в разряде. Основные параметры диагностики приведены в табл. 6.1.1.

Таблица 6.1.1. Типичные параметры диагностики пояса Роговского

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
I_p	—	0—2 МА	10 мс	—	1%

Диаманнитные петли предназначены для измерения энергосодержания плазмы W_p по изменению тороидального магнитного потока в плазменном разряде.

Диаманнитные измерения осуществляются по двухпетлевой схеме. Датчиками служат концентрические диаманнитные петли, расположенные на разном расстоянии от плазмы и обеспечивающие получение диаманнитного сигнала за один плазменный разряд. Петли представляют собой многовитковые катушки. Внешняя катушка закреплена на внутренней стенке ВК, а внутренняя катушка — на торце ребра жёсткости ВК. Существенной особенностью является малая величина изменения потока по сравнению с полным тороидальным потоком, что накладывает жёсткие требования на конструкцию диагностики. Необходимо обеспечить жёсткость монтажа диаманнитных петель для исключения перемещений петель во время плазменного разряда. Для компенсации влияния изменения вертикального магнитного поля на сигналы диаманнитных петель, возникающего из-за неточности установки, используется дополнительная петля.

Диаманнитные петли являются основной диагностикой, используемой для оперативного анализа энергосодержания плазмы в процессе и после разряда. Полученные данные используются для верификации величины энергосодержания, измеренной другими методами, в том числе с использованием профильных диагностик. Обеспечена эксплуатация петель в режиме длинного импульса с использованием активного аппаратного интегратора (длительность рабочего импульса интегратора до 12 с). Основные параметры диагностики приведены в табл. 6.1.2.

Таблица 6.1.2. Типичные параметры диагностики диаманнитные петли

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
W_p	—	0—500 кДж	10 мс	—	1%

Петли для измерения полоидального потока (датчики напряжения обхода — ДНО) предназначены, главным образом, для определения напряжения на обходе плазменного шнура U_{loop} . Также по данным измерений ДНО могут быть восстановлены значения полоидального потока Φ_p , усреднённые по тороидальному обходу ВК, значения вертикального \bar{B}_{ver} и горизонтального \bar{B}_{horz} магнитных полей, определено положение и восстановлено равновесие плазменного шнура.

Петли ДНО представляют собой осесимметричные тороидальные витки (одновитковые индуктивные катушки), установленные на внутренней поверхности ВК относительно равномерно вдоль полоидального обхода ВК. В ВК токамака Т-15МД установлены 32 ДНО, четыре датчика вертикального (ДВП) и четыре датчика горизонтального (ДГП) магнитных потоков (по две пары в горизонтальных плоскостях и по две пары в вертикальных плоскостях).

ДНО являются основной диагностикой, включённой в систему управления плазмой (СУП) для контроля напряжения обхода, а также для оперативного контроля и управления положением и формой плазменного шнура. Основные параметры диагностики приведены в табл.6.1.3.

Таблица 6.1.3. Типичные параметры диагностики петли для измерения полоидального потока

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность, %
			Временное, мс	Пространственное	
U	—	0—100 В	10	—	1
Φ	—	0—10 Вб	10	—	1
\bar{B}_{horz}	—	0—1 Тл	10	—	1
\bar{B}_{ver}	—	0—1 Тл	10	—	1

Седловые петли предназначены для обнаружения «запертых мод» — крупномасштабных МГД-возмущений, которые не вращаются либо вращаются с малой скоростью.

Седловые петли представляют собой многовитковые индуктивные катушки прямоугольной формы, размещённые на внутренней стенке ВК как вдоль полоидального обхода (ПСП), так и вдоль тороидального обхода (ПСТ). В ВК Т-15МД установлены в двух полоидальных сечениях, разнесённых примерно на 180 градусов вдоль тора, по 24 седловые петли (ПСП) и по восемь седловых петель (ПСТ) на трёх уровнях по вертикали вдоль тороидального обхода.

Основная роль седловых петель заключается в контроле возникновения и развития запертых мод, приводящих к ускоренной потере высокоэнергичных частиц, особенно при использовании систем нагрева ионной компоненты. Основные параметры диагностики приведены в табл. 6.1.4.

Таблица 6.1.4. Типичные параметры диагностики седловые петли

Параметр	Область	Диапазон величины, Тл	Разрешение		Точность, %
			Временное, мс	Пространственное	
B_p (по пол.)	—	0—1	10	$m \leq 11$	1
B_p (по тор.)	—	0—1	10	$n \leq 3$	1

Двухкомпонентные магнитные зонды (датчики формы — ДФ) используются для определения формы и положения крайней замкнутой магнитной поверхности плазменного шнура (сепаратрисы).

Датчики формы представляют собой небольшие индуктивные катушки, обеспечивающие измерение локальных значений изменения магнитного поля — тангенциальную (полоидальную) $B_{||}$ и нормальную по отношению к стенке ВК составляющую B_{\perp} . 39 датчиков формы установлены на внутренней поверхности ВК относительно равномерно вдоль полоидального обхода ВК. Для повышения точности измерений проводилась калибровка ДФ на стенде с относительной погрешностью калибровки каждого зонда не более 0,1%. Основные параметры диагностики приведены в табл. 6.1.5.

Таблица 6.1.5. Типичные параметры диагностики двухкомпонентные магнитные зонды

Параметр	Область	Диапазон величины, Тл	Разрешение		Точность, %
			Временное, мс	Пространственное	
$B_{ }$	—	0—1	10	$m \leq 19$	0,1
B_{\perp}	—	То же	То же	То же	0,1

Зонды тангенциальной компоненты магнитного поля позволяют регистрировать вариации магнитного поля, вызванного МГД-возмущениями плазмы, а также определять пространственную структуру таких возмущений.

Зонды тангенциального магнитного поля являются однокомпонентными локальными магнитными зондами, регистрирующими тангенциальную (полоидальную) компоненту B_p . Два идентичных набора по 39 зондов установлены на внутренней поверхности ВК примерно равномерно вдоль полоидального обхода ВК (МГДПВ) в двух полоидальных сечениях, разнесённых вдоль тора примерно на 180° . Два набора по 22 зонда установлены вдоль тороидального обхода ВК (МГДТВ) на двух уровнях на внутренней поверхности ВК. Наборы зондов тангенциальной компоненты магнитного поля (МГДПВ, МГДТВ) позволяют как регистрировать величину МГД-возмущения, так и определять полоидальное и тороидальное значения для винтовых мод (m, n) . Для повышения точности измерений проводилась калибровка ДФ на стенде с относительной погрешностью калибровки каждого зонда не более 0,1%.

Основной физической задачей для зондов тангенциальной компоненты магнитного поля является контроль амплитуды, частоты и пространственной структуры МГД-возмущений во время разряда. Основные параметры диагностики приведены в табл. 6.1.6.

Таблица 6.1.6. Типичные параметры диагностики зонды тангенциальной компоненты поля

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
B_p	—	0—1 Тл	10 мс	$(1, 1) \leq (m, n) \leq (19, 10)$	0,1%

Зонды Мирнова (МГД-зонды) представляют собой высокочастотные однокомпонентные магнитные датчики, регистрирующие флуктуации магнитного поля тока плазменного шнура.

Анализ данных о высокочастотных возмущениях магнитного поля позволит определять временную эволюцию и пространственную структуру МГД-возмущений. 48 зондов Мирнова располагаются равномерно вдоль полоидального обхода в четырёх полоидальных сечениях, разнесённых вдоль тора. Зонды расположены на внутренней стенке ВК в тонкостенной металлической защитной трубке, открытой на атмосферу, что позволяет при необходимости провести их ремонт и/или замену без нарушения вакуума.

Основными физическими задачами для зондов Мирнова являются контроль амплитуды, частоты и пространственной структуры МГД-возмущений во время разряда и исследование МГД-возмущений во время развития неустойчивости срыва. Основные параметры диагностики приведены в табл. 6.1.7.

Таблица 6.1.7. Типичные параметры диагностики зонды Мирнова

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
B_p	—	0—1 Тл	0,1 мс	$(1, 1) \leq (m, n) \leq (23, 4)$	0,1%

Общими особенностями диагностик электромагнитных параметров плазмы являются: а) значительное количество первичных датчиков — индуктивных катушек, которое составляет ~300 шт. (без учёта зондов Мирнова), что требует как верификации расположения катушек внутри и снаружи ВК, так и определения полярности сигналов; б) определение параметров датчика для распределённых катушек (имеющих линейные размеры, сравнимые с размерами Т-15МД) расчётным и/или эмпирическим образом; в) значимая паразитная составляющая в сигнале индуктивной катушки, создаваемая работой тиристорных модулей системы управления токами в обмотках электромагнитной системы токамака (ЭМС). Следует также отметить, что ремонт и/или замена датчиков, установленных стационарно на внутренней стенке ВК, затруднены. Для датчиков, установленных в тонкостенные металлические защитные трубки, ремонт и/или замена возможны. Датчики допускают длительный прогрев до температуры вплоть до 250°C .

Датчики ЭМД допускают работу в режиме длинного импульса. Интегрирование сигналов датчиков, если это необходимо, осуществляется как аппаратными средствами (аналоговый активный интегратор с длительностью интегрирования до 12 с), так и цифровыми методами (частота дискретизации АЦП не хуже 1 МГц). Возможно использование датчиков в системе управления плазмой (СУП). Интегрирование (ана-

логовое либо цифровое) будет применяться для сигналов поясов Роговского, диамагнитного сигнала, сигналов датчиков, участвующих в определении смещения плазменного шнура, других сигналов электромагнитных диагностик при необходимости.

При построении диагностики широко использовался опыт установок Т-10, Т-11М, Глобус, КТМ, ИТЭР и др. Поскольку одной из особенностей установки Т-15МД является толстостенная ВК, то опыт создания и эксплуатации ЭМД на Т-15МД будет учтён при проектировании ЭМД установки ТРТ. Подробную информацию о диагностиках электромагнитных параметров плазмы можно найти в работах [1—3].

6.1.2. Быстрый подвижный магнитный зонд

Быстрый подвижный магнитный зонд предназначен для измерений быстропеременных (до $f \sim 2$ МГц) возмущений полоидальных и радиальных магнитных полей в периферийных областях плазменного шнура. Одновременно планируется оборудовать измерительную систему, объединяющую магнитный зонд, зонд Ленгмюра и набор электродов для стимулирования дуговых разрядов непосредственно на поверхности зонда («дуговой» зонд). Диагностика основана на регистрации переменных магнитных потоков с помощью миниатюрных магнитных зондов (катушек) и зондов Ленгмюра, закреплённых на подвижном штыре. Расположение магнитных зондов в непосредственной близости от границы плазменного шнура позволит идентифицировать мелкомасштабные возмущения магнитных полей, не регистрируемых с помощью стандартных магнитных зондов, закреплённых на вакуумной камере токамака. Зонды Ленгмюра обеспечивают одновременную регистрацию токов на зонд.

Планируется, что диагностика будет размещена в нижней части горизонтального патрубка в сечении № 8 и будет состоять из системы позиционирования, системы быстрых перемещений и блока детектирования электромагнитных полей и токов. Для измерения электрических полей и токов на зонд диагностика будет оборудована игольчатыми электродами для стимулирования дуговых разрядов и измерительной системой, состоящей из трёх зондов Ленгмюра. Система измерений обеспечивает проведение измерений флуктуаций магнитного поля, токов и потенциалов на зондах и осуществляет подачу потенциалов на электроды зонда. Зонды располагаются вблизи поверхности плазмы с возможностью кратковременного их перемещения в периферийные плазменные области на глубину до 70 мм (скорость быстрых перемещений в плазме до 3,5 м/с, точность позиционирования 1 мм). Использование набора радиальных магнитных зондов обеспечивает возможность измерения радиального спада амплитуды электромагнитных колебаний. Оборудование магнитных зондов и зондов Ленгмюра обеспечивает одновременное измерение электромагнитных колебаний и токов на элементы первой стенки, характеризующих дуговые разряды.

Диагностика предназначена для идентификации пространственной структуры и измерения временной эволюции быстропеременных плазменных процессов в периферийных областях плазменного шнура: для изучения структуры плазменной турбулентности, магнитного перезамыкания при развитии срывов плазмы и ЭЛМ-неустойчивостей, возмущений полоидальных и радиальных магнитных полей в периферийных областях плазменного шнура, токов дуговых разрядов. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.1.8.

Таблица 6.1.8. Типичные параметры диагностики быстрый подвижный магнитный зонд

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
$\delta B_p, \delta B_r$	$0,9 < \rho < 1$	$10^{-4}—10^{-2}$	$f < 2$ МГц	$k_{\perp} \lesssim 5$ см ⁻¹	30%
I_{arc}	То же	0—0,2 кА	То же	То же	То же

В настоящее время полоса регистрируемых диагностикой частот ограничена 2 МГц. Область измерений в периферийных областях плазмы $0,9 < \rho < 1$ может быть ограничена в режиме длинного импульса и в энергонапряжённых режимах из-за возможного нагрева защитных элементов зонда.

Возможна модернизация системы быстрых перемещений (увеличение скорости перемещения) и оборудования системы трёхкомпонентных магнитных зондов для измерения трёхмерной пространственной структуры возмущений. Подробную информацию о быстром подвижном магнитном зонде можно найти в работах [4, 5].

6.2. СВЧ-ДИАГНОСТИКИ

6.2.1. Диагностика электронного циклотронного излучения плазмы

Диагностика электронного циклотронного излучения (ЭЦИ, ECE) — пассивная диагностика плазмы, предназначенная для измерения профиля электронной температуры T_e , а также среднеквадратичной амплитуды её мелкомасштабных флуктуаций.

Принцип диагностики основан на пропорциональности интенсивности ЭЦИ на некоторой частоте локальному значению T_e в определённой области плазмы. Положение области наблюдений определяется из условия соответствия анализируемой частоты рассматриваемой гармонике электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) при условии, что плазма обладает достаточно высокой оптической толщиной для данных частоты и номера гармоники. Регистрируемым параметром является мощность микроволнового излучения плазмы как функция частоты и времени. По величине мощности восстанавливается значение T_e , а по величине частоты и известному пространственному распределению индукции магнитного поля восстанавливается пространственное положение наблюдаемой области плазмы.

Для реализации диагностики ЭЦИ на T-15MD предполагается использовать схему на базе многоканального супергетеродинного приёма с двойным понижением частоты. Предполагается регистрировать мощность излучения необыкновенной волны на второй гармонике частоты ЭЦР вдоль радиальных линий наблюдения, расположенных в экваториальной плоскости со стороны слабого (Low magnetic Field Side — LFS) и сильного (High magnetic Field Side — HFS) магнитного поля. Согласно текущему проекту системы излучение плазмы принимается в трёх частотных диапазонах: 40—58 ГГц (U), 54—75 ГГц (V), 75—96 ГГц (W). Приём в диапазонах U, V осуществляется с LFS, в диапазоне W — с HFS. Частотный спектр излучения смещается на фиксированную величину посредством понижающего преобразователя частоты на базе смесителя с подавлением зеркальной полосы, в результате чего формируется спектр промежуточной частоты. Затем сигнал промежуточной частоты с помощью коаксиального делителя мощности распределяется между частотно-селективными каналами, в каждом из которых происходят вторичное понижение частоты, фильтрация сигнала и детектирование мощности в определённой частотной полосе шириной 100—1000 МГц. В каждом частотном диапазоне (U, V, W) предполагается использовать по 32 канала регистрации сигнала.

В диагностике ЭЦИ T-15MD предполагается применение квазиоптической фокусирующей системы и перестраиваемых (по частоте, коэффициенту передачи, ширине полосы) частотно-селективных модулей, что может позволить в дополнение к профилю температуры также определять профиль мелкомасштабных турбулентных флуктуаций температуры методом спектральной декорреляции теплового шума. Характерное пороговое значение разрешимой амплитуды флуктуаций оценивается в 0,2% при усреднении по временному интервалу около 1 с. Приём излучения с HFS в дополнение к традиционному приёму с LFS может расширить доступную область измерений для некоторых режимов, а также предоставит дополнительные возможности по измерению излучения надтепловых электронов. Применение системы автокалибровки СВЧ-приёмников посредством эталонного источника шума позволит компенсировать тепловой дрейф коэффициентов передачи.

Диагностика ЭЦИ осуществляет измерения в центральной области плазмы в экваториальной плоскости. Предельные достижимые границы области измерений оцениваются величинами $-0,30 \leq \rho \leq 0,75$ для приёма на LFS и $-0,60 \leq \rho \leq -0,10$ для приёма на HFS ($\rho = (R - R_0)/a$), однако границы в каждом конкретном режиме существенно зависят от магнитного поля, профилей плотности и температуры.

Ожидается, что диагностика ЭЦИ сможет предоставлять информацию о пространственно-временном распределении T_e . Эти данные могут быть использованы для исследования, в частности, H-моды и улучшенных (advanced) режимов с внутренними транспортными барьерами и неиндуктивной генерацией тока, процессов переноса примесей и воздействия на параметры плазмы различных обращённых к плазме материалов. Кроме того, благодаря высокому временному разрешению (время усреднения около 1 мкс) данные диагностики ЭЦИ могут применяться для изучения МГД-неустойчивостей, начальной стадии срыва. Информация о пространственном распределении среднеквадратичной амплитуды малых флуктуаций T_e может использоваться для изучения турбулентного переноса энергии. Ожидаемые параметры диагностики приведены в табл. 6.2.1.

Таблица 6.2.1. Ожидаемые параметры диагностики ЭЦИ

Параметр	Область	Диапазон величин	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
T_e	$-0,30 \leq \rho \leq 0,75$ (LFS) $-0,60 \leq \rho \leq -0,10$ (HFS)	0,3—50 кэВ	≥ 1 мкс	1—3 см	~10%
σ_T/T_e	$-0,30 \leq \rho \leq 0,75$ (LFS)	$\geq 0,2\%$	~1 с	2—6 см	Нет сведений

Измерения с помощью диагностики ЭЦИ на Т-15МД будут ограничены несколькими факторами. Из-за ограничений по оптической толщине для измерения T_e , вообще говоря, недоступны области, где плотность и температура недостаточно велики для того, чтобы ЭЦИ имело характеристики излучения чёрного тела. Это определяет ограничение области измерений со стороны периферийной плазмы. Часть плазменного шнура недоступна для измерений из-за наличия между положением ЭЦР и приёмником отсечки для необыкновенной волны соответствующей частоты. Это также накладывает ограничение на диапазон плотностей, при которых возможны измерения. В частности, для режимов с параболическим профилем плотности максимальная среднечордовая плотность $\langle n_e \rangle_{\max}$, при которой возможен максимальный охват доступной области измерений с LFS, грубо можно оценить как $\langle n_e \rangle_{\max} [10^{19} \text{ м}^{-3}] \approx (B_0 [\text{Тл}])^2$, т.е. $\langle n_e \rangle_{\max} \approx 1,0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ при поле $B_0 = 1$ Тл и $\langle n_e \rangle_{\max} \approx 1,7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ при $B_0 = 1,3$ Тл. Из-за малого аспектного отношения Т-15МД также существенно наложение излучения из областей ЭЦР для различных гармоник, что, в частности, накладывает ограничение на левую границу области измерений при приёме на LFS. Помимо этого, применимость диагностики ЭЦИ для измерения T_e зависит от того, существенен ли вклад в ЭЦИ излучения надтепловых электронов и паразитного излучения других систем (гиротронов, активных СВЧ-диагностик).

С технической стороны измерения T_e ограничены областью, в которой вторая гармоника частоты ЭЦР попадает в частотный диапазон измерительной системы. Это накладывает ограничение на диапазон магнитных полей, в котором возможны измерения. В текущей конфигурации номинальный диапазон полей составляет $1,0 \text{ Тл} \leq B_0 \leq 1,3 \text{ Тл}$. Следует отметить, что данное ограничение может быть устранено путём включения в состав системы дополнительных приёмных узлов. Для проведения абсолютных измерений электронной температуры необходима калибровка системы с использованием данных о T_e , полученных другими диагностиками (например, диагностикой томсоновского рассеяния или мягкого рентгеновского излучения), либо приспособление для абсолютной калибровки всего приёмного тракта *in situ*.

Диагностика ЭЦИ допускает возможность измерения профиля T_e в режиме реального времени при наличии соответствующей системы сбора данных, а также может работать в режиме с длинным импульсом.

Поскольку диагностика ЭЦИ нечувствительна к потокам ионизирующих излучений и частиц, накопленный опыт создания и эксплуатации диагностики ЭЦИ Т-15МД может служить основой диагностики электронной температуры для ТИН/ДЕМО. Ключевые области, которые могут найти применение на установках следующего поколения — это конструкция антенной системы, передающего тракта, супергетеродинные СВЧ-приёмники и разработанные методики калибровки приёмного тракта *in situ*. Также перспективным представляется использование данных диагностики в цепи обратных связей для расширенного управления сценариями разряда (*advanced control*).

Модернизация диагностики ЭЦИ для Т-15МД будет направлена на расширение рабочей области параметров и повышение её надёжности. Планируются разработка и изготовление приспособления для абсолютной калибровки системы — чёрного тела, нагреваемого до температуры около 800 К. Изготовление приёмных узлов ЭЦИ в двух дополнительных частотных диапазонах позволит расширить область измерения профиля температуры при больших значениях тороидального поля ($B_0 > 1,3$ Тл). Дублирование приёмных узлов со стороны слабого поля вдоль смещённых линий наблюдения может повысить надёжность измерений флуктуаций электронной температуры.

Интересным направлением работ представляется разработка изображающей диагностики ЭЦИ (ESE Imaging) для измерения двумерного распределения электронной температуры в полоидальном сечении. Система для измерений ЭЦИ на первой гармонике частоты ЭЦР в обыкновенной поляризации могла бы

повысить надёжность измерений T_e и обойти ограничение по наложению гармоник, однако применение такой системы представляется целесообразным только при высоких значениях магнитного поля ($B_0 \geq 1,5$ Тл) и температуры ($T_{e0} \sim 5$ кэВ) во избежание отсечки и недостаточно высокой оптической толщины. Наконец, дополнительная система с вертикальной линией наблюдения, монтируемая в вертикальный патрубок, могла бы позволить исследовать функцию распределения электронов, помимо дополнительных измерений температуры. Подробную информацию о диагностике электронного циклотронного излучения плазмы можно найти в работах [6, 7].

6.2.2. СВЧ-интерферометр

СВЧ-интерферометр — активная диагностика, основанная на измерении линейно интегрированной электронной концентрации $nl = \int_0^L n_e(x, y, z) dl$ зондированием плазмы электромагнитной волной с обыкновенной поляризацией в области частот сотен гигагерц. По результатам измерений по центральной хорде можно определить среднюю электронную концентрацию плазмы $\langle n_e \rangle$.

Диагностика основана на приращении фазы электромагнитной волны при прохождении через плазму по сравнению с фазой в опорном канале. Если частота зондирующего излучения много выше плазменной частоты ω_p , разность фаз можно считать пропорциональной линейно интегрированной электронной концентрации nl .

Схема диагностики представляет собой традиционный гетеродинный СВЧ-интерферометр с измерительным и опорным плечом. Особенностью реализованной схемы является использование задающего генератора с частотами 7,28(18) ГГц, 7,28 ГГц, 85 МГц и 10 МГц, активного умножителя для формирования зондирующей частоты и субгармонического смесителя. Это позволяет использовать высокочастотные коаксиальные кабели для передачи сигналов вне вакуумной камеры, в том числе по опорному каналу интерферометра. Квазиоптические элементы используются для ввода и вывода излучения из вакуумной камеры. Рабочая частота СВЧ-интерферометра составляет 320 ГГц (длина волны зондирующего излучения $\lambda = 0,936$ мм), измерения производятся на промежуточной частоте 80 МГц с последующим гетеродинированием на смесителе с сигналом генератора 85 МГц для снижения частоты до 5 МГц. Для измерения фазы в режиме реального времени используется фазометр на базе двух детекторов фазы AD8302 и контроллера STM32, ограничения по длительности плазменного разряда отсутствуют. Вертикальный канал зондирования СВЧ-интерферометра проходит через центр вакуумной камеры токамака Т-15МД.

Диагностика позволяет измерять среднюю линейную плотность плазмы вдоль линии зондирования в течение всего плазменного разряда, является основной диагностикой для управления средней плотностью плазмы с СУП и используется во всех плазменных экспериментах на установке Т-15МД. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.2.2.

Таблица 6.2.2. Типичные параметры диагностики СВЧ-интерферометр

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
nl	Интегральная	$2 \cdot 10^{16} \text{—} 10^{20} \text{ м}^{-2}$	2 мкс	—	10^{16} м^{-2}

Основное ограничение диагностики связано с рефракцией пучка зондирующего излучения в режимах с высокой плотностью ($n_e > 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$) и с сильным смещением магнитной оси разряда от центра камеры ($\Delta R > 10$ см).

Основным направлением для модернизации диагностики будет ввод в строй дополнительных каналов наблюдения, например, в экваториальном патрубке с использованием ретрорефлекторов для отражения зондирующей волны от внутренней стенки токамака Т-15МД. Следует отметить, что из-за влияния рефракции работоспособность такой системы будет ограничена режимами с низкой и умеренной плотностью плазмы (до $n_e \sim 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$). Подробную информацию об СВЧ-интерферометре можно найти в работах [8—10].

6.2.3. Рефлектометрия

Рефлектометрия с частотной модуляцией и непрерывной волной (Frequency Modulation Continuous Wave — FMCW) предназначена для измерения профиля электронной плотности плазмы. В основе диагностики лежит отражение электромагнитной волны в диапазоне частот несколько десятков гигагерц от слоя внутри плазменного шнура. Регистрируемым параметром является время распространения сигнала от излучателя до отражающего слоя и обратно (время задержки). Анализируя зависимость времени задержки от частоты зондирующего сигнала, можно восстановить пространственное распределение электронной плотности плазмы.

Для построения диагностики используется традиционная схема рефлектометра с фазовой модуляцией и непрерывной волной (FMCW). В качестве источника СВЧ-излучения используется быстро перестраиваемый генератор, управляемый напряжением (ГУН). Гетеродинный сигнал формируется с использованием миксера с подавлением несущей и боковой полосы (Single Side Band Mixer — SSBM). Рабочие частоты рефлектометра составляют от 12 до 66 ГГц в четырёх стандартных диапазонах. Для использования генераторами различных частотных диапазонов одной антенной системы и волноводного тракта на основе прямоугольных волноводов используются квазиоптические системы сложения СВЧ-сигналов на основе частотно-селективных брэгговских фильтров.

Особенностью работы рефлектометра на установке Т-15МД является использование сочетания зондирования плазмы в экваториальной плоскости со стороны сильного магнитного поля и нижней отсечки необыкновенной волны зондирующего излучения, впервые реализованное на установке Т-10. Для инициализации задачи восстановления профиля электронной плотности планируется дополнительно использовать данные измерений FMCW рефлектометром на обыкновенной волне на периферии плазменного шнура.

При использовании предлагаемой схемы измерений возможно проводить измерения профиля электронной плотности в экваториальной плоскости установки от области незамкнутых силовых линий (Scrape-Off-Layer — SOL) до центра плазменного шнура.

Рефлектометрия позволяет проводить измерения профиля электронной плотности с высоким временным и пространственным разрешением. Минимальное время измерения ограничено временем развёртки частоты зондирующего излучения и составляет 5 мкс, что даёт потенциальное временное разрешение 10 мкс при скважности работы диагностики 50%. Пространственное разрешение ограничивается фазовыми шумами в конкретном измеряемом режиме и может достигать сотен точек по радиусу при использовании специальных алгоритмов обработки данных. Особенности диагностики (квазиравномерная сетка частот, на которых проводится определение положения области отсечки) делают её особенно привлекательной для измерения профилей плотности в области барьеров, где пространственное разрешение диагностики естественным образом улучшается. Таким образом, основные физические программы, в которых измерения рефлектометром особенно привлекательны, — это программы с улучшенными режимами (Advanced Tokamak Regimes) и режимами с периферийными транспортными барьерами (H-мода, RI-мода). Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.2.3.

Таблица 6.2.3. Типичные параметры диагностики FMCW-рефлектометрия

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
n_e	$\rho < 0,85$	$0,2 \cdot 10^{19} — 7,0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$	10 мс	30 точек по малому радиусу	5%
	$\rho > 0,85$	То же	То же	~2 см	То же

Принципиальным ограничением для диагностики является возможность проводить измерения только при монотонно растущем профиле частоты отсечки, что ограничивает её применимость в режимах с немонотонным профилем плотности. Также из-за присутствия на пути распространения зондирующего сигнала фундаментальной гармоники электронного циклотронного резонанса могут быть недоступны для измерения внутренние области плазменного шнура. Это ограничивает максимальную наблюдаемую плотность в центре шнура величиной около $7,0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (при тороидальном поле $B_T = 2,0 \text{ Тл}$).

Технически диагностика допускает работу в режиме длинного импульса при реализации сбора данных с потоковой скоростью около 10 ГБ/с. Обработка данных в режиме реального времени из-за особенностей методики восстановления профиля электронной плотности по данным измерений (рекуррентный алгоритм) может проводиться только с использованием центрального процессора, что потенциально ограничивает время задержки (так называемое *latency time*) между измерениями и появлением обработанных данных в системе обратных связей. Для ускорения предварительной обработки данных может использоваться параллелизация вычислений с использованием многоядерных процессоров и графических ускорителей.

При построении диагностики планируется широкое использование опыта, полученного при работе над аналогичной диагностикой для установки ИТЭР. Это касается как прямого использования компонентов системы (управляющих генераторов, системы сложения), так и разработанных алгоритмов и кодов для обработки сигналов. Поскольку особенностью рефлектометрии является слабая чувствительность внутрикамерных компонентов системы к тепловым и механическим нагрузкам, радиации и пыли, практический опыт создания и эксплуатации диагностики на T-15МД может быть в будущем перенесён на термоядерные установки следующего поколения, прежде всего — ТИН и ДЕМО.

Основное направление для улучшения и модернизации диагностики на T-15МД будет связано с увеличением пропускной способности шины данных и быстродействия алгоритмов обработки для обеспечения измерений в длинном импульсе в режиме реального времени. Ещё одной интересной задачей является возможное построение диагностики поддержания формы и положения шнура (рефлектометр для позиционирования плазмы — *Plasma Position Reflectometer*), что также является актуальной задачей для ТИН/ДЕМО. Подробную информацию о FMCW-рефлектометрии для измерения профиля плотности можно найти в работах [11—13].

Корреляционная рефлектометрия — активная диагностика, предназначена для измерения свойств мелкомасштабных флуктуаций электронной плотности плазмы. В основе диагностики лежит отражение электромагнитной волны в диапазоне частот несколько десятков гигагерц от слоя внутри плазменного шнура, положение которого определяется частотой зондирующего излучения, локальной электронной плотностью в области отражения, а также, вообще говоря, величиной магнитного поля и температурой электронов. Наличие на отражающей поверхности переменных во времени флуктуаций приводит к вариации во времени фазы и амплитуды отражённой волны. Регистрируя параметры этой волны, можно судить о величине возмущений в области отражения. Используя методики корреляционного анализа для сигналов отражённой от пространственно разделённых областей плазмы, можно получить информацию о пространственной структуре возмущений и скорости их распространения.

Для построения корреляционной рефлектометрии на T-15МД планируется использовать гетеродинную схему с генератором, управляемым напряжением (ГУН) в качестве источника сигнала и активными умножителями для формирования зондирующего сигнала в требуемом диапазоне частот. Для формирования гетеродинного сигнала будет применяться миксер с подавлением несущей и боковой полосы (SSBM). Планируемый рабочий диапазон диагностики составляет от 12 до 90 ГГц. При работе планируется использовать зондирование плазмы на обыкновенной волне, что позволяет проводить измерения в областях с локальной электронной плотностью от $0,2 \cdot 10^{19}$ до $1,0 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

На установке T-15МД планируется размещение нескольких групп пирамидальных антенн в нескольких горизонтальных патрубках, в вертикальном патрубке и в экваториальной плоскости со стороны сильного магнитного поля. Это позволит получать информацию о величине и полоидальном распределении амплитуды мелкомасштабных возмущений плотности, их радиальной, полоидальной и тороидальной корреляционной длине, а также скорости движения.

Использование планируемого частотного диапазона позволит проводить измерения от области SOL до центральной части плазменного шнура.

Предлагаемая конструкция рефлектометра позволяет проводить измерения с использованием как фиксированной частоты зондирующего излучения, так и в режиме с плавной или ступенчатой перестройкой частоты в полном диапазоне с периодом 10 мс. Первый режим (измерения на фиксированной частоте) позволяет достичь временного разрешения до 100 мкс, что требуется для анализа поведения флуктуаций

в быстрых процессах, например, при исследовании физики нелокального транспорта и физики формирования транспортных барьеров. Режимы с перестройкой частоты позволяют проводить исследования параметров флуктуаций в квазистационарных режимах в широком пространственном диапазоне при исследовании физики транспортных процессов. Ещё одной важной задачей является исследование параметров квазипериодических возмущений плотности — геодезических акустических мод (ГАМ), альфвеновских мод (АМ), неклассических тиринг-мод и др. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.2.4.

Таблица 6.2.4. Типичные параметры диагностики корреляционная рефлектометрия

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
σ_n/n_e	$\rho < 0,85$	$10^{-4}—10^{-2} \text{ м}^{-3}$	$f < 500 \text{ кГц}$	$k_{\perp} \lesssim 5 \text{ см}^{-1}$	30%
E_{RMS}	$\rho > 0,85$	0,02—1	То же	То же	1%

Принципиальным ограничением для диагностики является возможность проводить измерения только при монотонно растущем профиле электронной плотности. На Т-15МД для некоторых ракурсов область наблюдения существенно ограничивается из-за присутствия в плазме фундаментальной и высших гармоник электронного циклотронного резонанса. Для минимизации влияния данной особенности на установке планируется использование зондирования в вертикальном направлении, что позволит расширить область измерений. Дополнительным ограничением для диагностики является невозможность проведения измерений в режимах с сильной турбулентностью, когда флуктуации фазы отражённого сигнала превышают 1 рад. Следует также отметить, что интерпретация данных диагностики может быть сложной и требовать существенной поддержки со стороны теории.

Технически диагностика допускает работу в режиме длинного импульса при реализации сбора данных с потоковой скоростью в диапазоне нескольких ГБ/с в зависимости от количества каналов наблюдения. При необходимости возможна спектральная обработка сигнала в режиме реального времени с использованием многоядерных процессоров и графических ускорителей.

При построении диагностики планируется широкое использование опыта, полученного на установке Т-10 и при разработке рефлектометрии для ИТЭР. Прежде всего это относится к использованию компонентов системы, алгоритмов и кодов для интерпретации сигналов. Слабая чувствительность внутрикамерных компонентов диагностики к тепловым и механическим нагрузкам, радиации и пыли, практический опыт создания и эксплуатации диагностики на Т-15МД могут быть при необходимости перенесены на термоядерные установки следующего поколения, прежде всего — ТИН и ДЕМО.

Основное направление для улучшения и модернизации диагностики на Т-15МД будет связано с увеличением одновременно наблюдаемых каналов, что позволит проводить измерения большого числа параметров одновременно. Интересной представляется реализация на установке многочастотных измерений с использованием синтезаторов частот и комбинированных генераторов для повышения временного разрешения диагностики и гибкого измерения радиальных корреляционных свойств флуктуаций. Ещё одним применением рефлектометрии является использование тороидальных корреляций для измерений угла наклона силовых линий с последующим восстановлением профиля запаса устойчивости q . Подробную информацию о корреляционной рефлектометрии можно найти в работах [11, 14, 15].

6.3. ДИАГНОСТИКИ ИК, ВИДИМОЙ И УФ-ОБЛАСТЕЙ СВЕТА

6.3.1. Обзорные камеры

Обзорные ССD-камеры в видимой области предназначены для двумерной визуализации динамики видимого излучения из пристеночной области плазмы и взаимодействия плазмы с первой стенкой.

В основе диагностики лежит регистрация интенсивности видимого излучения из зоны наблюдения, определяемой объективом камеры и областью матрицы камеры, с которой считывается информация. Обзорные камеры видимой области обеспечивают регистрацию излучения в диапазоне длин волн 350—900 нм. Для диагностики используются высокоскоростные ССD-камеры с глобальным затвором, позволяющие получать изображение плазмы с частотой от 250 до 20000 (при считывании части матрицы) кадров

в секунду. Камеры работают от внешнего тактового импульса и могут осуществлять регистрацию излучения плазмы в заданные моменты времени. Расположенные в сечениях № 8 и 16 камеры оснащены широкоугольными объективами, обеспечивающими наблюдение ~100% поверхности вакуумной камеры Т-15МД со стороны сильного поля и ~50% со стороны слабого поля с разрешением $\lesssim 5$ см.

Камеры будут использоваться в рабочих и технологических режимах работы установки для контроля состояния внутрикамерных элементов и получения визуальной информации о возникающих на краю шнура плазменных структурах. Ещё одной областью применения диагностики является оценка притока рабочего газа путём регистрации излучения при оснащении камеры соответствующим спектральным фильтром. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.3.1.

Таблица 6.3.1. Типичные параметры обзорных камер в видимой области

Параметр	Область	Динамический диапазон	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
I_{vis}	Обзорная	60 дБ	≤ 4 мс	$\lesssim 5$ см	—

Следует отметить, что диапазон длин волн излучения, регистрируемых камерой, характерен для теплового излучения элементов внутри камеры токамака и линейчатого излучения рабочего газа и примесей на краю плазменного шнура.

Работа камер в режиме длинного импульса ограничена объёмом внутренней памяти. Полное время регистрации информации может быть увеличено при снижении скважности измерений.

Основное направление для улучшения и модернизации диагностики на Т-15МД будет связано с возможностью увеличения числа камер, выбора оптимальных ракурсов наблюдения с целью обзора наиболее важных зон взаимодействия плазмы со стенкой. Кроме этого, планируется оснащение камер набором сменных спектральных фильтров для регистрации излучения в отдельных линиях. Подробную информацию об обзорных ССD-камерах в видимой области можно найти в [16].

Обзорные камеры в инфракрасной (ИК) области предназначены для двумерной визуализации температуры и динамики энерговыделения на компоненты первой стенки, элементы дивертора и другие внутрикамерные элементы при взаимодействии на них плазмы.

