

На правах рукописи



Крупин Вадим Александрович

**СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
ИОНОВ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Специальность **01.04.08** – Физика плазмы

Москва

2020

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

Научный руководитель: **Мельников Александр Владимирович**
доктор физико-математических наук, заместитель руководителя Отделения токамаков Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

Официальные оппоненты: **Сергеев Владимир Юрьевич**
доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург;

Летунов Александр Алексеевич
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Отдела физики плазмы Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва.

Ведущая организация: Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, г. Троицк

Защита диссертации состоится 17 февраля 2021 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 520.009.02 на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте .

Автореферат разослан _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 520.009.02
кандидат физико-математических наук



Ю.В. Капустин

Введение

1. Актуальность темы исследования

По мере приближения параметров плазмы современных токамаков к термоядерному уровню на первый план выходит диагностика ионной температуры, определяющей эффективность термоядерной реакции синтеза. Это обстоятельство определило **актуальность** разработки эффективного метода измерения $T_i(r)$, в частности, такого, как перезарядочно-рекомбинационная спектроскопия (CXRS, от англ. Charge Exchange Recombination Spectroscopy), развиваемая на пучках быстрых атомов (H, D, He, Li), инжектируемых в плазму. Этот метод является локальным, наиболее точным, он производит наименьшее возмущение параметров плазмы в случае использования диагностических пучков (DNB, от англ. Diagnostic Neutral Beam) и обладает лучшим временным и пространственным разрешением в сравнении с другими методами измерения T_i , такими, например, как доплеровское уширение рентгеновских линий, абсолютная интенсивность нейтронного излучения или анализ спектров нейтралов перезарядки.

Многие проблемы, связанные с применением трех последних методов, сделали актуальным поиск нового и надежного метода определения $T_i(r)$ в плазме токамаков. С этой целью на токамаке T-10 был разработан метод измерения локальных величин ионной температуры с помощью перезарядочной спектроскопии и показана возможность измерений $T_i(r)$ из доплеровского уширения спектральных линий, возбуждаемых при перезарядке быстрых атомов диагностического пучка на ионах плазмы. На сегодня CXRS, как наиболее надежный метод измерения ионной температуры, применяется на большинстве установок токамаков.

Актуальность темы исследования определяется также и тем, что активная CXRS спектроскопия будет применяться на строящемся термоядерном реакторе-токамаке ИТЭР, где с ее помощью планируется измерять многие параметры плазмы, определяющие эффективность зажигания и протекания термоядерной реакции синтеза, а именно: радиальные профили ионной температуры плазмы

$T_i(r)$, температуры и концентрации быстрых ионов и α -частиц, концентрации ионов дейтерия $n_d(r)$, ядер примесей гелия $n_{He}(r)$ и бериллия $n_{Be}(r)$, а также скорости тороидального $V_{tor}(r)$ и полоидального $V_{pol}(r)$ вращения шнура и профили радиального электрического поля $E_r(r)$. На ИТЭР будут задействованы три варианта CXRS диагностики: для центральной ($\rho \leq 0.6$) и периферийной ($0.5 \leq \rho \leq 1$) областей шнура, а также для области наружного транспортного барьера ($0.85 \leq \rho \leq 1$). Разработка периферийной “CXRS-edge” диагностики ИТЭР является одной из наиболее актуальных задач, ее создание взяла на себя Российская Федерация.

Ближайший шаг в развитии отечественной программы УТС планируется сделать с помощью установки Т-15МД, создаваемой в НИЦ “Курчатовский институт”. На данной установке планируется проведение экспериментов в различных режимах плазмы (L, H) и ее конфигурациях (вытянутой, диверторной), с целью получения высоких значений относительного давления β_p и длительного поддержания разряда токами увлечения с участием мощного нагревного комплекса, включающего инжекцию пучка высокоэнергетичных нейтральных атомов, нижегибридного нагрева, нагревов на ионно-циклотронном и электронно-циклотронном резонансах. Для данной установки является чрезвычайно актуальной разработка новой и уникальной по своим возможностям CXRS диагностики ионной температуры, способной обеспечить решение многих научных задач, требующих знания профилей $T_i(r)$ и таких параметров плазмы, как концентрация протонов $n_p(r)$, примесей плазмы $n_Z(r)$, скоростей вращения шнура: полоидальной $V_{pol}(r)$ и тороидальной $V_{tor}(r)$. Автор диссертационной работы является ответственным за разработку CXRS диагностики Т-15МД, которая создается на базе мощного диагностического инжектора “ДИНА КИ-60” и высокоэффективных спектрометров, разработанных для CXRS диагностики ИТЭР.