В основе диагностики лежит регистрация интенсивности ИК-излучения из зоны наблюдения, определяемой объективом камеры и областью матрицы камеры, с которой считывается информация. Обзорные камеры ИК-области обеспечивают регистрацию излучения в диапазоне длин волн 8—14 мкм с частотой до 125 кадров/с.

Камеры будут использоваться в рабочих режимах установки для контроля температуры внутрикамерных элементов и получения визуальной информации о зонах максимального нагрева элементов первой стенки. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.3.2.

Таблица 6.3.2. Типичные параметры обзорных камер в ИК-области

Параметр	Область	Температурный диапазон	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
I_{IR}	Обзорная	0—1500 °С	Не хуже 10 мс	$\lesssim 5$ см	2%

Основное направление для улучшения и модернизации диагностики на Т-15МД будет связано с возможностью увеличения числа камер, выбора оптимальных ракурсов наблюдения с целью обзора наиболее важных зон взаимодействия плазмы со стенкой. Подробную информацию об обзорных камерах в ИК-области можно найти в [17].

6.3.2. Диагностика радиационных потерь

Пирозлектрические болометры — пассивная диагностика, предназначенная для измерения полных радиационных потерь плазмы P_{rad} и пространственного распределения радиационных потерь R_{rad} (хордовых профилей энергетической светимости или яркости плазмы).

Детектор радиационных потерь должен обладать постоянной спектральной чувствительностью в широком диапазоне длин волн (от видимого до рентгеновского излучения). Этому требованию удовлетворяют тепловые приборы, измеряющие мощность падающего на поглотитель излучения по изменению его температуры. Принцип действия применяемых на Т-15МД пирозлектрических детекторов основан на линейной зависимости спонтанной поляризации сегнетоэлектрических материалов от температуры. В результате нагрев детектора приводит к возникновению в его электрической цепи тока, который в пренебрежении тепловыми потерями пропорционален поглощённой мощности излучения. Значения яркости плазмы получаются на основании результатов предварительной абсолютной калибровки детекторов и определяемых геометрией системы коэффициентов (*étendue*).

Многоканальные системы реализованы в виде вакуумированных камер-обскур с линейными массивами детекторов, расположенных в одном полоидальном сечении токамака. Т-15МД оснащается двумя обзорными болометрами и двумя 15-канальными камерами-обскурами (ширина хорд наблюдения в плазме ~10 см) для наблюдения основной плазмы из горизонтального экваториального и верхнего наклонного патрубков. Отдельная камера используется для наблюдения диверторной области из нижнего горизонтального патрубка.

К особенностям реализации диагностики на Т-15МД следует отнести:

- применение для повышения отношения сигнал/шум в многоканальных системах вакуумно-совместимых предусилителей, расположенных непосредственно на детекторном блоке, и виброразвязки детекторного блока от камеры установки на основе сильфона;

- использование для удобства интеграции общих камер-обскур для болометров и полупроводниковых AXUV-детекторов и применение водяного охлаждения для защиты встроенной электроники в режимах длительного импульса и прогрева установки.

Областями измерения диагностики являются: для обзорных болометров — основная плазма; для многохордовых систем — все области плазменного шнура от стороны сильного до стороны слабого магнитного поля, а также область дивертора. Распределения локальных плотностей мощности излучения должны восстанавливаться по измеренным профилям яркости с использованием методов томографии. Диагностика может работать в режиме реального времени. Следует отметить, что при работе в режиме с длинным импульсом (более 4 с) становится существенной деградация сигнала из-за тепловых потерь детекторов и для проведения измерений требуется схема с модуляцией излучения механическим затвором.

Полный уровень радиационных потерь является одним из основных параметров при получении разряда, исследовании энергосодержания плазмы и энергетического времени жизни, а также при контроле состояния подготовки камеры установки. Данные о пространственном распределении радиационных потерь плазмы могут быть использованы для определения энергобаланса при исследовании режимов с улучшенным удержанием плазмы, для изучения процессов переноса примесей и воздействия на плазму различных материалов и конфигураций обращённых к плазме элементов, физики срывов, для исследования процессов в пристеночной плазме (таких как неустойчивости Edge Localized Mode (ELM), MARFE, воздействие напуска примеси RI-мода) и в области дивертора (переизлучение энергии, detachment) и т.п. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.3.3.

Таблица 6.3.3. Типичные параметры диагностики пирозлектрические болометры

Параметр	Область	Диапазон	Разрешение		Точность, %
			Временное, мс	Пространственное, см	
R_{rad}	$-1,1 < h/a < 1,1$	0,3—3000 кВт/м ²	20	10	~20
	Дивертор	3—3·10 ⁴ кВт/м ²	5	3	То же
P_{rad}	—	10—10 ⁵ кВт	1	—	То же

Следует отметить, что работа пирозлектрических болометров на Т-15МД ограничена из-за ряда эффектов. Прежде всего надо учитывать, что болометр измеряет суммарную мощность электромагнитного излучения и потока нейтральных частиц из плазмы. Конечное пространственное разрешение и ограниченное число ракурсов наблюдения диагностики могут приводить к ошибкам при восстановлении локальных

параметров плазмы при наличии в пристеночной плазме сильно излучающих областей с резкими градиентами. Боллометры чувствительны к ИК-излучению нагреваемых в процессе разряда и находящихся в поле зрения диагностики областей на обращённых к плазме поверхностях. Также возможно влияние газонапуска, вызывающего охлаждение детекторов. Несмотря на наличие защиты детекторов от непоглощённого СВЧ-излучения систем нагрева плазмы, при работе гиротрона в отсутствие плазмы наблюдаются значительные паразитные сигналы на всех каналах. Таким образом, использование диагностики в экспериментах по СВЧ-пробое (ECRH-assisted) не представляется возможным. Также ожидается существенное снижение отношения сигнал/шум в переходных и неустойчивых режимах разряда, сопровождающихся повышенными вибрациями камеры установки и электромагнитными наводками.

В дальнейшем планируется дооснастить диагностику подсистемами для наблюдения пристеночной и диверторной плазмы с повышенным пространственным разрешением и с различных ракурсов, в том числе размещаемых непосредственно на стенке вакуумной камеры. Это позволит обеспечить корректность томографического восстановления пространственного распределения радиационных потерь. Также запланированы разработка и изготовление механических затворов (с пьезоэлектрическим приводом) для непрерывной модуляции излучения с целью обеспечения работы диагностики в разрядах любой длительности и дополнительного повышения отношения сигнал/шум. Подробную информацию об обзорных камерах в ИК-области можно найти в [18—20].

Диагностика на основе детекторов AXUV (Absolute eXtreme UltraViolet) — пассивная диагностика, предназначенная для наблюдения с высоким временным разрешением пространственного распределения излучения плазмы в диапазоне энергий квантов ~ 1 эВ—10 кэВ (длин волн 0,12—1200 нм).

Детекторы AXUV представляют собой полупроводниковые фотодиоды с отсутствием поверхностного «мёртвого слоя», что позволяет расширить диапазон чувствительности на область дальнего и экстремального ультрафиолета. Для большей части измеряемого спектра чувствительность детектора AXUV практически постоянна и равна 0,27 А/Вт, что соответствует идеальной квантовой эффективности 3,6 эВ/пару для кремния. Применение детекторов AXUV в токамаках в дополнение к тепловым боллометрам оказывается привлекательным из-за их высокого временного разрешения до 1 мкс, высокой чувствительности, а также отсутствия влияния нейтральных частиц, паразитных тепловых воздействий и рассеянного СВЧ-излучения. Данные многоканальных систем AXUV обычно представляются в виде хордовых профилей условной энергетической светимости плазмы R_{rad}^* (Вт/см²), получаемой в предположении о постоянной по спектру чувствительности 0,27 А/Вт и с использованием определяемых геометрией системы коэффициентов (*étendue*).

Многоканальные системы AXUV реализованы в виде вакуумированных камер-обскур с линейными массивами детекторов, расположенных в одном полоидальном сечении токамака. Для наблюдения основной плазмы используются три 16-канальные камеры-обскуры (ширина хорд наблюдения в плазме ~ 5 —10 см) в горизонтальном экваториальном, верхнем наклонном и нижнем наклонном патрубках. Нижняя камера может быть использована для наблюдения диверторной области из нижнего горизонтального патрубка. К особенностям диагностики на T-15МД относятся применение расположенных непосредственно на детекторных блоках вакуумно-совместимых предусилителей, использование водяного охлаждения камер для защиты полупроводниковых детекторов и встроенной электроники, а также использование общих камер-обскур для детекторов AXUV и боллометров для облегчения интеграции диагностики на установке.

Областью измерения диагностики являются все области основной плазмы (*core/edge/SOL*) и область дивертора. Распределения локальных плотностей мощности излучения должны восстанавливаться по измеренным профилям условной яркости методами томографии. Диагностика допускает работу в режиме реального времени и в режиме с длинным импульсом.

Многоканальные системы AXUV дают информацию о быстрой эволюции излучения плазмы преимущественно в диапазоне вакуумного ультрафиолета, дополняя SXR-камеры. Эти данные могут быть использованы для изучения неустойчивостей центральной плазмы (МГД-моды, срыв, пилообразные колебания, связанные с нейтральной инжекцией неустойчивости и др.) и пристеночной области (ELM), эволюции излучения плазмы в быстрых процессах (таких как инжекция пеллет, появление микрочастиц примесей). В ряде случаев по данным AXUV может быть получена информация о распределении радиационных потерь в центральной плазме. Профили AXUV также могут быть использованы для контроля положения плазмы. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.3.4.

Таблица 6.3.4. Типичные параметры диагностики полупроводниковые детекторы AXUV

Параметр	Область	Диапазон, Вт/м ²	Разрешение	
			Временное, мкс	Пространственное, см
R_{rad}^*	Основная плазма — два-три ракурса $-1,05 < h/a < 1,05$	5—5·10 ⁵	До 1	~5—10
	Область дивертора — один-два ракурса	20—2·10 ⁶	То же	~2

Следует отметить, что из-за наличия входного окна из диоксида кремния в области энергий квантов ~7—100 эВ имеет место снижение чувствительности детекторов, достигающее 4—5 раз в минимуме кривой, что не позволяет использовать AXUV в качестве датчиков абсолютных радиационных потерь. Пространственные профили AXUV, а в ряде случаев и временные зависимости сигналов могут существенно отличаться от профилей и сигналов болометров. Кроме того, при экспозиции в токамаке наблюдается постепенная и с трудом контролируемая деградация спектральной чувствительности вследствие напыления на поверхность детектора тонких плёнок, эффективно увеличивающих толщину «мёртвого» слоя. Также с ростом дозы фотонов наблюдается снижение общей квантовой эффективности, что потребует периодической замены детекторов.

В дальнейшем возможна модернизация существующих камер-обскур для повышения пространственного разрешения и добавление новых ракурсов наблюдения для повышения точности восстановления локальных параметров плазмы, в частности, для режимов с резкими градиентами параметров (транспортными барьерами). Для новых подсистем рассматривается переход на отечественные детекторы SPD, имеющие аналогичную AXUV спектральную зависимость чувствительности. Интересным направлением модернизации диагностики может стать применение двумерной матрицы SPD-детекторов для быстрой визуализации неустойчивостей плазмы при наблюдении в тангенциальном направлении. Также можно рассматривать использование подсистемы AXUV с набором УФ-фильтров для определения усреднённой по спектру чувствительности S_{eff} , соответствующей конкретному режиму разряда, например, с целью оценки мощности излучения плазмы в стадии срыва тока, что невозможно осуществить с использованием стандартных болометров. Подробную информацию об обзорных камерах в ИК-области можно найти в [21—23].

6.3.3. Пассивная спектроскопия

Пассивная спектроскопия применяется для измерений следующих параметров плазмы Т-15МД:

- величины и пространственного распределения эффективного заряда плазмы $Z_{\text{эф}}(r)$ по интенсивности тормозного излучения;
- профилей ионной температуры T_i и скорости тороидального вращения плазмы $V_{\text{тор}}$ на периферии шнура из анализа спектральных контуров пассивной линии 5291 Å иона углерода CVI;
- величины потоков рабочего газа (водорода) и примесей (собственных С, N, O и инжектированных He, Li, Ne, Ar) в разряд путём обработки профилей яркости линий рабочего газа и примесей.

Методика измерений основана на выделении нужных участков спектра в видимой области (4000—8000 Å) с помощью спектральных приборов с последующей регистрацией непрерывного линейчатого излучения либо CCD-камерами, либо фотоэлектронными умножителями.

Пассивная спектроскопия особенно важна на начальном этапе ввода установки в эксплуатацию для оперативного мониторинга уровня примесей в разряде и контроля качества кондиционирования камеры. Многообразие задач, стоящих перед диагностикой, диктует необходимость использования различных подходов для оптимального измерения каждого из параметров. На установке Т-15МД пассивная спектроскопия включает следующие диагностики.

Многоканальная диагностика профилей яркости тормозного и линейчатого излучения плазмы с высоким спектральным разрешением реализована на базе спектрометров HES-370 и детекторов EMCCD PhotonMax 512В и обладает спектральным разрешением до 0,02 нм. Высокое спектральное разрешение позволяет проводить измерения эффективного ионного заряда плазмы Z_{eff} , надёжно выделяя уровень тормозного излучения на фоне плотного линейчатого спектра излучения молекул рабочего газа и

примесей, исходящего с периферии шнура и из области SOL, а также проводить измерения периферийных значений T_i и V_{tor} из доплеровского уширения и сдвига спектральных контуров линий ионов примесей. Благодаря использованию двух стигматичных спектрометров HES-370 система позволяет организовать 40 хордовых каналов регистрации в сечении камеры № 9 для проведения томографических измерений яркости тормозного и линейчатого излучения плазмы с двух ракурсов в полоидальном сечении. Временное разрешение системы в режиме с предельным спектральным (0,02 нм) и пространственным (~5 см) разрешением составляет ~50—100 мс. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.3.5.

Таблица 6.3.5. Типичные параметры многоканальной диагностики профилей яркости тормозного и линейчатого излучения плазмы с высоким спектральным разрешением

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
$Z_{эф}$	$0 < \rho < 1$	1—10	10—100 мс	$a/15—a/30$	10—30%
T_i	$\rho > 0,85$	Нет сведений	То же	То же	Нет сведений
V_{tor}	То же	Нет сведений	То же	То же	Нет сведений

Обзорная диагностика излучения плазмы в видимой области спектра основана на базе спектрометра BWTek ExemlarLS и применяется для оперативной оценки примесного состава плазмы по отношению яркости наиболее сильных линий примесей к яркости линий рабочего газа H_β и H_α . Система регистрирует обзорные спектры в диапазоне 400—800 нм со спектральным разрешением ~1 нм и временным разрешением до 5 мс. До начала эксплуатации дивертора сбор излучения производится из области токового лимитера, где наблюдается наиболее интенсивный рециклинг рабочего газа и примесей, с помощью оптической системы, расположенной в сечении камеры № 8. В дальнейшем выбор расположения системы сбора света будет определяться путём интеграции диагностик в комплекс токамака T-15МД. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.3.6.

Таблица 6.3.6. Типичные параметры обзорной диагностики излучения плазмы в видимой области спектра диагностики

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
n_z/n_i	$\rho > 0,85$	Нет сведений	5 мс	—	Нет сведений

Диагностика тормозного и линейчатого излучения плазмы, представленная одноканальными стационарными и сканирующими по пространству шнура системами, построена на базе четырёх монохроматоров МДР-2 и детекторов ФЭУ (ET Enterprises 9201sb и 39A) с квантовой эффективностью до 21%. Использование фотоэлектронных умножителей в качестве детекторов излучения позволяет добиться высокого временного разрешения ~10 мкс и регистрировать временной ход интенсивностей выбранных спектральных линий рабочего газа, ионов примесей и тормозного излучения плазмы вдоль выбранных полоидальных и тороидальных хорд наблюдения. Спектральное разрешение монохроматоров МДР-2 составляет $\leq 2 \text{ \AA}$.

Использование при наблюдении сканирующих по пространству систем на основе зеркального барабана, МДР-2 и ФЭУ позволит обеспечить временную развёртку полных профилей излучения в полоидальном сечении шнура линейчатого излучения с пространственным (~20 мм), временным (~10 мс) и спектральным ($\leq 2 \text{ \AA}$) разрешением. Полученная информация о профилях свечения спектральных линий в плазменном шнуре необходима для проведения абсолютных измерений поступления в плазму водорода и примесей.

В настоящее время основная часть систем сбора света диагностики расположена в сечении № 9 установки. Следует отметить, что размещение и ракурсы наблюдения могут быть изменены в соответствии с требованиями эксперимента и интеграции диагностик в комплекс токамак T-15МД. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.3.7.

Таблица 6.3.7. Типичные параметры диагностики тормозного и линейчатого излучения плазмы

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное, мкс	Пространственное, мм	
I_{vis}	$\rho > 0,85$	Нет сведений	10	50	Нет сведений
			10	20	Нет сведений

Диагностика спектров линейчатого излучения плазмы построена на базе двух монохроматоров МДР-23 с обратной линейной дисперсией 13 Å/мм, снабжённых CCD-камерами. Применение данной диагностики позволяет исследовать выбранные участки спектров излучения плазмы шириной от 150 до 300 Å (в зависимости от размера матрицы CCD-камеры) со спектральным разрешением ≤ 1 Å. Использование этих систем в дополнение к обзорному спектрометру значительно расширяет возможности точного определения примесного состава плазмы и величин поступления различных сортов примесей в разряд. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.3.8.

Таблица 6.3.8. Типичные параметры диагностики спектров линейчатого излучения плазмы

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное, мс	Пространственное, см	
n_z/n_i	$\rho > 0,85$	Нет сведений	10—100	5—10	Нет сведений

Технически все диагностики, относящиеся к пассивной спектроскопии, допускают работу в режиме длинного импульса. Для систем на базе CCD-детекторов в некоторых случаях может потребоваться переход на меньшую частоту опроса либо на детекторы с большей потоковой скоростью передачи данных.

Приоритетным направлением для развития комплекса диагностик пассивной спектроскопии на Т-15МД станет отладка рутинных методов обработки сигналов с определением примесного состава плазмы, величин $Z_{эф}$, периферийной ионной температуры и скорости вращения плазменного шнура. Применяемые методики измерений были отработаны на установке Т-10. Все системы комплекса успешно зарекомендовали себя в широком диапазоне рабочих параметров токамака при проведении различных исследовательских программ. Подробную информацию о диагностиках пассивной спектроскопии можно найти в [24—29].

6.3.4. Активные диагностики спектроскопии видимой области

Активная перезарядочная спектроскопическая диагностика (CXRS-диагностика). Используется для измерений следующих параметров плазмы: температуры ионов плазмы T_i (где температуры ионов рабочего газа T_p и примесей T_z практически равны: $T_z = T_p = T_i$), концентрации ионов рабочего газа n_p и ядер примесей n_z , полоидальных V_{pol} и тороидальных V_{tor} скоростей их вращения. Одновременное измерение величин магнитных полей B_{pol} , B_{tor} , давления ядер примесей $p_z = n_z T_i$ (либо протонов $p_p = n_p T_i$) и скоростей их вращения V_{pol} , V_{tor} и использование уравнения движения ионов позволяют получить данные о пространственном распределении напряжённости радиального электрического поля E_r в шнуре.

Диагностика основана на следующем принципе. Пучок быстрых атомов, создаваемый диагностическим (DNB) либо нагревным (NBI) инжектором, проходя через плазму, передаёт в процессе перезарядки свои электроны протонам и ядрам примесей, помещая эти электроны в возбуждённые состояния возникающих атомов водорода и водородоподобных ионов примесей. Распад этих состояний инициирует появление набора линейчатого CXRS-излучения перезарядённых ионов в широкой области спектра. Абсолютная величина интенсивности любой из инициированных линий содержит информацию о концентрации ядер примеси n_z , в которых сосредоточено ~95% концентрации лёгкой примеси либо протонов n_p . Спектральный контур линии содержит информацию об ионной температуре плазмы T_i , заложенной в доплеровском уширении линии. Данные о скоростях вращения ионов в шнуре V_{pol} , V_{tor} содержатся в доплеровских сдвигах линий от табличных значений. Измерения параметров носят локальный по пространству характер, поскольку извлекаются из узких зон пересечения пучка с хордами наблюдения. Регистрация CXRS-излучения одновременно по многим хордам наблюдения (20—40) позволяет многократно измерять

профили указанных параметров в течение плазменного разряда. CXRS-излучение выводится из вакуумной камеры с помощью систем сбора света и передаётся оптоволоконными коллекторами за биозащиту в пультовую спектрометрии Т-15МД, где спектры излучения анализируются с использованием спектрометров и регистрирующих камер.

Активная перезарядочная спектроскопическая диагностика на диагностическом пучке (CXRS-DNB) использует в качестве источника нейтралов диагностический инжектор ДИНА КИ-60, расположенный в сечении № 9 токамака Т-15МД. Инжекция пучка осуществляется в экваториальной плоскости тора вдоль большого радиуса токамака. Энергия основной компоненты водородного пучка $E_0 = 60$ кэВ, мощность $P_{inj} \sim 130$ кВт, диаметр пучка на полувысоте профиля его концентрации $D_b = 6$ см, длительность периодических импульсов инжектора ≥ 5 мс при интервале между импульсами ≥ 5 мс. Высокие энергия и мощность DNB-пучка дают возможность проводить надёжные измерения указанных параметров плазмы во всей экваториальной области плазменного шнура Т-15МД, включая область HFS.

Использование диагностического пучка позволяет организовать временную разностную схему измерения CXRS-излучений. Она заключается в вычитании спектрального контура пассивной линии иона, зарегистрированного камерой в отсутствие инжекции DNB-пучка, из суммарного контура пассивной и активной CXRS-линии иона, зарегистрированного в момент инжекции DNB-пучка. Операция вычитания пассивного спектра несколько увеличивает ошибку измерений, но существенно повышает надёжность выделения активного CXRS-спектра.

Диагностика CXRS-DNB имеет отдельные подсистемы, оптимизированные для наблюдения центральной и периферийной областей плазменного шнура в полоидальном и тороидальном направлении как со стороны слабого, так и со стороны сильного магнитного поля. Для этого используется наблюдение из экваториальных и наклонных портов в сечениях № 8 и 9 установки. В системах спектрального анализа излучений используются спектрометры, разработанные для CXRS-диагностики ИТЭР. Оснащение систем регистрации CXRS-спектров EMCCD-камерами позволяет существенно снизить отношение сигнал/шум и повысить точность измерений. Типичные параметры системы приведены в табл. 6.3.9.

Таблица 6.3.9. Типичные параметры системы CXRS-DNB

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное, мс	Пространственное, см	
T_Z	$\rho < 0,85$	0,5—15 кэВ	<5	<5	Нет сведений
n_Z	То же	$10^{19}—10^{20}$ м ⁻³	То же	То же	Нет сведений
V_Z^{pol}	То же	Нет сведений	То же	То же	Нет сведений
V_Z^{tor}	То же	Нет сведений	То же	То же	Нет сведений
T_Z	$\rho > 0,85$	0,01—2 кэВ	<5	<1	Нет сведений
n_Z	То же	$10^{18}—10^{19}$ м ⁻³	То же	То же	Нет сведений
V_Z^{pol}	То же	Нет сведений	То же	То же	Нет сведений
V_Z^{tor}	То же	Нет сведений	То же	То же	Нет сведений

Временное разрешение и величины ошибки CXRS-измерений на Т-15МД будут зависеть от степени влияния электромагнитных наводок при работе установки на величину тока атомов пучка ДИНА КИ-60. Предполагается исследовать влияние данного эффекта в прямых экспериментах на установке Т-15МД в ходе экспериментальных кампаний 2024—2025 гг. Модельные расчёты показали слабое влияние рассеянного излучения из области дивертора, приходящего на хорды наблюдения CXRS-диагностики Т-15МД в области излучения основной спектральной линии диагностики 5291 Å иона C⁺⁵. Из-за слабой отражательной способности графитовых облицовочных пластин в зелёной области спектра вклад отражённого света от поверхности камеры в спектр CXRS-линии 5291 Å пренебрежимо мал.

Работа DNB-пучка в периодическом режиме позволяет регистрировать временное поведение измеряемых параметров в длинном импульсе Т-15МД ($t \geq 10^2 \tau_E \sim 10—20$ с), при этом суммарная длительность импульсов инжектора в течение длинного разряда будет ограничена величиной ≈ 1 с.

Активная перезарядочная спектроскопическая диагностика на нагревном пучке (CXRS-NBI) будет использоваться в качестве источника нейтралов нагревный инжектор с энергией $E_0 = 40\text{—}60$ кэВ и мощностью 2—3 МВт, расположенный в сечении № 11 токамака Т-15МД.

В комплекс активной спектроскопии на нагревном пучке входят две системы сбора света, ориентированные на измерения параметров плазмы в центральной части и в области пьедестала на краю плазменного шнура. Они располагаются в двух тороидальных патрубках сечения токамака № 10. Для системы измерений в центре шнура используется стигматичный спектрометр, разработанный для CXRS-диагностики ИТЭР, на базе двух прозрачных голографических решёток на области регистрации излучения с длинами волн 5291 и 6563 Å со светосилой 1/3, шириной инструментального контура $\sim 0,2$ Å и обратной линейной дисперсией 4—5 Å/мм. В качестве детекторов используются EMCCD-камеры с матрицей 1024×1024 пикселей размером 16×16 мкм и частотой опроса 25 кадров/с. Система CXRS-измерений в области пьедестала основана на светосильном спектрометре HES-370 [3] и на EMCCD-камере.

Диагностика CXRS-NBI дополнит данные CXRS-DNB-диагностики и позволит скомпенсировать недостатки CXRS-измерений в наружной части плазменного шнура. В этой области хорды наблюдения CXRS-NBI-диагностики проходят практически параллельно магнитным поверхностям шнура вдоль всей области их пересечения с NBI-пучком. Это обеспечит хорошее пространственное разрешение и высокую статистику измерений профилей температуры T_i , концентрации ионов n_p , n_z и тороидальной скорости вращения шнура $V_{\text{тор}}$ в разрядах с задействованным NBI-нагревом. Типичные параметры CXRS-NBI-диагностики приведены в табл. 6.3.10.

Таблица 6.3.10. Типичные параметры системы CXRS-DNB

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное, мс	Пространственное, см	
T_i	$\rho < 1$	0,5—15 кэВ	40	<5	Нет сведений
n_p	То же	$10^{19}\text{—}10^{20}$ м ⁻³	То же	То же	Нет сведений
n_z	То же	Нет сведений	То же	То же	Нет сведений
$V_p^{\text{тор}}$	То же	Нет сведений	То же	То же	Нет сведений
T_z	$\rho > 0,85$	0,01— 2 кэВ	40	<1	Нет сведений
n_p	То же	$10^{19}\text{—} 10^{20}$ м ⁻³	То же	То же	Нет сведений
n_z	То же	Нет сведений	То же	То же	Нет сведений
$V_z^{\text{тор}}$	То же	Нет сведений	То же	То же	Нет сведений

Длительность работы CXRS-NBI-диагностики в процессе длинного импульса Т-15МД будет определяться длительностью работы NBI-пучков, создающих токи увлечения для организации длинного разряда токамака. Возможность реализации CXRS-NBI-диагностики на Т-15МД определяется полученными параметрами нагревных пучков нейтральных атомов в штатном режиме работы и качеством подготовки камеры Т-15МД к работе с нагревными пучками, в том числе принятием мер по существенному снижению поступлений рабочего газа и примесей, возрастающих при работе NBI-инжекторов.

Для обеспечения ввода в строй и штатной работы NBI-пучков будет использована специальная система, смонтированная на патрубках CXRS-NBI-диагностики. Данная система, создаваемая на базе спектрометра HES-370, монохроматора МДР-23 и CMOS-камер, будет осуществлять контроль за физическими параметрами NBI-пучка и плазмы в процессе NBI-нагрева, измеряя компонентный состав и каустику пучка, динамику поступления в разряд рабочего газа и примесей при включении NBI-нагрева, динамику развития «подушки плотности» в области входа пучка в плазму, профиль в шнуре источника быстрых NBI-протонов, измеряемый по профилю поглощения пучка NBI-атомов в плазме, и депозит энергии быстрых протонов пучка в ионной компоненте, определяемый из концентрации n_p^{fast} и энергии T_p^{fast} быстрых протонов.

CXRS-диагностики Т-15МД участвуют в качестве основных исследовательских диагностик, в решении таких задач, как:

- локальные измерения величин и профилей ионной температуры $T_i(r)$ как основного параметра токамака-реактора;
- ввод в строй и налаживание штатной работы NBI- и ICR-систем нагрева и организация с их помощью токов увлечения;
- контроль за формированием внешнего (ЕТВ) и внутреннего (ИТВ) транспортных барьеров с помощью детальной регистрации профилей T_i , n_p , n_z , V^{pol} , V^{tor} , E_r ;
- регистрация профилей V^{pol} , V^{tor} , E_r для постановки задачи об управлении уровнем турбулентного переноса в области внешнего (ЕТВ) и внутреннего (ИТВ) транспортных барьеров и получения режимов advanced с улучшенными параметрами плазмы;
- измерение абсолютных концентраций $n_z(r)$ примесей C, N, O в плазме T-15МД с целью их снижения как главного условия успешной работы данной установки и получения в ней разрядов advanced;
- разработка методов удаления примесей из плазмы токамака с помощью NBI-, ICR- и ECR-систем нагрева с целью скомпенсировать процесс неклассического накопления примесей в зонах ЕТВ- и ИТВ-барьеров.

Подробную информацию об активной перезарядочной спектроскопической диагностике (CXRS) можно найти в [30—32].

Диагностика штарковского расщепления линий (MSE — Motional Stark Effect) используется для измерения профилей плотности тока $j_{pl}(r)$ и коэффициента запаса устойчивости $q(r)$ в шнуре по локальному углу наклона силовых линий магнитного поля (пинч-углу).

В основе диагностики лежит динамический эффект Штарка — расщепление линий в спектре излучения атомов DNB- или NBI-пучка на отдельные компоненты с векторами поляризации, параллельными (π -компоненты) и перпендикулярными (σ -компоненты) вектору лоренцовского электрического поля $E_{\text{Lor}} = (1/c) [V \times B]$, которое возникает в системе координат атома, движущегося со скоростью V в магнитном поле B , что приводит к частичному снятию вырождения возбуждённых состояний атома и расщеплению его электронных термов. Для водородных атомов и водородоподобных ионов величина расщепления прямо пропорциональна величине напряжённости полей B и E_{Lor} .

Диагностика MSE позволяет проводить локальные измерения коэффициента запаса устойчивости $q(r)$ в области шнура с $\rho < 1$. Эта информация важна для оптимизации профиля и величины генерируемого безындукционного тока. Важная физическая задача — изучение влияния профиля тока на устойчивость МГД- и альфвеновских мод и на процессы формирования транспортных барьеров.

Традиционно по различию измеряемых характеристик спектра и применяемому оборудованию MSE-диагностика разделяется на MSE-LS (от Line Splitting, расщепление линий), MSE-LP (от Line Polarization, поляризация линий). MSE-LS-методика основана на измерениях двух параметров: абсолютной величины расщепления линии H_α пучка $\Delta\lambda_{\text{Stark}}$ и соотношения интенсивностей отдельных компонент штарковского расщепления I_π/I_σ . Точность измерений может быть улучшена по мере уточнения скоростных коэффициентов возбуждения π - и σ -компонент H_α пучка в плазме токамака. MSE-LP-методика основана на измерениях малого угла поворота вектора поляризации σ -компоненты спектра, возникающего в результате добавления к тороидальному магнитному полю токамака малого магнитного поля тока. В настоящее время в качестве приоритетного варианта реализации диагностики на установке T-15МД выбрана методика MSE-LS, которая может быть построена на основе коммерчески доступных компонентов.

В состав MSE-LS-диагностик войдёт DNB-пучок, расположенный в сечении № 9 T-5МД, при расположении системы сбора MSE-излучения линии H_α пучка в сечении № 8. Уникальной особенностью MSE-диагностики на T-15МД станет возможность выполнения измерений во всей экваториальной зоне шнура, включая его внутреннюю область (HFS) с существенно большей величиной B_T . Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.3.11.

Существенным фактором, ограничивающим применение MSE-метода на T-5МД, является низкое магнитное поле установки $B_T \leq 2$ Тл, что приводит к недостаточному расщеплению π - и σ -компонент спектра, сравнимому с собственным уширением штарковских компонент. Это вызывает существенное переналожение компонент с соответствующим увеличением ошибки измерения поля тока $B_{\text{pol}}(r)$. Ожидается, что

измерение B_{pol} с помощью MSE-диагностики при тороидальных полях $B_T \leq 1$ Тл окажется возможным только при использовании для интерпретации данных измерений сложных кодов.

Таблица 6.3.11. Типичные параметры диагностики MSE

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
q	$\rho < 1$	Нет сведений	10 мс	30 точек по малому радиусу	20%

В настоящее время представляется реализуемым построение спектрометров с высокой обратной дисперсией ($\leq 1,5$ Å/мм), которые потребуются для прямого нахождения величины магнитного поля тока B_{pol} в данной точке шнура из увеличения расщепления π - и σ -компонент при добавлении к полю B_T токамака малого магнитного поля тока B_{pol} . Следует отметить, что оценки показывают существенные ошибки (до 50%) в полученных данных при использовании MSE-диагностики в разрядах с тороидальным полем $B_T \sim 0,5\text{—}1$ Тл. Это может существенно ограничить применимость диагностики для контроля профиля плотности тока в режиме реального времени в разрядах с длительностью $t \sim 10\text{—}20$ с и низким тороидальным полем. В перспективе планируется дооснастить установку диагностикой на основе MSE-LS-методики измерений, что позволит снизить ошибки измерений $B_{\text{pol}}(r)$. Подробную информацию о диагностике штарковского расщепления линий (MSE) можно найти в [33].

Диагностика флуктуаций плотности электронов из измерений флуктуаций интенсивности линейчатого излучения атомного пучка (BES-диагностика) позволяет проводить локальные измерения параметров длинноволновых и низкочастотных (< 1 МГц) флуктуаций плотности плазмы.

В основе метода лежит измерение свечения линий H_α пучка ($I_{H_\alpha}^{\text{beam}}$), наблюдаемых под углом к пучку и потому сдвинутых по длине волны относительно пассивной линии рабочего газа I_{H_α} за счёт эффекта Доплера. Флуктуации интенсивности линий $I_{H_\alpha}^{\text{beam}} = n_e n_0^{\text{beam}} Q_{H_\alpha}^{\text{beam}}$ задаются искомой флуктуацией n_e , а также флуктуациями концентрации трёх энергетических компонент NBI-пучка n_0^{beam} и скоростного коэффициента возбуждения их линейчатого штарковского излучения $Q_{H_\alpha}^{\text{beam}} (\sim n_e^{-0,7})$. Значения концентраций n_0^{beam} , затухающих вглубь плазмы, сохраняют в данной точке шнура r_0 информацию о величинах флуктуаций n_e (в меньшей степени о флуктуациях T_e, T_i, n_p, n_z) в наружной зоне шнура ($r_0 < r < a$, где a — граница шнура), предшествовавшей радиусу r_0 . Это обстоятельство усложняет нахождение характеристик флуктуации n_e в шнуре и увеличивает ошибку их определения. Одновременные измерения $I_{H_\alpha}^{\text{beam}}$ в нескольких пространственных точках шнура позволяют проводить корреляционные измерения параметров флуктуаций n_e , определять их фазовую скорость, корреляционные размеры и другие параметры.

Диагностика BES на T-15МД построена по традиционной схеме. Яркость линии $I_{H_\alpha}^{\text{beam}}$ и её флуктуации из точек пересечения нагревного пучка с многими хордами наблюдения, идущими почти по касательным к магнитным поверхностям в области $\rho = 0,7\text{—}1$, что увеличивает локальность BES-измерений, будут передаваться за биозащиту в спектроскопическую пультовую с помощью кварцевого оптоволоконного коллектора. При проведении измерений в направлении нагревного пучка с энергией $E_0 = 80$ кэВ граница спектра линий $I_{H_\alpha}^{\text{beam}}$, измеряемых по хорде, идущей под углом $\sim 45^\circ$ к пучку, сместится в красную область относительно линии H_α (6561Å) на $\delta\lambda \approx 60\text{—}65$ Å. Выделение набора многих сдвинутых по длинам волн спектров линий $I_{H_\alpha}^{\text{beam}}$ осуществляется либо соответствующим набором интерференционных светофильтров, либо разработанным спектрометром повышенного пропускания и светосилы. Излучение линии H_α отсекается либо с использованием узкополосного (нотч-) фильтра, либо диафрагмированием области расположения H_α на выходе спектрометра. В качестве детекторов используются эффективные в красной области спектра высокочастотные камеры на лавинных диодах. Каждый пиксель такой камеры регистрирует излучение с одной из хорд наблюдения. При условии высокой эффективности измерения интенсивности спектров $I_{H_\alpha}^{\text{beam}}$ это позволяет достичь временного (1 мкс) и пространственного (1—3 см) разрешения измеряемого профиля флуктуаций линии $I_{H_\alpha}^{\text{beam}}$. Наличие на T-15МД нагревных пучков с низкой энергией

(40—75 кэВ) позволяет иметь более высокую концентрацию атомов пучка n_0^{beam} при входе в плазму, но приводит к более быстрому их выбыванию вдоль траектории шнура. Система сбора света BES-диагностики может быть размещена в экваториальном порту № 10, соседнем с портом № 11, где размещён первый из пучков NBI-системы нагрева.

Основной задачей для диагностики BES является исследование параметров флуктуаций плотности и их связи с транспортными процессами в плазме токамака. Диагностика естественным образом дополняет другие диагностики, ориентированные на исследование флуктуаций. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.3.12.

Таблица 6.3.12. Типичные параметры диагностики BES

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
σ_n/n_e	$\rho < 1$	Нет сведений	1 мкс	1—3 см	30%

По принципу своей работы диагностика может проводить измерения только в режимах с нагревом плазмы NBI-пучком. Особенностью диагностики является существенный вклад ослабления зондирующего пучка в плазме до области наблюдения. Это требует учёта вклада интегрального члена в корреляционные функции возмущений, что ограничивает точность измерения флуктуаций n_e и область, пригодную для BES-исследований в плазменном шнуре. Подробную информацию о диагностике флуктуаций плотности электронов из измерений флуктуаций интенсивности линейчатого излучения атомного пучка (BES) можно найти в [34].