2. Степень разработанности темы исследования

1. Применению CXRS метода предшествовали измерения $T_i(r)$ из анализа спектров атомов перезарядки, доплеровских рентгеновских измерений и абсолютной интенсивности нейтронного излучения. При этом измерения $T_i(r)$ с помощью анализаторов атомов перезарядки имеют низкое отношение сигнал/шум в центре шнура вследствие малой концентрации атомов рабочего газа, а также на периферии шнура вследствие повышенной концентрации горячих локально-запертых ионов из-за гофрировки тороидального магнитного поля. Такие измерения требуют применения специальных методов коррекции измеряемых энергетических спектров. К недостаткам рентгеновского метода можно отнести необходимость дополнительной инжекции тяжелых примесей, негативно влияющих на параметры разряда, а также нелокальный характер измерений T_i вдоль хорды наблюдения, требующий решения обратной задачи (инверсии Абеля) при определении профиля интенсивности рентгеновских линий $I(r)$ по измеренным профилям их яркости.

Для определения температуры в центре плазменного шнура $T_i(0)$ из интенсивности нейтронного излучения необходимо располагать данными о величинах и профилях концентрации электронов $n_e(r)$ и эффективного ионного заряда $Z_{eff}(r)$, а также о форме профиля ионной температуры $T_i(r)/T_i(0)$.

2. Применение “пассивного” спектрального метода на токамаках предварялось традиционными доплеровскими измерениями $T_i(r)$, выполнявшимися следующим образом. Измерялся профиль яркости свечения линии иона примеси (например, O^{7+} , C^{3+}) в радиальном интервале ($0 < \rho < 1$) с последующим восстановлением радиального профиля интенсивности линии путем инверсии Абеля. Восстановленный радиальный профиль интенсивности линии представлял собой немонотонную функцию с явно выраженным максимумом на некотором радиусе r_{max} . Одновременно проводилось измерение T_i из доплеровского уширения линии свечения данного иона по центральной хорде наблюдения, и полученная величина T_i приписывалась радиусу r_{max} . Получаемые данные по T_i справедливы в случае, когда радиальный профиль $I(r)$ свечения иона

представим в виде узкого кольца, расположенного на радиусе r_{\max} . Используя линии нескольких ионов примесей с различными потенциалами ионизации, можно построить периферийный участок профиля $T_i(r)$. Однако данный подход приводит к систематическому занижению реальных значений T_i , во-первых, из-за отличия наблюдаемых профилей $I(r)$ от дельта-функции в области r_{\max} и, во-вторых, из-за неспособности низкоионизованных ионов примесей С и О достигать за время их ионизации (10^{-5} – 10^{-6} сек) температуры дейтронов T_i при существенно больших временах выравнивания температур ионов примесей и дейтронов ($\sim 10^4$ сек).

3. В последнее время на токамаках активно совершенствуются упомянутые методы и развивается ряд новых методов определения $T_i(r)$, таких как многохордовые рентгеновские и нейтронные доплеровские измерения, локальные измерения $T_i(r)$ с использованием коллективного томсоновского рассеяния. Рентгеновский метод с использованием спектрометров на вогнутых кристаллах по-прежнему требует дополнительной инъекции тяжелых примесей Kr, Fe и Ar. Приемлемыми для условий ИТЭР считаются радиационные потери на инжектированных примесях, не превышающие 0.5 МВт. Отсутствие локальности у рентгеновских и нейтронных доплеровских измерений T_i может быть скомпенсировано увеличением числа направлений наблюдения, то есть переходом к томографической регистрации яркости рентгеновских линий к такой же регистрации спектров термоядерных нейтронов с энергией 14.1 МэВ.

Измерения $T_i(r)$ с использованием коллективного томсоновского рассеяния излучения гиротрона приближаются по локальности к CXRS измерениям и с точностью до 10-15% совпадают с ними по абсолютной величине и профилю. Данный метод имеет ограничения по величине плотности плазмы в центре шнура, связанные с отсечкой СВЧ-излучения (например, в условиях Т-10 для $B_t = 2.4$ Тл и второй гармоники СВЧ-излучения отсечка происходит на $n_{e_cut-off} \approx (1-2) \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$), а также с утратой черноты плазмы при малых n_e на периферии шнура.

Тем не менее, все три указанных метода определения $T_i(r)$ имеют хорошие перспективы использования в термоядерных установках следующего поколения.

3. Цели и задачи

Цель – разработка спектроскопических методов исследования температуры ионов $T_i(r)$ в плазме токамака.

Задачи:

а) Разработать “пассивный” метод определения ионной температуры плазмы по доплеровскому спектру излучения пассивной линии C^{5+} 5291 Å на периферии плазменного шнура с созданием диагностики периферийной ионной температуры и измерением периферийных профилей $T_i(r)$ на Т-10.

б) Разработать “активный” метод локального измерения профиля $T_i(r)$ с использованием диагностического пучка быстрых атомов, инициирующего активное перезарядочное излучение атомов рабочего газа и водородоподобных ионов примесей (CXRS). Создать многоканальную CXRS-диагностику ионной температуры T_i с измерением ее радиальных профилей и формированием базы данных $T_i(r)$ токамака Т-10, измеренных совместно CXRS и “пассивным” методом.

в) Исследовать зависимость времени удержания энергии τ_E плазмы Т-10 от плотности \bar{n}_e и эффективного заряда плазмы Z_{eff} в условиях омического нагрева и зависимости времени удержания энергии в ионной компоненте τ_{Ei} от параметров \bar{n}_e и Z_{eff} в условиях омического и ЭЦР-нагрева.

г) Разработать CXRS-диагностику ионной температуры $T_i(r)$ для токамака Т-15МД.

4. Научная новизна

1. Впервые в мире на токамаке Т-10 были произведены измерения локальных величин ионной температуры методом перезарядочной спектроскопии и показана возможность измерений $T_i(r)$ из доплеровского уширения спектральных линий, возбуждаемых при перезарядке быстрых атомов диагностического пучка на ионах рабочего газа.

2. Взаимная дополняемость “активного” (CXRS) и “пассивного” методов является новым и важным эффектом их совместного использования. На периферии плазмы активное излучение снижается из-за падения концентрации ядер примесей вследствие их перезарядки на атомах рабочего газа, что делает невозможным измерение здесь $T_i(r)$ “активным” методом. Однако одновременный рост излучения водородоподобных ионов примесей вследствие той же перезарядки увеличивает точность измерений $T_i(r)$ “пассивным” методом. Такая дополняемость методов обеспечивает надежное определение $T_i(r)$ на периферии шнура в широком интервале изменения параметров разряда и типов нагрева.

3. В омических разрядах T-10 при использовании обоих методов измерения $T_i(r)$ получены новые результаты по удержанию энергии в плазме токамака:

- а) энергетическое время жизни плазмы τ_E не зависит от величины Z_{eff} как на участке линейного роста τ_E с величиной \bar{n}_e (в режиме LOC, от англ. Linear Ohmic Confinement), так и на участке насыщения τ_E при $\bar{n}_e \geq 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (в режиме SOC, от англ. Saturated Ohmic Confinement);
- б) насыщение величины τ_E в области SOC связано со значительным ухудшением удержания тепла в ионной компоненте при высоких плотностях плазмы;
- в) центральный ЭЦР нагрев мощностью 0.8–1.6 МВт ухудшает время удержания энергии τ_{Ei} в ионной компоненте до 2-3 раз в области LOC.

5. Практическая и научная значимость работы

1. Применение “активного” CXRS-метода дает возможность производить локальные измерения ионной температуры в широком радиальном диапазоне от центра до границы шнура, а также в гораздо более широком диапазоне по параметрам плазмы, чем у других методов, таких как анализ энергетических спектров атомов перезарядки или коллективное томсоновское рассеяние.

2. Диагностика, созданная на основе CXRS-метода, применяется для измерения профиля $T_i(r)$ на большинстве действующих термоядерных установок

мира. Благодаря локальности, высокому пространственному и временному разрешению, точности и защищенности от паразитных эффектов, результаты измерения ионной температуры CXRS-методом рассматриваются как эталонные при установлении достоверности измерений $T_i(r)$ другими методами, такими как коллективное томсоновское рассеяние, доплеровское уширение линейчатого излучения в рентгеновской области спектра и анализ энергетического спектра атомов перезарядки.