Диагностика флуктуаций температуры ионов на нагревном пучке (Ultrafast-CXRS). Диагностика основана на сверхбыстрой активной перезарядочной спектроскопии, при которой с помощью CXRS-методики осуществляется регистрация высокочастотных флуктуаций T_i с высоким временным разрешением (до 1 мкс). Это позволяет восстановить временной ход возмущений ионной температуры $\delta T_i(r)$ (из флуктуации доплеровских ширин) и тороидальной скорости вращения шнура $\delta V_{\text{tor}}(r)$ (из флуктуаций доплеровских смещений) спектральных контуров CXRS-линий водородоподобных ионов лёгких примесей и ионов рабочего газа.

Общая схема диагностики, традиционная для CXRS, однако, требует использования наиболее интенсивных CXRS-линий и создания высокоэффективной регистрации их спектральных контуров, чтобы обеспечить необходимую статистику спектральных измерений с частотой ~ 1 МГц. Для реализации диагностики используют самые яркие спектральные линии H-подобных ионов (например, линии 5291 \AA иона C^{5+}), нейтральный пучок атомов с предельной интенсивностью, линейку из лавинных фотодиодов (APD) с индивидуальным термоэлектрическим охлаждением в качестве системы регистрации, что позволяет достичь требуемого соотношения сигнал/шум.

При формировании схемы спектрометра с предельно высокими светосилой и пропусканием в качестве входной и выходной оптики предлагается использовать объективы Nikon с апертурой $f/2$ и фокусным расстоянием 200 мм, а в качестве диспергирующего элемента — призму из сдвоенных объёмно-фазовых голографических решёток. Такая призма, выполненная с использованием 4871 штр./мм, оптимизирована для длин волн 528—530 нм и обладает коэффициентом пропускания 75—80%, что позволяет реализовать регистрацию перезарядочной линии 5291 \AA ядер углерода (базовой примеси плазмы в токамаке T-15МД). Систему сбора света диагностики планируется расположить в 10-м сечении установки.

В качестве основных физических задач для данной системы следует рассматривать изучение физики мелкомасштабных колебаний и переходных процессов в плазме, в том числе процессов формирования внутренних транспортных барьеров. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.3.13.

Основным ограничивающим фактором для диагностики будет недостаток статистики измерений, затрудняющий их проведение в ряде режимов. Следует отметить, что интерпретация данных диагностики может потребовать дополнительного моделирования и/или теоретического обоснования из-за сравнимости времён наблюдаемых процессов и времени максвеллизации ионных температур, особенно при приближении температур T_i к высоким термоядерным значениям. Подробную информацию о диагностике флуктуаций температуры ионов на нагревном пучке (Ultrafast-CXRS) можно найти в [35].

Таблица 6.3.13. Типичные параметры диагностики Ultrafast CXRS

Параметр	Область	Диапазон величин	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
$\delta T_i(r)$	$\rho < 1$	Нет сведений	1 мкс	30 точек по малому радиусу	30%
$\delta V_{\text{tor}}(r)$	То же	Нет сведений	То же	То же	То же

Диагностика быстрых ионов Fast Ion Deuterium-Alpha (FIDA). Диагностику планируется использовать на Т-15МД для измерений концентрации n_{fast} , энергии E_{fast} и питч-угла V_{\parallel}/V быстрых протонов, созданных либо инжекцией атомов NBI-нагрева, либо ионным циклотронным нагревом.

В основе FIDA-диагностики лежит перезарядка быстрых ионов плазмы с водородными атомами нагревного (FIDA-NBI) или диагностического (FIDA-DNB) пучков, приводящая к образованию быстрого атома рабочего газа и его излучения на линии H_{α} . Регистрация данного излучения позволяет получать локальную информацию о параметрах быстрых протонов. Благодаря сравнительно малой энергии (40—70 кэВ) нагревных NBI-пучков Т-15МД и сравнительно малой энергии быстрых протонов процесс перезарядки атом—протон будет в условиях Т-15МД интенсивным в сравнении с эффектами, производимыми высокоэнергичными пучками с энергией порядка 1 МэВ на больших установках. Это даёт возможность достаточно эффективного использования диагностики FIDA.

FIDA-измерения могут проводиться совместно с CXRS-измерениями на линии H_{α} при совместном использовании их пространственных каналов наблюдения. Засветка от пассивной линии H_{α} устраняется путём установки дополнительного узкого полосового фильтра (нотч-фильтра). Для улучшения соотношения сигнал/шум и надёжной регистрации FIDA-спектра необходимо увеличивать время экспозиции, так как большая энергия быстрых ионов и соответственно большое доплеровское уширение спектрального FIDA-контура линии H_{α} приводят к уменьшению плотности освещённости пикселей камеры. Для получения информации о питч-угле V_{\parallel}/V необходима организация наблюдения одной и той же области пересечения быстрых ионов с атомным пучком с разных ракурсов. Измерение CXRS-спектра линии H_{α} пучка под разными углами позволяет проводить томографическую реконструкцию двумерного распределения $f(E_{\text{fast}}, V_{\parallel}/V)$.

Основной физической задачей для FIDA на Т-15МД является исследование физики термализации быстрых ионов, осуществляющих нагрев плазмы, а также формирования с их помощью токов увлечения. Важный физический интерес представляет также исследование возбуждения альфвеновских колебаний и удержания быстрых частиц (нагревных ионов и α -частиц) как крайне актуальная задача для целей повышения эффективности работы термоядерного реактора. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.3.14.

Таблица 6.3.14. Типичные параметры диагностики FIDA

Параметр	Область	Диапазон величин	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
E_{fast}	$\rho < 1$	Нет сведений	Нет сведений	Нет сведений	30%
V_{\parallel}/V	То же	То же	То же	То же	То же

Следует отметить, что для определения параметров быстрых ионов из спектральных измерений необходимо проведение модельных расчётов (так называемая синтетическая диагностика). Состав спектра быстрых ионов в области H_{α} достаточно сложен. В нём присутствуют пассивный спектр H_{α} , CXRS-спектр тепловых ионов на линии H_{α} , CXRS-спектр быстрых ионов на линии H_{α} при их перезарядке на тепловых атомах Н плазмы, MSE-спектр H_{α} от компонент атомного пучка E_0 , $E_0/2$ и $E_0/3$ и гало-спектр линии H_{α} и линии примесей. Поэтому прямое определение величин n_{fast} , E_{fast} и питч-угла V_{\parallel}/V с помощью указанных аппроксимаций не всегда оказывается возможным. Подробную информацию о диагностике флуктуаций температуры ионов на нагревном пучке (Ultrafast-CXRS) можно найти в [36, 37].

6.3.5. Спектроскопия гелиевого пучка

Спектроскопия гелиевого пучка — активная диагностика, используемая для измерений температуры T_e и концентрации n_e электронов в пристеночной и диверторной плазме.

Метод измерений основан на одновременном наблюдении синглетных и триплетных линий атомарного гелия, дополнительно инжектируемого в исследуемый объём плазмы. Отношение интенсивностей излучения линий переходов между уровнями одной мультиплетности сильно зависит от n_e и слабо от T_e , а отношение интенсивностей линий переходов разной мультиплетности в большей степени зависит от T_e , чем от n_e .

Гелиевый пучок предлагается инжектировать в область «внешней ноги» дивертора со стороны слабого поля. Такая схема инжекции предположительно позволит измерять n_e и T_e от стенки вплоть до сепаратрисы. Для измерений в диапазоне ожидаемых в диверторе Т-15МД параметров $n_e = 10^{18}—10^{20} \text{ м}^{-3}$ и $T_e = 0,1—200 \text{ эВ}$ подходит группа спектральных линий HeI 667,8 нм (переход $1s3d \ ^1D \rightarrow 1s2p \ ^1P$), 706,5 нм ($1s3s \ ^3S \rightarrow 1s2p \ ^3P$) и 728,1 нм ($1s3s \ ^1S \rightarrow 1s2p \ ^1P$). Рассматриваются два возможных набора точек измерения с хордой наблюдения вдоль направления инжекции пучка гелия и хордой наблюдения, параллельной сепаратрисе во «внешней ноге» дивертора.

Ограниченный доступ к диверторной плазме в Т-15МД требует применения внутривакуумной оптической системы сбора сигналов. Для уменьшения инерционности инжекции гелиевого пучка планируется разместить быстрый клапан газонапуска непосредственно около сопла внутри вакуумной камеры токамака. При использовании предлагаемой схемы измерений возможно проводить измерения n_e и T_e в области «внешней ноги» дивертора со стороны слабого поля.

Диагностика теплового гелиевого пучка позволит измерять n_e и T_e в диверторе в направлении вдоль и поперёк магнитных силовых линий, что важно для изучения режимов работы дивертора Т-15МД, в том числе режима детачмента. Диагностика естественным образом дополняет другие спектроскопические диагностики диверторной плазмы Т-15МД, такие как томсоновское рассеяние и пассивная спектроскопия. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.3.15.

Таблица 6.3.15. Типичные параметры диагностики спектроскопии гелиевого пучка

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
n_e	Дивертор	$10^{18}—10^{20} \text{ м}^{-3}$	1 мс	5 мм	10%
T_e	То же	0,1—200 эВ	То же	То же	То же

Область измерения диагностики ограничена областью свечения гелиевого облака и глубиной проникновения атомов гелия в плазму, что, в свою очередь, сильно зависит от магнитной конфигурации и положения сепаратрисы в диверторе.

Диагностика может работать в режиме реального времени при использовании упрощённой модели интерпретации результатов измерений. В случае постобработки сигналов и применения кодов, моделирующих пристеночную и диверторную плазму (например, SOLPS), можно достичь существенно более точных результатов при интерпретации сигналов.

Возможное направление для модернизации — использование сверхзвукового сопла, формирующего пучок атомов гелия с меньшей расходимостью и большей глубиной проникновения в плазму. Переход на быстрые фотодетекторы (многоканальные ФЭУ) позволит проводить измерения n_e и T_e с частотой вплоть до 1 МГц. Аналогичная диагностическая система может быть установлена в экваториальном сечении в дополнение к томсоновскому рассеянию для измерений в пристеночной и краевой плазме с высоким пространственным и временным разрешением. Подробную информацию о спектроскопии гелиевого пучка можно найти в [38, 39].

6.4. ЛАЗЕРНЫЕ ДИАГНОСТИКИ

6.4.1. Многоканальный лазерный интерферометр

Многоканальный лазерный интерферометр — активная диагностика, основанная на измерении линейно интегрированной электронной концентрации $nl = \int_0^L n_e(x, y, z) dl$ зондированием плазмы лазерным излучением с обыкновенной поляризацией в инфракрасном (ИК) и видимом диапазоне длин волн области.

По результатам измерений нескольких каналов интерферометра восстанавливается профиль электронной концентрации $n_e(r)$.

Диагностика основана на приращении фазы электромагнитной волны при прохождении через плазму по сравнению с фазой в опорном канале. Если частота зондирующего излучения много выше плазменной частоты ω_p , разность фаз можно считать пропорциональной линейно интегрированной электронной концентрации nl . Для восстановления профиля концентрации используется решение обратной задачи типа обратного преобразования Абея. Измеряемый с помощью многоканального лазерного интерферометра профиль концентрации электронов $n_e(r)$ является одним из основных параметров плазмы и будет использоваться во всех экспериментальных программах.

Многоканальный гетеродинный двухцветный CO₂-лазерный интерферометр (CO₂-лазерный интерферометр). Интерферометр представляет собой двухцветный супергетеродинный интерферометр с рабочими длинами волн $\lambda_{CO_2} = 10,6$ мкм, $\lambda_{NdYAG} = 532$ нм (вторая гармоника). Наличие двух волн обусловлено необходимостью компенсации вибраций оптических элементов интерферометра и элементов токамака, вносящих значительный вклад в измеряемую величину. Разность частот в опорном и измерительном плечах создаётся при помощи акустооптических модуляторов, сдвигающих частоту на $\Delta f_{CO_2} = 40$ МГц и $\Delta f_{NdYAG} = 100$ МГц. Диагностика допускает работу в режиме длинного импульса с обработкой данных в режиме реального времени для использования в системе управления плазмой (СУП) установки.

В составе диагностики на Т-15МД планируется использовать до восьми каналов измерения от одного CO₂-лазера и одного NdYAG-лазера с поканальным делением пучков. Блоки интерферометра располагаются на нижнем уровне зала токамака Т-15МД. Излучение передаётся к экваториальному фланцу Т-15МД при помощи открытой оптики, размещённой в защитном коробе. Для ввода и приёма излучения из вакуумной камеры, а также для разделения пучков и их смешивания используются окна из ВаF₂ и ZnSe. Ввод и приём излучения осуществляются через экваториальный патрубок токамака Т-15МД с использованием уголковых отражателей, расположенных на внутренней стенке установки. Уголковые отражатели во время технологической чистки вакуумной камеры между плазменными разрядами установки защищены механической шторкой. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.4.1.

Таблица 6.4.1. Типичные параметры диагностики многоканальный гетеродинный двухцветный CO₂-лазерный интерферометр

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
n_e	$\rho < 1$	$10^{18} - 10^{21} \text{ м}^{-3}$	1 мс	$a/4$	$5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$

Зондирование с помощью CO₂-лазерного интерферометра через экваториальный патрубок ограничено возможностью расположения уголковых отражателей на внутренней стенке установки. Зондирующими каналами будет охватываться практически весь плазменный шнур в лимитерной конфигурации и большая часть шнура в вытянутой конфигурации (кроме верхних и нижних областей). Небольшое количество каналов зондирования накладывает ограничения на пространственное разрешение диагностики и ограничивает её применимость в режимах с сильными локальными градиентами электронной плотности. Дополнительные ограничения на диагностику связаны, в первую очередь, с большим влиянием механических вибраций, которые в ряде случаев могут приводить к невозможности измерений. Подробную информацию о многоканальном CO₂-лазерном интерферометре можно найти в [40].

Многоканальный двухцветный гетеродинный волоконный лазерный интерферометр (волоконный лазерный интерферометр). Интерферометр представляет собой двухцветный супергетеродинный интерферометр с рабочими длинами волн $\lambda_1 = 1550$ мкм, $\lambda_2 = 532$ нм. Частоты лазеров могут подстраиваться в небольшом диапазоне. Наличие двух волн обусловлено необходимостью компенсации вибраций оптических элементов интерферометра, вносящих вклад в измеряемую величину. Разность частот в опорном и измерительном плечах создаётся при помощи акустооптических модуляторов, сдвигающих частоту на $\Delta f_{\lambda_1} = 80$ МГц и $\Delta f_{\lambda_2} = 100$ МГц.

На токамаке Т-15МД планируется до 15 каналов волоконного интерферометра. Блоки интерферометра будут располагаться на нижнем этаже зала токамака в специально оборудованном помещении. Для ввода

и приёма излучения из вакуумной камеры используются коллиматоры, расположенные на окнах из плавленого кварца. Ввод и приём осуществляются через экваториальный патрубок токамака T-15МД с отражением от уголкового отражателя, расположенных на внутренней стенке установки. Уголки отражатели во время технологической чистки вакуумной камеры между плазменными разрядами установки защищены механической шторкой. Оборудование интерферометра отличается компактностью: все блоки для 15 каналов интерферометра размещены в одном стандартном 19" шкафу, а размер коллиматоров позволяет использовать для одного канала стандартные фланцы CF63. Таким образом, возможно расположить 15 каналов зондирования на одном экваториальном патрубке токамака T-15МД. Для передачи лазерного излучения между блоками интерферометра, а также между лазерной комнатой и коллиматорами на экваториальном фланце токамака T-15МД используется оптическое волокно. Диагностика допускает работу в режиме длинного импульса с обработкой данных в режиме реального времени для использования в СУП установки.

Измеряемый с помощью многоканального волоконного лазерного интерферометра профиль электронной концентрации $n_e(r)$ является одним из основных параметров плазмы и будет использоваться во всех экспериментальных программах. Профиль описывает распределение плотности по всему сечению плазменного шнура, а одновременное использование 15 каналов зондирования волоконного лазерного интерферометра совместно с восемью каналами CO₂-лазерного интерферометра повышает пространственное разрешение восстанавливаемого профиля концентрации электронов в плазменных разрядах токамака T-15МД. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.4.2.

Таблица 6.4.2. Типичные параметры диагностики многоканальный двухцветный гетеродинный волоконный лазерный интерферометр

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
n_e	$\rho < 1$	$10^{18}—10^{21} \text{ м}^{-3}$	1 мс	$a/8$	$5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$

Следует отметить, что зондирование с помощью волоконного лазерного интерферометра через экваториальный патрубок ограничено возможностью расположения уголкового отражателя на внутренней стенке установки. Зондирующими каналами будет охватываться практически весь плазменный шнур в лимитерной конфигурации и большая часть шнура в вытянутой конфигурации (кроме верхних и нижних областей). Для возможности исследования недоступных зон возможно введение дополнительных каналов зондирования через другие диагностические патрубки токамака T-15МД. Такое развитие диагностики позволит повысить пространственное разрешение восстанавливаемого профиля концентрации электронов в плазменных разрядах и точность восстановления профиля электронной концентрации плазмы в разрядах токамака T-15МД.

Ограничения на диагностику связаны, в первую очередь, с большим влиянием механических вибраций. В случае, если их влияние на измеряемую фазу в сигналах интерферометра приведёт к невозможности её измерений, например, при выходе сигнала из полосы усиления, из-за недостаточного быстродействия системы обработки и сбора данных или из-за слишком высокого соотношения между вибрационным сдвигом фаз и плазменным, экспериментальные данные будут утрачены. Для минимизации влияния вибраций используются максимально отличные длины зондирующего излучения, а коллиматоры устанавливаются непосредственно на фланец токамака T-15МД. Подробную информацию о многоканальном CO₂-лазерном интерферометре можно найти в [41, 42].

6.4.2. Томсоновское рассеяние

Томсоновское рассеяние — это активная диагностика, предназначенная для измерения профиля электронной температуры и плотности плазмы. В основе диагностики лежит явление упругого рассеяния электромагнитной волны на заряженных частицах. Диагностика регистрирует спектр рассеянного лазерного излучения на свободных электронах. Анализируя форму и амплитуду полученных спектров, можно восстановить значение температуры и плотности плазмы в локальной области пересечения лазерного луча и линии наблюдения.

Диагностика тангенциального томсоновского рассеяния построена на основе традиционной схемы с использованием 5-канальных фильтровых полихроматоров для регистрации рассеянного излучения. В качестве источника излучения используется излучение Nd:YAG-лазера с длиной волны 1064 нм и энергией в импульсе 3 Дж при длительности 10 нс. Частота следования импульсов составляет 100 Гц. Особенностью диагностики на Т-15МД является использование полихроматоров с индивидуальным АЦП и процессором в составе каждого прибора, что значительно ускоряет процесс регистрации и первичной обработки данных. Это может обеспечить работу диагностики в режиме реального времени. Низкая задержка между регистрацией первичных данных диагностики и получением значения измеряемого параметра после обработки позволит использовать диагностику в системе управления плазмой. Диагностика может работать в режиме длинного импульса, ограничением для этого в настоящее время выступает лазер, способный непрерывно работать до 10 с.

Область наблюдения диагностики находится в экваториальной плоскости и охватывает весь плазменный шнур по большому радиусу от внутренней до внешней периферии. Измерения будут проводиться в 10 пространственных каналах с возможностью выбора положения области наблюдения в плазме благодаря наличию оснастки для 20 измерительных каналов.

Диагностика служит одним из основных инструментов изучения поведения электронной компоненты плазмы в любых режимах независимо от величины магнитного поля и формы профиля электронной плотности. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.4.3.

Таблица 6.4.3. Типичные параметры диагностики тангенциальное томсоновское рассеяние

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
n_e	$0 < \rho < 1$	$> 10^{18} \text{ м}^{-3}$	10 мс	10 точек на шнур	10%
T_e	$0 < \rho < 1$	10 эВ — 3 кэВ ($\rho = 1$) 40 эВ ($\rho = 0$)	То же	2—5 см	То же

Принципиальными ограничениями для диагностики являются минимальная величина электронной плотности плазмы $n_e > 10^{18} \text{ м}^{-3}$ и смещение диапазона измеряемых температур в зависимости от положения пространственного канала измерений в плазме из-за заметного изменения угла рассеяния.

Основное направление для улучшения и модернизации диагностики на Т-15МД будет связано с увеличением числа пространственных каналов путём как увеличения числа регистрирующих приборов, так и использования одного прибора для измерения нескольких пространственных каналов путём разделения волоконной сборки на несколько отдельных жгутов со стороны сбора света. Переход на лазер с частотой следования импульсов 330 Гц позволит уменьшить интервал между измерениями до 3 мс. Подробную информацию о диагностике тангенциального томсоновского рассеяния можно найти в [43—45].

Диагностика вертикального томсоновского рассеяния построена на основе традиционной схемы с использованием видеокамеры с усилителем изображения в качестве детектора. Для увеличения вводимой энергии в плазму используется многопроходная система, с помощью которой лазерный луч проходит 7 раз через объём плазмы за одно измерение. В качестве источника излучения используется Nd:YAG-лазер, работающий на второй гармонике с длиной волны 532 нм с энергией в импульсе до 2,5 Дж при длительности 10 нс. Частота следования импульсов составляет 100 Гц. Использование второй гармоники Nd:YAG-лазера совместно с телевизионной системой регистрации позволяет проводить измерения в большом количестве точек с высоким пространственным разрешением при использовании одного спектрального прибора. В Т-15МД для перекрытия всей хорды наблюдения потребуется установка трёх спектральных приборов. Зондирование плазмы будет производиться вертикально, при этом хорда наблюдения будет проходить вблизи оси плазменного шнура, а её длина составит порядка 2200 мм. Измерения будут проводиться в 159 пространственных точках. Технически возможна работа диагностики в режиме длинного импульса до 10 с, для чего необходимо наличие у камеры быстрого интерфейса обмена данными.

Диагностика служит одним из основных инструментов изучения поведения электронной компоненты плазмы в любых режимах независимо от величины магнитного поля и формы профиля электронной плотности. Вертикальная система томсоновского рассеяния позволяет проводить измерения профиля электронной температуры и плотности с высоким пространственным разрешением с временным интервалом

10 мс. Такие параметры позволяют наблюдать динамику образования в плазме транспортных барьеров. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.4.4.

Таблица 6.4.4. Типичные параметры диагностики вертикальное томсоновское рассеяние

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
n_e	$0 < \rho < 1$	$>10^{18} \text{ м}^{-3}$	10 мс	159 точек на шнур	10%
T_e	$0 < \rho < 1$	25 эВ — 8 кэВ	То же	11—24 мм	То же

Принципиальным ограничением для диагностики является минимальная величина электронной плотности плазмы $n_e > 10^{18} \text{ м}^{-3}$. Кроме того, на работоспособность диагностики может повлиять наличие большого количества интенсивных линий в видимом диапазоне спектра излучения плазмы.

Потенциально возможным направлением развития системы может служить переход на SWIR-детекторы, обладающие большей квантовой эффективностью. Это позволит работать на основной гармонике Nd:YAG-лазера в ближнем инфракрасном диапазоне без использования усилителя изображения. Кроме того, рассматривается возможность перехода на неосновные линии излучения Nd:YAG-лазера и их гармоники (основная гармоника 947 нм, вторая гармоника 1320 нм), что также позволит сместить спектр рассеяния в красную область видимого диапазона. Оба направления модернизации сместят спектр рассеяния в более длинноволновый диапазон, что позволит в значительной степени снизить влияние линейчатого спектра излучения плазмы. Подробную информацию о диагностике тангенциального томсоновского рассеяния можно найти в [46, 47].

Диагностика томсоновского рассеяния в диверторной области построена на основе традиционной схемы с использованием 4-канальных полихроматоров на основе интерференционных фильтров для регистрации рассеянного излучения. В качестве источника излучения используется Nd:YAG-лазер с длиной волны 1064 нм и энергией в импульсе до 3 Дж при длительности 10 нс. Частота следования импульсов составляет 100 Гц. Особенностью системы сбора света является использование внутривакуумной оптики для нижней зоны хорды зондирования. Вывод света из вакуумной камеры установки планируется осуществлять с помощью оптоволоконных вакуумных проходок. Диверторная система томсоновского рассеяния позволяет проводить измерения профиля электронной температуры и плотности вдоль «внешней ноги» дивертора от уровня X-точки до зоны выхода сепаратрисы на первую стенку с временным интервалом 10 мс. Диагностика может работать в режиме длинного импульса, ограничением для этого в настоящее время выступает лазер, способный непрерывно работать до 10 с. Каждый полихроматор комплектуется индивидуальным АЦП и процессором, что значительно ускоряет процесс регистрации и первичной обработки данных. Это позволит обеспечить низкую задержку между измерениями и получением информации об измеряемом параметре для использования в системе управления плазмой в области дивертора.

Диагностика служит одним из основных инструментов изучения поведения электронной компоненты плазмы в любых режимах независимо от величины магнитного поля или наличия/отсутствия крутых градиентов. Диагностика позволит проводить изучение различных режимов работы дивертора, а при заведении обратной связи изучать возможность их управлением. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.4.5.

Таблица 6.4.5. Типичные параметры диагностики томсоновское рассеяние в диверторной области

Параметр	Диапазон величины	Разрешение		Ошибка измерений
		Временное	Пространственное	
n_e	$10^{18}—10^{21} \text{ м}^{-3}$	10 мс	13 точек	<20%
T_e	До 100 эВ	То же	3—5 мм	То же

Принципиальным ограничением для диагностики является минимальная величина электронной плотности плазмы $n_e > 10^{18} \text{ м}^{-3}$. Также проведение измерений может быть затруднено при заметном превышении уровня фонового излучения плазмы и теплового излучения конструкционных элементов.

Основное направление для улучшения и модернизации диагностики на Т-15МД будет связано с увеличением числа пространственных каналов и регистрирующих приборов, а также с использованием одного прибора для измерения нескольких пространственных каналов путём разделения волоконной сборки

на несколько отдельных жгутов со стороны сбора света. Переход на лазер с частотой следования импульсов 330 Гц позволит уменьшить интервал между измерениями до 3 мс. Также рассматривается возможность реализации сканирования диверторной области с помощью установки моторизованного зеркала с пьезоприводами для изменения угла ввода лазерного излучения в плазму. Подробную информацию о диагностике тангенциального томсоновского рассеяния можно найти в [48—50].

6.4.3. Лазерное индуцированное тушение

Лазерное индуцированное тушение (ЛИТ) — активный метод диагностики параметров атомарного водорода в пристеночной и диверторной плазме токамака. ЛИТ используется для измерения концентрации водорода $n_a(\text{H})$ и сканирования спектрального контура линии поглощения лазерного излучения. Из измеренного спектрального контура линии могут быть получены такие параметры, как температура атомов и ионов, проекция скорости движения атомов водорода, проекция магнитного поля и другие.

Метод измерений основан на лазерном возбуждении (накачке) атомов водорода с $n = 3$ состояния на одно из более высоковозбуждённых состояний ($n \geq 4$). В результате лазерной накачки оптически разрешённого перехода, соответствующего одной из линий Пашена, уменьшается населённость на $n = 3$ группе уровней. Пропорционально населённости снижается интенсивность свечения линии $H_\alpha = 656,3$ нм водорода. Регистрируя уменьшение свечения линии H_α , можно рассчитать концентрацию атомов водорода с помощью столкновительно-излучательной модели в области пересечения лазерного луча и хорд сбора света оптической системы наблюдения.

Главная особенность ЛИТ-диагностики — использование модулированного во времени волоконного лазерного источника для накачки линии водорода $P_\alpha = 1875,1$ нм. Применение модулированного во времени лазера в отличие от традиционно используемых в задачах лазерной спектроскопии импульсных лазеров позволяет значительно увеличить чувствительность диагностики и улучшить временное разрешение. Высокая частота следования импульсов лазера (~ 1 МГц) даёт возможность проводить усреднение сигналов тушения за разные отрезки времени в зависимости от уровня сигналов уже после эксперимента, тем самым варьировать временное разрешение в зависимости от задачи эксперимента.

На установке Т-15МД измерения планируется проводить во «внешней ноге» дивертора. Лазерный пучок в плазму будет вводиться через вертикальный диверторный патрубок. Полезные сигналы планируется наблюдать с помощью двух систем сбора света: внутривакуумной, предназначенной для измерений в области выхода сепаратрисы на пластины дивертора (так называемая *strike-point*), и «атмосферной», расположенной за вакуумным окном и регистрирующей свет из середины и верхней части хорды зондирования. На Т-15МД диагностика ЛИТ может быть совмещена с диагностикой диверторного томсоновского рассеяния (ДТР). Разные спектральные диапазоны работы ЛИТ и ДТР позволяют использовать единую оптику для ввода лазерных пучков в плазму и сбора света.

Измерение профиля концентрации атомов водорода вдоль траектории лазерного пучка в диверторе необходимо для исследования режимов работы дивертора, определения положения ионизационного и рекомбинационного фронтов. Атомарная (ионная) температура требуется для контроля давления атомарной (ионной) компоненты плазмы в районе *strike-point*. ЛИТ совместно с диагностикой пассивной спектроскопии в диверторе, томсоновским рассеянием и гелиевым тепловым пучком будет давать всю необходимую информацию для исследования эффекта детачмента плазмы в диверторе. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.4.6.

Область измерения диагностики ограничена областью свечения атомарного водорода в линии H_α . Для интерпретации результатов измерений $n_a(\text{H})$ требуются значения концентрации и температуры электронов в точках измерения.

Диагностика может использоваться для верификации расчётных кодов (например, SOLPS), применяемых для моделирования пристеночной и диверторной плазмы. Измерение профиля свечения линии H_α вдоль хорды зондирования ЛИТ-методом будет дополнять результаты измерений диагностики пассивной спектроскопии дивертора (спектроскопия водородных линий и примесей в диверторе). Предлагается использовать диагностику лазерного индуцированного тушения на ИТЭР в области дивертора как часть диагностики лазерной индуцированной флуоресценции, совмещённой с диагностикой диверторного томсоновского рассеяния.

Таблица 6.4.6. Типичные параметры диагностики лазерное индуцированное тушение

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность, %
			Временное, мс	Пространственное	
$n_a(\text{H})$	Дивертор	$n_a(\text{H}) > 10^{16} \text{ м}^{-3}$	1—10	5 мм поперёк и 25 мм	10
T_a, T_i	Дивертор	0,2—100 эВ	То же	вдоль магнитных поверхностей	10

На первом этапе ввода диагностики в строй планируются только измерения концентрации водорода с помощью лазера с широкой линией (около 2 нм). В дальнейшем будет реализована возможность генерации узкополосного лазерного излучения ($\Delta\lambda_l = 50\text{—}100$ пм) для сканирования спектрального контура линии P_α . Использование подвижного внутривакуумного зеркала, направляющего лазерный пучок в плазму, позволит проводить измерения во всей области «внешней ноги» дивертора токамака. Подробную информацию о диагностике лазерного индуцированного тушения можно найти в [51—53].

6.5. ДИАГНОСТИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

6.5.1. Мониторы рентгеновского излучения

Монитор мягкого рентгеновского излучения — это пассивная диагностика, предназначенная для измерения интенсивности мягкого рентгеновского излучения в диапазоне энергии от 1 до 50 кэВ.

Диагностика построена на базе полупроводниковых поверхностно-барьерных детекторов из кремния. При поглощении рентгеновского кванта создаётся свободный заряд, пропорциональный энергии поглощённого кванта. Регистрируемым параметром является интенсивность излучения. Зная калибровочную зависимость детектора и геометрию его расположения на токамаке, можно определить интенсивность потока мягкого рентгеновского излучения в абсолютных единицах.

Основными компонентами диагностики являются полупроводниковый детектор и усилитель, интегрированные в едином экранированном корпусе для минимизации наводок. Усилитель предназначен для преобразования фототока детектора в напряжение, для уменьшения наводок и увеличения мощности выходного сигнала. Детекторы расположены на фланцах с бериллиевыми окнами (фольга толщиной ~100 мкм) вплотную к ним для уменьшения влияния поглощения в воздушном зазоре. Поскольку детекторы находятся в непосредственной близости от вакуумной камеры, катушек управления и тороидального поля, возможно влияние рассеянных магнитных полей на качество сигнала за счёт наводок на сам полупроводниковый кристалл и входные цепи усилителя. Для уменьшения влияния переменных магнитных полей использованы проводящие экраны. Диагностика имеет пять широкоугольных каналов обзора, расположенных на 55-градусном патрубке в верхнем конусе токамака. Число каналов и их геометрия выбраны таким образом, чтобы охватить всю D-образную плазму, в том числе с учётом смещения шнура. Диагностика может работать при любой длительности импульса, а также в режиме реального времени.

Монитор мягкого рентгеновского излучения является базовой диагностикой и предоставляет информацию о температуре плазмы. Диагностика необходима для работы в цепях управления, в частности, для базового управления разрядом (Basic control) и защиты установки (Machine protection).

За счёт большого количества каналов измерения диагностика предоставляет достоверную информацию при любом смещении и геометрии плазменного шнура. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.5.1. Из-за ограничений на минимальную энергию регистрируемых квантов диагностика не может проводить измерения при температуре плазмы $T_e < 200$ эВ.

Таблица 6.5.1. Типичные параметры диагностики мониторов мягкого рентгеновского излучения

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
I_{SXR}	Обзорный	$10^{12}\text{—}10^{16} \text{ эВ}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$	1 мкс	Обзорный	$10^{11} \text{ эВ}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$

Модернизация может включать в себя установку других видов детекторов для повышения быстродействия, уменьшения уровня шума, устойчивых к действию интенсивных нейтронных потоков. Подробную информацию о мониторе мягкого рентгеновского излучения можно найти в [54, 55].

Монитор жёсткого рентгеновского излучения — это обзорная диагностика, предназначенная для измерения интенсивности жёсткого рентгеновского излучения в диапазоне энергии свыше 300 кэВ.

В основе диагностики лежит принцип генерации оптического излучения (сцинтилляций) при прохождении его через среды с определёнными характеристиками (сцинтиллятора). Регистрируемым параметром является интенсивность сцинтилляционного излучения. Зная калибровочную зависимость детектора и геометрию его расположения на токамаке, можно определить интенсивность потока жёсткого рентгеновского излучения в абсолютных единицах.

В состав диагностики входят девять детекторов жёсткого рентгеновского излучения вне вакуумной камеры (на расстоянии до 5 м от установки), измеряющих радиационное поле в зале токамака. Каждый детектор представляет собой сборку из сцинтилляционного кристалла NaI(Tl), фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) и предварительного усилителя сигнала, размещённых в едином корпусе. Используются кристаллы двух разных типоразмеров — 38×38 мм и 75×75 мм, предназначенные для работы при различных значениях интенсивности потока и энергии квантов жёсткого рентгеновского излучения. В базовом варианте детекторы размещаются в четырёх различных сечениях Т-15МД равномерно по тороидальному обходу. При необходимости детекторы могут быть сгруппированы иным образом, например, для более подробного обмера выделенного направления излучения жёсткого рентгена, связанного с взаимодействием пучков ускоренных электронов и внутрикамерных элементов.

Монитор жёсткого рентгеновского излучения предоставляет базовую информацию о наличии в плазме высокоэнергетичных заряженных частиц — ускоренных электронов, ионов нейтральной инжекции и возможных продуктов реакции во всех плазменных разрядах установки. Монитор жёсткого рентгеновского излучения работает штатно в течение всей экспериментальной кампании на Т-15МД. Диагностика может использоваться в цепях управления, в частности, для базового управления разрядом (Basic control) и защиты установки (Machine protection). Сигнал монитора жёсткого рентгена может использоваться как показатель нештатных параметров разряда, для предотвращения возникновения опасности выхода излучения за пределы экспериментального зала, например, в случае развития мощных пучков ускоренных электронов. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.5.2.

Таблица 6.5.2. Типичные параметры диагностики монитор жёсткого рентгеновского излучения

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Энергетическое	
I_{HXR}	Обзорный	$<10^{18}$ эВ/с	1 мкс	0,3—10 МэВ	Нет сведений

С учётом того, что Т-15МД обладает воздушным индуктором, во время импульсов ожидаются высокие значения рассеянных магнитных полей (до 0,1 Тл) на расстоянии до 5 м от установки, поэтому компоненты диагностики требуют магнитной экранировки. Данная проблема может быть также решена использованием ФЭУ на основе кремния.

В дальнейшем планируется оснащение диагностики ФЭУ, не подверженным действию магнитных полей и полей излучения, а также использование сцинтилляторов с лучшим световыходом и временем высвечивания, что позволит улучшить временное разрешение монитора. Подробную информацию о мониторе мягкого рентгеновского излучения можно найти в [54—56].

6.5.2. Рентгеновская спектрометрия

Спектрометр мягкого рентгеновского излучения — это пассивная диагностика, предназначенная для измерения пространственного и временного распределения абсолютного значения электронной температуры плазмы.

Диагностика основана на преобразовании квантов рентгеновского и низкоэнергетического гамма-излучения в пропорциональные по амплитуде электрические сигналы посредством полупроводникового детектора. Гистограмма амплитуд всплесков от отдельных квантов на зарегистрированном электрическом сигнале отражает спектральную плотность интенсивности излучения плазмы. При максвелловском распределении электронов плазмы по скоростям наклон спектральной плотности интенсивности в полулогарифмическом масштабе позволяет определять максимальную вдоль линии наблюдения абсолютную величину электронной температуры плазмы.