3. Научная значимость работы состоит в обнаружении причин насыщения энергетического времени τ_E в области SOC, которая связана в эксперименте с ухудшением удержания энергии в ионной компоненте. Также научная значимость состоит в установлении негативного влияния ЭЦР-нагрева плазмы на удержание энергии в ионной компоненте, приводящее к 2-3 кратному снижению времени удержания энергии ионов τ_{Ei} при центральном ЭЦР-нагреве по сравнению с омикескими временами τ_{Ei} в области LOC.

4. Разработанные “активный” и “пассивный” методы измерения $T_i(r)$ имеют высокую научную и практическую значимость для будущих экспериментов на токамаке T-15МД, где данные о локальных значениях T_i будут использоваться для исследования переноса энергии и частиц в плазме, организации внутреннего и внешнего транспортных барьеров, изучения режимов улучшенного удержания и получения режимов с предельной нормализованной β_N .

6. Методология и методы исследования

1. Развитый соискателем CXRS метод определения ионной температуры основан на измерении доплеровского уширения линейчатого излучения атомов рабочего газа и водородоподобных ионов примесей, возбуждаемых за счет перезарядки ионов рабочего газа и ядер примесей на быстрых атомах нейтрального пучка. Излучение регистрируется из узкой области пересечения пучка с хордой наблюдения, сформированной оптической системой. Одновременная регистрация излучения по многим хордам наблюдения после

обработки получаемых спектров позволяют определять локальные пространственные профили $T_i(r)$.

2. Измерение активного спектра усложняет тот факт, что он присутствует на фоне яркого пассивного излучения плазмы, состоящего из:

- спектра водородоподобного иона примеси, возбуждаемого на периферии шнура различными атомными процессами;
- тормозного континуума плазмы;
- отраженного и рассеянного света из дивертора, состоящего из линий водородоподобных ионов и тормозного континуума, который существенно увеличивает уровень пассивного излучения при наличии металлических стенок в камере установки, эффективно отражающих видимое излучение.

Для выделения активного спектра из измеряемой суммы активного и пассивного спектров вычитается отдельно регистрируемый пассивный спектр. Применение данного разностного способа выделения активного сигнала приводит к увеличению статистической ошибки его измерения в ≤ 1.4 раза.

3. Для определения величины ионной температуры по измеренному спектру производится расчет активного спектра CXRS-линий водородоподобных ионов с учетом тонкой структуры уровней спектральных переходов, зеемановского расщепления и доплеровского уширения линий, а также аппаратной функции спектральных измерений, внесенных в расчетную программу в среде “Matlab”. Ионная температура вместе с ошибкой ее измерения определяется по методу наименьших квадратов при варьировании величины T_i и достижении минимального отклонения расчетного спектра CXRS линии от измеренного.

4. Развитый соискателем “пассивный” метод определения периферийного профиля $T_i(r)$ из доплеровского уширения спектров пассивной линии водородоподобного иона содержит следующие операции:

- В эксперименте одновременно по многим хордам наблюдения измеряются спектральные контуры $S(\lambda, x)$ яркости линии, в частности линии 5291 Å иона C^{5+} . Интегрирование контуров $S(\lambda, x)$ по длинам волн даёт пространственный профиль $B(x)_{exp}$ яркости исследуемой линии. По данному хордовому

профилю восстанавливается радиальный профиль $I(r)$ интенсивности линии методом квазирешений, путем минимизации квадратичного функционала невязки.

- В модели строятся пробные спектры яркости $S(\lambda, x)_M$. Для этой цели в модель вводятся пробные профили ионной температуры $T_i(r)_M$, позволяющие построить модельные спектральные контуры линии $F(\lambda, r)_M$, которые учитывают доплеровское уширение, тонкую структуру и зеемановское расщепление линии, а также аппаратную функцию измерительной системы. При суммировании пробных контуров $F(\lambda, r)_M$ вдоль хорд наблюдения “ x ” с весами, пропорциональными интенсивностям линии $I(r)$ и длинам хорд наблюдения $L(x, r)$, получаем набор пробных хордовых спектров линии $S(\lambda, x)_M$, соответствующих заданному пробному профилю температуры $T_i(r)_M$.

Профиль $T_i(r)$ на периферии плазмы находится путем вариации профилей $T_i(r)_M$ и достижения наилучшего совпадения пробных спектров линии $S(\lambda, x)_M$ с экспериментальными спектрами $S(\lambda, x)_{exp}$ по методу наименьших квадратов.

7. Положения, выносимые на защиту

1. “Пассивный” метод измерения профиля ионной температуры $T_i(r)$ на периферии плазмы из пространственного распределения спектров излучения линий водородоподобных ионов легких примесей. Создание спектроскопической аппаратуры для многохордовых измерений спектров линии C^{5+} 5291 Å и определение профилей $T_i(r)$ “пассивным” методом на периферии плазменного шнура Т-10.

2. “Активный” метод локального измерения $T_i(r)$ с использованием перезарядочно-рекомбинационной спектроскопии на пучке быстрых атомов водорода. Создание многоканальной CXRS диагностики $T_i(r)$ установки Т-10 на основе диагностического инжектора и высокоэффективной спектроскопической аппаратуры.

3. Разработка многофункциональной CXRS-диагностики для токамака Т-15МД на базе диагностического инжектора “ДИНА КИ-60” и

спектроскопической аппаратуры, аналоги которой используются в CXRS-диагностике ИТЭР. Проведение испытаний инжектора “ДИНА КИ-60” в ИЯФ им. Г.И. Будкера (г. Новосибирск) и спектрометров CXRS-диагностики ИТЭР в экспериментах на токамаке Т-10.

4. С использованием экспериментальной базы данных о профилях $T_i(r)$, измеренных CXRS и “пассивным” методом на Т-10, показано, что:

- в омических разрядах энергетическое время жизни плазмы τ_E не зависит от уровня Z_{eff} как на участке линейного роста τ_E с величиной \bar{n}_e в области LOC, так и на участке насыщения τ_E при $\bar{n}_e \geq 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ в области SOC;
- причиной насыщения τ_E в области SOC является увеличение потерь тепла по ионному каналу;
- центральный ЭЦР-нагрев с мощностью 0.8–1.6 МВт уменьшает время удержания энергии в ионной компоненте плазмы до 2-3 раз относительно омического уровня в режиме LOC.

8. Степень достоверности результатов

1. При определяющем участии соискателя собрана и обработана база активных CXRS спектров линии C^{5+} 5291А для нескольких сотен импульсов токамака Т-10. Профили $T_i(r)$ исследованы соискателем во всех разрядах токамака Т-10 с углеродным и вольфрамовым лимитерами и при различных величинах параметров разряда T_e , T_i , n_e , Z_{eff} , I_p , B_t , Δ_{hor} , а также в режимах с различными способами нагрева плазмы: омическим и электронно-циклотронным нагревом с мощностью $P_{EC} = 0.5\text{--}2.2$ МВт. Достоверность полученных результатов подтверждается регулярными измерениями ионной температуры в повторных и контрольных опытах и сравнением с результатами других диагностик. При детальном воспроизведении исходных параметров разряда измеряемые профили $T_i(r)$ воспроизводятся в среднем с точностью лучшей, чем 10%.

2. Данные измерений центральных значений $T_i(0)$ методом CXRS совпадают с данными анализа спектров атомов перезарядки и интенсивности нейтронного излучения с точностью 10-20% в омических режимах токамака Т-10.

3. Анализ энергетического и материального баланса плазмы в режимах с омическим и СВЧ-нагревом показывает, что полное энергосодержание плазмы, рассчитанное по измеренным профилям $T_i(r)$, $T_e(r)$, $n_e(r)$, $Z_{eff}(r)$, совпадает с результатами диамагнитных измерений энергозапаса плазмы W_{dia} .

4. При измерении $T_i(r)$ из анализа спектров пассивной линии C^{5+} 5291 Å и активным методом CXRS в широкой радиальной области их совместного применения $\rho \approx 0.7-1$ результаты обоих методов совпадают с точностью 10-15%.