Детектирование излучения осуществляется с использованием коммерчески доступных полупроводниковых детекторов. Из-за необходимости размещения детектора на расстоянии порядка 1,5 м от плазмы в измерительных каналах требуется поддерживать давление не хуже 10^{-3} — 10^{-4} Торр для предотвращения поглощения рентгеновского излучения в воздухе. Для изменения потока квантов рентгеновского излучения, попадающего на входное окно детектора, вакуумный объём измерительного канала каждого детектора оснащается дистанционно управляемым устройством смены коллиматоров и фильтров. Измерения планируется проводить по семи хордам наблюдения в горизонтальном направлении, из которых две — с фиксированным центральным прицельным параметром и сборка из пяти хорд наблюдения — с возможностью вариации прицельного параметра между плазменными разрядами. Хорды наблюдения с фиксированным прицельным параметром оснащаются детекторами, измеряющими в двух диапазонах энергии излучения, а именно от 1 до 15 кэВ (кремниевый детектор) и от 5 до 150 кэВ (теллурид-кадмиевый). Хорды наблюдения с изменяемым прицельным параметром оснащаются кремниевыми детекторами для измерений в диапазоне от 1 до 15 кэВ. Особенностью работы диагностики на токамаке T-15МД является использование цифровой обработки сигнала детектора, что позволяет увеличить динамический диапазон по интенсивности регистрируемого излучения. Так как система регистрации сохраняет время регистрации каждого отдельного гамма-кванта, то анализ спектра можно проводить по произвольному интересующему интервалу времени.

Диагностика позволяет проводить оценку электронной температуры в горячей области плазменного шнура ($\rho < 0,85$) с пространственным разрешением не хуже 2 см. Минимальная измеряемая величина электронной температуры составляет ~ 300 эВ, максимальная величина определяется типом применяемого детектора. При использовании кремнедрейфового детектора (SDD — Silicon Drift Detector) максимальная измеряемая температура не превышает 2—3 кэВ, для больших значений необходимо использовать детекторы на основе теллурида кадмия или германия. При использовании современных детекторов время, необходимое на набор спектра, достаточного для определения электронной температуры с точностью ≈ 100 —150 эВ, может составлять ~ 5 —10 мс. Технически диагностика допускает работу в режиме длинного импульса при реализации сбора данных с потоковой скоростью около 30 ГБ/с без обработки сигнала детекторов в режиме псевдореального времени. При обработке сигнала детекторов в режиме псевдореального времени с помощью графических ускорителей длительность регистрируемого сигнала практически не ограничена.

Измерение абсолютной величины температуры позволяет проводить калибровку по абсолютной величине других диагностик, измеряющих температуру. Измерение спектра рентгеновского излучения также позволяет получать информацию о качественном составе тяжёлых примесей, присутствующих в плазме. Дополнительно форма спектра даёт информацию об отклонении функции распределения электронов по скоростям от максвелловского. Таким образом, диагностика позволяет измерять один из основных макропараметров плазмы, что делает диагностику востребованной практически для всех физических программ. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.5.3.

Таблица 6.5.3. Типичные параметры диагностики спектрометр мягкого рентгеновского излучения

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
T_e	$\rho < 0,85$	> 300 эВ	~ 10 мс	< 2 см	Нет сведений

Принципиальной особенностью диагностики является взаимосвязь пространственного и временного разрешения. Улучшение пространственного разрешения при уменьшении телесного угла, под которым детектор виден из плазмы, т.е. за счёт увеличения расстояния между детектором и плазмой, приводит к увеличению времени на набор достаточной спектральной плотности излучения, что ухудшает временное разрешение. При использовании фиксированных радиусов наблюдения для измерения профиля температуры с шагом 2 см в диапазоне ρ от 0 до 0,67 (для круглой плазмы ожидаемая температура на $\rho = 0,67 \sim 300$ эВ) требуется 4—5 плазменных разрядов, при диапазоне измерений ρ от 0 до 1 (вытянутая плазма) потребуется 7—8 плазменных разрядов при проведении измерений пятью детекторами в каждом разряде. Ещё одной особенностью диагностики является необходимость измерять спектр излучения в диапазоне энергии

больше, чем $2T_e$, когда величина интенсивности излучения определяется экспоненциальным множителем ($I \sim \exp(-E/kT_e)$). В этом случае интеграл интенсивности вдоль хорды определяется наиболее горячей областью наблюдения, что делает возможным определять температуру этой области, используя зависимость интенсивности излучения от энергии кванта.

Вследствие возможного повреждения детекторов потоками нейтронов диагностика не может быть использована на установках с параметрами, близкими к реакторным. Однако алгоритмы цифровой обработки сигнала могут быть применены при создании диагностик энергетического спектра быстрых нейтронов и нейтронного излучения на установках с параметрами, близкими к реакторным, таких как ТИН и ДЕМО.

С целью обеспечения измерений в плазменном разряде, в котором интенсивность излучения изменяется в большом диапазоне, представляет интерес возможность модернизации устройства смены коллиматоров и фильтров, а именно уменьшение времени на смену коллиматоров и фильтров и их замена во время плазменного разряда. Помимо этого, предлагаемые улучшение и модернизация диагностики направлены на улучшение временного разрешения измерений электронной температуры. Подробную информацию о мониторе мягкого рентгеновского излучения можно найти в [57—59].

Рентгеновский кристаллический монохроматор РМ-2 с изогнутым коллиматором Соллера является пассивной диагностикой, измеряющей пространственное распределение спектрально-разрешённого мягкого рентгеновского излучения плазмы.

Прибор представляет собой рентгеновскую камеру-обскуру с регистрацией одномерным координатным детектором. Для выделения рентгеновского излучения в спектральной полосе с $\delta\lambda/\lambda \approx 1/30$ используется отражение от плоского кристалла по закону Брегга—Вульфа $n\lambda = 2d \cdot \sin\Theta$, где λ — длина волны отражённого излучения, n — порядок дифракции и $2d$ — постоянная кристаллической решётки. Угол падения на кристалл Θ задаётся коллиматором Соллера и перестраивается механически от импульса к импульсу. Для обеспечения постоянства угла падения для наблюдения по всем хордам коллиматор Соллера имеет коническую форму, кривизна которой меняется в соответствии с изменением угла падения.

В качестве кристалла используется пирографит ($2d = 6,71 \text{ \AA}$). Диапазон изменения углов скольжения может изменяться от 0 до 45° , что позволяет регистрировать излучение в энергетическом диапазоне примерно от 2 до 20 кэВ. Спектральное разрешение определяется разрешающей способностью кристалла — пирографита, угловое разрешение которого составляет $\Delta\Theta \approx 1^\circ$. Конструкция прибора позволяет применять для выделения требуемого излучения другие кристаллы и, таким образом, изменять диапазон регистрируемого излучения и спектральное разрешение. Полоидальный угол обзора прибора определяется апертурной диафрагмой. Изгиб коллиматора позволяет увеличить этот угол α до 20° . Для уменьшения поглощения рентгеновского излучения в объёме прибора последний заполняется гелием либо откачивается. Для обеспечения измерений во всём объёме плазменного шнура на установке планируется размещение нескольких приборов с разными ракурсами наблюдения. Это также даст возможность применения томографических методик восстановления пространственного распределения рентгеновского излучения. Прибор может работать в режиме реального времени и в длительном импульсе с временным разрешением порядка 100 мкс.

На Т-15МД прибор может применяться для изучения диффузии инжестрированных примесей, а также для диагностики концентрации собственных примесей (Ti, Fe, Ni, Cr) в стационарных режимах установки. Особый интерес (в том числе для будущих токамаков-реакторов) представляет исследование диффузии примесей в режимах с транспортными барьерами и при мощном дополнительном нагреве плазмы. Прибор может также применяться для исследования динамики изменения рентгеновского излучения при развитии крупномасштабных неустойчивостей плазмы. Типичные параметры диагностики представлены в табл. 6.5.4.

Таблица 6.5.4. Типичные параметры рентгеновского кристаллического монохроматора

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное, мс	Пространственное, см	
I_{SWR}	$\rho < 0,85$	Нет сведений	$\sim 0,1$	~ 2	5%
λ	$\rho < 0,85$	0,5—6 \AA	$\sim 0,1$	~ 2	1/30

Основным ограничением для диагностики является невозможность работы в холодной плазме (<0,3 кэВ), в том числе на краю плазменного шнура. Кроме того, диагностика не может использоваться в разрядах с высокими потоками нейтронов из плазмы.

Основным направлением для модернизации прибора является подбор альтернативных кристаллов-анализаторов, позволяющих оптимизировать спектральное и временное разрешение диагностики, а также оптимизация формы изгиба коллиматора для точного приближения к конусной поверхности. Подробную информацию о рентгеновском кристаллическом монохроматоре РМ-2 можно найти в [60].

Спектрометр жёсткого рентгеновского излучения — это диагностика, предназначенная для измерения энергетического распределения жёсткого рентгеновского излучения в диапазоне энергий свыше 300 кэВ.

В основе диагностики лежит принцип генерации оптического излучения (сцинтилляций) при прохождении его через среды с определёнными характеристиками (сцинтиллятора). Регистрируемым параметром является интенсивность сцинтилляционного излучения. Интенсивность оптического излучения при поглощении единичного рентгеновского или гамма-кванта линейно пропорциональна энергии этого кванта в широком диапазоне энергий. Таким образом, измерение спектра рентгеновского излучения заключается в анализе и сортировке амплитуд последовательных вспышек сцинтилляционного излучения.

В состав диагностики входят девять детекторов жёсткого рентгеновского излучения. Каждый детектор представляет собой сборку из сцинтилляционного кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) и предварительного усилителя сигнала, размещённых в едином корпусе. Используются кристаллы двух разных типоразмеров — 38×38 мм и 75×75 мм, предназначенных для работы при различных значениях интенсивности потока и энергии квантов жёсткого рентгеновского излучения. Все детекторы оснащены коллиматорами специальной конструкции: четыре детектора размещены в двух спаренных закрытых коллиматорах (диаметр смотрового отверстия 10 мм), расположенных в экваториальной плоскости Т-15МД на расстоянии 5 м от вакуумной камеры с тангенциальной линией обзора и возможностью угловой регулировки в вертикальной и горизонтальной плоскостях; четыре детектора оснащены трубчатым коллиматором, расположенным в экваториальной плоскости с нормальной линией наблюдения; один детектор размещён в полностью экранированном боксе и используется как эталонный. Диагностика может работать при любой длительности импульса. Для работы в режиме (квази)реального времени требуется разработка алгоритмов быстрой обработки спектров с применением многопоточных вычислений.

Спектрометр жёсткого рентгеновского излучения используется для определения энергетического распределения рентгеновского излучения в диапазоне свыше 300 кэВ и его эволюции при взаимодействии ускоренных электронов с плазмой и элементами первой стенки, эволюции скорости термоядерных реакций. Диагностика позволяет определять локализацию области возникновения пучков ускоренных электронов и их эволюцию на протяжении разрядного импульса. Данная диагностика будет использоваться как основная для исследования пространственно-временной эволюции ускоренных электронов в физических программах по исследованию срывов и стабилизации МГД-возмущений, а также в физических программах с риском развития пучков ускоренных электронов высоких энергий. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.5.5.

Таблица 6.5.5. Типичные параметры диагностики монитор жёсткого рентгеновского излучения

Параметр	Область	Скорость счёта	Разрешение		Точность
			Диапазон	Пространственное	
$I_{\text{НХР}}$	Спектрометр	$< 5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$	0,3—10 МэВ	10 мм — тангенциальное, 200 мм — нормальное	3%

С учётом того, что Т-15МД обладает воздушным индуктором, во время импульсов ожидаются высокие значения рассеянных магнитных полей (до 0,1 Тл) на расстоянии до 5 м от установки, поэтому компоненты диагностики требуют магнитной экранировки. Данная проблема может быть также решена использованием ФЭУ на основе кремния.

В дальнейшем планируется оснащение диагностики ФЭУ, не подверженным действию магнитных полей и полей излучения, а также использование сцинтилляторов с лучшим световыходом и временем

высвечивания, что позволит улучшить временное разрешение монитора. Подробную информацию о спектрометре жёсткого рентгеновского излучения можно найти в [54—56].

6.5.3. Томографическая диагностика мягкого рентгеновского излучения

Томографическая диагностика мягкого рентгеновского излучения — пассивная многоканальная диагностика, предназначенная для измерения двумерного пространственного распределения интенсивности потоков мягкого рентгеновского излучения в диапазоне энергии от 1,5 до 15 кэВ.

Диагностика построена на базе многопроволочных газовых детекторов. Рентгеновский квант, поглощаемый детектором, создаёт свободный заряд, пропорциональный энергии поглощённого кванта. Регистрируемым параметром является интенсивность рентгеновского излучения. Зная калибровочную зависимость детектора и геометрию его расположения на токамаке, можно определить интенсивность мягкого рентгеновского излучения в относительных единицах. Восстановление локальных интенсивностей рентгеновского излучения производится по данным хордовых измерений с помощью методов томографического анализа. На первом этапе предполагается использование для этих целей метода Кормака с фильтрацией.

Лежащий в основе диагностики многопроволочный газовый детектор обладает 64 каналами измерений с размером чувствительной зоны каждого канала $35 \times 2 \text{ мм}^2$. Операционные усилители с подключением инвертирующего сигнала предназначены для преобразования тока детектора в напряжение, уменьшения наводок, увеличения выходной мощности для передачи сигнала через длинные кабельные линии. Общее количество каналов составляет 384 (шесть детекторов, расположенных в пяти патрубках). Расположение детекторов обеспечивает многоракурсный обзор плазмы, охватывающий область круглой плазмы, а также большую часть D-образной плазмы. Детекторы смонтированы в камерах-обскурах с гелиевым наполнением, расположенных на фланцах с бериллиевыми окнами (толщина фольги $\sim 100 \text{ мкм}$).

С помощью томографической диагностики мягкого рентгеновского излучения возможно определять положение и форму центральной области плазменного шнура, а также исследовать динамические транспортные процессы и магнитогидродинамические неустойчивости. Диагностика позволяет следить за формированием транспортных барьеров и изучать быстрые процессы в плазме, например, пилообразные колебания и срывы плазмы. За счёт большого количества каналов измерения диагностика предоставляет достоверную информацию при смещении и изменении геометрии плазменного шнура. Также при использовании метода калибровочных фольг или при оборудовании многослойных газовых детекторов возможно измерение с помощью диагностики профилей электронной температуры. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.5.6.

Таблица 6.5.6. Типичные параметры томографической диагностики мягкого рентгеновского излучения

Параметр	Диапазон величины	Разрешение		Точность
		Временное	Пространственное	
I_{XWD}	1,5—15 кэВ	10 мкс	2—3 см	3%

Диагностика неработоспособна при температуре плазмы менее 200 эВ. Поскольку детекторы находятся в непосредственной близости к вакуумной камере и катушкам тороидального поля и управления, то возможно влияние рассеянных магнитных полей на качество сигнала. Расположенные непосредственно на установке компоненты диагностики требуют экранировки от магнитных полей. Диагностика совместима с работой в режиме длинного импульса, однако требует для построения двумерного распределения измеряемого параметра существенных вычислительных ресурсов, что может приводить к увеличению времени между измерением и доступностью обработанных данных для СУП.

Модернизация может включать в себя установку других видов детекторов с более высоким быстродействием, уменьшенным уровнем шума, устойчивых к действию интенсивных нейтронных полей. Также можно изменять пространственное разрешение каналов путём установки щелей или камер-обскура. Возможна установка дополнительных детекторов для увеличения пространственного разрешения диагностики и увеличения точности измерений. Подробную информацию о томографической диагностике мягкого рентгеновского излучения можно найти в [61, 62].

6.5.4. Диагностика быстропеременных возмущений мягкого рентгеновского излучения

Диагностика предназначена для многоракурсного анализа быстропеременных возмущений интенсивности мягкого рентгеновского излучения (2—20 кэВ) в диапазоне частот до 5 МГц. В основе диагностики лежит регистрация коллимированного мягкого рентгеновского излучения из плазмы токамака набором кремниевых поверхностно-барьерных детекторов, характеризующихся повышенным временным разрешением (до 10^{-9} с).

Излучение плазмы, проходя через входные окна камер (Ве-фольги толщиной 200 мкм), установленных внутри патрубков Т-15МД, регистрируется поверхностно-барьерными детекторами. Сигнал детекторов через систему предусилителей подаётся на модули регистрации электрических сигналов, пропорциональных интенсивности излучения. Детекторы располагаются в четырёх камерах с коллиматорами Соллера на вертикальном и горизонтальном диагностических патрубках в сечении № 8 токамака, обеспечивающих наблюдение вдоль пяти пространственных хорд. Диагностика рассчитана на регистрацию излучения в энергетическом диапазоне от 2,5 до 20 кэВ с пространственным разрешением 2 см по малому радиусу и 7 см в тороидальном направлении. Временное разрешение диагностики составляет 0,2 мкс. Регистрация и предварительная обработка данных осуществляются аппаратными средствами диагностики, включая быстрые частотные преобразователи. Область наблюдения диагностики ограничена центральной зоной плазменного шнура ($\rho < 0,85$). Работа в режиме реального времени ограничена скоростью обработки и передачи данных.

Диагностика позволит исследовать пространственное и временное распределение локальных быстропеременных возмущений мягкого рентгеновского излучения. Такие измерения позволят исследовать разнообразие физические явления, такие как перезамыкание магнитных силовых линий, стохастические транспортные процессы, а также возмущения в диапазоне ТАЕ-мод, являющиеся важными для исследования кинетических неустойчивостей в плазме с горячими ионами. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.5.7.

Т а б л и ц а 6.5.7. Типичные параметры диагностики быстропеременных возмущений мягкого рентгеновского излучения

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
I_{SXR}	$\rho < 0,85$	$2 \cdot 10^{11} \text{—} 3 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1}$	0,2 мкс	$\Delta_r \sim 5 \text{ см}$ $\Delta_{\parallel} \sim 7 \text{ см}$	30%

При необходимости возможна модернизация диагностики с расширением рабочей полосы частот до 10 МГц. Подробную информацию о диагностике быстропеременных возмущений мягкого рентгеновского излучения можно найти в [63—64].

6.5.5. Томографическая диагностика надтеплого рентгеновского излучения

Томографическая диагностика надтеплого рентгеновского излучения — это пассивная многоканальная диагностика, предназначенная для измерения интенсивности рентгеновского излучения в диапазоне энергии от 2 до 300 кэВ.

Диагностика построена на базе полупроводниковых детекторов из CdTe (теллурида кадмия). Каждый рентгеновский квант поглощается детектором, создающим свободный заряд, пропорциональный энергии поглощённого кванта. Регистрируемым параметром является интенсивность излучения. Зная калибровочную зависимость детектора и геометрию его расположения на токамаке, можно определить интенсивность надтеплого рентгеновского излучения в абсолютных единицах. Восстановление пространственного распределения (локальной интенсивности) рентгеновского излучения производится по данным хордовых измерений интенсивностей с помощью метода Кормака.

Основным компонентом диагностики является массив полупроводниковых детекторов, произведённых компанией Eurogad, с размером чувствительной зоны $5 \times 5 \times 3 \text{ мм}^3$ и $1 \times 1 \times 1 \text{ мм}^3$. Для преобразования фототока детектора в напряжение для уменьшения наводок и увеличения мощности выходного сигнала

используются операционные усилители с подключением инвертирующего сигнала. Они также позволяют осуществлять передачу сигналов через согласованные кабельные линии. Полная конфигурация диагностики включает 41 канал наблюдения в трёх патрубках одного полоидального сечения токамака. Первый массив детекторов располагается в верхнем патрубке токамака, второй массив детекторов — в экваториальном патрубке и третий — под углом 55° к экватору. Расположение детекторов оптимизировано для максимального обзора плазмы с круглым и D-образным сечением, что позволит проводить измерения как в центральной области, так и на краю плазменного шнура. Детекторы расположены на фланцах с бериллиевыми окнами (толщина фольги ~ 100 мкм) вплотную к ним для уменьшения влияния поглощения в воздушном зазоре. Диагностика допускает работу в режиме длинных импульсов с регистрацией интенсивности излучения в режиме реального времени.

Томографическая диагностика надтеплового рентгеновского излучения используется для определения локальных интенсивностей при взаимодействии ускоренных электронов с плазмой. С помощью диагностики можно идентифицировать момент возникновения пучков ускоренных электронов в центральной зоне плазменного шнура на начальной стадии срыва. Диагностика позволяет также наблюдать за пространственной неоднородностью пучков ускоренных электронов. При этом можно изучать быстрые процессы в плазме, например, пилообразные колебания, и определять параметры плазмы с временным разрешением, соответствующим этим быстрым изменениям. За счёт большого количества каналов измерения диагностика предоставляет достоверную информацию при любом смещении и геометрии плазменного шнура. Диагностика допускает измерение профилей температуры и плотности электронов с помощью метода калибровочных фольг. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.5.8.

Таблица 6.5.8. Типичные параметры томографической диагностики надтеплового рентгеновского излучения

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
$I_{\text{томо}}$	$\rho < 1$	$< 10^{15}$ эВ/с	1 мкс	< 15 см	10%

Поскольку детекторы находятся в непосредственной близости к вакуумной камере и катушкам тороидального поля и управления, то возможно влияние рассеянных магнитных полей на качество сигнала. Для уменьшения нежелательных эффектов должны быть использованы методы экранировки от воздействия магнитных полей. Построение пространственного распределения интенсивности надтеплового рентгеновского излучения требует большого объёма вычислений, что накладывает ограничения на временное разрешение диагностики при работе в режиме реального времени.

Модернизация диагностики может включать в себя установку других видов детекторов с более высоким быстродействием, меньшим уровнем темновых токов (уменьшенным уровнем шума), устойчивых к воздействию интенсивных потоков нейтронов. Также будет возможно изменять пространственное разрешение каналов путём установки щелей или камер-обкура. Возможна работа с большим количеством каналов, а следовательно, с более высокой точностью. Модернизация электроники позволит изменять время интегрирования каналов и временное разрешение. Подробную информацию о томографической диагностике надтеплового рентгеновского излучения можно найти в [65—66].

6.5.6. Нейтронные диагностики

Монитор нейтронного излучения — это пассивная диагностика, предназначенная для измерения интенсивности нейтронного излучения в диапазоне энергии от 0,1 эВ до 2,5 МэВ. При работе в режиме с дейтерием диагностика также может предоставлять информацию об ионной температуре.

Нейтроны являются элементарными частицами, не обладающими электрическим зарядом и слабо взаимодействующими с веществом. Нейтронное излучение относится к категории ионизирующего, причём ионизация производится не при прямом воздействии нейтронов, а за счёт вторичных эффектов. При движении внутри вещества нейтрон взаимодействует с его ядрами, при этом испытывая упругие и неупругие столкновения (последние могут приводить к возбуждению ядерных уровней), также с некоторой вероятностью, определяемой сечением реакции, нейтроны могут быть захвачены ядрами вещества и образовать

составное ядро. Вероятность нейтронного захвата увеличивается с уменьшением энергии нейтронов. Электрический сигнал, позволяющий зарегистрировать взаимодействие нейтронов с веществом, может возникнуть либо при распаде составного ядра, когда происходит ионизация окружающего вещества осколками деления, либо при прямом ударе нейтрона с высокой энергией в ядро вещества, при этом так называемое ядро отдачи производит ионизацию окружающего вещества. В последнем случае по амплитуде электрического сигнала возможно восстановление спектра нейтронов. Таким образом, для регистрации интенсивности нейтронного излучения наиболее оптимальным является метод ядерных реакций, для увеличения эффективности которого для регистрации нейтронов высоких энергий должны применяться замедлители.

В состав диагностики входят девять детекторов нейтронного излучения. Каждый детектор представляет собой сборку из специального газоразрядного счётчика с внутренним покрытием, обладающим высоким сечением поглощения нейтронов (^{10}B), интегрированного источника высокого напряжения и усилителя сигнала. Для обеспечения измерений в широком диапазоне потоков нейтронов используются детекторы с различной чувствительностью (СНМ-11, СНМ-17). Для обеспечения максимальной эффективности регистрации детекторы помещаются в замедлители. Толщина замедлителей составляет $\sim 6\text{—}7$ см, что соответствует длине замедления нейтронов с энергией 2,5 МэВ до тепловых энергий. Детекторы размещаются в четырёх различных сечениях T-15МД равномерно по тороидальному обходу. Диагностика может работать при любой длительности импульса, а также в режиме реального времени.

Монитор нейтронного излучения может предоставлять дополнительную информацию при проведении физических программ, связанных со срывами и стабилизацией МГД-возмущений в части контроля ускоренных электронов. При работе с добавкой дейтерия диагностика может предоставлять информацию о температуре ионов. Также диагностика может давать дополнительную информацию для работы в цепях управления, в частности, для базового управления разрядом (Basic control) и защиты установки (Machine protection). Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.5.9.

В дальнейшем планируется оснастить диагностику счётчиками нейтронов с лучшим временным разрешением для уменьшения задержки в цепи обратной связи и исследований быстропротекающих процессов. Подробную информацию о мониторе нейтронного излучения можно найти в [54—56].

Т а б л и ц а 6.5.9. Типичные параметры диагностики монитора жёсткого рентгеновского излучения

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Энергетическое	
I_{neut}	Обзорная	$10^9\text{—}10^{13}$ нейтр./с	1 мс	0,1 эВ—2,5 МэВ	Нет сведений

Томографическая диагностика нейтронного излучения — это пассивная многоканальная диагностика, предназначенная для измерения интенсивности нейтронного излучения в диапазоне энергии от 0,1 эВ до 2,5 МэВ. В режимах работы с присутствием в рабочем газе диагностика может также предоставлять данные о распределении ионной температуры.

Диагностика основана на анализе электрического сигнала, возникающего при взаимодействии нейтронов с веществом (при распаде составного ядра и ионизации окружающего вещества осколками деления либо ядром отдачи, получившим энергию от столкновения с нейтроном). В случае ионизации вещества ядром отдачи по амплитуде возникающего электрического сигнала возможно восстановление спектра нейтронов. Для увеличения эффективности диагностики в области высоких энергий нейтронов должны применяться замедлители. При этом по данным хордовых измерений можно восстановить пространственно-временную картину профиля нейтронного источника, профиля плотности термоядерной мощности, профиля ионной температуры.

В состав диагностики входят девять детекторов нейтронного излучения. Детекторы устанавливаются в одном сечении тора на экваториальном фланце. Каждый из детекторов имеет свою систему коллимации, изготовленную из свинца и полиэтилена. Массив детекторов установлен в пяти метрах от установки, чтобы снизить до минимума влияние фонового нейтронного излучения. Детекторы представляют собой сборку специального газоразрядного счётчика с внутренним покрытием, обладающим высоким сечением поглощения нейтронов (^{10}B), например, стандартные счётчики нейтронов СНМ-11 и СНМ-17, интегрированного источника высокого напряжения, представляющего собой DC-DC-преобразователь, усилителя

сигнала. Для обеспечения измерений в широком диапазоне величины нейтронного потока используются детекторы с различной чувствительностью (СНМ-11, СНМ-17). При этом счётчик закрыт слоем замедлителя толщиной примерно 6—7 мм, что соответствует длине замедления нейтронов с энергией 2,5 МэВ до тепловых энергий. Основная область наблюдения диагностики — центральные части плазменного шнура. Диагностика может работать при любой длительности импульса. Работа в режиме реального времени может иметь значительную задержку (latency) с учётом необходимости построения пространственно-временной картины.

Томографическая диагностика нейтронного излучения позволяет получать зависимости полного нейтронного выхода, полной термоядерной мощности плазмы. Также из полученных данных можно построить профили нейтронного источника, термоядерной мощности и ионной температуры. Дополнительно диагностика позволяет получать информацию об эволюции ускоренных электронов по интенсивности фотонейтронного излучения. Диагностика может предоставлять дополнительную информацию системе обратных связей для базового управления разрядом (Basic control) и защиты установки (Machine protection). Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.5.10.

Таблица 6.5.10. Типичные параметры томографической диагностики нейтронного излучения

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение			Точность
			Временное	Энергетическое	Пространственное	
I_{neut}	$\rho < 0,85$	$10^7—10^9$ нейтр./с	1 мс	0,1 эВ—2,5 МэВ	<15 см	10%

Рассматриваемая диагностика позволяет получать результаты только при наличии нейтронного излучения из плазмы. Такое излучение можно ожидать в режимах, благоприятных для развития пучков ускоренных электронов (низкая плотность, грязная камера, срывы тока плазмы), либо при работе с добавкой дейтерия в рабочий газ. Дополнительные сложности связаны с размером зала установки, не позволяющим разместить чувствительные элементы диагностики вдали от установки.

Модернизация диагностики может быть направлена на увеличение количества каналов сбора информации, что позволит увеличить пространственное разрешение и повысит точность определения локальных значений потока нейтронного излучения из плазмы. Также рассматривается возможность использования детекторов на основе алмазных или жидкого органических сцинтилляторов NE213 и стильбеновых детекторов. Возможным путём модернизации является также замена счётчиков нейтронов для улучшения временного разрешения диагностики. Подробную информацию о мониторе нейтронного излучения можно найти в [54—56, 67].

Спектрометр нейтронного излучения — это диагностика, предназначенная для измерения энергетического распределения нейтронного излучения при энергии свыше 100 кэВ.

В основе диагностики лежит принцип генерации оптического излучения (сцинтилляций) при прохождении его через среды с определёнными характеристиками (сцинтиллятора). Регистрируемым параметром является интенсивность сцинтилляционного излучения. Интенсивность оптического излучения при поглощении единичного нейтрона линейно пропорциональна энергии в широком диапазоне энергии. Таким образом, измерение спектра нейтронного излучения заключается в анализе и сортировке амплитуд последовательных вспышек сцинтилляционного излучения.

В состав диагностики входят четыре спектрометра нейтронного излучения. Спектрометры построены на основе сцинтилляционного кристалла стильбена, фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) и предварительного усилителя сигнала, размещённых в едином корпусе. Используются кристаллы типоразмера 38×38 мм, предназначенные для работы при различных значениях интенсивности нейтронного потока и энергии нейтронов. Все детекторы располагаются в экранированном боксе из полиэтилена толщиной до 20 см с коллимационным отверстием 2 мм. Диагностика может работать при любой длительности импульса. Для работы в режиме (квази)реального времени требуется разработка алгоритмов быстрой обработки спектров с применением многопоточных вычислений.

Спектрометр нейтронного излучения используется для определения энергетического распределения нейтронного излучения при энергии свыше 100 кэВ. Диагностика позволяет определять скорость термоядерных реакций и оценивать энергии ускоренных электронов. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.5.11.

Таблица 6.5.11. Типичные параметры диагностики спектрометр нейтронного излучения

Параметр	Область	Скорость счёта	Разрешение		Точность
			Диапазон	Пространственное	
I_{neut}	$\rho < 1$	$< 5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$	До 15 МэВ	10 мм — тангенциальное	Не определена

Диагностика несёт полезный сигнал только при наличии нейтронов в плазме. С учётом того, что Т-15МД обладает воздушным индуктором, во время импульсов ожидаются высокие значения рассеянных магнитных полей (до 0,1 Тл) на расстоянии до 5 м от установки. Это требует оснащения компонентов диагностики магнитной экранировкой. ФЭУ покрывается дополнительной экранировкой от магнитных полей. Данная проблема может быть также решена использованием ФЭУ на основе кремния.

В дальнейшем планируется оснащение диагностики ФЭУ, не подверженным действию магнитных полей и полей ионизирующих излучений. Возможно использование детекторов на основе неорганических сцинтилляционных материалов, а также на основе органических либо алмазных. Это позволит улучшить временное разрешение монитора. Планируется разработка программного обеспечения для анализа спектров в режиме (квази)реального времени. Подробную информацию о спектрометре нейтронного излучения можно найти в [54—56].

6.6. КОРПУСКУЛЯРНЫЕ ДИАГНОСТИКИ

6.6.1. Диагностика нейтральных атомов перезарядки

Диагностика анализа нейтральных атомов перезарядки (АНАП) — это пассивная диагностика, предназначенная для определения ионной температуры и массы ионов T_i .

В основе диагностики лежит измерение распределения по энергиям и массам потока частиц перезарядки, возникающих при взаимодействии ионов плазмы с нейтральными атомами. Измеряемые величины однозначно связаны с распределениями по энергиям и массам ионов плазмы.

АНАП построен по традиционной схеме. Нейтральные частицы, вылетающие из установки, при столкновении с поверхностью мишени или при прохождении через сверхтонкую углеродную фольгу ионизируются. Образовавшиеся ионы анализируются по массам и энергиям путём разделения в электрическом и магнитном полях. Основная область измерения диагностики — центральная хорда в экваториальной плоскости плазменного шнура. Диагностика может работать в плазменном разряде большой длительности. Возможно сканирование линии наблюдения прибора вдоль радиуса установки.

Поскольку основным измеряемым параметром является температура ионов плазмы, получаемые данные могут использоваться во всех основных режимах работы установки для верификации данных измерений ионной температуры другими диагностиками. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.6.1.

Таблица 6.6.1. Типичные параметры диагностики нейтральных атомов перезарядки

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
T_i	$\rho < 1$	0,1—10 кэВ	50 мс	5 см	10%
m_i		1—10 а.е.м.	То же	То же	1%

Основные ограничения связаны с возможностью интеграции элементов диагностики в зале установки Т-15МД и влиянием магнитных полей установки на работу анализатора. При работе в режиме с низкой плотностью возможно ухудшение временного разрешения и/или точности измерений из-за уменьшения интенсивности потока частиц перезарядки.

При разработке диагностики будет использоваться опыт создания аналогичной диагностики для токамака ИТЭР. Основным направлением модернизации диагностики представляется организация системы сканирования линии наблюдения во время разряда. Альтернативным вариантом может быть создание многохордовой и/или многокурсовой диагностики для томографических измерений. Возможна также разработка активного варианта диагностики с использованием диагностического или нагревного пучка

нейтральных атомов. Подробную информацию о диагностике анализа нейтральных атомов перезарядки можно найти в [68—69].

6.6.2. Диагностический комплекс зондирования плазмы пучком тяжёлых ионов

Зондирование пучком тяжёлых ионов (ЗПТИ) — инструмент комплексного исследования плазмы. Это уникальная диагностика, позволяющая проводить измерение локальных значений электрического потенциала плазмы ϕ . Кроме этого, ЗПТИ позволяет измерять параметры флуктуаций плотности плазмы \tilde{n}_e и магнитного потенциала (полоидального поля \tilde{B}_{pol}).

Для измерений в плазму инжектируется однократно заряженный зондирующий пучок Ti^+ с энергией E_0 , ионы которого движутся по ларморовской окружности под действием магнитного поля установки. По мере движения по плазме ионы пучка сталкиваются с частицами плазмы, происходит вторичная ионизация и образуется веер вторично заряженных ионов Ti^{++} . Часть этого веера попадает в энергетический анализатор, в котором измеряется энергия вторичного зондирующего пучка E_1 . Потенциал плазмы в локализованной области вторичной ионизации, которая является «точкой» измерений, определяется по разнице энергий зондирующего пучка до и после плазмы: $\phi = (E_1 - E_0)/e$, где e — заряд электрона. При применении для измерений позиционно-чувствительного детектора изменение энергии зондирующих ионов вызывает вертикальный (параллельный анализирующему полю) сдвиг положения пучка на детекторе. Флуктуации энергии (вертикального сдвига пучка) дают информацию о колебаниях потенциала $\tilde{\phi}$. Флуктуации полной интенсивности зондирующего пучка на детекторе дают информацию о колебаниях плотности плазмы \tilde{n}_e . Вариации тороидального сдвига пучка позволяют судить о колебаниях полоидального магнитного поля \tilde{B}_{pol} . Пространственное разрешение диагностики определяется размерами области вторичной ионизации и составляет порядка 1—2 см.

Для получения пространственного распределения используется периодическое сканирование угла инжекции пучка, что позволяет измерять эволюцию профилей параметров плазмы с временным разрешением 5—50 мс. Пространственное сканирование позволяет также измерять радиальный профиль плотности $n_e(r)$ на периферии шнура. Измерения всех величин (ϕ , $\tilde{\phi}$, $n_e(r)$, \tilde{n}_e и \tilde{B}_{pol}) осуществляются одновременно, что позволяет проводить исследования корреляций между различными параметрами. Многоканальный (5—7 каналов) энергетический анализатор ЗПТИ позволяет измерять пространственные (полоидальные и радиальные) корреляционные длины возмущений λ , полоидальные модовые числа m и скорости вращения плазменных колебаний ω , а также электростатический турбулентный поток частиц $\Gamma_{E \times B}$. Двойной диагностический комплекс, состоящий из двух идентичных систем ЗПТИ, разнесённых на 1/4 тороидального обхода установки, станет уникальным инструментом исследования зональных течений.

ЗПТИ состоит из инжектора, первичного и вторичного ионопроводов и энергетического анализатора. В инжекторе происходят формирование и ускорение зондирующего пучка с энергией до 500 кэВ. Первичный ионопровод позволяет управлять положением области измерения в плазме. Вторичный ионопровод предназначен для доставки вторичного пучка в энергетический анализатор для проведения измерений. Ускорительное напряжение инжектора и измеряющее напряжение анализатора должны иметь точность порядка $\delta U/U \approx 10^{-4}$ — 10^{-5} , так как энергия зондирующего пучка имеет величину порядка сотен кэВ, а измеряемый потенциал плазмы не превышает нескольких киловольт. Ток вторичного пучка на детекторе имеет значение порядка 1—100 нА. Для надёжной регистрации такие значения тока требуют преобразователей ток—напряжение с коэффициентом преобразования на уровне 10^6 — 10^7 В/А. Для эффективного исследования турбулентности полоса пропускания должна составлять не менее 1 МГц.

При фиксированной энергии пучка E_0 доступная область наблюдения ЗПТИ зависит от магнитного поля в разряде. В режиме работы с магнитным полем $B_T = 1,0$ — $1,5$ Тл ЗПТИ позволяет проводить измерения от центра до периферии плазмы в рамках одного импульса в режиме сканирования с частотой ~ 100 Гц. Доступная для измерений ЗПТИ область покрывает большую часть первой четверти вертикального сечения плазмы, значительную часть четвёртой четверти и небольшую область второй четверти, диапазон полоидальных углов от -40° до $+82^\circ$ (для радиуса $\rho = 0,7$). Энергия зондирующего пучка E_0 при этом находится в диапазоне от 100 до 380 кэВ. При тороидальном поле более 1,5 Тл и энергии пучка менее 500 кэВ

возможность проводить измерения в центре шнура теряется, однако сохраняется возможность измерений в градиентной зоне и на внешней части плазменного шнура.