9. Личный вклад автора

Автор выполнил следующие работы лично:

1. Разработал метод определения периферийного профиля $T_i(r)$, провел анализ условий его применимости в плазме токамака Т-10 с оценкой точности измерений $T_i(r)$. Создал аппаратуру и выполнил измерения периферийных участков профиля $T_i(r)$ на установке Т-10.

2. Первым доказал возможность измерения локальных значений ионной температуры из доплеровского уширения перезарядочного излучения ионов плазмы, возбуждаемых диагностическим пучком быстрых атомов. Разработал активную CXRS диагностику ионной температуры на диагностическом пучке и провел измерения профилей $T_i(r)$ в различных режимах работы Т-10.

3. Показал совпадение профилей $T_i(r)$, измеренных на периферии шнура “активным” и “пассивным” методами.

4. Разработал CXRS диагностику $T_i(r)$ для токамака Т-15МД, уникальную по точности измерений, пространственному и временному разрешению. Провел испытания основных ее элементов:

- диагностического инжектора “ДИНА КИ-60” – на площадке изготовителя ИЯФ им Г.И. Будкера (г. Новосибирск);
- оптоволоконных коллекторов, спектрометров и EM CCD камер – в экспериментах на установке Т-10.

5. Исследовал зависимость времен удержания энергии от величин \bar{n}_e и Z_{eff} :

- глобального (τ_E) и в электронной компоненте (τ_{Ee}) – в омических разрядах;
- в ионной компоненте (τ_{Ei}) – в омических и ЭЦР разрядах Т-10.

10. Апробация работы

Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах отдела Токамаков, российских и международных научных конференциях:

- VII International Conference Plasma Physics and Plasma Technology (Minsk, Belarus, 2012).
- International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion (Alushta, Ukraine, 2012).
- VIII Всероссийская конференция. Современные средства диагностики плазмы и их применение, МИФИ (Москва, 2012).
- XV и XVII Всероссийские конференции по диагностике высокотемпературной плазмы (Звенигород, 2013, 2017).
- XL, XLII, XLIII и XLV Международные конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород, 2013 – 2 доклада, 2015 – 2 доклада, 2016 и 2018).
- 39th и 40th EPS Conference on Plasma Physics (Stockholm, 2012 и Espoo, 2013).
- 3rd ECPD Conference on Plasma Diagnostics (Lisbon, 2019).

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 23 публикациях, 9 из которых изданы в виде статей в российских и зарубежных журналах, включённых в перечень ВАК и/или индексируемых в базах данных WoS, Scopus, 14 – в виде тезисов докладов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 148 страниц, включая 53 рисунка и 4 таблицы. Список литературы содержит 85 наименований.

Список публикаций автора по теме диссертации

1. Березовский Е.Л. Локальные измерения ионной температуры по доплеровскому уширению водородных линий с использованием пучка быстрых атомов / Березовский Е.Л., Березовская М.М., Извозчиков А.Б., Крупин В.А. // Письма в ЖТФ – 1982 – Т. 8(22) – сс. 1383–1386.
2. Berezovskij E.L. Local ion temperature measurements from Doppler broadening of hydrogen lines using a fast atomic beam / Berezovskij E.L., Berezovckaya M.M., Izvozhnikov A.B., Krupin V.A., Rantsev-Kartinov V.A. // Nuclear Fusion – May 1985 – Т. 25 – № 10 – pp. 1495–1497.
3. Krupin V.A. Активная спектроскопическая диагностика ионной температуры плазмы на токамаке Т-10 / Krupin V.A., Barsukov A.G., Dnestrovskij A.Y., Klyuchnikov L.A., Korobov K.V., Nemets A.R., Krasnyanskii S.A., Sushkov A.V., Tilinin G.N., Tugarinov S.N., Naumenko N.N. // Физика Плазмы – 2013 – Т. 39(8) – сс. 712–724.
4. Крупин В.А. Модернизированная активная спектроскопическая диагностика (CXRS) токамака Т-10 / Крупин В.А., Ключников Л.А., Коробов К.В., Немец А.Р., Нургалиев М.Р., Горбунов А.В., Наumenко Н.Н., Тройнов В.И., Тугаринов С.Н., Фомин Ф.В. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез – 2014 – Т. 37 – В. 4 – сс. 60 – 70.
5. Ключников Л.А. Возможности спектроскопической диагностики CXRS в токамаке Т-10 / Ключников Л.А., Крупин В.А., Коробов К.В., Нургалиев М.Р., Немец А.Р., Днестровский А.Ю., Наumenко Н.Н., Тугаринов С.Н., Серов С.В., Деньщиков Д.С. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез – 2016 – Т. 39 – В. 1 – сс. 95 – 104.
6. Krupin V.A. Modernized Active Spectroscopic Diagnostics (CXRS) of the T-10 Tokamak / Krupin V.A., Klyuchnikov L.A., Korobov K.V., Nemets A.R., Nurgaliev M.R., Gorbunov A.V., Naumenko N.N., Troynov V.I., Tugarinov S.N., Fomin F.V. // Physics of Atomic Nuclei – 2015 – Т. 78 – № 10 – pp. 1164–1173.