ЗПТИ на токамаке T-15МД будет представлен двойным диагностическим комплексом, состоящим из двух идентичных систем, сдвинутых друг относительно друга на $\sim 90^\circ$ в тороидальном направлении. Такая компоновка позволит проводить измерения дальних корреляций ($\sim 2\text{—}3$ м) при исследовании зональных течений (ЗТ). Для увеличения области наблюдения ЗПТИ на токамаке T-15МД имеет двойной вторичный ионопровод. Одна ветвь ионопровода оптимизирована для измерений в режимах с магнитным полем $B_T = 1$ Тл, вторая — для режимов с $B_T = 2$ Тл. Такая компоновка позволяет не только увеличить пространственную область измерений ЗПТИ в различных режимах T-15МД, но и обеспечить измерения среднемасштабных (~ 5 см) корреляций параметров плазмы. Источники питания и эмиттер ЗПТИ работают в непрерывном режиме, что позволяет проводить измерения в длинных импульсах без ограничения на их длительность. Обе концепции — двойной диагностический комплекс и двойной вторичный ионопровод — были успешно опробованы коллективом ЗПТИ НИЦ «Курчатовский институт» на стеллараторе TJ-II (научный центр CIEMAT, Мадрид).

ЗПТИ позволяет измерять профили электрического потенциала, из которого вычисляются радиальное электрическое поле E_r и скорость полоидального вращения плазмы $V_p = [\mathbf{E} \times \mathbf{B}]$. Изучение поведения радиального электрического поля E_r и скорости вращения плазмы V_p в различных режимах работы токамака, в том числе и в режимах улучшенного удержания (H-мода, I-мода), позволит понять физические механизмы удержания энергии и частиц в плазме токамака. Изучение поведения радиального электрического поля может также внести вклад в изучение феномена спонтанного вращения плазмы. Как эффективный инструмент исследования турбулентности ЗПТИ позволяет изучать физику альфвеновских мод, геодезической акустической моды (ГАМ), квазикогерентной моды (ККМ) и другие характеристики и свойства широкополосной турбулентности. Альфвеновские моды приводят к потерям горячих ионов, ГАМ участвует в процессе саморегуляции турбулентности и непосредственно влияет на удержание энергии в плазме, ККМ вносит вклад в турбулентный поток частиц. Область наблюдения покрывает существенную часть сечения плазменного шнура, что делает возможным измерение двумерных распределений величин, измеряемых с помощью ЗПТИ. Совместные измерения с другими диагностиками (зонд Ленгмюра, корреляционный рефлектометр, BES) позволят проводить корреляционные исследования турбулентности не только в тороидальном и полоидальном, но и в радиальном направлении. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.6.2.

Таблица 6.6.2. Типичные параметры диагностики ЗПТИ

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
φ	$\rho < 1$	$-3,0\text{—}+1,5$ кВ	1 мкс	~ 1 см	10—20%
$\tilde{\varphi}$	То же	3—300 В	То же	То же	То же
n_e	То же	$10^{18}\text{—}4 \cdot 10^{19}$ м $^{-3}$	То же	То же	То же
\tilde{n}_e	То же	$< 5\text{—}10\%$	То же	То же	То же
\tilde{B}_{pol}	То же	± 1 отн. ед.	То же	Интегральное	20%

Основными ограничениями области измерения ЗПТИ являются магнитное поле, близкое к максимальному значению 2 Тл, и высокая плотность плазмы. Для сохранения размеров области измерения при максимальных параметрах T-15МД ($B_T = 2$ Тл, $I_p = 2$ МА) энергию пучка необходимо увеличить в 4 раза — вплоть до 1,5 МэВ. Существующие коммерческие источники высокого напряжения открытого типа (без использования элегазового кожуха) позволяют получить напряжение до 500 кВ, вследствие чего область наблюдения ЗПТИ в центральных областях плазмы значительно сокращается, сохраняясь во внешних областях шнура. Высокая плотность плазмы приводит к ослаблению зондирующего пучка и уменьшению тока пучка на детекторе. Расчёты показывают, что при среднечордовой плотности плазмы $\bar{n}_e = 3 \cdot 10^{19}$ м $^{-3}$ отношение тока пучка на детекторе к начальному току зондирующего пучка в центральных областях плазмы может достигать $I_{det}/I_0 = 10^{-8}$. При такой величине затухания измерения с помощью ЗПТИ будут в

значительной степени осложнены. Работа в режиме с обратным направлением тока требует внесения изменений в ориентацию инжектора и анализатора, что может быть сделано только в перерыве между экспериментальными кампаниями. Работа ЗПТИ при обратном направлении тороидального магнитного поля невозможна.

Основным направлением модернизации ЗПТИ является увеличение тока зондирующего пучка. Увеличение этого параметра позволит расширить диапазон плотностей плазмы, доступных для зондирования. Создание преобразователей с более высокими коэффициентами преобразования до 10^8 — 10^9 В/А и более низким уровнем шума также позволит расширить доступный для измерений диапазон плотности плазмы. Расширение полосы пропускания преобразователей выше 1 МГц позволит исследовать турбулентность в более широком частотном диапазоне. Оптимизация фокусировки пучка улучшит пространственное разрешение диагностики до нескольких мм. Модернизация инжектора ЗПТИ для работы с энергиями зондирующего пучка порядка 1 МэВ и выше позволит существенно расширить область измерений в центре плазмы в режимах с максимальным значением магнитного поля. Подробную информацию о диагностике анализа нейтральных атомов перезарядки можно найти в [70—75].

6.7. ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМА—СТЕНКА

6.7.1. Диагностическая станция WASA-Upgrade

Диагностическая станция WASA-Upgrade (Wall Analysis with SIMS and Auger) — диагностическая станция (ДС), предназначенная для исследования плазменно-стеночного взаимодействия (Plasma-Surface Interaction — PSI) и процессов, происходящих в пристеночной области (SOL) в процессе кондиционирования камеры и плазменного разряда.

Диагностика основана на анализе элементарного состава поверхности пробы коллекторных зондов, вводимых в зону экспозиции, что позволяет получать информацию о распылении, переносе и повторном осаждении примесей в SOL, а также о процессах эрозии внутри камеры токамака. Использование коллекторной пробы с диафрагмой обеспечивает измерение потоков частиц с временным разрешением как в тороидальном, так и в полоидальном направлении. Для измерения содержания примесей *in situ* на поверхности пробы используются высокоточные методы ВИМС (вторично-ионной масс-спектрометрии) и оже-спектроскопии.

Диагностический зонд монтируется на транспортной тележке, движущейся в высоковакуумном канале между местом экспозиции в токамаке, транспортным отсеком, камерой анализа и шлюзовой секцией без нарушения вакуумных условий. Коллекторный зонд после подготовки (очистка прогревом и напыление слоя серебра) без нарушения вакуумных условий перемещается с помощью транспортной системы в пристеночную область камеры токамака для экспозиции с заданным временем в процессе процедур очистки и боронизации камеры или проведения плазменного разряда. После завершения экспозиции коллекторный зонд также без нарушения вакуумных условий помещается в камеру анализа для исследования поверхностной концентрации примесей методами ВИМС и оже-спектроскопии. Высокая поверхностная чувствительность оже-спектроскопии позволяет определять состав субмонослоя и получать данные об осаждённых частицах во время разряда токамака с временным разрешением. Главная особенность диагностической станции WASA-Upgrade — возможность оперативного проведения поверхностного анализа пробы и определения потоков примесей между рабочими разрядами или в процессе кондиционирования камеры. Места экспозиции коллекторной пробы — SOL, рядом с X-точкой и диверторной зоной, а также на уровне защитного графитового покрытия первой стенки или за ним (в нижнем горизонтальном патрубке в сечении № 7).

ДС WASA-Upgrade является универсальным средством оперативной доставки различных зондов в пристеночную область плазмы в диверторной зоне токамака T-15МД и необходимым инструментом для исследования плазменно-стеночного взаимодействия и процессов, происходящих в пристеночной области плазмы токамака. ДС WASA-Upgrade даёт возможность контролировать и оптимизировать кондиционирование камеры токамака, изучать влияние PSI на длительность разряда и срок службы материалов, решать

материаловедческие задачи, дополнять данные других спектроскопических диагностик. Точность поворота коллекторного зонда для реализации временного разрешения $0,75^\circ$. Точность позиционирования зонда в камере T-15МД 1 мм. Другие типичные значения параметров диагностики приведены в табл. 6.7.1.

Таблица 6.7.1. Типичные параметры диагностики WASA-Upgrade

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
E_{Auger}	$\rho > 1$	0—2500 эВ	0,1 с	$188,5 \times 20 \text{ мм}^1$	$0,5\% ^2$
m_z	То же	0—300 а.е.м.	То же	То же	1 а.е.м.

¹Рабочая поверхность пробы.
²Энергетическое разрешение.

Оборудование камеры анализа и транспортная система ДС WASA-Upgrade работают в перерывах между работой электромагнитной системы токамака, кроме механизма вращения зонда, который должен работать во время плазменного разряда для получения временной развёртки коллекторной пробы в зоне экспозиции. На время работы электромагнитной системы токамака оборудование ДС WASA-Upgrade, чувствительное к действию электромагнитного излучения, должно быть дистанционно обесточено. Для исключения фоновой адсорбции в камере анализа поддерживается вакуум не хуже $5 \cdot 10^{-7}$ Па.

ДС может быть основой для создания технологической диагностики, контролирующей состояние внутрикамерных элементов перспективных установок в процессе эксплуатации. Для работы диагностики нет ограничения по времени экспозиции. ДС WASA-Upgrade имеет значительный потенциал развития за счёт применения современных анализаторов ВИМС и оже-спектроскопии с картированием, новых методов обработки и представления данных, а также за счёт возможности использования различных видов зондов, устанавливаемых на транспортной тележке. Подробную информацию о ДС WASA-Upgrade можно найти в [76—77].

6.7.2. Зонды Ленгмюра

Многояэлектродные зонды Ленгмюра обеспечивают измерения пространственного распределения средних значений и флуктуаций параметров периферийной и диверторной плазмы, таких как электронная температура T_e , плотность плазмы n_e , потоков Γ_e , потенциала плазмы ϕ_r , локальной величины электрического поля E и скорости вращения плазмы ω (числа Маха M). Диагностика позволяет детально изучать и измерять локальные потоки частиц и турбулентный перенос частиц и энергии, которые являются определяющими для периферийной и диверторной плазмы.

Для определения электронной температуры T_e и плотности n_e используется измерение вольт-амперной характеристики зонда, получаемой при приложении переменного напряжения к электроду в плазме. Для определения электронной плотности n_e регистрируются ионные токи насыщения на электроды. Измерение потенциала зонда позволяет восстановить локальные значения потенциала плазмы ϕ_r и локального значения электрического поля E . Корреляционный анализ флуктуаций электронной плотности позволяет определить скорость вращения плазмы ω . С помощью корреляционного анализа возможно проводить также прямые измерения потоков плазмы Γ_e в области наблюдения диагностики.

Преимущество измерений зондами Ленгмюра — локальность измерений (пространственное разрешение), связанная с малыми размерами зондов. Также преимуществами являются высокое отношение сигнал/шум благодаря высокому уровню сигнала и возможность регистрировать параметры плазмы во всём частотном диапазоне дрейфово-диссипативной турбулентности, ответственной за аномальную диффузию плазмы.

Комплексы зондов Ленгмюра являются базовой диагностикой для программы исследований пристеночной (SOL), периферийной и диверторной плазмы, а также материаловедческих исследований на токамаке T-15МД во всех режимах удержания, включая стадию квазистационарного удержания плазмы. Диагностика позволит вести мониторинг параметров плазмы вблизи поверхности дивертора, в окрестности X-точки и вблизи внутренней стенки вакуумной камеры. Данные измерений будут использоваться для

оценки и моделирования роли различных процессов при взаимодействии плазма—стенка. Кроме того, такие измерения дадут граничные значения параметров плазмы при построении распределений параметров в основной (горячей) части плазменного шнура и при моделировании процессов переноса в различных режимах работы Т-15МД.

Комплекс ленгмюровских зондов диверторов (верхнего и нижнего) предназначен для измерения параметров плазмы на диверторных пластинах. Он включает в себя 84 зонда, монтируемых на четырёх диагностических пластинах диверторов (два верхних и два нижних). Зонды представляют собой графитовые электроды высотой 2 и диаметром 5 мм. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.7.2.

Следует отметить, что в условиях длинного импульса с высокой тепловой нагрузкой данные диагностики могут искажаться из-за влияния на измерения термоэмиссии с поверхности электродов. При нагрузках выше 5 МВт/м² зонды могут быть разрушены.

Таблица 6.7.2. Типичные параметры диагностики Комплекс ленгмюровских зондов диверторов

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
$\bar{T}_e(x)$	Дивертор	0,1—200 эВ	1 мкс	20 мм	10%
$\bar{n}_e(x)$	То же	$2 \cdot 10^{17}$ — $2 \cdot 10^{19}$ м ⁻³	То же	То же	То же
$\bar{\phi}_p(x)$	То же	0,1—100 В	То же	То же	То же

Комплекс быстроперемещаемых зондовых систем (КБЗС) предназначен для измерения параметров периферийной плазмы и включает 11 зондов на специальной подвижной («прыгающей») головке. Быстрые «прыгающие» зондовые системы позволяют измерять распределения параметров плазмы за времена порядка 10—100 мс при больших тепловых нагрузках во время длинного импульса. Область измерения диагностики — нижняя диверторная зона и зоны вблизи экваториальной плоскости токамака. Эти области включают пристеночную зону (SOL) и периферийную плазму за сепаратрисой с возможностью достижения зоны пьедестала при измерениях в Н-режиме. Конструкция комплекса «прыгающих» зондов позволит разместить его как в экваториальной, так и в диверторной областях в сечении № 5 установки.

КБЗС оснащён системой передвижения и позиционирования зондовой головки, которая позволяет вводить зонд в камеру токамака на глубину до 1 м. Возможные углы отклонения от центральной оси составляют $\pm 5^\circ$ в вертикальной и горизонтальной плоскости токамака. Система обеспечивает ввод-вывод зондов из камеры токамака, перемещение внутри камеры на расстояние до 1500 мм, позиционирование с точностью ± 2 мм. Использование двигателей линейного перемещения позволяет осуществлять быстрый ввод и вывод образцов из зоны исследований с высокой плазменной нагрузкой на расстояние 300 мм с максимальной скоростью не менее 3700 мм/с и длительностью цикла от 0,2 с. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.7.3.

Таблица 6.7.3. Типичные параметры диагностики Комплекс быстроперемещаемых зондовых систем

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
$\bar{T}_e(x)$	Дивертор	0,1—200 эВ	1 мкс	20 мкс	10%
$\bar{\phi}_p(x)$	То же	0,1—100 В	То же	То же	То же

В условиях длинного импульса диагностика позволяет проводить измерение параметров плазмы с временным циклом 200—300 мс, временной выборкой (временем измерения параметров плазмы) 10—100 мс.

Использование быстроперемещаемых («прыгающих») зондов Ленгмюра и зондов на диверторных пластинах делает эту диагностику пригодной для использования на проектируемых (ДЕМО, ТИН) токамаках. Для токамака ИТЭР проектируется система зондов Ленгмюра, монтируемых на диверторных пластинах. Подробную информацию о зондах Ленгмюра можно найти в [78—81].

6.7.3. Материаловедческий комплекс

Материаловедческий комплекс создаётся для проведения испытаний кандидатных материалов и конструкций внутрикамерных компонентов для разрабатываемых токамаков-реакторов, в том числе термоядерного источника нейтронов (ТИН). Основными задачами комплекса являются испытания материалов и внутрикамерных компонентов в условиях повышенных импульсных плазменных нагрузок (10 МВт/м^2 и более), в том числе срывов тока плазмы, ELMов и др., испытания охлаждаемых внутрикамерных компонентов с использованием перспективных методов интенсивного охлаждения в обеспечение длительных стационарных разрядов, мониторинг состояния первой стенки и дивертора токамака зондовыми методами, исследование изменений элементного состава и структуры поверхности дивертора и первой стенки без нарушения вакуума токамака.

В состав комплекса входят конструкции и системы, обеспечивающие погружение в плазму испытуемых элементов на манипуляторе с возможностью подключения к ним систем охлаждения, систем измерения параметров плазмы и состояния поверхности. Для исследования влияния мощных импульсных плазменных нагрузок испытания проводятся в областях, близких к сепаратрисе. После облучения образцы подвергаются исследованию методами оптической и электронной микроскопии, рентгеновского анализа, спектроскопии и т.д. Для осуществления мониторинга поверхности пластин дивертора и первой стенки оптическими и зондовыми методами необходимо вводить и устанавливать приборы непосредственно в вакуумную камеру токамака.

Система передвижения и позиционирования тестовых внутрикамерных компонентов и образцов материалов позволяет размещать и проводить ресурсные испытания образцов и макетов массой до 10 кг в пристеночной зоне и в диверторе токамака T-15MD. Образцы массой до 5 кг могут быть введены в область с высокой плотностью плазмы для испытаний в условиях мощных импульсных нагрузок. Система обеспечивает ввод-вывод образцов из камеры токамака, перемещение внутри камеры на расстояние до 1500 мм, позиционирование с точностью ± 2 мм. Использование двигателей линейного перемещения позволит осуществлять быстрый ввод и вывод образцов из зоны исследований с высокой плазменной нагрузкой на расстояние 300 мм с максимальной скоростью не менее 3700 мм/с, что обеспечит контролируемый ввод и торможение при бросковых испытаниях длительностью от 0,1 с.

Материаловедческий комплекс оснащён собственной системой откачки. Система шлюзовой загрузки и установки образцов позволит проводить исследования без нарушения вакуума камеры токамака T-15MD и без демонтажа самого комплекса. Дополнительно с помощью комплекса возможно проводить измерение параметров плазмы зондами. Конструкция комплекса позволит разместить его в экваториальной и диверторной плоскостях, в зонах пристеночной плазмы (SOL), вблизи X-точки сепаратрисы и в диверторном объёме токамака T-15MD. Ввод образцов на глубину до 1,5 м позволит получить образцы переосаждённых плёнок и провести мониторинг поверхности дивертора и внутренней стенки вакуумной камеры. Типичные параметры комплекса приведены в табл. 6.7.4.

Таблице 6.7.4. Параметры материаловедческого комплекса установки T-15MD

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
Положение	$\rho \geq 1$	0—300 мм	0,1 с	2 мм	Нет сведений

Следует отметить, что из-за высокого уровня электромагнитных наводок проведение мониторинга состояния поверхности дивертора и первой стенки методами оптической и зондовой микроскопии возможно только между импульсами токамака.

Материаловедческий комплекс позволит проводить длительные ресурсные испытания разрабатываемых внутрикамерных компонентов в SOL и исследование влияния мощных импульсных нагрузок (10 МВт/м^2 и более) на пластины дивертора, что является актуальной задачей для ТИН и ДЕМО. Конструкция комплекса, в том числе, обеспечит испытания охлаждаемых внутрикамерных компонентов на основе вольфрамовых модулей и жидкометаллических капиллярно-пористых систем, рассматриваемых в качестве основных кандидатов для первой стенки термоядерных установок следующего поколения.

В конструкцию комплекса заложена возможность его дооснащения и модернизации. Предусмотрены установка линии дистанционной смены и передвижения образцов и подключение растрового электронного микроскопа, что позволит проводить исследования параметров поверхности образцов без контакта с

атмосферой. Для мониторинга состояния первой стенки и дивертора предполагается дооснащение системы оптической камерой высокого разрешения, атомно-силовым и туннельным микроскопами. Подробную информацию о зондах Ленгмюра можно найти в [82].

6.8. ОПЕРАЦИОННЫЕ ДИАГНОСТИКИ УСТАНОВКИ

6.8.1. Диагностика вибраций и деформаций компонентов токамака Т-15МД

Вибрации, смещения и деформации компонентов токамака возникают во время рабочих импульсов из-за действующих на них электромагнитных нагрузок.

При протекании тока через тороидальную катушку корпус катушки расширяется в радиальном направлении, а катушка в целом под действием результирующей силы стремится сместиться в радиальном направлении и двигаться к центру установки. Изменения магнитного поля во время заведения и вывода токов из обмоток, плазменного разряда, вертикальной нестабильности вытянутой плазмы и срыва вызывают смещения и вибрацию, влияющие на конструктивные элементы и чувствительные диагностические датчики. Контроль уровня смещений, вибраций, механического напряжения и деформаций конструктивных элементов позволит поддерживать установку в безаварийном состоянии. Знание величин смещений элементов установок во время рабочих импульсов позволит экспериментаторам вносить коррективы в измеряемые величины.

Комплекс средств механического мониторинга конструкций токамака подразумевает использование тензодатчиков и датчиков вибрации, работающих в магнитном поле, поэтому в этой диагностике могут использоваться тензодатчики на основе линейных переменных сопротивлений, аналогичных применявшимся на установках Т10 и TEXTOR, муар-тензометры, волоконно-оптические датчики и акселерометры, а также акустические датчики и машинное зрение.

Количество, тип и места расположения датчиков для контроля вибраций и деформаций элементов тороидальной обмотки и других компонентов токамака Т-15МД в настоящее время уточняются. Диагностика предназначена для контроля вибрации и механических напряжений секций тороидальной обмотки, полоидальных обмоток и индуктора, вакуумной камеры токамака. Тензодатчики волоконно-оптического типа также могут устанавливаться на диверторе. Система регистрации, обработки и визуализации данных датчиков контроля вибраций и смещений элементов тороидальной обмотки и других конструктивных элементов токамака будет синхронизирована с системой управления плазмой и интегрирована с системой сбора и визуализации данных, а также включена в систему оповещений об авариях.

Диагностика позволит контролировать вибрации и смещения элементов тороидальной обмотки и других конструктивных элементов во время рабочих импульсов Т-15МД, выявить недостатки в элементах крепления тороидальных обмоток, которые необходимо устранить для обеспечения проведения экспериментов с проектными параметрами тока разряда и длительности импульса. Дополнительно информация с датчиков должна учитываться при обработке данных диагностик, чувствительных к смещениям/вибрации. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.8.1.

Таблица 6.8.1. Типичные параметры диагностики вибрации и деформаций компонентов токамака

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность
			Временное	Пространственное	
Δ	Нет сведений	0,01—10 мм	До 1 кГц	Нет сведений	Нет сведений

Основными проблемами при создании системы измерения вибрации и смещений компонентов токамака являются наличие в зале установки сильных переменных магнитных полей и необходимость размещения датчиков между изолированными элементами конструкций токамака. Поэтому в диагностике планируется применение нечувствительных к электромагнитным полям датчиков с пробойным напряжением относительно «земли» не менее 1500 В.

При создании диагностики планируется использование опыта, полученного при работе над аналогичной диагностикой на установках Т-10 и TEXTOR, а также на других крупных зарубежных токамаках. Подробную информацию о диагностике вибраций и деформаций компонентов установки можно найти в [83].

6.8.2. Вакуумметрия

Системы вакуумметрии установки Т-15МД обеспечивают контроль остаточного давления в вакуумируемых объёмах установки, участвуют в автоматизированном процессе вакуумной откачки разрядной камеры и противоаварийных защитах.

Для регистрации вакуумного давления в разрядной камере и в модулях системы вакуумной откачки (СВО) используются датчики с различными диапазонами измерений:

- низковакуумные с диапазоном $1,33 \cdot 10^{-2}—10^5$ Па;
- широкодиапазонные с диапазоном $6,65 \cdot 10^{-7}—10^5$ Па.

В качестве низковакуумных датчиков используются датчики Пирани VSP62MV компании Thyracont в количестве девяти штук. Широкодиапазонные датчики представлены устройствами Thyracont VSM72 в количестве 10 штук, где каждое устройство состоит из двух сенсоров: датчика Пирани и датчика давления с холодным катодом с инверсным магнетроном. Задержка измерения (latency time) для датчика VSP62MV составляет менее 200 мс, а для VSM72 — менее 120 мс. Указанные временные отклики датчиков достаточны для решения технологических задач, но слишком велики для быстрых процессов управления газонапуском перед началом плазменного разряда. Для решения последней задачи используется магниторазрядный инверсно-магнетронный датчик с холодным катодом Pfeiffer IKR251 с рабочим диапазоном $2 \cdot 10^{-7}—2$ Па и временем измерения менее 10 мс.

Датчики Thyracont VSP62MV и VSM72 подключаются по аналоговым линиям связи к 16-битным аналого-цифровым преобразователям сигналов 140AVI03000 Schneider Electric, установленным в шкафах распределённого ввода-вывода (ШРВВ) АСУ СВО. Все ШРВВ связаны со шкафом программируемого логического контроллера (ПЛК) с помощью процессоров сети Ethernet RIO 140CRP31200 Schneider Electric. Данные от модулей 140AVI03000 поступают на процессорный модуль Modicon Quantum 140CPU67160, в котором используется программа управления процессом вакуумной откачки. На верхнем уровне SCADA системы данных отображаются и архивируются в программе Wonderware Industrial Application Server (IAS) с частотой не менее 1 с.

Аналоговый сигнал датчика Pfeiffer IKR251 поступает на многофункциональный модуль ввода-вывода NI PXI-6358 с 16-битным скоростным АЦП, далее обрабатывается процессорным модулем NI PXIe-8135 RT шасси NI PXIe-1085 18-Slot 3U PXI Express Chassis, установленного в шкафу автоматики системы газонапуска установки (АСУ ГНСУ). Параметры оборудования, входящего в состав систем вакуумметрии установки Т-15МД, приведены в табл. 6.8.2.

Т а б л и ц а 6.8.2. Характеристики вакуумметрического оборудования

Параметр	Область	Диапазон величины, Па	Временное разрешение, мс	Количество точек измерения, шт.	Точность, %
<i>P</i>	Вакуумная камера	$6,65 \cdot 10^{-7}—10^5$	>120	4	30
	То же	$2 \cdot 10^{-7}—2$	>10	1	30
	Модули откачки	$1,33 \cdot 10^{-2}—10^5$	>200	9	30
	То же	$6,65 \cdot 10^{-7}—10^5$	>120	4	30

Следует отметить, что во время плазменного режима работа установленных на разрядной камере вакуумных датчиков выполняется в сильных рассеянных магнитных полях, поэтому возможны искажение сигнала и выход из строя датчиков, установленных в непосредственной близости от электромагнитных катушек установки Т-15МД. Поэтому в настоящее время предусмотрено удалённое отключение питания данных датчиков, а также запланировано их оснащение магнитными экранами.

Кроме того, ввиду значительного количества присоединяемых к фланцам вакуумной камеры диагностических систем и систем дополнительного нагрева плазмы в целях оперативного контроля вакуума в камере планируется разработка системы мониторинга запорной вакуумной арматуры и общей вакуумметрии установки Т-15МД. Подробную информацию о вакуумметрии установки можно найти в [84, 85].

6.8.3. Масс-спектрометрия

Диагностика масс-спектрометрии установки Т-15МД обеспечивает контроль состава остаточных и рабочих газов в технологических режимах, а также перед началом и после окончания рабочего разряда в плазменном эксперименте.

Масс-спектрометрия установки Т-15МД состоит из двух масс-спектрометрических модулей, один из которых установлен на вакуумной камере, а второй размещён в откачном трубопроводе Ду400 над криосорбционным модулем. Оба модуля гальванически развязаны от металлических конструкций установки через керамический изолятор. Каждый масс-спектрометрический модуль состоит из двух ручных высоковакуумных клапанов Kinglai Group CF2.75", широкодиапазонного датчика вакуумного давления Thyasont VSM72 с диапазоном измерения $5 \cdot 10^{-9}$ —750 Торр и квадрупольного масс-спектрометра Extorr XT200M.

Основные характеристики масс-спектрометра Extorr XT200M:

- диапазон анализируемых масс-анализаторов 1—200 а.е.м.;
- тип фильтра масс-квадрупольный;
- разрешающая способность менее 1 а.е.м. при высоте пика 10%, настраиваемая;
- диапазон рабочих давлений от 10^{-4} Торр до сверхвысокого вакуума;
- программное обеспечение VacuumPlus v34;
- интерфейс подключения RS-232C.

Откачка масс-спектрометрических модулей производится переносным безмасляным высоковакуумным откачным постом Pfeiffer HiCube80 Eco.

Масс-спектрометрические модули включены в автоматизированную систему управления системы вакуумной откачки (АСУ СВО). Датчики Thyasont VSM72 подключаются по аналоговым линиям связи к 16-битным аналого-цифровым преобразователям сигналов 140AVI03000 Schneider Electric, установленным в шкафах распределённого ввода-вывода (ШРВВ) АСУ СВО, а масс-спектрометры подключены к Ethernet-серверам последовательных интерфейсов RS-232/422/485 NPORT IA5150AI MOXA, которые также установлены в данных шкафах. Подача питания на вакуумные датчики и масс-спектрометры осуществляется через реле, управление реле производится через модуль вывода дискретных сигналов 140DDO35300. Измеряемые параметры диагностики приведены в табл. 6.8.3.

Таблица 6.8.3. Характеристики масс-спектрометрического оборудования

Параметр	Область	Диапазон величины	Временное разрешение	Количество точек измерения	Точность
m/z	Вакуумная камера	1—200 а.е.м.	1—200 с	2 шт.	<1 а.е.м.
P	Цилиндр Фарадея	10^{-11} — 10^{-4} Торр	То же	То же	10%
	ВЭУ	10^{-14} — 10^{-6} Торр	То же	То же	10%

Следует отметить, что во время плазменного режима установленный на разрядной камере масс-спектрометрический модуль находится в сильных рассеянных магнитных полях от обмоток токамака, поэтому возможны искажения сигнала и выход оборудования из строя. В связи с этим в настоящее время предусмотрено удалённое отключение питания элементов масс-спектрометрических модулей, а также проектируется оснащение чувствительного оборудования защитными магнитными экранами. В перспективе намечено размещение масс-спектрометрических модулей в системе инъекции нейтралов (СИН). Подробную информацию о вакуумметрии установки можно найти в [86, 87].

6.8.4. Система температурного контроля

Система температурного контроля — многофункциональная система, обеспечивающая контроль и автоматическое управление температурой различных элементов установки Т-15МД.

Контроль температуры вакуумной камеры установки требуется для формирования карты распределения температуры вакуумной камеры (ВК) установки Т-15МД при её технологической подготовке (прогреве для десорбции газов до 220 ± 20 °С) и осуществляется с использованием термоэлектрических

преобразователей (термопар) хромель-копель ХК(L) (0—400 °С). При измерении применяется нормирующий преобразователь, который измеряет значение ЭДС на термопаре типа хромель-копель и преобразует его в значение температуры.

Измерение температуры разрядной камеры осуществляется с помощью 92 термопар, смонтированных на оболочке разрядной камеры. Основные комплекты термопар располагаются в секторах № 1 и 9 разрядной камеры (по 17 шт. в каждом из секторов). Термопары № 8, 12 и 54, 58 устанавливаются вблизи нагревателя. Вспомогательные комплекты термопар располагаются в секторах № 3, 7, 11 и 15 разрядной камеры (по 7 шт. в каждом секторе). В данных секторах электронагреватели с внутренней поверхности внутреннего цилиндра выводятся через вертикальные патрубки Ду 160 на днище оболочки разрядной камеры. В секторах разрядной камеры № 2, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 13, 14, 16 располагается по три термопары для определения неравномерности температуры прогрева ВК.

Показания с термопар обрабатываются в нормирующих преобразователях, установленных в непосредственной близости к датчикам (15—20 м). После обработки с преобразователя выходит нормированный сигнал 4—20 мА. Все аналоговые измерения регистрируются в контроллере Schneider Electric Modicon Quantum 140CPU67160 на модуле 140ACI03000 с 12-битным АЦП. Дискретные сигналы обрабатываются на модулях 140DDI35300. На верхнем уровне SCADA системы данные отображаются и архивируются в программе Wonderware Industrial Application Server (IAS) с частотой не менее 1 с.

Диагностика работает в круглосуточном режиме при подготовке камеры и при проведении экспериментов на установке и обеспечивает контроль температурного режима и механической целостности камеры. Типичные параметры системы приведены в табл. 6.8.4.

Таблица 6.8.4. Параметры системы контроля температуры вакуумной камеры

Параметр	Область	Диапазон величины, °С	Разрешение временное, с	Количество точек измерения, шт.	Точность, °С
T	Вакуумная камера	0—400	1	92	1

Следует отметить, что во время плазменного режима работа данной системы выполняется в сильных рассеянных магнитных полях от электрических обмоток установки Т-15МД, что может вызвать искажение данных. В дальнейшем планируются разработка и монтаж систем термоконтроля нижнего и верхнего диверторов.

Система контроля температуры и протока в контуре водяного охлаждения токамака Т-15МД предназначена для поддержания температуры компонентов установки в допустимых пределах. Данная система включает в себя охлаждение обмоток электромагнитной системы, оборудования системы вакуумной откачки и комплекса диагностик, а также компонентов системы дополнительного нагрева плазмы. Контроль температуры воды на входе и выходе коллекторов охлаждения перечисленных систем осуществляется датчиками Pt100, температура воды на выходных патрубках охлаждения обмоток (PF1-6, TF1-4, CS1-3) токамака Т-15МД дополнительно контролируется теплореле 331—540 (100 ± 5 °С), кроме того во всех указанных системах дополнительно контролируются расход воды и её температура при помощи реле протока жидкости РПЖ-24FT, релейные сигналы которого срабатывают при превышении температуры выше заданного порога или при уменьшении расхода воды ниже установленного уровня.

Для измерения температуры воды на входе и выходе коллекторов охлаждения используется модуль Schneider Electric 140ARI03010 с 13-битным АЦП, который измеряет сопротивление на концах датчика Pt100 (–30—+120 °С) и преобразует его в значение температуры.

В качестве термореле используются нормально замкнутые биметаллические термостаты. Нормально замкнутый термостат при достижении заданной температуры размыкается и при остывании — замыкается. При превышении температуры на обмотках сигнал подаётся на контроллер и формируются аварийные сигналы.

Принцип работы реле протока РПЖ-24FT основан на измерении частоты вращения крыльчатки, находящейся во взаимодействии с протекающей в системе водой. При этом элементы, преобразующие частоту вращения в последовательность импульсов, не имеют контакта с водой, так как кинематическая связь

между крыльчаткой и растровым диском оптоэлектронного преобразователя частоты вращения осуществляется путём магнитного взаимодействия через герметичную перегородку. Растровый диск с прозрачными щелями вращается между инфракрасным излучателем света и приёмником. При прохождении света через щель фотоприёмник формирует сигнал. При протокте жидкости крыльчатка и диск синхронно вращаются и на выходе формируются импульсные сигналы с частотой, пропорциональной скорости протока. Описанные элементы датчика образуют первичный преобразователь, который обеспечивает формирование 1728 импульсов при прохождении одного литра жидкости. Частотный сигнал с выхода первичного преобразователя поступает на вход микроконтроллера, который измеряет количество импульсов в единицу времени. Затем контроллер преобразовывает количество импульсов в расход жидкости (л/мин), выводит полученное значение на дисплей и сравнивает его с заданной уставкой. Если расход жидкости превышает заданный объём, то контроллер сигнализирует об этом, открывая выходной ключ и зажигая соответствующий светодиод на передней панели. Также контроллер измеряет и выводит на дисплей текущую температуру системы охлаждения и сигнализирует, если температура воды превышает заданную уставку, закрывая соответствующий выходной ключ и гася светодиод на передней панели. Требуемые расход и температура могут быть настроены в следующих диапазонах: расход — в диапазоне 1—24 л/мин, температура — в диапазоне 5, ..., +70 °С.

Диагностика работает в круглосуточном режиме при подготовке камеры и при проведении экспериментов и обеспечивает контроль температурного режима и функционирования системы охлаждения установки. Типичные параметры системы приведены в табл. 6.8.5.

Таблица 6.8.5. Параметры системы контроля водяного охлаждения установки

Параметр	Область	Диапазон величины	Временное разрешение, с	Количество точек измерения, шт.	Точность
$T_{\text{вода}}$	Коллекторы	-30—+120 °С	1	92	0,1 °С
	PF1-6, TF1-4, CS1-3	+5—+70 °С	1	141	0,1 °С
	Система откачки	100 ± 5 °С	1	26	5 °С
	PF1-6, TF1-4, CS1-3	+5—+70 °С	1	92	0,1 °С
$Q_{\text{вода}}$	Система откачки	1—24 л/мин	1	26	0,1 л/мин

В дальнейшем планируются разработка и монтаж оборудования контроля температуры и расхода воды системы охлаждения нижнего и верхнего диверторов и технологического комплекса охлаждения системы дополнительного нагрева плазмы. Подробную информацию о системе температурного контроля установки можно найти в [88].

6.8.5. Система автоматического радиационного контроля

Система автоматического радиационного контроля (АСРК) представляет собой комплекс диагностик, обеспечивающий измерения мощности доз гамма- и нейтронного излучения в стационарных точках в здании токамака Т-15МД. АСРК осуществляет функции по оперативному радиационному контролю, а также по отслеживанию и предотвращению нештатного режима работы установки Т-15МД.

Диагностики основаны на применении интегрированных сцинтилляционных датчиков, чувствительных к широкому спектру гамма- и нейтронного (γ , n) излучения. Для АСРК установки Т-15МД используются 22 датчика БДКГ-204, чувствительных к гамма-излучению, и 23 датчика БДКН-02, чувствительных к нейтронному излучению. Датчики системы расположены как в зале № 3 установки Т-15МД, так и за биологической защитой, во всём здании 73, в том числе на крыше здания. Информация с датчиков выводится на собственные дисплеи датчиков и рабочую станцию оператора. АСРК ведёт накопление информации со стационарных точек контроля с последующим анализом для минимизации радиационных нагрузок на персонал. К АСРК подключаются звуковые и световые сигнализаторы, которые срабатывают при превышении предельных доз. Типичные параметры диагностики приведены в табл. 6.8.6.

Таблица 6.8.6. Типичные параметры системы автоматического радиационного контроля

Параметр	Область	Диапазон			Временное разрешение, с	Точность, %
		энергии	счёта	мощности дозы		
n	Зд. 73	0,025 эВ—14 МэВ	$0—5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$	100 нЗв/ч—10 мЗв/ч	2	20
γ		20 кэВ—10 МэВ	—	50 нЗв/ч—10 Зв/ч	2	20

Подробную информацию о системе автоматического радиационного контроля установки можно найти в [89—91].

6.8.6. Автоматизированная система индикации замыканий

Автоматизированная система индикации замыканий (АСИЗ) предназначена для измерения электрического сопротивления и напряжения между изолированными элементами оборудования установки Т-15МД.

При проведении плазменных экспериментов на токамаке Т-15МД требуется обеспечение контроля целостности электрической изоляции между элементами конструкции с целью предотвращения возникновения замкнутых электрических контуров, которые вызывают нарушения в работе установки и разрушение элементов её конструкции.

АСИЗ позволяет установить наличие короткого замыкания между контролируемыми элементами установки по измеренному между ними сопротивлению и сравнению его с заданным пороговым значением.

Для подключения измерительного оборудования АСИЗ к 44 контролируемым элементам установки Т-15МД используются специально разработанные блоки высоковольтных реле БВР. Процесс работы АСИЗ представляет собой автоматическое последовательное переключение узлов матрицы высоковольтных реле с помощью релейных контроллеров (relay driver module) в соответствии с заданным набором пар контролируемых элементов для измерения сопротивления и напряжения между ними высокоточным высокопроизводительным $6\frac{1}{2}$ -разрядным мультиметром. АСИЗ позволяет провести измерения между всеми элементами (всего 1892 измерения) за несколько минут. Между импульсами в силу конструктивных особенностей токамака можно сократить число измерений до 171. Помимо сопротивления, АСИЗ измеряет напряжение (AC/DC) и частоту напряжения между конструктивными элементами токамака Т-15МД. Это позволяет выявить дополнительные проблемы с подключаемым к камере токамака оборудованием.

Применение АСИЗ позволяет сократить время контроля целостности электрической изоляции между элементами конструкции установки с нескольких часов до минут, исключить ошибки, возможные при ручном измерении, отобразить полученный результат на экранной форме и сохранить в бинарном виде для дальнейшего анализа. Измеряемые параметры диагностики приведены в табл. 6.8.7.

Таблица 6.8.7. Типичные параметры автоматизированной системы индикации замыканий элементов токамака диагностики

Параметр	Область	Диапазон величины	Разрешение		Точность, %
			Временное	Пространственное	
R	Конструктивные элементы установки	До 10 МОм	<1 с/измерение	44 точки	<0,1
U		До 300 В	То же	То же	<0,01(DC) <1(AC)
F		До 500 кГц	То же	То же	<0,01

Во время проведения эксперимента на Т-15МД измерительное оборудование АСИЗ должно быть электрически изолировано от установки блоками высоковольтных реле БВР. Измерения АСИЗ должны проводиться перед каждым рабочим импульсом токамака.

Опыт, полученный при разработке и эксплуатации АСИЗ, может применяться на токамаках и других различных электрофизических установках для контроля наличия электрического соединения между элементами и исключения повреждения оборудования в рабочем режиме установки.

Дальнейшее развитие АСИЗ направлено на усовершенствование системы регистрации, что позволит строить графики и следить за тенденциями, например, за деградацией изоляции или изменениями после подключения нового оборудования к камере токамака. Подробную информацию об автоматизированной системе индикации замыканий установки можно найти в [92—93].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение перечислим основные особенности планируемого диагностического комплекса Т-15МД как инструмента для проведения исследований на установке. Поскольку подробное описание решаемых задач дано в соответствующих разделах настоящей Физической программы установки, в данном Заключении остановимся на наиболее общих моментах, не претендуя на полноту описания.

Существующие и планируемые к вводу в эксплуатацию диагностические системы установки позволяют осуществлять безопасное функционирование Т-15МД и осуществлять контролируемый плазменный разряд с заданными параметрами. Прежде всего это относится к основным параметрам — магнитному полю, току плазмы, средней электронной плотности. В перспективе, по мере ввода диагностик в режим рутинной эксплуатации, можно ожидать включение в контур обратных связей установки таких параметров, как электронная и ионная температура в определённой области плазмы, амплитуда возмущений электронной плотности и температуры, вызванные развитием неустойчивостей, а также кинетическим управлением положением шнура. Комплекс технологических диагностик обеспечивает безопасность самой установки, коллектива Т-15МД и населения.

Комплекс физических диагностик Т-15МД позволит проводить измерение пространственного распределения основных параметров плазмы (ионной и электронной температуры, электронной плотности) в рабочих режимах установки с высоким пространственным и временным разрешением. Это создаёт условия для исследования транспортных коэффициентов и условий формирования режимов с улучшенным удержанием, необходимых для построения энергоэффективной термоядерной установки. Следует отметить, что запланированный комплекс диагностик позволит проводить измерения ряда параметров плазмы с использованием нескольких различных систем, что повышает надёжность измерений и расширяет область измеряемых параметров. Также следует отдельно отметить диагностики, позволяющие проводить измерения профиля фактора запаса устойчивости (MSE-спектроскопия) и скорости вращения плазмы (СХР-спектроскопия, ЗПТИ, корреляционная рефлектометрия). Согласно существующей парадигме описания транспортных процессов в горячей плазме в режимах с улучшенным удержанием, эти параметры определяют условия и область формирования областей локального уменьшения переноса (транспортных барьеров). Наличие диагностик с высоким пространственным разрешением позволит проводить детальные исследования профилей плазмы в области барьеров. Наличие специальных диагностик диверторной области плазмы позволит проводить эффективное управление параметрами в наиболее энергетически нагруженной области установки.

Диагностический комплекс установки позволит не только определять транспортные коэффициенты, но и исследовать физические процессы, лежащие в основе аномального переноса в плазме токамака, в первую очередь — параметры мелкомасштабных флуктуаций плазмы (турбулентности). Наличие ряда диагностик, измеряющих параметры турбулентности, повышает надёжность результатов и расширяет область измеряемых параметров. Диагностический комплекс Т-15МД даёт возможность проводить уникальные измерения параметров турбулентности — колебаний электрического потенциала плазмы, корреляций возмущений различных параметров плазмы, длинномасштабных корреляций, зональных течений, в том числе с привлечением данных нескольких диагностик.

Запланированные к вводу в строй на первом этапе работы установки диагностики естественным образом дополняют друг друга, позволяя проводить измерения параметров мелкомасштабных возмущений плотности, электрического и магнитного поля в установке во всех областях плазменного шнура — от центра до пристеночной области. Одновременное измерение локальных электрических полей и параметров турбулентности в области барьера может внести существенный вклад в понимание механизмов формирования транспортных барьеров. Второй важной физической задачей для диагностик является исследование формирования квазипериодических возмущений в горячей области шнура, существенно ухудшающих параметры разряда, прежде всего неоклассических разрывных мод (NTM) и альфвеновских собственных мод (AE). Оба явления относятся к числу нежелательных, поскольку приводят к повышенной потере энергии из горячей части плазменного шнура.

Таким образом, диагностический комплекс Т-15МД обеспечит возможность всестороннего исследования характеристик плазмы, необходимых для понимания физических механизмов, лежащих в основе

процессов аномального переноса энергии и частиц — основного из основных вопросов физики магнитного удержания.

Вклад диагностического комплекса в общую программу создания термоядерной установки следующего поколения не ограничивается изучением физики плазмы. Существенные усилия будут направлены на исследование кандидатных материалов и отдельных систем будущих установок, исследование взаимодействия плазмы с поверхностью с помощью различных зондов.

Полный список диагностик установки с основными измеряемыми параметрами приведён в табл. 6.9.1.

Таблица 6.9.1. Параметры, измеряемые с использованием планируемого диагностического комплекса установки Т-15МД. W_p — запасённая энергия, B — магнитное поле, I — ток плазмы, U — напряжение обхода, $Z_{эф}$ — эффективный заряд плазмы, P_{rad} — радиационные потери, n_e — плотность электронов, T_e — температура электронов, n_i — плотность основных ионов плазмы, T_i — температура ионов, n_z — плотность ионов примесей, ω — скорость вращения плазмы, ИИ — ионизирующие излучения, проч. — прочее

Диагностики	Стр.	Область					Тип изм.		Изм. параметр														
		Интегр.	Центр	Край	SOL	Дивер.	Среднее	Флукт.	W_p	B	I	U	$Z_{эф}$	P_{rad}	n_e	T_e	n_i	T_i	n_z	ω	ИИ	Проч.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
Диаманитные петли	112	•					•		•														
Петли для измерения полоидального потока	113	•					•			•		•											
Двухкомпонентные магнитные зонды	113	•					•			•													
Седловые петли	113	•					•			•													
Зонды тангенциальной компоненты поля	114	•					•			•													
Зонды Мирнова	114	•						•		•													
Быстрый подвижный магнитный зонд	115				•			•		•												•	
Диагностический комплекс ЗПТИ	151		•	•			•	•		•					•						•		
Пояс Роговского	112	•					•				•												
Диагностика штарковского расщепления линий (MSE)	130		•	•			•				•												
Многоканальная диагностика яркости излучения с высоким разрешением	125		•	•	•		•						•					•			•		
Пирозлектрические болометры	122	•	•	•	•	•	•							•									
Полупроводниковые (АХUV) болометры	124		•	•	•	•	•							•									
СВЧ-интерферометр	118	•					•								•								
FMСW-рефлектометрия для измерения профиля плазмы	119		•	•	•		•								•								
Корреляционная рефлектометрия	120		•	•	•			•							•						•		
Диагностика флуктуаций плотности электронов (BES)	131		•	•				•							•								
Спектроскопия гелиевого пучка	133					•	•								•	•							

Продолжение таблицы 6.9.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Многоканальный двухцветный гетеродинный СО ₂ -лазерный интерферометр	135	•	•	•			•								•							
Многоканальный гетеродинный волоконный лазерный интерферометр	135	•	•	•			•								•							
Диагностика тангенциального томсоновского рассеяния	137		•	•			•								•	•						
Диагностика вертикального томсоновского рассеяния	137		•	•			•								•	•						
Диагностика томсоновского рассеяния в диверторной области	138					•	•								•							
Комплекс ленгмюровских зондов диверторов	155					•	•	•							•	•				•		
Комплекс быстропереключаемых зондовых систем	155				•	•	•	•							•	•				•		
Диагностика ЭЦР-излучения плазмы	116		•				•	•								•						
Диагностика флуктуаций температуры ионов на NBI (Ultrafast CXRS)	132		•	•				•								•				•		
Спектрометр мягкого рентгеновского излучения	141		•	•	•		•									•					•	
Томографическая диагностика мягкого рентгеновского излучения	145		•	•	•		•									•					•	
Обзорная диагностика излучения плазмы в видимой области спектра	121			•	•		•										•		•			
Диагностика тормозного и линейчатого излучения плазмы	127			•	•		•										•		•			•
Диагностика спектров линейчатого излучения плазмы	127			•	•		•										•		•			
Активная перезарядочная спектроскопическая диагностика (CXRS)	127		•	•	•		•										•	•	•	•		
Лазерное индуцированное тушение	139					•	•										•	•				•
Диагностика нейтральных атомов перезарядки	150		•	•	•		•											•				
Рентгеновский кристаллический монохроматор	143		•				•												•			•
Диагностика быстрых ионов Fast Ion Deuterium-Alpha (FIDA)	133		•	•			•													•		•
Монитор мягкого рентгеновского излучения	140	•					•														•	
Монитор жёсткого рентгеновского излучения	141	•					•														•	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
Диагностика быстропеременных возмущений мягкого рентгеновского излучения	146		•	•			•	•														•	•
Томографическая диагностика надтеплового рентгеновского излучения	146		•				•															•	
Спектрометр жёсткого рентгеновского излучения	144	•					•															•	
Монитор нейтронного излучения	147	•					•															•	
Томографическая диагностика нейтронного излучения	148	•					•															•	
Спектрометр нейтронного излучения	149	•					•															•	
Система автоматического радиационного контроля	161	•					•															•	•
Обзорные CCD-камеры в видимой области	121	•					•																•
Обзорные камеры в инфракрасной области	122	•					•																•
Диагностическая станция WASA-Upgrade	153	•			•		•																•
Материаловедческий комплекс	156	•			•	•	•																•
Диагностика вибраций и деформаций компонентов токамака Т-15МД	157	•					•																•
Вакуумметрия	158	•					•																•
Диагностика контроля температуры вакуумной камеры установки	159	•					•																•
Диагностика контроля системы охлаждения установки	160	•					•																•
Система индикации замыканий элементов токамака	162	•					•																•
Масс-спектрометрия	159	•					•																•

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗДЕЛУ 6

1. **Sushkov A.V., Belov A.M., Igonkina G.B. et al.** Design of inductive sensors and data acquisition system for diagnostics of magnetohydrodynamic instabilities on the T-15MD tokamak. — Fusion Engineering and Design, 2019, vol. 146, Part A, p. 383—387; doi: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.12.073>.
2. **Пустовитов В.Д.** Диагностические возможности диамагнитных измерений с двумя петлями в токамаках. — Физика плазмы, 2020, т. 46, № 8, с. 675—684; doi: <https://doi.org/10.31857/S0367292120080065>.
3. **Белов А.М., Макашин И.Н.** МГД-диагностика на токамаке Т-11М. — Физика плазмы, 2004, т. 30, № 2, с. 195—199.
4. **Savrukhin P.V., Shestakov E.A.** Arc discharges during disruptions in the T-10 tokamak. — Physics of Plasmas, 2019, vol. 26 (9), 092505 (13 p.); doi: <https://doi.org/10.1063/1.5102112>.

5. **Savrukhin P.V., Shestakov E.A.** Movable magnetic probe system in the T-10 tokamak. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2012, vol. 83 (1), 013505 (5 p.); doi: <https://doi.org/10.1063/1.3675577>.
6. **Соловьёв Н.А., Сарычев Д.В.** Диагностика электронно-циклотронного излучения на токамаке Т-15МД. Перспективы и оценка возможностей. — В сб.: Тезисы XVIII Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». 2019, с. 192—194.
7. **Luhmann N.C., Bindslev H., Park H. et al.** Chapter 3: Microwave diagnostics. — *Fusion Science and Technology*, 2008, vol. 53, № 2, p. 335—396; doi: <https://doi.org/10.13182/FST08-A1675>.
8. **Sergeev D.S., Nerush M.N.** Analysis of the Possibility of Measuring the Electron Plasma Density of the T-15MD Tokamak by Probing with Electromagnetic Waves of the Submillimeter Range. — *Physics of Atomic Nuclei*, 2021, vol. 84 (7), p. 1351—1357; doi: <http://doi.org/10.1134/S1063778821070127>.
9. **Сергеев Д.С., Дрозд А.С., Кириллов А.С. и др.** Оценка влияния эволюции плотности плазмы токамака Т-15МД на изменение фазы и частоты сигналов вертикального канала СВЧ-интерферометра. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2022, т. 5, вып. 3, с. 23—28; doi: <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2022-45-3-23-28>.
10. **Drozd A., Sergeev D.** Design of a phasemeter for real-time measurements of the average plasma density with the microwave interferometer of the tokamak T-15MD. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2022, vol. 93(6), 063501; doi: <https://doi.org/10.1063/5.0087847>.
11. **Shelukhin D.A., Subbotin G.F., Vershkov V.A. et al.** Analysis of Physical and Engineering Capabilities for the Implementation of the Reflectometry Diagnostics at T-15MD Installation. — *Plasma Phys. Rep.*, 2022, vol. 48, p. 721—739; doi: <https://doi.org/10.1134/S1063780X22600402>.
12. **Shelukhin D.A., Vershkov V.A., Subbotin G.F. et al.** Measurements of electron density profile by frequency modulated continuous wave reflectometer in the T-10 tokamak using high magnetic field side probing and extraordinary mode lower cutoff. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2018, vol. 89 (9), 094708 (12 p.); doi: <https://doi.org/10.1063/1.5039151>.
13. **Vershkov V.A., Soldatov S.V., Shelukhin D.A. et al.** Development of a Concept of Reflectometric Diagnostics for the ITER Tokamak for Plasma Probing from the High-Magnetic-Field Side. — *Instruments and Experimental Techniques*, 2004, vol. 47, p. 182—190; doi: <https://doi.org/10.1023/B:INET.0000025199.00478.be>.
14. **Vershkov V.A., Dreval V.V., Soldatov S.V.** A three-wave heterodyne correlation reflectometer developed in the T-10 tokamak. — *Rev. Sci. Instrum.*, 1999, vol. 70 (3), p. 1700—1709; doi: <https://doi.org/10.1063/1.1149654>.
15. **Vershkov V.A., Buldakov M.A., Subbotin G.F. et al.** 3D structure of density fluctuations in the T-10 tokamak and new approach for current profile estimation. — *Nucl. Fusion*, 2019, vol. 59, 066021 (15 p.); doi: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab15b1>.
16. **XIMEA.** xiB & xiB-64 fast speed PCIe Gen2 and Gen3 camera series. Technical Manual, 2021, Version 1.09.
17. **Micro-Epsilon.** ThermoIMAGER TIM — Compact Thermal Imaging Cameras. Datasheet, 2023.
18. **Vershkov V.A., Sarychev D.V., Notkin G.E. et al.** Review of recent experiments on the T-10 tokamak with all metal wall. — *Nucl. Fusion*, 2017, vol. 57, 102017 (15 p.); doi: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6b0e>.
19. **Алексеев А.Г., Забродский В.В., Сарычев Д.В. и др.** Комбинированная диагностика измерения профилей радиационных потерь, экстремального ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучений в токамаке TRT. — *Физика плазмы*, 2022, т. 48, № 12, с. 1—10; doi: <https://doi.org/10.31857/S0367292122601035>.
20. **Ingesson L.C., Alper B., Peterson B.J., Vallet J.-C.** Chapter 7: Tomography Diagnostics: Bolometry and Soft-X-Ray Detection. — *Fusion Science and Technology*, 2008, vol. 53(2), p. 528—576; doi: <http://dx.doi.org/10.13182/FST53-528>.
21. **Vershkov V.A., Sarychev D.V., Notkin G.E. et al.** Review of recent experiments on the T-10 tokamak with all metal wall. — *Nucl. Fusion*, 2017, vol. 57, 102017 (15 p.); doi: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6b0e>.
22. **Alekseyev A.G., Belov A.M., Zabrodsky V.V. et al.** Fast XUV 16 × 16 Array Hybrid Module for Plasma Imaging Applications. — *Plasma and Fusion Research*, 2007, vol. 2, S1061 (3 p.); doi: <https://doi.org/10.1585/pfr.2.S1061>.
23. **Gray D.S., Luckhardt S.C., Chousal L. et al.** Time resolved radiated power during tokamak disruptions and spectral averaging of AXUV photodiode response in DIII-D. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, vol. 75, p. 376—381; doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1642745>.
24. **Крупин В.А., Немец А.Р., Ключников Л.А. и др.** Комплекс спектроскопических диагностик для измерения абсолютной величины и радиального распределения эффективного заряда плазмы на токамаке Т-10. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2016, т. 39, вып. 1, с. 81—94.
25. **Ключников Л.А., Немец А.Р., Крупин В.А. и др.** Многохордовые измерения эффективного заряда плазмы в токамаке Т-10 по интенсивности тормозного континуума в видимой области при высоком спектральном разрешении. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2015, т. 38, вып. 4, с. 34—40.
26. **Nemets A.R., Krupin V.A., Klyuchnikov L.A. et al.** Radial scanning diagnostics of bremsstrahlung and line emission in T-10 plasma. — *Phys. Atom. Nuclei*, 2016, vol. 79 (7), p. 1204—1209; doi: <http://doi.org/10.1134/S1063778816070097>.

27. **Крупин В.А., Ключников Л.А., Нургалиев М.Р. и др.** Определение профиля периферийной ионной температуры из измерений доплеровского уширения линии 5291 Å иона C⁵⁺. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 4, с. 68—77; doi: <http://doi.org/10.21517/0202-3822-2016-39-4-68-76>.
28. **Klyuchnikov L.A., Krupin V.A., Nurgaliev M.R., et al.** Spatially resolved spectroscopic ion temperature measurements at plasma edge of the T-10 tokamak. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2017, vol. 88, 093508 (8 p.); doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5001490>.
29. **Nemets A.R., Krupin V.A., Klyuchnikov L.A. et al.** Study of Plasma Impurity Composition in the Experiments with Carbon, Tungsten and Lithium Limiters on T-10. — *Phys. Atom. Nuclei*, 2018, vol. 81, p. 1048—1052; doi: <http://doi.org/10.1134/S1063778818070074>.
30. **Krupin V., Zemtsov I., Nurgaliev M. et al.** The development of charge exchange recombination spectroscopy diagnostics for the T-15MD tokamak. — *J. of Instrumentation*, 2020, vol. 15, C02027 (7 p.); doi: <http://doi.org/10.1088/1748-0221/15/02/C02027>.
31. **Тугаринов С.Н., Белокопытов А.А., Кулаков Д.М. и др.** Трехдиапазонный спектрометр высокого разрешения для диагностической системы «Активная Спектроскопия» ИТЭР. — ПТЭ, 2016, № 1, с. 102—107; doi: <https://doi.org/10.7868/S0032816216010158>.
32. **Klyuchnikov L.A., Krupin V.A., Nurgaliev M.R. et al.** Charge exchange recombination spectroscopy on the T-10 tokamak. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2016, vol. 87, 053506 (8 p.); doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4949498>.
33. **Крупин В.А., Иванов С.Н., Медведев А.А. и др.** Разработка MSE диагностики профиля тока для установки T-10: Препринт ИАЭ-5940/7. Москва, 1995.
34. **Paul S.F., Fonk R.J.** Neutral beam emission spectroscopy diagnostic for measurement of density fluctuations on the TFTR tokamak. — *Rev. Sci. Instrum.*, 1990, vol. 61 (11), p. 3496—3500; doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1141557>.
35. **Li Y., Zhou Y., Jiang D. et al.** Concept design of ultrafast charge exchange recombination spectroscopy on EAST tokamak. — *Fusion Engineering and Design*, 2019, vol. 146, Part A, p. 522—525; doi: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.01.012>.
36. **Haskey S.R., Grierson B.A., Stagner L. et al.** Active spectroscopy measurements of the deuterium temperature, rotation, and density from the core to scrape off layer on the DIII-D tokamak. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2018, vol. 89, 10D110 (9 p.); doi: <https://doi.org/10.1063/1.5038349>.
37. **Geiger B., Garcia-Munoz M., Heidbrink W.W. et al.** Fast-ion D-alpha measurements at ASDEX Upgrade. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2011, vol. 53, 065010 (19 p.); doi: <https://doi.org/10.1088/0741-3335/53/6/065010>.
38. **Griener M., Muñoz Burgos J.M., Cavedon M. et al.** Qualification and implementation of line ratio spectroscopy on helium as plasma edge diagnostic at ASDEX Upgrade. — *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2017, vol. 60, № 2, 025008 (27 p.); doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa97e8>.
39. **Barbui T., Krychowiak M., Schmitz O. et al.** Measurements of plasma parameters in the divertor island of Wendelstein 7-X through line-ratio spectroscopy on helium. — *Nuclear Fusion*, 2020, vol. 60, № 10, 106014; doi: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aba9eb>.
40. **Carlstrom T.N., Ahlgren D.R., Crosbie J.** Realtime, vibration compensated CO₂ interferometer operation on the DIII-D tokamak. — *Rev. Sci. Instrum.*, 1988, vol. 59(7), p. 1063—1066; doi: <https://doi.org/10.1063/1.1139726>.
41. **Zhang S., Chen C., Lan T. et al.** Optical fiber interferometer application for high electron density measurements on compact torus plasmas. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2020, vol. 91(6), 063501 (6 p.); doi: <https://doi.org/10.1063/5.0005868>.
42. **Van Zeeland M.A., Boivin R.L., Carlstrom T.N. et al.** Fiber optic two-color vibration compensated interferometer for plasma density measurements. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, vol. 77(10), 10F325 (3 p.); doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2336437>.
43. **Асадулин Г.М., Бельбас И.С., Горшков А.В.** Тангенциальная система диагностики томсоновского рассеяния для токамака T-15. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 2, с. 91—95.
44. **Асадулин Г.М., Баженов А.Н., Бельбас И.С. и др.** Испытание полихроматора для тангенциальной системы томсоновского рассеяния токамака T-15MD в составе диагностики токамака T-10. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 1, с. 89—94.
45. **Kurskiv G.S., Chernakov A.P., Solovey V.A. et al.** Digital filter polychromator for Thomson scattering applications. — *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2020, vol. 963, 163734 (10 p.); doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.163734>.
46. **Asadulin G., Bel'bas I., Gorshkov A.** Upgraded TV Thomson scattering system on the T-10 tokamak. — *Fusion Engineering and Design*, 2022, vol. 177, 113066; doi: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2022.113066>.
47. **Kantor M.Y., Donné A.J.H., Jaspers R., van der Meiden H.J.** Thomson scattering system on the TEXTOR tokamak using a multi-pass laser beam configuration. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2009, vol. 51, 055002(17 p.); doi: <https://doi.org/10.1088/0741-3335/51/5/055002>.

48. **Асадулин Г.М., Баженов А.Н., Бельбас И.С. и др.** Испытание полихроматора для тангенциальной системы томографического рассеяния токамака T-15MD в составе диагностики токамака T-10. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 1, с. 89—94.
49. **Carlstrom T.N., Glass F., Du D. et al.** Thomson scattering measurements on DIII-D using in-vessel laser mirrors and lenses to diagnose a new divertor location. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2018, vol. 89, 10C111 (5 p.); doi: <https://doi.org/10.1063/1.5036968>.
50. **Kurzan B., Lohs A., Sellmair G. et al.** Design and first measurements of the divertor Thomson scattering system on the ASDEX Upgrade tokamak. — *J. of Instrumentation*, 2021, vol. 16, C09012, doi: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/09/C09012>.
51. **Krivoruchko D.D., Gorbunov A.V., Pshenov A.A. et al.** Laser-Induced Quenching Diagnostics of T-15MD Divertor Plasma. — *Plasma Phys. Rep.*, 2023, vol. 49, p. 687—699; doi: <https://doi.org/10.1134/S1063780X23600421>.
52. **Gorbunov A., Mukhin E., Munoz Burgos J.M. et al.** Laser-induced quenching diagnostics of hydrogen atoms in fusion plasma. — *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2022, vol. 64, № 11, 115004; doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6587/ac89ad>.
53. **Gorbunov A.V., Mukhin E.E., Berik E.B. et al.** Laser-induced fluorescence of helium ions in ITER divertor. — *Fusion Engineering and Design*, 2019, vol. 146, p. 2703—2706; doi: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.04.091>.
54. **Орлинский Д.В., Берлизов А.Б., Щеглов Д.А. и др.** Измерения температуры и излучения плазмы на установке T-15 (Первая очередь): Препринт ИАЭ-3519/7. Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова, Москва, 1981. 54 с.
55. **Хрипунов В.И.** Оценка источников и полей излучения на установке T-15MD. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 1, с. 9—38; doi: [10.21517/0202-3822-2020-43-1-9-3](https://doi.org/10.21517/0202-3822-2020-43-1-9-3).
56. **Шестаков Е.А.** Управление пучками ускоренных электронов и МГД-возмущениями с помощью СВЧ-нагрева и резонансных магнитных полей в плазме токамака T-10. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 2019. 116 с.
57. **Трухин В.М., Рыжаков Д.В., Шестаков Е.А.** Цифровая обработка сигналов полупроводникового рентгеновского детектора. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2013, т. 36, вып. 1, с. 78—85.
58. **Shi Y., Chen Z., Wan B. et al.** Soft X-ray pulse height analyzer in the HT-7 tokamak. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, vol. 75, p. 4930—4933; doi: <https://doi.org/10.1063/1.1808911>.
59. **Kubkowska M., Czarnecka A., Fornal T. et al.** First Results from the Soft X-ray Pulse Height Analysis System on Wandelstein 7-X Stellarator. — *Fusion Engineering and Design*, 2018, vol. 136, part A, p. 58—62; doi: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.12.024>.
60. **Вершков В.А., Каржавин Ю.Ю.** Рентгеновский кристаллический монохроматор с изогнутым коллиматором Соллера. — *Приборы и техника эксперимента*, 1987, № 6, с. 171.
61. **Sushkov A., Andreev V., Camenen Y. et al.** High-resolution multiwire proportional soft x-ray diagnostic measurements on TCV. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2008, vol. 79, 023506 (5 p.); doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2833822>.
62. **Sushkov A.V., Andreev V.F., Kravtsov D.E.** Duplex multiwire proportional x-ray detector for multichord time-resolved soft x-ray and electron temperature measurements on T-10 tokamak. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2008, vol. 79 (10), 10E319 (3 p.); doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2964999>.
63. **Savrukhn P.V., Klimanov I.V.** Tangential x-ray imaging system for analysis of the small-scale modes in the T-10 tokamak. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, vol. 72, № 3, p. 1668—1671; doi: <https://doi.org/10.1063/1.1344175>.
64. **Savrukhn P.V., Vasin N.V., Bagdasarov A.A., Tarasyan K.N.** Trigger mechanism of the sawtooth crash in T-10 tokamak plasma. — *Plasma Phys. and Contr. Fusion*, 1991, vol. 33, № 12, p. 1347—1361; doi: <http://doi.org/10.1088/0741-3335/33/12/001>.
65. **Savrukhn P.V., Shestakov E.A.** A study on the effects of magnetohydrodynamic perturbations on nonthermal beam formation during the current decay phase of disruptions in the T-10 tokamak. — *Nuclear Fusion*, 2015, vol. 55, № 4, 043016 (9 p.); doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0029-5515/55/4/043016>.
66. **Саврухин П.В., Шестаков Е.А., Храменков А.В.** Пространственно-временная эволюция ускоренных электронов при развитии неустойчивости срыва в плазме токамака T-10. — *Физика плазмы*, 2018, т. 44, № 12, с. 951—960; doi: <https://doi.org/10.31857/S0367292120040113>.
67. **Ishikawa M., Nishitani T., Morioka A. et al.** First measurement of neutron emission profile on JT-60U using Stilbene neutron detector with neutron-gamma discrimination. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2002, vol. 73 (12), p. 4237—4242; doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1518145>.
68. **Gott Yu.V., Kadyrgulov A.A.** A new type of ionizer for charge-exchange particle analyzer. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2018, vol. 89, 093504 (4 p.); doi: <https://doi.org/10.1063/1.5043262>.
69. **Петров С.Я., Афанасьев В.И., Мельник Ф.Д. и др.** Особенности конструкции системы диагностики по потокам атомов изотопов водорода для международного термоядерного реактора ИТЭР. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, № 1, с. 67—80; doi: [10.21517/0202-3822-2016-1-67-80](https://doi.org/10.21517/0202-3822-2016-1-67-80).

70. **Melnikov A.V.** Electric Potential in Toroidal Plasmas. Springer Nature Switzerland AG, 2019, ISBN 978-3-030-03480-1.
71. **Melnikov A.V., Krupnik L.I., Eliseev L.G. et al.** Heavy ion beam probing — diagnostics to study potential and turbulence in toroidal plasmas. — Nuclear Fusion, 2017, vol. 57 (7), 072004 (13 p.); doi: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa5382>.
72. **Melnikov A.V., Drabinskiy M.A., Eliseev L.G. et al.** Heavy ion beam probe design and operation on the T-10 tokamak. — Fusion Engineering and Design, 2019, vol. 146, p. 850—853; doi: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.01.096>.
73. **Drabinskiy M.A., Melnikov A.V., Khabanov P.O. et al.** Conceptual design of the heavy ion beam probe diagnostic for the T-15MD tokamak. — J. of Instrumentation, 2019, vol. 14(11), C11027 (7 p.); doi: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/11/C11027>.
74. **Melnikov A.V., Eliseev L.G., Barcala J.M. et al.** 2D distributions of potential and density mean-values and oscillations in the ECRH and NBI plasmas at the TJ-II stellarator. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2022, vol. 64, 054009; doi: <http://doi.org/10.1088/1361-6587/ac5b4c>.
75. **Саранча Г.А., Елисеев Л.Г., Мельников А.В. и др.** Идентификация зональных течений и их пространственное распределение в плазме стелларатора TJ-II. — Письма в ЖЭТФ, 2022, т. 116, вып. 1—2, с. 96—102; doi: <http://doi.org/10.31857/S1234567822140051>.
76. **Alkhimovich V.A., Vertiporokh A.N., Igon'kina G.B. et al.** T-15 Plasma Chamber Design and Testing. — Plasma Devices and Operations, 1992, vol. 2, p. 27—46; doi: <https://doi.org/10.1080/10519999208241301>.
77. **Zvonkov S., Igonkina G., Stefanovskij A., Herrmann A.** Wall conditioning in T-15. Investigations of wall surface state by WASA II. — In: Proc. of 23rd European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics. Contributed Papers. Part II. Kiev, Ukraine, 1996, p. 747—750.
78. **Рогозин К.А., Грашин С.А., Будаев В.П. и др.** Зондовая диагностика диверторной плазмы в токамаке T-15MD. — В сб.: Труды XX Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». Сочи, 2023., с. 134.
79. **Asakura T., Tsuji-Iio S., Ikeda Y. et al.** Fast reciprocating probe system for local scrape-off layer measurements in front of the lower hybrid launcher on JT-60U. — Rev. Sci. Instrum., 1995, vol. 66, p. 5428—5432; doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1146064>.
80. **De Kock L., Ando T., Antipenkov A. et al.** Langmuir probes and Optical diagnostic for the ITER divertor. — In: Diagnostics for Experimental Fusion Reactors. Ed. Storr, Gorini, Sindoni. Plenum press, 1996, p. 591—594.
81. **Van Oost G.** Probe Diagnostics for Fusion Devices. — Fusion Science and Technology, 2006, vol. 49(2T), p. 357—366; doi: <https://doi.org/10.13182/FST06-A1135>.
82. **Грашин С.А., Будаев В.П., Карпов А.В. и др.** Разработка комплекса материаловедческих исследований на токамаке T-15MD. — Вестник МЭИ, 2023, № 3, с. 145—153; doi: <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2023-3-145-153>.
83. **Khvostenko P.P., Mikhailichenko V.A., Bogdanov V.F. et al.** Vibration measurements of the tokamaks components of TEXTOR and T-10 in operation. — Fusion Engineering and Design, 2001, vol. 56—57, p. 959—963; doi: [http://doi.org/10.1016/s0920-3796\(01\)00433-1](http://doi.org/10.1016/s0920-3796(01)00433-1).
84. **Образцов И.С., Анашкин И.О., Кочин В.А.** Вакуумметрия разрядной камеры установки токамак T-15MD. — В сб.: Труды XIX Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». Сочи, 2021, с. 290—293.
85. **Анашкин И.О., Кочин В.А., Образцов И.С.** Система откачки вакуумной камеры установки токамак T-15MD. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2023, т. 46, № 3, с. 47—54.
86. **Образцов И.С., Анашкин И.О., Кочин В.А., Цыганков И.А.** Масс-спектрометрия рабочих и остаточных газов установки токамак T-15MD. — В сб.: Труды XX Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». Сочи, 2022, с. 168—172.
87. **Анашкин И.О., Кочин В.А., Образцов И.С.** Система откачки вакуумной камеры установки токамак T-15MD. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2023, т. 46, № 3, с. 47—54.
88. **Моцкин Ю.Я., Соколов М.М., Хвостенко П.П. и др.** Информационно-управляющая система экспериментальной термоядерной установки «Токамак T-15». — М.: НИЦ «Курчатовский институт». 2015, МКА: ВКС № 3.
89. **Оценка источников и полей излучения на установке T-15.** — М.: РНЦ «Курчатовский институт», 2007.
90. **Анализ нарушений нормального режима работы и аварийных ситуаций на установке T-15.** — Ленинград — Москва: НИИЭФА, ИАЭ, 1988.
91. **Белюков М.М.** Радиационные факторы на термоядерной установке T-15. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. — М.: ИАЭ, 1991.
92. **Хайрутдинов Э.Н., Игонькина Г.Б., Соколов М.М., Сушков А.В.** Диагностика и индикация электрических замыканий между конструктивными элементами токамака T-15MD. — В сб.: Труды XIX Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». Сочи, 2021.

93. Качкин А.Г., Соколов М.М., Игонькина Г.Б. и др. Инженерная реализация систем индикации замыканий, визуализации плазмы и диагностической станции анализа первой стенки токамака Т-15МД. — В сб.: Труды XX Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». Сочи, 2023.

РАЗДЕЛ 7

ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ

ВВЕДЕНИЕ

Токамак Т-15МД является научной электрофизической установкой, самой крупной в Российской Федерации действующей установкой в области термоядерных исследований.

С учётом быстрого развития плазменных технологий в мире и нацеленности многих стран на создание национальных реакторов на основе токамака необходимость проведения опережающих исследований в части разработки и тестирования технологий, которые в классических экспериментальных токамаках не нужны, но без которых работа токамака-реактора будет невозможной или нецелесообразной, является очень актуальной задачей. Несмотря на то, что Т-15МД имеет ограничения по работе с изотопами водорода, что исключает возможность получения интенсивных нейтронных потоков, часть технологий может быть отработана с учётом имеющихся ограничений.

Уникальной особенностью токамака Т-15МД является конструкция вакуумной камеры с большими экваториальными фланцами и их близким расположением к плазме. Эта особенность конструкции Т-15МД облегчает диагностирование плазмы и позволяет устанавливать и тестировать макеты реакторных систем.

7.1. РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Для обеспечения проектирования и создания термоядерного источника нейтронов (ТИН) требуется провести цикл экспериментальных исследований и опытно-конструкторских работ, направленных на обоснование выбора материалов и охлаждаемых конструкций теплозащитной облицовки первой стенки и дивертора, стационарной эксплуатации в режимах Н-моды с ожидаемой квазистационарной нагрузкой более 10 МВт/м² и экстремально высокими нагрузками при неустойчивостях типа ЭЛМ и других переходных процессах [1]. Следует развивать технологии бланкета для оптимизации производства нейтронов в условиях повышенных нагрузок на первую стенку в реакторе.

На основе имеющихся результатов экспериментов на современных токамаках, включая Т-15МД, разработок для первой стенки и дивертора ИТЭР, а также экспериментов на плазменных стендах в поддержку термоядерного токамака-реактора всё ещё нет однозначных выводов и рекомендаций о тепло-технических характеристиках систем охлаждения, эксплуатации внутрикамерных компонентов и режимов взаимодействия плазма—стенка в токамаке, которые могут быть положены в основу разработки термоядерного источника нейтронов (ТИН). Также важной задачей является разработка эффективных методов получения электрической энергии из термоядерной энергии синтеза, включая прямое преобразование энергии частиц в электрическую.