7. Klyuchnikov L.A. Charge exchange recombination spectroscopy on the T-10 tokamak / Klyuchnikov L.A., Krupin V.A., Nurgaliev M.R., Nemets A.R., Korobov K.V., Dnestrovskij A.Yu., Tugarinov S.N., Serov S.V., Naumenko N.N. // Review of Scientific Instruments – 2016 – Т. 87 – 053506.
8. Крупин В.А. Определение профиля периферийной ионной температуры из измерений доплеровского уширения линии 5291 Å иона C^{5+} / Крупин В.А., Ключников Л.А., Нурғалиев М.Р., Немец А.Р., Коробов К.В., Земцов И.А., Науменко Н.Н., Тугаринов С.Н. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез – 2016 – Т. 39 – В. 4 – сс. 68–77.
9. Klyuchnikov L.A. Spatially resolved spectroscopic ion temperature measurements at plasma edge of the T-10 tokamak / Klyuchnikov L.A., Krupin V.A., Nurgaliev M.R., Nemets A.R., Zemtsov I.A., Tugarinov S.N., Naumenko N.N. // Review of Scientific Instruments – 2017 – Т. 88 – 093508.
10. Serov S.V. CXSFIT Code Application to Process Charge-Exchange Recombination Spectroscopy Data at the T-10 Tokamak / Serov S.V., Tugarinov S.N., Klyuchnikov L.A., Krupin V.A., von Hellermann M. // Plasma Physics Reports – 2017 – Т. 43 – pp. 1123–1131.
11. Krupin V.A. Study of lithium influx, radiation, transport and influence on plasma parameters in the T-10 tokamak / Krupin V.A., Klyuchnikov L.A., Nurgaliev M.R., Nemets A.R., Zemtsov I.A., Dnestrovskiy A.Yu., Grashin S.A., Kislov A.Ya., Myalton T.B., Sarychev D.V., Sergeev D.S., Solov'ev N.A., Trukhin V.M. // Plasma Phys. and Controlled Fusion – 2019 – Т. 62 (2) – 025019 – pp. 1–25.
12. Krupin V.A. The development of charge exchange recombination spectroscopy diagnostics for the T-15MD tokamak / Krupin V.A., Zemtsov I.A., Nurgaliev M.R., Klyuchnikov L.A., Nemets A.R., Ivanov A.A., Stupishin N.V., Naumenko N.N., Tugarinov S.N. // JINST – 2020 – 15 – C02027.

Содержание работы

Во **введении** рассмотрена актуальность темы диссертации, посвященной разработке спектроскопических методов измерения температуры ионов T_i в плазме токамака. Сформулированы цели и задачи данной работы. Рассмотрены новизна, степень разработанности, научная и практическая значимость темы исследования. Приведено краткое содержание активного и пассивного методов определения температуры ионной компоненты плазмы, разработанных автором. Рассмотрен личный вклад автора в разработку данных методов, в развитие на их базе диагностики профиля ионной температуры $T_i(r)$ на токамаке Т-10. Созданная на токамаке Т-10 при непосредственном участии автора база данных по экспериментальным профилям $T_i(r)$ позволила ему провести исследование удержания энергии в ионной и электронной компонентах плазмы. Отдельно рассмотрен вклад автора в разработку CXRS-диагностики плазмы токамака Т-15МД.