Далее приведён список и краткое описание основных технологических задач для ТИН, которые могут быть решены в рамках работ на Т-15МД.

7.1.1. Разработка, создание и испытание систем охлаждения первой стенки, бланкета и дивертора в обеспечение стационарной работы токамака при нагрузке на внутрикамерные компоненты до 10 МВт/м² и более

Разработка и изготовление модулей первой стенки и бланкета для ТИН являются новыми задачами, требующими комплексного подхода. При разработке конструкции должны учитываться следующие факторы:

- тепловые нагрузки и эффективность теплоотвода;
- электромагнитные нагрузки;
- работа в квазистационарных сильных (свыше 2 Тл) магнитных полях;
- эффективность захвата термоядерных нейтронов;
- возможность воспроизводства трития;
- возможность дистанционного обслуживания.

В настоящее время нет решения, какую конкретно концепцию и конструкцию blankets использовать. Рассматриваются различные варианты, в том числе жидкосолевые, твердотельные, растворные, высоко- и низкотемпературные и др. Одним из перспективных вариантов является конструкция blankets на основе сферических твердотельных элементов (СЭЛ) [2].

Для проверки работоспособности и удовлетворения всех требований необходимо изготовление макетов и прототипов модулей первой стенки, blankets и дивертора, которые должны быть испытаны в условиях, максимально приближенных к реакторным.

Отличительной особенностью токамака Т-15МД является конструкция вакуумной камеры с большими экваториальными фланцами и их близким расположением к плазме. Эта особенность конструкции Т-15МД позволяет проводить испытания крупногабаритных макетов реакторных систем.

По своим характеристикам Т-15МД позволяет достигать тока 2 МА при мощности дополнительного нагрева не более 24 МВт, что обеспечивает создание теплового потока на первую стенку и дивертор до 10 МВт/м^2 [3]. Если будет обеспечена возможность работы токамака Т-15МД с дейтериевой смесью, то на нём может быть проведён весь спектр испытаний макетов первой стенки и blankets.

Таким образом, токамак Т-15МД позволяет проводить актуальные испытания макетов первой стенки и blankets на тепловые и электромагнитные нагрузки в условиях реального термоядерного эксперимента, отрабатывать методы дистанционного обслуживания, а при обеспечении работы с дейтерием проводить также нейтронные испытания элементов blankets.

7.1.2. Система дополнительных внутрикамерных резонансных обмоток магнитного поля (RMP)

Целями разработки системы являются подавление неустойчивостей типа ELM и управление переносом дополнительными магнитными катушками у сепаратрисы для уменьшения тепловой нагрузки на внутрикамерные компоненты и blankets.

Неустойчивости типа ЭЛМов возникают вблизи границы плазмы в режиме с улучшенным удержанием и являются нежелательными, поскольку во время развития этих мод мощность теплового потока на

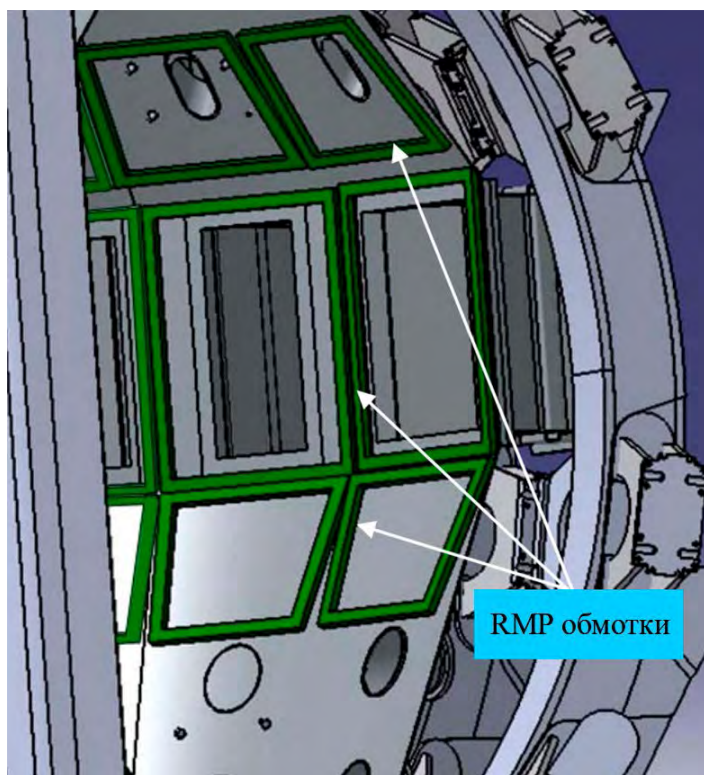


Рис. 7.1.1. Проект размещения обмоток системы генерации резонансных магнитных полей внутри вакуумной камеры токамака Т-15МД [5]

внутривакуумные элементы может увеличиваться в десятки раз по сравнению со стационарными потоками [4]. Развитие методов подавления ЭЛМ является одной из важных задач для обеспечения разработки и создания надёжного термоядерного реактора.

Для токамака Т-15МД разработан концептуальный проект системы создания внешних резонансных магнитных возмущений [5]. Данная система состоит из 48 магнитных обмоток, расположенных внутри вакуумной камеры за первой стенкой (рис. 7.1.1).

Дополнительно данная система может использоваться для коррекции несимметрии магнитных полей токамака, стохастизации границы плазменного шнура для управления переносом и развитием пучков ускоренных электронов.

Проведение экспериментов по управлению ЭЛМами в Т-15МД с помощью системы дополнительных внутрикамерных резонансных обмоток магнитного поля (RMP) позволит применить разработанную методику при работе токамака-реактора.

7.1.3. Исследование режимов и разработка методов и технологий для прямого преобразования термоядерной энергии

Практической целью создания токамака-реактора является получение электрической энергии. С учётом значительных энергозатрат на собственные нужды важной задачей является повышение эффективности преобразования энергии, выделяющейся в токамаке-реакторе, в электрическую. В настоящее время основным методом преобразования энергии в токамаке-реакторе является аккумуляция всей энергии на внутрикамерных элементах в виде тепла и последующее её преобразование в электрическую энергию с помощью одного из тепловых циклов (например, цикл Ренкина [6]). Максимальная достижимая эффективность преобразования при этом для тепловых электростанций обычно не превышает 40%, а для токамака-реактора не будет превышать 30% [7]. При этом эффективность отдельных методов прямого преобразования энергии может достигать 90% и более [8].

Несмотря на обилие различных методов прямого преобразования энергии [9], только некоторые из них могут быть применены в установках типа токамак из-за конструктивных особенностей, в том числе [10]:

- преобразование кинетической энергии плазменных струй в потенциальную энергию электрического поля (direct collection);
- передача энергии бегущей электростатической волне (traveling wave direct energy conversion);
- МГД-генератор.

При этом промышленных образцов генераторов с прямым преобразованием энергии для токамаков в настоящее время не существует, и поисковые работы в этой области представляют большой интерес.

Если говорить о термоядерном реакторе, а не о ТИН, хотя нейтронные реакции синтеза (D—T и D—D) являются наиболее привлекательными в настоящее время из-за более низких параметров плазмы для их осуществления, в будущем могут быть использованы и безнейтронные реакции (например, p—¹¹B). Помимо явных достоинств, таких как экологичность, другим важным преимуществом является выход термоядерной реакции только в виде заряженных частиц, что позволит использовать метод прямого преобразования энергии как основной.

Исследование режимов и разработка методов и технологий для прямого преобразования термоядерной энергии на токамаке T-15MD позволят продвинуться в понимании подходов для решения проблемы прямого преобразования энергии.

7.1.4. Развитие технологий преобразования тепловой энергии в электрическую в системах охлаждения токамака

Основным методом получения электрической энергии в токамаке-реакторе является преобразование тепловой энергии теплоносителей контуров охлаждения blankets, первой стенки и дивертора в электрическую посредством одного из термодинамических циклов.

Тем не менее до сих пор не выработана окончательная концепция системы охлаждения, включая выбор теплоносителя, совместимость с электромагнитной системой токамака, радиационная безопасность, сопряжение с компонентами термодинамического цикла.

Одним из лучших известных теплоносителей в настоящее время считается вода. Тем не менее существуют требования к качеству используемой воды в системах охлаждения токамака-реактора [7]:

- из-за ограниченного давления теплоносителя температура воды в контуре охлаждения не будет превышать 300 °С, при этом КПД теплового цикла не достигнет 30%;
- активация воды и образование в ней трития требуют обязательного применения двухконтурной схемы;
- коррозионная опасность.

Как альтернатива воде рассматриваются различные теплоносители, в том числе газы (например, гелий) и жидкие металлы. Оценки показывают повышенную (до 55%) эффективность теплового цикла при использовании жидкометаллического теплоносителя на основе свинцово-литиевого сплава [7].

Таким образом, развитие технологий преобразования тепловой энергии в электрическую в системах охлаждения токамака является актуальной и перспективной задачей.

7.2. ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА, ВКЛЮЧАЯ МЕТОДЫ ИНЖЕКЦИИ ТОПЛИВА

Целью работ на Т-15МД по системам ввода топлива и пучкового нагрева плазмы является определение оптимальных условий удержания плазмы в токамаке с дивертором и пучковым нагревом, существенно превышающим омический. В процессе эксплуатации планируется определение характеристик надёжности и безопасности технологических систем, обеспечивающих формирование основной и пристеночной плазмы, а также систем топливного цикла, включая системы откачки.

Необходимость НИР обосновывается отсутствием отечественного опыта создания и поддержания длительных разрядов (до 100 с) в классических токамаках с полоидальным дивертором и мощным до 8 МВт пучковым нагревом плазмы.

Планируется использовать возможности всех технологических систем токамака, обеспечивающих формирование разрядов с токами до 2 МА, с температурой электронов до 10 кэВ и ионов до 5 кэВ. Будут проведены исследования плазмы с ионным составом Н+Не. В таких экспериментах будет использоваться напуск газов со стороны первой стенки, а также инжекция водородных пеллет со стороны сильного и слабого поля. Будут выполнены исследования плазменных режимов с различными материалами покрытия первой стенки и диверторных пластин, включая литий и бор.

Наиболее существенным ограничением программы Т-15-МД является отсутствие интенсивных нейтронных потоков из плазмы, обусловленное преимущественным использованием указанного состава топливной смеси Н+Не, что не позволит получить опыт реализации стационарных разрядов и проверить возможности работы инженерного и диагностического комплексов установки и дистанционного обслуживания в условиях нейтронного облучения. Также указанный состав смеси накладывает ограничения на возможности для исследования физики плазмы с заметной долей альфа-частиц.

7.3. РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Системы дистанционного обслуживания (ДО) являются ключевыми для плазменно-физических установок, работающих в условиях радиационных полей, повышенных температур и высокого вакуума. В современных крупномасштабных токамаках системы ДО обеспечивают сборку, обследование, плановую замену, ремонт и разборку оборудования внутрикамерных элементов, в том числе в режиме автономного доступа в условиях нейтронной активации. В строящемся токамаке-реакторе ИТЭР использование систем ДО предполагается при выполнении всех работ в зонах с мощностью радиационной дозы, превышающей предельно допустимую для квалифицированного обслуживающего персонала 100 мкЗв/ч. Состав систем ДО в ИТЭР объединяет системы обслуживания внутрикамерных элементов, бланкета, оборудования в горячих камерах и транспортировки и хранения оборудования.

В установке Т-15МД предусматривается использование упрощённого набора систем ДО [11], включающего, в первую очередь, пространственные манипуляторы, конвейерные транспортёры и системы видеоконтроля (рис. 7.3.1).

Конвейерные транспортёры обеспечивают оперативное перемещение диагностической аппаратуры и малогабаритных систем обслуживания внутрикамерных элементов. Доступ внутрь вакуумной камеры может осуществляться через шлюзовые камеры, оборудованные на боковых стенках патрубков ввода нейтральной инжекции.

Система пространственных манипуляторов используется для планового обслуживания и замены крупногабаритных компонентов внутрикамерных элементов. Манипуляторы планируется расположить в патрубках нейтральной инжекции.

Разработка систем ДО обеспечивает также важную информацию для тестирования элементов систем ДО в реакторе, включая:

— тестирование шлюзовых элементов с 2D-позиционированием на базе цельнометаллических сильфонных узлов;

— отработку высоковакуумных актюаторов на базе шаговых моторов, многопозиционных редукторов и сильфонных высоковакуумных вводов движения, включая тестирование работы актюаторов в условиях сильных магнитных полей;

- разработку и тестирование алгоритмов удалённого управления на базе промышленных контроллеров с дополнительными релейными блоками коммутации и модулями электропитания;
- оборудование систем управления как в режиме удалённого доступа, так и с использованием мобильной панели оператора;
- разработку методик экранировки от жёсткого рентгеновского и гамма-излучения.

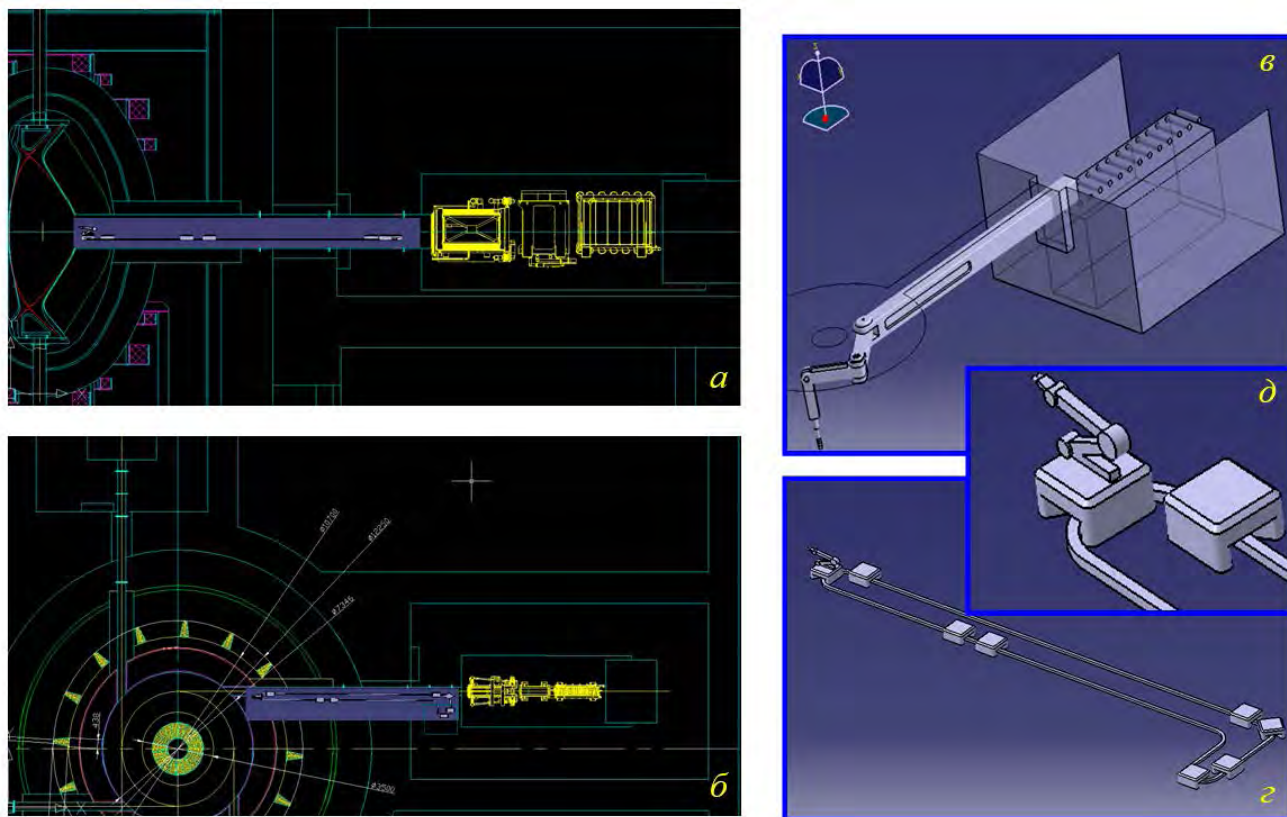


Рис. 7.3.1. Пространственные манипуляторы и конвейерные транспортёры для дистанционного обслуживания внутрикамерных элементов токамака. Эскизный чертёж пространственного манипулятора: *a* — вид сбоку; *b* — вид сверху. Эскизная 3D-модель пространственного манипулятора (*в*), конвейерного транспортёра (*з*); увеличенное изображение секций конвейерного транспортёра (*д*)

С помощью системы видеоконтроля выполняется наблюдение внутрикамерных элементов в промежутке между плазменными разрядами. Система основана на многозвенных манипуляторах для мониторинга внутрикамерных элементов и анализа состояния поверхности диафрагм и дивертора токамака Т-15МД. Схематическое изображение системы мониторинга показано на рис. 7.3.2.

Система мониторинга располагается в диагностическом патрубке в сечении токамака с углеродными и жидкометаллическими лимитерами. Система мониторинга вводится в камеру в промежутке между разрядами без нарушения вакуума. Анализ поверхности внутрикамерных элементов обеспечивается видеомодулем. Видеомодуль закрепляется на манипуляторе, обеспечивающем перемещение видеокамеры внутри вакуумной камеры токамака вблизи поверхности лимитеров и дивертора. Манипулятор построен на базе линейного ввода движения в вакуум с сильфонным уплотнением (звенья S1 и S2) и дополнительными звеньями S3 и S4, закреплёнными на подвижных шарнирах (A2, A3). Звено манипулятора S4 приводится в движение с помощью миниатюрного высоковакуумного шагового мотора, расположенного вблизи шарнира A3. Подвижность звена S3 обеспечивается с помощью рейки, приводимой в движение с помощью линейного актюатора. В проекте системы ДО предусмотрена шлюзовая камера, закрываемая от основной камеры Т-15МД с помощью высоковакуумного клапана. Видеомодуль закрепляется на звене S4 и, в случае необходимости, может быть заменён на аналогичный, адаптированный для различных целей эксперимента.

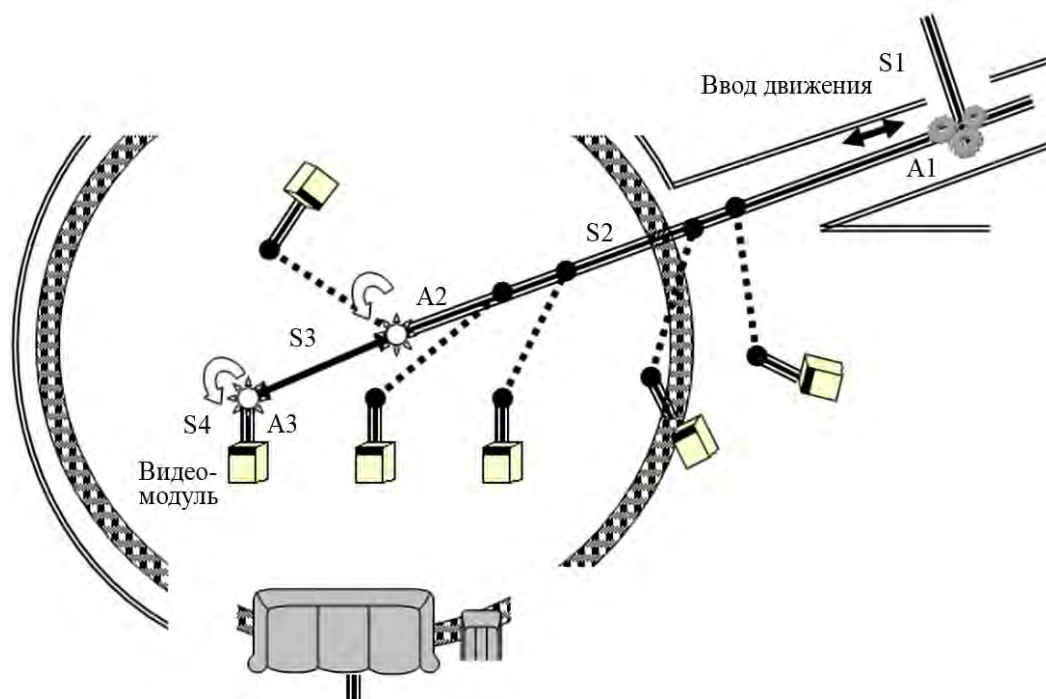


Рис. 7.3.2. Схематическое расположение системы видеомониторинга поверхности внутрикамерных элементов в токамаке Т-15МД

7.4. БЕЗОПАСНОСТЬ

Токамак Т-15МД расположен в экспериментальном зале, оснащённом барьером «теневого» биозащиты, защищающей окружающие помещения от ионизирующего излучения. В настоящее время установка спроектирована для работы с водородом. Это ограничение позволяет избежать возникновения нейтронов за счёт термоядерных реакций. Тем не менее возможность появления нейтронов существует и в чистой водородной плазме. В некоторых режимах работы токамака возможно появление ускоренных электронов, которые способны набирать энергию несколько десятков МэВ [12]. Это несёт риск разрушения внутрикамерных элементов и вакуумной камеры. Другим нежелательным последствием возникновения ускоренных электронов является возможность генерации фотонейтронов при их взаимодействии с внутрикамерными элементами и ионами плазмы. Хотя и существуют методы подавления ускоренных электронов, их надёжность является низкой.

7.4.1. Обеспечение безопасной работы с литием

Для получения плазменных разрядов с высокими параметрами необходима точная настройка системы управления электромагнитной системой, газонапуска, дополнительного нагрева. При переходе от коротких импульсов (секунды) к длинным (десятки и сотни секунд) при взаимодействии плазмы с первой стенкой будет происходить не только адсорбция атомов газа с поверхности, но и эрозия обращённых к плазме поверхностей, её распыление и поступление в вакуумную камеру в виде атомов и пылевых частиц.

Одним из возможных решений проблемы может быть литиевое покрытие первой стенки. Для покрытия может быть использована как жидкометаллическая диафрагма, вдвигаемая внутрь вакуумной камеры, так и литиевый инжектор.

С точки зрения обслуживания литиевый инжектор представляется более безопасным, учитывая, что он будет находиться вдали от плазмы и нейтронные потоки будут не такими значительными, как вблизи, в зоне расположения литиевой диафрагмы.

В случае возникновения аварийных ситуаций с прорывом трубок водяного охлаждения или разгерметизацией вакуумной камеры большие запасы лития в диафрагме представляют угрозу.

На токамаке T-15MD планируется установка литиевого инжектора. Данная система будет использоваться для отработки метода защиты первой стенки напылением на неё слоя лития. В этой связи планируется решение следующих задач:

1. Разработка проекта литиевого инжектора и его изготовление;
2. Исследование эффективности покрытия первой стенки литием при инъекции пеллет и оптимизация режима работы инжектора в длинных и коротких импульсах T-15MD;
3. Исследование радиационной и пожарной безопасности работы литиевого инжектора и токамака с литиевым покрытием первой стенки.

Предварительные эксперименты с литиевым инжектором уже проводились на токамаках, в том числе на токамаке T-10. Результаты работ требуют уточнения в экспериментах на токамаке T-15MD.

7.4.2. Возможность работы с дейтерием

Современные экспериментальные токамаки позволяют получать высокие параметры плазмы, близкие к требуемым для реакторов или источников нейтронов, однако получаемые на них результаты так и остаются недостаточными для проектирования установок, работающих с термоядерным топливом (D—T, D—D и пр.). Основной проблемой проведения экспериментов с термоядерным топливом является активация конструкционных элементов за счёт поглощения получаемых в реакциях нейтронов, что исключает многие современные токамаки из программ таких исследований.

Рассматривая возможность работы с дейтерием на T-15MD, необходимо проектировать биозащиту [13]. Дополнительно необходимо учитывать возможность активации конструкционных элементов, а значит должны быть проработаны вопросы доступа и обслуживания установки.

Таким образом, вопрос возможности работы с дейтерием на T-15MD заключается в подтверждении удержания нейтронов внутри биозащиты и исключения их выхода за пределы экспериментального зала, а также в контроле наведённой радиоактивности и обслуживании установки с использованием дистанционных систем. Для этого должны быть решены следующие задачи:

1. Оценка технической возможности работы с водороддейтериевой смесью;
2. Проектирование и строительство модернизированной усиленной биозащиты и оптимизация конструкции и процентного содержания дейтерия в водороде;
3. Разработка и оснащение T-15MD системой аварийного отвода внутрикамерных газов в изолированный объём;
4. Проектирование и создание комплекса дистанционного обслуживания установки;
5. Модернизация дозиметрического комплекса для контроля наведённой радиоактивности;
6. Модернизация регламента обслуживания установки.

Работа с дейтерием может обеспечить:

- исследование физики удержания горячих ионов;
- исследование стойкости первой стенки и диагностик к потокам нейтронов;
- разработка и настройка нейронных диагностик;
- отработка технологий реактора, в том числе испытания технологий бланкета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗДЕЛУ 7

1. **Велихов Е.П., Ильгисонис В.И.** Перспективы термоядерных исследований. — Вестник Российской академии наук, 2021, т. 91, № 5, с. 470—478.
2. **Пашков А.Ю.** Концепция бланкета с непрерывной перегрузкой твердого сырьевого материала. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 2, с. 96—107.
3. **Хвостенко П.П., Анашкин И.О., Бондарчук Э.Н. и др.** Экспериментальная термоядерная установка токамак T-15MD. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 1, с. 15—38.
4. **Будаев В.П.** Результаты испытаний вольфрамовых мишеней дивертора при мощных плазменно-тепловых нагрузках, ожидаемых в ИТЭР и токамаках реакторного масштаба (обзор). — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 4, с. 5—33.
5. **Sushkov A.V., Belov A.M., Korobov K.V. et al.** Engineering Aspects and Physical Research Program of the Modernized T-15 Tokamak. IAEA FEC 2014, Paper Number FIP/P8-29.

6. **Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е.** Техническая термодинамика. — М.: Изд-во МЭИ, 2008.
7. **Kovari M., Harrington C., Jenkins I., Kiely C.** Converting energy from fusion into useful forms. — *J. Power and Energy, Proc IMechE Part A*, 2013, vol. 228(3), p. 234—240.
8. **Ralph W.** Moir Chapter 5: Direct Energy Conversion in Fusion Reactors. — In: *Energy Technology Handbook*, 1977, p. 5-150—5-154.
9. **Харитонов В.В., Кокорев Л.С.** Прямое преобразование энергии и термоядерные энергетические установки. Учебное пособие. — М.: Атомиздат, 1980.
10. **Miley G.H.** Fusion energy conversion. — American Nuclear Society, 1976.
11. **Саврухин П.В., Кутеев Б.В., Зимин А.М., Шестаков Е.А.** Концептуальные разработки систем дистанционно-го обслуживания ТИН. — В сб.: *Всероссийский семинар по физическим и техническим аспектам объемного источника нейтронов для материаловедческих, технологических исследований и решения задач ядерной энергетики*. Звенигород, 2012, с. 66—67.
12. **Shestakov E.A., Savrukhin P.V., Ershova M.I., Khramenkov A.V.** Generation of runaway electrons during the initial stage of the T-10 tokamak plasma discharge. — *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 1094 p. 012004; <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1094/1/012004>.
13. **Хрипунов В.И.** Оценка источников и полей излучения на установке Т-15МД. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2020, т. 43, вып. 1, с. 9—38; doi:10.21517/0202-3822-2020-43-1-9-38.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С осуществлением энергетического пуска в 2023 г. и началом проведения плазменных экспериментов токамак Т-15МД стал в ряд современных установок, построенных в мире за прошедшие 3—5 лет. Сравнение параметров токамака Т-15МД с параметрами этих установок приведено в таблице.

Сравнительные характеристики отечественных и зарубежных токамаков

Параметр	Т-15МД	Глобус-М2	HL-2М, Китай	КТМ, Казахстан	JT-60SA, Япония
Ток плазмы I_p , МА	2	0,5	3,0	0,75	5,5
Аспектное отношение	2,2	1,5	2,73	2	2,5
Большой радиус R_0 , м	1,47	0,36	1,78	0,9	2,96
Малый радиус a , м	0,67	0,24	0,65	0,45	1,18
Вытянутость, k_{95}	1,7—1,9	2	1,8	1,7	1,93
Треугольность, δ_{95}	0,3—0,4	0,5		0,1—0,2	0,5
Тороидальное магнитное поле B_T , Тл	2,0	1,0	2,2	1,0	2,25
Длительность плато тока $\Delta t_{\text{плато}}$, с	5—10	0,4	3	4	100
Мощность доп. нагрева, МВт	24	3	25	7	41
ЭЦР	8				7
НИ (Р — полож. ионы, N — отр. ионы)	6 (Р)	2 (Р)			24 (Р)
НГ	4	0,5			10 (N)
ИЦР	6	0,5		7	
Магнитная конфигурация	Лимитерная, SN	SN, DN	SN	SN	SN, DN
$P_{\text{доп}}/V_{\text{пл}}$, МВт/м ³	1,94	7,33	1,87	1,43	1,54
Рабочий газ	Н (He)	D	Н, D	Н, D	Н, D

Отличительной особенностью токамака Т-15МД по сравнению с другими компактными токамаками является достаточно высокая величина тороидального поля 2 Тл при низком аспектном отношении 2,2. Высокие значения β (отношение газокINETического давления к давлению магнитного поля) позволят получать более интенсивные потоки термоядерных нейтронов в токамаках. По удельной мощности дополнительного нагрева плазмы (параметр $P_{\text{доп}}/V_{\text{пл}}$, МВт/м³) токамак Т-15МД, по крайней мере, не уступает своим зарубежным аналогам.

Программа физических исследований на токамаке Т-15МД будет направлена на получение высокотемпературной плазмы с улучшенным удержанием энергии и на отработку технологий взаимодействия пучка быстрых атомов с плазмой, приводящего к интенсивной генерации нейтронов в разрядах длительностью до сотен секунд.

Основными результатами работы Т-15МД станут получение и исследование плазмы с горячей ионной компонентой, включающие:

- отработку методов мощного нагрева ионной компоненты плазмы и условий, обеспечивающих эффективную работу систем нагрева ионов для создания ТИН — будущих термоядерных источников нейтронов гибридных реакторов;

- отработку технологий получения двухкомпонентной плазмы — генератора нейтронов будущих термоядерных источников нейтронов гибридных реакторов в разрядах длительностью до сотен секунд;

- получение исчерпывающих данных о физике турбулентного переноса тепла и частиц в плазме токамака, создание моделей, описывающих турбулентный перенос плазмы, отработку методов управления величинами турбулентного переноса;

— реализацию разрядов токамака с максимальными величинами β_N и τ_E (advanced-режимов) на основе понимания физики аномального переноса;

— разработку автоматических систем магнитного и кинетического управления плазмой для получения длительных высокоэнергетических разрядов с реакторными параметрами.

Для достижения длительности плазменных разрядов в сотни секунд будет решена проблема удаления примесей со стенок вакуумной камеры в процессе эрозии её компонентов, контактирующих с плазмой, в частности, путём покрытия поверхности камеры литием, одновременно снизив локальные тепловые нагрузки на элементы разрядной камеры.

Современный диагностический комплекс, по своим возможностям не уступающий, а в ряде случаев и превосходящий лучшие аналоги зарубежных лабораторий, позволит получать информацию о плазме, недоступную ранее другим установкам. Результатом проведённых физических исследований на токамаке Т-15МД станут физическая и технологическая базы данных в обоснование создания стационарных термоядерных реакторов и перспективных гибридных систем на основе токамаков.

Согласно принятым комиссией Росатома решениям, следующим этапом Программы по созданию гибридного реактора с учётом современной физической и технологической базы данных должно стать создание демонстрационного D—T-реактора ТИН-1 с уровнем квазистационарной нейтронной нагрузки на первую стенку 0,1—0,3 МВт/м² [1], которая была бы достаточна для испытания размещённых в нём тестовых модулей ядерных бланкетов (солевого ториевого, переработки минорных актинидов) — прототипов аналогичных модулей, предназначенных для гибридного D—T-реактора. Такой установкой в перспективе может стать разрабатываемый в настоящее время токамак реакторных технологий ТРТ, а также модернизированный токамак Т-15МД с увеличенными значениями тороидального магнитного поля до 3 Тл и аспектного отношения до 2,5. При мощности инжекции быстрых атомов 20 МВт и энергии пучков 110—130 кэВ нейтронный выход мог бы достигать 10 МВт [2]. ТИН-1 на базе модернизированного токамака Т-15МД может быть построен к 2035 г.

Завершающим этапом Программы должно стать создание гибридного реактора ДЕМО промышленного масштаба (ТИН-2) со средней нейтронной нагрузкой на уровне 0,3—0,4 МВт/м², позволяющего производить в год ядерное топливо на уровне его потребления одним-двумя реакторами ВВЭР-1000. К середине нынешнего столетия строительство и ввод в эксплуатацию гибридного реактора ДЕМО могли бы быть осуществлены.

Токамак Т-15МД будет единственной установкой с современной магнитной конфигурацией плазмы, работающей в России в течение ближайших 10—15 лет. Этот проект станет центром исследований по программе УТС, объединяющим научный и технический потенциал различных коллективов страны. Исследования на токамаке Т-15МД станут логичным продолжением пионерских работ по физике токамаков, проводившихся в Курчатовском институте более полувека, и обеспечат подготовку научных и инженерных кадров для реализации проектов по созданию стационарных термоядерных реакторов и перспективных гибридных систем на основе токамаков в нашей стране.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Выводы Комиссии** Росатома по выбору путей оптимального развития термоядерной энергетики России на основе токамаков. — М., ГК «Росатом», 2009.
2. **Азизов Э.А., Минеев А.Б.** О пределах компактности нейтронных источников на основе токамака. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2012, т. 35, вып. 2, с. 5—20.

Работа проведена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Статья поступила в редакцию 01 августа 2024 г.

После доработки 25 октября 2024 г.

Принята к публикации 31 октября 2024 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып. 4, с. 9—183.

**ПЕРЕЧЕНЬ АВТОРОВ И НАЗВАНИЯ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ
В ВАНТ. СЕР. ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ, 2024, т. 47**

А

Абед Н. (см. Куркучеков В.В.)	2024, вып. 2, с. 73
Айрапетов А.А. (см. Беграмбеков Л.Б.)	2024, вып. 1, с. 54
Алябьев И.А., Цыбенко В.Ю., Позняк И.М., Бирюлин Е.З., Новоселова З.И., Федулаев Е.Д., Путрик А.Б. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СЛОЯ В УСЛОВИЯХ, ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИТЭР	2024, вып. 1, с. 76
Алябьев И.А. (см. Позняк И.М.)	2024, вып. 1, с. 99
Анашкин И.О. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Анашкин И.О. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Андреев В.Ф. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Андреев В.Ф. (см. Сычуглов Д.Ю.)	2024, вып. 3, с. 5
Аникин А.С., Семенов А.А., Лизунов А.В., Розенкевич М.Б., Родионов Н.Б., Хайров А.Р., Рудов А.В., Кондрашов В.Н. СИСТЕМА ТРИТИЕВОГО ЦИКЛА ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ	2024, вып. 2, с. 31
Аракчеев А.С. (см. Шошин А.А.)	2024, вып. 1, с. 65
Асадулин Г.М. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Асадулин Г.М. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Ахметов Э.Р. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5

Б

Багрянский П.А. (см. Коваленко Ю.В.)	2024, вып. 2, с. 23
Бажин М.А. (см. Обрезков О.И.)	2024, вып. 2, с. 98
Бакланов В.В. (см. Батырбеков Э.Г.)	2024, вып. 2, с. 15
Балаш И.И. (см. Шошин А.А.)	2024, вып. 1, с. 65
Балашов А.Ю. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Баркалов Е.Е. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Баркалов К.Е. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Барсук В.А. (см. Позняк И.М.)	2024, вып. 1, с. 99
Барсук В.А. (см. Топорков Д.А.)	2024, вып. 2, с. 66
Батырбеков Э.Г., Тажибаева И.Л., Бакланов В.В., Чектыбаев Б.Ж., Зарва Д.Б., Коянбаев Е.Т., Гордиенко Ю.Н., Кульсартов Т.В., Миниязов А.Ж., Понкратов Ю.В. ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН	
Бегишев Р.А. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Беграмбеков Л.Б., Айрапетов А.А., Грунин А.В., Довганюк С.С., Садовский Я.А. КАРБИД БОРА КАК ЗАЩИТНЫЙ МАТЕРИАЛ КОНТАКТИРУЮЩИХ С ПЛАЗМОЙ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАЗМЕННЫХ И ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК	2024, вып. 1, с. 54
Белов А.М. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Белов А.М. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Бельбас И.С. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Бирюлин Е.З. (см. Алябьев И.А.)	2024, вып. 1, с. 76
Бирюлин Е.З. (см. Позняк И.М.)	2024, вып. 1, с. 99
Бобров С.В. (см. Пискарев П.Ю.)	2024, вып. 1, с. 111
Бобров С.В. (см. Пискарев П.Ю.)	2024, вып. 1, с. 122
Бондарчук Э.Н. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Бондаренко Г.Г. (см. Боровицкая И.В.)	2024, вып. 3, с. 79

- Боровицкая И.В.**, Пименов В.Н., Коршунов С.Н., Мансурова А.Н., Масляев С.А., Демин А.С., Морозов Е.В., Епифанов Н.А., Михайлова А.Б., Латышев С.В., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И., Матвеев Е.В., Монахов И.С. ПОВРЕЖДЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВОЛЬФРАМА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СТАЦИОНАРНЫМИ ИОННЫМИ И ИМПУЛЬСНЫМИ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ ГЕЛИЯ 2024, вып. 3, с. 79
- Борщеговский А.А** (см. [Велихов Е.П.](#)) 2024, вып. 2, с. 9
- Борщеговский А.А** (см. [Велихов Е.П.](#)) 2024, вып. 4, с. 9
- Будаев В.П.**, Федорович С.Д., Дедов А.В., Кавыршин Д.И., Карпов А.В., Лукашевский М.В., Захаренков А.В., Губкин М.В., Чан К.В., Рогозин К.А., Коньков А.А., Губанова А.И. ИСПЫТАНИЯ ВОЛЬФРАМОВОЙ ОБЛИЦОВКИ ДИВЕРТОРА В ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКЕ ПЛМ 2024, вып. 2, с. 49
- Будаев В.П.** (см. [Велихов Е.П.](#)) 2024, вып. 4, с. 9
- Букатин Т.Н.** (см. Пискарев П.Ю.) 2024, вып. 1, с. 111
- Бурдаков А.В.** (см. Шошин А.А.) 2024, вып. 1, с. 65
- Бурдаков А.В.** (см. Черепанов Д.Е.) 2024, вып. 1, с. 89
- Бурмистров Д.А.** (см. Топорков Д.А.) 2024, вып. 2, с. 66
- Бурмистров Д.А.** (см. Лиджигорьяев С.Д.) 2024, вып. 2, с. 58
- В**
- Васильев А.А.** (см. Шошин А.А.) 2024, вып. 1, с. 65
- Велихов Е.П.**, Ковальчук М.В., Анашкин И.О., Андреев В.Ф., Асадулин Г.М., Ахметов Э.Р., Балашов А.Ю., Бегишев Р.А., Белов А.М., Бельбас И.С., Бондарчук Э.Н., Борщеговский А.А., Вершков В.А., Горбунов А.В., Горшков А.В., Грашин С.А., Громова А.В., Диас Михайлова Д.Е., Дрёмин М.М., Дрозд А.С., Дубиницкий А.Ф., Земцов И.А., Ильгисонис В.И., Ильин И.С., Карпов А.В., Качкин А.Г., Кирнева Н.А., Кислов Д.А., Кочин В.А., Крупин В.А., Кузнецова Л.К., Левин И.В., Лисовой П.Д., Лутченко А.В., Матвеев Ю.В., Машункин М.В., Минеев А.Б., Модяев А.Л., Мустафин Н.А., Мялтон Т.Б., Немец А.Р., Николаев А.В., Новиков В.Н., Ноткин Г.Е., Нургалиев М.Р., Образцов И.С., Панфилов Д.С., Пименов И.С., Рогозин К.А., Рой И.Н., Романников А.Н., Рыжаков Д.В., Саврухин П.В., Сарычев Д.В., Сергеев Д.С., Смирнов В.В., Соловьёв Н.А., Степин А.В., Сушков А.В., Сычугов Д.Ю., Тарасян К.Н., Тепикин В.И., Толпегина Ю.И., Уласевич Д.Л., Хайрутдинов Э.Н., Хвостенко А.П., Хвостенко П.П., Чудеснов А.И., Чудновский А.Н., Шелухин Д.А., Шестаков Е.А. и коллектив установки Т-15МД. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НА ТОКАМАКЕ Т-15М 2024, вып. 2, с. 5
- Велихов Е.П.**, Ковальчук М.В., Анашкин И.О., Асадулин Г.М., Баркалов Е.Е., Баркалов К.Е., Белов А.М., Борщеговский А.А., Будаев В.П., Вершков В.А., Горбунов А.В., Готт Ю.В., Грашин С.А., Губин А.М., Гусаков Е.З., Длугач Е.Д., Драбинский М.А., Дьяченко В.В., Ирзак М.А., Карпов А.В., Качкин А.Г., Кирнева Н.А., Кислов Д.А., Коновалов С.В., Крупин В.А., Кузнецова Л.К., Кутев Б.В., Лукаш В.Э., Лутченко А.В., Маренков Е.Д., Мельников А.В., Минеев А.Б., Мустафин Н.А., Немец А.Р., Неудачин С.В., Ноткин Г.Е., Нургалиев М.Р., Образцов И.С., Панасенков А.А., Пименов И.С., Пшенов А.А., Рой И.Н., Рыжаков Д.В., Саврухин П.В., Сарычев Д.В., Сергеев Д.С., Соловьёв Н.А., Сушков А.В., Толпегина Ю.И., Трошин Г.А., Хайрутдинов Р.Р., Хайрутдинов Э.Н., Хвостенко А.П., Хвостенко П.П., Хрипунов В.И., Черненко А.С., Шелухин Д.А., Шестаков Е.А. ПРОГРАММА ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД. 2024, вып. 4, с. 9

Вертков А.В. (см. Писарев А.А.)	2024, вып. 1, с. 15
Вершков В.А. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Вершков В.А. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9
Волошинов В.В. (см. Курские Г.С.)	2024, вып. 3, с. 36
Воронов А.С., Гладуш Г.Г., Рудов А.В. КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ	2024, вып. 2, с. 40
Вячеславов Л.Н. (см. Черепанов Д.Е.)	2024, вып. 1, с. 89
Г	
Гаврилов В.В. (см. Топорков Д.А.)	2024, вып. 2, с. 66
Гаврилов В.В. (см. Лиджигоряев С.Д.)	2024, вып. 2, с. 58
Гайдар А.И. (см. Боровицкая И.В.)	2024, вып. 3, с. 79
Гаспарян Ю.М., Крат С.А. ВЛИЯНИЕ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА ОБЛИЦОВКИ СТЕНОК ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК НА НАКОПЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА	2024, вып. 1, с. 5
Гаспарян Ю.М. (см. Хуснутдинов Р.И.)	2024, вып. 3, с. 108
Герваш А.А. (см. Пискарев П.Ю.)	2024, вып. 1, с. 122
Гладуш Г.Г. (см. Воронов А.С.)	2024, вып. 2, с. 40
Глазунов Д.А. (см. Пискарев П.Ю.)	2024, вып. 1, с. 122
Горбунов А.В. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Горбунов А.В. (см. Сычугов Д.Ю.)	2024, вып. 3, с. 5
Горбунов А.В. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9
Гордиенко Ю.Н. (см. Батырбеков Э.Г.)	2024, вып. 2, с. 15
Горшков А.В. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Готт Ю.В. TOREQ — КОД ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ГРЭДА—ШАФРАНОВА В ПЛАЗМЕ С ФИКСИРОВАННОЙ ГРАНИЦЕЙ	2024, вып. 3, с. 108
Готт Ю.В. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9
Грашин С.А. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Грашин С.А. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9
Гриняев К.В. (Смирнов И.В.)	2024, вып. 2, с. 80
Громова А.В. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Грунин А.В. (см. Беграмбеков Л.Б.)	2024, вып. 1, с. 54
Губанова А.И. (см. Будаев В.П.)	2024, вып. 2, с. 49
Губин А.М. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9
Губкин М.В. (см. Будаев В.П.)	2024, вып. 2, с. 49
Гурьев В.В., Куликов И.В., Шавкин С.В. АНИЗОТРОПИЯ КРИТИЧЕСКОГО ТОКА ТЕХНИЧЕСКИХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ: МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ	2024, вып. 3, с. 93
Гусаков Е.З. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9
Д	
Дедов А.В. (см. Будаев В.П.)	2024, вып. 2, с. 49
Демин А.С. (см. Боровицкая И.В.)	2024, вып. 3, с. 79
Дерябина Н.А., Кутеев Б.В., Пашков А.Ю., Шпанский Ю.С. О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СПЛАВА РЬ—Ві В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЯР	2024, вып. 2, с. 92
Диас Михайлова Д.Е. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Дитенберг И.А. (см. Смирнов И.В.)	2024, вып. 2, с. 80
Довганюк С.С. (см. Беграмбеков Л.Б.)	2024, вып. 1, с. 54
Длугач Е.Д. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9
Драбинский М.А. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9
Дрёмин М.М. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5

Дрозд А.С. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Дрозд А.С. (см. Саранча Г.А.)	2024, вып. 3, с. 25
Дубиницкий А.Ф. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Душик В.В. (см. Пискарев П.Ю.)	2024, вып. 1, с. 111
Дьяченко В.В. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Е	
Епифанов Н.А. (см. Боровицкая И.В.)	2024, вып. 3, с. 79
Ефимов Н.Е. (см. Хуснутдинов Р.И.)	2024, вып. 3, с. 108
Ж	
Жарков М.Ю. (см. Писарев А.А.)	2024, вып. 1, с. 15
Жильцов Н.С. (см. Курский Г.С.)	2024, вып. 3, с. 25
З	
Зарва Д.Б. (см. Батырбеков Э.Г.)	2024, вып. 2, с. 15
Зарва Д.Б. (см. Коренев П.С.)	2024, вып. 3, с. 49
Захаренков А.В. (см. Будаев В.П.)	2024, вып. 2, с. 49
Земцов И.А. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Зубарев П.В. (см. Коваленко Ю.В.)	2024, вып. 2, с. 23
И	
Иваненко С.В. (см. Коваленко Ю.В.)	2024, вып. 2, с. 23
Иванов А.В. (см. Куркучеков В.В.)	2024, вып. 2, с. 73
Иванов И.А. (см. Шошин А.А.)	2024, вып. 1, с. 65
Ильгисонис В.И. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Ильин И.С. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Ирзак М.А. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
К	
Кавыршин Д.И. (см. Будаев В.П.)	2024, вып. 2, с. 49
Казанцев С.Р. (см. Шошин А.А.)	2024, вып. 1, с. 65
Казанцев С.Р. (см. Черепанов Д.Е.)	2024, вып. 1, с. 89
Кандауров И.В. (см. Шошин А.А.)	2024, вып. 1, с. 65
Кандауров И.В. (см. Черепанов Д.Е.)	2024, вып. 1, с. 89
Кандауров И.В. (см. Куркучеков В.В.)	2024, вып. 2, с. 73
Карелов С.В. (см. Топорков Д.А.)	2024, вып. 2, с. 66
Карпов А.В. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Карпов А.В. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Касатов А.А. (см. Шошин А.А.)	2024, вып. 1, с. 65
Касатов А.А. (см. Черепанов Д.Е.)	2024, вып. 1, с. 89
Качкин А.Г. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Качкин А.Г. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Кирнева Н.А. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Кирнева Н.А. (см. Сычугов Д.Ю.)	2024, вып. 3, с. 5
Кирнева Н.А. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Кислов Д.А. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Кислов Д.А. (см. Сычугов Д.Ю.)	2024, вып. 3, с. 5
Кислов Д.А. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Климов Н.С. (см. Топорков Д.А.)	2024, вып. 2, с. 66
Коваленко Ю.В., Зубарев П.В., Иваненко С.В., Соломахин А.Л., Пурьга Е.А., Багрянский П.А. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДИСПЕРСИОННЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2	2023, вып. 1, с. 86
Ковальчук М.В. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Ковальчук М.В. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9

Колесник М.С. (см. Пискарев П.Ю.)	2024, вып. 1, с. 41
Колесник М.С. (см. Пискарев П.Ю.)	2024, вып. 1, с. 111
Колесник М.С. (см. Рулёв Р.В.)	2024, вып. 3, с. 68
Кондрашов В.Н. (см. Аникин А.С.)	2024, вып. 2, с. 31
Коновалов С.В. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9
Коньков А.А. (см. Будаев В.П.)	2024, вып. 2, с. 49
Коньков А.Е. (см. Коренев П.С.)	2024, вып. 3, с. 49
Коренев П.С., Коньков А.Е., Чектыбаев Б.Ж., Котов С.В., Зарва Д.Б. ОЦЕНКА ОБЛАСТИ УПРАВЛЯЕМОСТИ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ КТМ С КАТУШКОЙ НФС	2024, вып. 3, с. 49
Кортаев А.Д. (см. Смирнов И.В.)	2024, вып. 2, с. 80
Коршунов С.Н. (см. Боровицкая И.В.)	2024, вып. 3, с. 79
Котов С.В. (см. Коренев П.С.)	2024, вып. 3, с. 49
Кочетов С.Н. (см. Обрезков О.И.)	2024, вып. 2, с. 98
Кочин В.А. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Коянбаев Е.Т. (см. Батырбеков Э.Г.)	2024, вып. 2, с. 15
Красильников А.В. (см. Черепанов Д.Е.)	2024, вып. 1, с. 89
Красильников А.В. (см. Пискарев П.Ю.)	2024, вып. 1, с. 111
Крат С.А. (см. Гаспарян Ю.М.)	2024, вып. 1, с. 5
Крупин В.А. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Крупин В.А. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9
Крыжановский А.К. (см. Курскиев Г.С.)	2024, вып. 3, с. 36
Кудашев М.С. (см. Саранча Г.А.)	2024, вып. 3, с. 25
Кузнецов В.Е. (см. Рулёв Р.В.)	2024, вып. 3, с. 68
Кузнецова Л.К. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Кузнецова Л.К. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9
Кузьмин Е.И. (см. Шошин А.А.)	2024, вып. 1, с. 65
Кукушкин А.Б. (см. Курскиев Г.С.)	2024, вып. 3, с. 36
Кукушкин А.Б. (см. Хуснутдинов Р.И.)	2024, вып. 3, с. 108
Кукушкин А.Б. (см. Минашин П.В.)	2024, вып. 3, с. 129
Куликов И.В. (см. Гурьев В.В.)	2024, вып. 3, с. 93
Кульсартов Т.В. (см. Батырбеков Э.Г.)	2024, вып. 2, с. 15
Куркучек В.В., Абед Н., Иванов А.В., Кандауров И.В., Никифоров Д.А. ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ДЛЯ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ	2024, вып. 2, с. 73
Курскиев Г.С., Сдвиженский П.А., Жильцов Н.С., Ткаченко Е.Е., Теплова Н.В., Трошин Г.А., Крыжановский А.К., Кукушкин А.Б., Соколов А.В., Волошинов В.В. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОДОБИЯ ПРОФИЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ НА КВАЗИСТАЦИОНАРНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДОВ В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2	2024, вып. 3, с. 36
Кутеев Б.В. (см. Сергеев В.Ю.)	2024, вып. 1, с. 29
Кутеев Б.В. (см. Пискарев П.Ю.)	2024, вып. 1, с. 111
Кутеев Б.В. (см. Дерябина Н.А.)	2024, вып. 2, с. 92
Кутеев Б.В. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9
Л	
Латышев С.В. (см. Боровицкая И.В.)	2024, вып. 3, с. 79
Левин И.В. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Левичев В.В. (см. Рулёв Р.В.)	2024, вып. 3, с. 68
Лиджигорьяев С.Д. (см. Топорков Д.А.)	2024, вып. 2, с. 66

- Лиджигорьяев С.Д.**, Бурмистров Д.А., Гаврилов В.В., Позняк И.М., Пушина А.В., Топорков Д.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ ПОТОКОВ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА ПОВЕРХНОСТЬ ВОЛЬФРАМОВОЙ МИШЕНИ С ПОМОЩЬЮ ИНФРАКРАСНОЙ ПИРОМЕТРИИ 2024, вып. 2, с. 58
- Лизунов А.В.** (см. Аникин А.С.) 2024, вып. 2, с. 31
- Лисица В.С.** (см. Нагель Н.Н.)
- Лисовой П.Д.** (см. Велихов Е.П.) 2024, вып. 2, с. 5
- Литуновский Н.В.** (см. Пискарев П.Ю.) 2024, вып. 1, с. 41
- Лукаш В.Э.** (см. Велихов Е.П.) 2024, вып. 4, с. 9
- Лукашевский М.В.** (см. Будаев В.П.) 2024, вып. 2, с. 49
- Лутченко А.В.** (см. Велихов Е.П.) 2024, вып. 2, с. 5
- Лутченко А.В.** (см. Велихов Е.П.) 2024, вып. 4, с. 9
- Лянзберг Д.В.** (см. Пискарев П.Ю.) 2024, вып. 1, с. 122
- М**
- Мазуль И.В.** (см. Писарев А.А.) 2024, вып. 1, с. 15
- Мазуль И.В.** (см. Пискарев П.Ю.) 2024, вып. 1, с. 41
- Мазуль И.В.** (см. Пискарев П.Ю.) 2024, вып. 1, с. 111
- Мазуль И.В.** (см. Пискарев П.Ю.) 2024, вып. 1, с. 122
- Мазуль И.В.** (см. Рулёв Р.В.) 2024, вып. 3, с. 68
- Мансурова А.Н.** (см. Боровицкая И.В.) 2024, вып. 3, с. 79
- Маренков Е.Д.** (см. Велихов Е.П.) 2024, вып. 4, с. 9
- Мартыненко Ю.В.** (см. Обрезков О.И.) 2024, вып. 2, с. 98
- Масляев С.А.** (см. Боровицкая И.В.) 2024, вып. 3, с. 79
- Матвеев Е.В.** (см. Боровицкая И.В.) 2024, вып. 3, с. 79
- Матвеев Ю.В.** (см. Велихов Е.П.) 2024, вып. 2, с. 5
- Маханьков А.Н.** (см. Пискарев П.Ю.) 2024, вып. 1, с. 41
- Машункин М.В.** (см. Велихов Е.П.) 2024, вып. 2, с. 5
- Мельников А.В.** (см. Велихов Е.П.) 2024, вып. 4, с. 9
- Минаев В.Б.** (см. Обрезков О.И.) 2024, вып. 2, с. 98
- Минашин П.В.**, Филипенко Д.Р., Кукушкин А.Б. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ИНЖЕКТИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАЗМЕ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА В ТОКАМАКАХ 2024, вып. 3, с. 129
- Минеев А.Б.** (см. Велихов Е.П.) 2024, вып. 2, с. 5
- Минеев А.Б.** (см. Велихов Е.П.) 2024, вып. 4, с. 9
- Миниязов А.Ж.** (см. Батырбеков Э.Г.) 2024, вып. 2, с. 15
- Михайлова А.Б.** (см. Боровицкая И.В.) 2024, вып. 3, с. 79
- Мищенко А.Б.** (см. Обрезков О.И.) 2024, вып. 2, с. 98
- Мисников В.Е.** (см. Обрезков О.И.) 2024, вып. 2, с. 98
- Модяев А.Л.** (см. Велихов Е.П.) 2024, вып. 2, с. 5
- Монахов И.С.** (см. Боровицкая И.В.) 2024, вып. 3, с. 79
- Монтак Н.В.** (см. Пискарев П.Ю.) 2024, вып. 1, с. 111
- Морозов Е.В.** (см. Боровицкая И.В.) 2024, вып. 3, с. 79
- Мустафин Н.А.** (см. Велихов Е.П.) 2024, вып. 2, с. 5
- Мустафин Н.А.** (см. Велихов Е.П.) 2024, вып. 4, с. 9
- Мялтон Т.Б.** (см. Велихов Е.П.) 2024, вып. 2, с. 5
- Н**
- Нагель М.Ю.** (см. Обрезков О.И.) 2024, вып. 2, с. 98
- Нагель Н.Н.**, Лисица В.С., Шурыгин В.А. АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЗАРЯДОВОЙ КИНЕТИКИ ГЕЛИЯ В НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЕ ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА В LHD 2024, вып. 3, с. 60

Немец А.Р. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Немец А.Р. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9
Неудачин С.В. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9
Никитин И.А. (см. Хуснутдинов Р.И.)	2024, вып. 3, с. 108
Никифоров Д.А. (см. Куркучеков В.В.)	2024, вып. 2, с. 73
Николаев А.В. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Новиков В.Н. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Новоселова З.И. (см. Алябьев И.А.)	2024, вып. 1, с. 76
Новоселова З.И. (см. Позняк И.М.)	2024, вып. 1, с. 99
Ноткин Г.Е. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Ноткин Г.Е. (см. Сычугов Д.Ю.)	2024, вып. 3, с. 5
Ноткин Г.Е. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9
Нургалиев М.Р. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Нургалиев М.Р. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9

О

Образцов И.С. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Образцов И.С. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9
Обрезков О.И. , Мартыненко Ю.В., Нагель М.Ю., Шутьев О.Л., Шевчук С.Л., Рукина Ю.И., Мисников В.Е., Кочетов С.Н., Бажин М.А., Минаев Д.И., Мищенко А.Б., Чурина Т.В. МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ПЛЁНОК, ОСАЖДАЕМЫХ ПУТЁМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ	2024, вып. 2, с. 98
Огурский А.Ю. (см. Пискарев П.Ю.)	2024, вып. 1, с. 122
Окунева Е.В. (см. Пискарев П.Ю.)	2024, вып. 1, с. 41
Окунева Е.В. (см. Пискарев П.Ю.)	2024, вып. 1, с. 122
Осипов Д.А. (см. Смирнов И.В.)	2024, вып. 2, с. 80

П

Панасенков А.А. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9
Пантелеев М.А. (см. Пискарев П.Ю.)	2024, вып. 1, с. 122
Панфилов Д.С. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Пашков А.Ю. (см. Дерябина Н.А.)	2024, вып. 2, с. 92
Пименов В.Н. (см. Боровицкая И.В.)	2024, вып. 3, с. 79
Пименов И.С. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Пименов И.С. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9
Пинжин Ю.П. (см. Смирнов И.В.)	2024, вып. 2, с. 80
Писарев А.А. , Вертков А.В., Жарков М.Ю., Мазуль И.В., Пискарев П.Ю., Тарасюк Г.М. ТЕКУЩИЙ ЖИДКИЙ ЛИТИЙ КАК МАТЕРИАЛ, ОБРАЩЁННЫЙ К ПЛАЗМЕ	2024, вып. 1, с. 15
Писарев А.А. (см. Пискарев П.Ю.)	2024, вып. 1, с. 111
Пискарев П.Ю. (см. Писарев А.А.)	2024, вып. 1, с. 15
Пискарев П.Ю. , Мазуль И.В., Маханьков А.Н., Колесник М.С., Окунева Е.В., Литунковский Н.В. КОМПОНЕНТЫ, ОБРАЩЁННЫЕ К ПЛАЗМЕ, В ПРОЕКТЕ ТРТ: КОНСТРУКЦИЯ, МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ	2023, вып. 2, с. 63
Пискарев П.Ю. , Рулев Р.В., Мазуль И.В., Красильников А.В., Писарев А.А., Кутев Б.В., Колесник М.С., Душик В.В., Бобров С.В., Монтак Н.В., Рыбиков А.А., Букатин Т.Н. ПОКРЫТИЯ НА ОБРАЩЁННОЙ К ПЛАЗМЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ: АНАЛИЗ И ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ НА СТЕНДЕ «ЦЕФЕЙ-М»	2024, вып. 1, с. 111
Пискарев П.Ю. , Герваш А.А., Огурский А.Ю., Глазунов Д.А., Бобров С.В., Мазуль И.В., Рулёв Р.В., Окунева Е.В., Рузанов В.В., Лянзберг Д.В., Путрик А.Б., Пантелеев М.А. ТЕХНОЛОГИЯ ВАКУУМНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ПАЙКИ	2024, вып. 1, с. 122

ОБЛИЦОВКИ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПАНЕЛЕЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ИТЭР

Пискарёв П.Ю. (см. Рулёв Р.В.)	2024, вып. 3, с. 68
Подковыров В.Л. (см. Позняк И.М.)	2024, вып. 1, с. 99
Позняк И.М. (см. Алябьев И.А.)	2024, вып. 1, с. 76
Позняк И.М., Алябьев И.А., Подковыров В.Л., Барсук В.А., Цыбенко В.Ю., Би-рюлин Е.З., Федулаев Е.Д., Новоселова З.И. ПОВЕДЕНИЕ ВОЛЬФРАМА С ПОКРЫТИЕМ ИЗ КАРБИДА БОРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ	2024, вып. 1, с. 99
Позняк И.М. (см. Лиджигорьев С.Д.)	2024, вып. 2, с. 58
Полосаткин С.В. (см. Шошин А.А.)	2024, вып. 1, с. 65
Понкратов Ю.В. (см. Батырбеков Э.Г.)	2024, вып. 2, с. 15
Попов В.А. (см. Шошин А.А.)	2024, вып. 1, с. 65
Попов В.А. (см. Черепанов Д.Е.)	2024, вып. 1, с. 89
Потапенко М.М. (см. Смирнов И.В.)	2024, вып. 2, с. 80
Пурьга Е.А. (см. Коваленко Ю.В.)	2024, вып. 2, с. 23
Путрик А.Б. (см. Алябьев И.А.)	2024, вып. 1, с. 76
Путрик А.Б. (см. Пискарев П.Ю.)	2024, вып. 1, с. 122
Пушина А.В. (см. Топорков Д.А.)	2024, вып. 2, с. 66
Пушина А.В. (см. Лиджигорьев С.Д.)	2024, вып. 2, с. 58
Пшенов А.А. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9

Р

Рогозин К.А. (см. Будаев В.П.)	2024, вып. 2, с. 49
Рогозин К.А. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Родионов Н.Б. (см. Аникин А.С.)	2024, вып. 2, с. 31
Розенкевич М.Б. (см. Аникин А.С.)	2024, вып. 2, с. 31
Рой И.Н. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Рой И.Н. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9
Романников А.Н. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Рудов А.В. (см. Воронов А.С.)	2024, вып. 2, с. 40
Рудов А.В. (см. Аникин А.С.)	2024, вып. 2, с. 31
Рузанов В.В. (см. Пискарев П.Ю.)	2024, вып. 1, с. 122
Рузанов В.В. (см. Рулёв Р.В.)	2024, вып. 3, с. 68
Рукина Ю.И. (см. Обрезков О.И.)	2024, вып. 2, с. 98
Рулёв Р.В. (см. Пискарев П.Ю.)	2024, вып. 1, с. 111
Рулёв Р.В. (см. Пискарев П.Ю.)	2024, вып. 1, с. 122
Рулёв Р.В., Мазуль И.В., Пискарев П.Ю., Кузнецов В.Е., Левичев В.В., Колесник М.С., Рузанов В.В., Танчук В.Н. ТЕПЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ МИШЕНИ ДИВЕРТОРА ПРИ ИМИТИРОВАНИИ КАЧАНИЯ СЕПАРАТРИСЫ	2024, вып. 3, с. 68
Рыбиков А.А. (см. Пискарев П.Ю.)	2024, вып. 1, с. 111
Рыжков Г.А. (см. Шошин А.А.)	2024, вып. 1, с. 65
Рыжков Г.А. (см. Черепанов Д.Е.)	2024, вып. 1, с. 89
Рыжаков Д.В. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Рыжаков Д.В. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 9
Рыжаков Д.В. (см. Сычугуов Д.Ю.)	2024, вып. 3, с. 5

С

Саврухин П.В. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 2, с. 5
Саврухин П.В. (см. <u>Велихов Е.П.</u>)	2024, вып. 4, с. 5
Саврухин П.В., Шестаков Е.А., Тепикин В.И. СИСТЕМА ГЕНЕРАЦИИ ВНЕШНИХ РЕЗОНАНСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ТОКАМАКЕ T-15MD	2024, вып. 3, с. 17

Садовский Я.А. (см. Беграмбеков Л.Б.)	2024, вып. 1, с. 54
Саранча Г.А., Дрозд А.С., Кудашев М.С., Сергеев Д.С. КОНЦЕПЦИЯ ОПТОВО-ЛОКОННОГО ДАТЧИКА ТОКА ДЛЯ ТОКАМАКА T-15МД	2024, вып. 3, с. 25
Сарычев Д.В. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Сарычев Д.В. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Сдвиженский П.А. (см. Курскиев Г.С.)	2024, вып. 3, с. 36
Семенов А.А. (см. Аникин А.С.)	2024, вып. 2, с. 31
Сергеев В.Ю., Скоков В.Г., Кутеев Б.В., Тимохин В.М. КОНЦЕПЦИЯ ЗАМКНУТОГО ЛИТИЕВОГО ЦИКЛА В УСТАНОВКЕ ДЕМО-ТИН С СЕКЦИОНИРОВАННЫМ ДИВЕРТОРОМ	2024, вып. 1, с. 29
Сергеев Д.С. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Сергеев Д.С. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Сергеев Д.С. (см. Саранча Г.А.)	2024, вып. 3, с. 25
Скоков В.Г. (см. Сергеев В.Ю.)	2024, вып. 1, с. 29
Смирнов В.В. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Смирнов И.В., Дитенберг И.А., Гриняев К.В., Тюменцев А.Н., Пинжин Ю.П., Осипов Д.А., Коротаев А.Д., Чернов В.М., Потапенко М.М. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГОВ НА ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ И МИКРОТВЁРДОСТЬ КАРБИДНОУПРОЧНЁННОГО СПЛАВА V—CR—W—ZR	2024, вып. 2, с. 80
Соколов А.В. (см. Курскиев Г.С.)	2024, вып. 3, с. 36
Соловьёв Н.А. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Соловьёв Н.А. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Соломахин А.Л. (см. Коваленко Ю.В.)	2024, вып. 2, с. 23
Степин А.В. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Сушков А.В. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Сушков А.В. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Сушков А.В. (см. Сычугов Д.Ю.)	2024, вып. 3, с. 5
Сычугов Д.Ю. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Сычугов Д.Ю., Рыжаков Д.В., Андреев В.Ф., Горбунов А.В., Кирнева Н.А., Кислов Д.А., Ноткин Г.Е., Сушков А.В., Тарасян К.Н., Шелухин Д.А., Хайрутдинов Э.Н. МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ РАВНОВЕСНЫХ МАГНИТНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ ДЛЯ ПЕРВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА УСТАНОВКЕ ТОКАМАК T-15МД	2024, вып. 3, с. 5
Т	
Тажигаева И.Л. (см. Батырбеков Э.Г.)	2024, вып. 2, с. 15
Танчук В.Н. (см. Рулёв Р.В.)	2024, вып. 3, с. 68
Тарасюк Г.М. (см. Писарев А.А.)	2024, вып. 1, с. 15
Тарасян К.Н. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Тарасян К.Н. (см. Сычугов Д.Ю.)	2024, вып. 3, с. 5
Тепикин В.И. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Тепикин В.И. (см. Саврухин П.В.)	2024, вып. 3, с. 17
Теплова Н.В. (см. Курскиев Г.С.)	2024, вып. 3, с. 36
Тимохин В.М. (см. Сергеев В.Ю.)	2024, вып. 1, с. 29
Ткаченко Е.Е. (см. Курскиев Г.С.)	2024, вып. 3, с. 36
Толпегина Ю.И. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Толпегина Ю.И. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Топорков Д.А., Бурмистров Д.А., Барсук В.А., Гаврилов В.В., Карелов С.В., Климов Н.С., Лиджигоряев С.Д., Пушина А.В. ЭФФЕКТ ЭКРАНИРОВКИ ВОЛЬФРАМА ВИСМУТОМ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МОЩНОГО ПОТОКА ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ	2024, вып. 2, с. 66
Топорков Д.А. (см. Лиджигоряев С.Д.)	2024, вып. 2, с. 58
Трошин Г.А. (см. Курскиев Г.С.)	2024, вып. 3, с. 36

Трошин Г.А. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Тюменцев А.Н. (см. Смирнов И.В.)	2024, вып. 2, с. 80
У	2024, вып. 2, с. 5
Уласевич Д.Л. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Ф	
Федорович С.Д. (см. Будаев В.П.)	2024, вып. 2, с. 49
Федулаев Е.Д. (см. Алябьев И.А.)	2024, вып. 1, с. 76
Федулаев Е.Д. (см. Позняк И.М.)	2024, вып. 1, с. 99
Филипенко Д.Р. (см. Минашин П.В.)	2024, вып. 3, с. 129
Х	
Хайров А.Р. (см. Аникин А.С.)	2024, вып. 2, с. 31
Хайрутдинов Р.Р. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Хайрутдинов Э.Н. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Хайрутдинов Э.Н. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Хайрутдинов Э.Н. (см. Сычугов Д.Ю.)	2024, вып. 3, с. 5
Хвостенко А.П. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Хвостенко А.П. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Хвостенко П.П. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Хвостенко П.П. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Хрипунов В.И. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Хуснутдинов Р.И. , Ефимов Н.Е., Никитин И.А., Гаспарян Ю.М., Кукушкин А.Б. МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ РАСПЫЛЕНИЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКА- МАКА АТОМАМИ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ	2024, вып. 3, с. 108
Ц	
Цыбенко В.Ю. (см. Алябьев И.А.,)	2024, вып. 1, с. 76
Цыбенко В.Ю. (см. Позняк И.М.)	2024, вып. 1, с. 99
Ч	
Чан К.В. (см. Будаев В.П.)	2024, вып. 2, с. 49
Чектыбаев Б.Ж. (см. Батырбеков Э.Г.)	2024, вып. 2, с. 15
Чектыбаев Б.Ж. (см. Коренев П.С.)	2024, вып. 3, с. 49
Черепанов Д.Е. (см. Шошин А.А.)	2024, вып. 1, с. 65
Черепанов Д.Е. , Бурдаков А.В., Вячеславов Л.Н., Казанцев С.Р., Кандауров И.В., Касатов А.А., Красильников А.В., Попов В.А., Рыжков Г.А., Шошин А.А. ИСПЫТАНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ КАРБИДА БОРА ИМПУЛЬСНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКОЙ, ВОЗМОЖНОЙ В ДИВЕРТОРНОЙ ЗОНЕ ТОКАМАКА ИТЭР	2024, вып. 1, с. 89
Черненко А.С. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Чернов В.М. (см. Смирнов И.В.)	2024, вып. 2, с. 80
Чудеснов А.И. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Чудновский А.Н. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Чурина Т.В. (см. Обрезков О.И.)	2024, вып. 2, с. 98
Ш	
Шавкин С.В. (см. Гурьев В.В.)	2024, вып. 3, с. 93
Шевчук С.Л. (см. Обрезков О.И.)	2024, вып. 2, с. 98
Шелухин Д.А. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Шелухин Д.А. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Шелухин Д.А. (см. Сычугов Д.Ю.)	2024, вып. 3, с. 5
Шестаков Е.А. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 2, с. 5
Шестаков Е.А. (см. Велихов Е.П.)	2024, вып. 4, с. 9
Шестаков Е.А. (см. Саврухин П.В.)	2024, вып. 3, с. 17

- Шошин А.А.**, Бурдаков А.В., Кандауров И.В., Касатов А.А., Казанцев С.Р., Балаш И.И., Попов В.А., Рыжков Г.А., Черепанов Д.Е., Кузьмин Е.И., Полосаткин С.В., Иванов И.А., Аракчеев А.С., Васильев А.А. ОБЗОР РАБОТ В ИЯФ СО РАН ПО ТЕМАТИКЕ ПЛАЗМА—ПОВЕРХНОСТЬ 2024, вып. 1, с. 65
- Шошин А.А.** (см. Черепанов Д.Е.) 2024, вып. 1, с. 89
- Шпанский Ю.С.** (см. Дерябина Н.А.) 2024, вып. 2, с. 92
- Шурыгин В.А.** (см. Нагель Н.Н.) 2024, вып. 3, с. 60
- Шутьев О.Л.** (см. Обрезков О.И.) 2024, вып. 2, с. 98

СОДЕРЖАНИЕ

Памяти Евгения Павловича Велихова.....	5
<u>Велихов Е.П.</u> , Ковальчук М.В., Анашкин И.О., Асадулин Г.М., Баркалов Е.Е., Баркалов К.Е., Белов А.М., Борщеговский А.А., Будаев В.П., Вершков В.А., Горбунов А.В., Готт Ю.В., Грашин С.А., Губин А.М., Гусаков Е.З., Длугач Е.Д., Драбинский М.А., Дьяченко В.В., Ирзак М.А., Карпов А.В., Качкин А.Г., Кирнева Н.А., Кислов Д.А., Коновалов С.В., Крутин В.А., Кузнецова Л.К., Кутеев Б.В., Лукаш В.Э., Лутченко А.В., Маренков Е.Д., Мельников А.В., Минеев А.Б., Мустафин Н.А., Немец А.Р., Неудачин С.В., Ноткин Г.Е., Нургалиев М.Р., Образцов И.С., Панасенков А.А., Пименов И.С., Пшенов А.А., Рой И.Н., Рыжаков Д.В., Саврухин П.В., Сарычев Д.В., Сергеев Д.С., Соловьев Н.А., Сушков А.В., Толтегина Ю.И., Трошин Г.А., Хайрутдинов Р.Р., Хайрутдинов Э.Н., Хвостенко А.П., Хвостенко П.П., Хрипунов В.И., Черненко А.С., Шелухин Д.А., Шестаков Е.А. Программа физических исследований на токамаке Т-15МД.....	9
Перечень и названия статей, опубликованных в ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47.....	184

CONTENT

In memory of Evgeny Pavlovich Velikhov5

Velikhov E.P., Kovalchuk M.V., Anashkin I.O., Asadulin G.M., Barkalov E.E., Barkalov K.E., Belov A.M., Borshchegovsky A.A., Budaev V.P., Vershkov V.A., Gorbunov A.V., Gott Yu.V., Grashin S.A., Gubin A.M., Gusakov E.Z., Dlugach E.D., Drabinsky M.A., Diachenko V.V., Irzak M.A., Karpov A.V., Kachkin A.G., Kirneva N.A., Kislov D.A., Kononov S.V., Krupin V.A., Kuznetsova L.K., Kuteev B.V., Lukash V.E., Lutchenko A.V., Marenkov E.D., Melnikov A.V., Mineev A.B., Mustafin N.A., Nemets A.R., Neudachin S.V., Notkin G.E., Nurgaliev M.R., Obraztsov I.S., Panasenkov A.A., Pimenov I.S., Pshenov A.A., Roy I.N., Ryzhakov D.V., Savrukhin P.V., Sarychev D.V., Sergeev D.S., Solovyov N.A., Sushkov A.V., Tolpegina Yu.I., Troshin G.A., Khayrutdinov R.R., Khayrutdinov E.N., Khvostenko A.P., Khvostenko P.P., Khripunov V.I., Chernenko A.S., Shelukhin D.A., Shestakov E.A. Physical research program on the T-15MD tokamak.....9

List of authors and titles of papers published in Problems of Atomic Science and Technology.

Series Thermonuclear Fusion, 2024, vol. 47.....184

Вопросы атомной науки и техники

С е р и я : Термоядерный синтез

Том 47, выпуск 4

Специальный выпуск

Программа физических исследований на токамаке Т-15МД

Ответственные за выпуск А.Б. Кукушкин, Л.К. Кузнецова

Редактор Н.В. Бокша. Компьютерная вёрстка Л.К. Кузнецова. Корректор Н.В. Бокша

Программист-переводчик И.В. Скорюпина. IT-инженер Е.Н. Николаев

Подписано в печать 25.12.2024. Формат 60×90/8

Печать цифровая. Усл. печ. л. 24,5. Уч.-изд. л. 26,0. Тираж 200. Индекс 3648. 1 статья. Заказ 19

Адрес редакции: Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

Отпечатано в национальном исследовательском центре «Курчатовский институт»