Первая глава содержит обзор литературы, связанной с созданием источника термоядерной энергии на базе установок токамак и с разработкой различных методов измерения ионной температуры T_i в плазме данных установок. Рассмотрены пассивные хордовые методы измерения T_i , основанные на анализе спектров излучения плазмы, регистрируемых и усредненных вдоль хорд наблюдения, и активные локальные методы измерения T_i , использующие зондирование плазмы пучками быстрых нейтральных атомов и (или) электромагнитных волн и регистрирующие спектры излучения, индуцированные пучками, из локальных зон пересечения пучков с хордами наблюдения. Проведено сравнение результатов применения активного спектроскопического перезарядочного метода (CXRS) измерения $T_i(r)$ на пучках быстрых атомов с альтернативными методами, такими как анализ энергетических спектров атомов перезарядки, спектров рентгеновских линий, уширенных эффектом Доплера, и спектров томсоновского коллективного рассеяния СВЧ излучения.

Приведены варианты CXRS-диагностик современных установок токамак, позволяющие одновременно с $T_i(r)$ измерять локальные профили таких

параметров, как концентрация ионов рабочего газа n_d , концентрация ядер примесей n_z , концентрация и энергетический спектр быстрых ионов и α -частиц, скорости тороидального V_{tor} и полоидального V_{pol} вращений шнура и радиальное электрическое поле E_r . Подробно рассмотрены физические задачи, решаемые с помощью CXRS-диагностик на таких токамаках, как KSTAR, Alcator C-Mod, DIII-D, Asdex U, JT-60U, JET и ITER, а также параметры и особенности конструкций этих диагностик. Повышенный интерес, проявленный автором к физическим задачам и деталям конструкций зарубежных CXRS диагностик, связан с проводимой им разработкой CXRS диагностики для токамака T-15МД.

Во **второй** главе представлен “пассивный” метод определения профиля $T_i(r)$ на периферии шнура из спектров пассивного излучения линий водородоподобных ионов примесей, уширенных эффектом Доплера. Излагается принцип работы метода, дается его физическое обоснование. При разработке метода соискателем акцент перенесен с преимущественно математического его представления в работах [1–2] на детальное описание в моделях (используемых для определения $T_i(r)$) формы спектральных контуров линии C^{5+} 5291 Å, измеряемых по многим хордам в плазменном шнуре, на оценку применимости “пассивного” метода в различных условиях эксперимента на токамаке, а именно: для различных сортов примесей, степени их ионизации, области их локализации в шнуре и величин параметров разряда. Подчеркивается дополнительный характер “пассивного” метода определения $T_i(r)$ при его совместном использовании с основным “активным” CXRS-методом. Необходимость применения “пассивного” метода связана с ухудшением условий использования CXRS-метода на периферии шнура в связи с резким снижением здесь концентрации ядер углерода C^{6+} , а с ним и величины активного CXRS-сигнала, вследствие перезарядки ядер C^{6+} на атомах рабочего газа в ион C^{5+} . В результате данный процесс приводит к увеличению интенсивности пассивной линии C^{5+} 5291 Å, а с ним – к созданию выгодных условий для применения “пассивного” метода определения $T_i(r)$. Приводятся результаты использования автором данного метода измерения $T_i(r)$ на периферии плазмы T-10, включающие в себя анализ структуры спектров линии C^{5+} 5291 Å,

их измерение по пространству шнура и последовательность их обработки до получения профиля $T_i(r)$. Из Рис. 2 видно, что профили $T_i(r)$, получаемые “пассивным” методом, совпадают в пределах ошибок с профилями, измеренными CXRS методом. Выполнен анализ особенностей использования метода в условиях токамака, ограничений на его применение в различных областях шнура и точности определения периферийного профиля $T_i(r)$.

В **третьей** главе рассмотрено определение ионной температуры методом активной перезарядочной рекомбинационной спектроскопии (методом CXRS), и приводятся результаты применения данного метода для определения профилей $T_i(r)$ на токамаке Т-10. Описывается принцип измерений ионной температуры методом CXRS. Приводятся результаты первых в мире измерений T_i данным методом, выполненных автором на токамаке Т-10 в 1981-1982 гг. Подчеркивается методическая направленность первых измерений T_i , произведенных на диагностическом пучке водородных атомов с энергией $E_0 = 20$ кэВ и сосредоточенных, во многом, на поиске эффектов, которые могли бы воспрепятствовать использованию CXRS-метода в условиях токамака.

В главе отмечены усилия автора по разработке CXRS-диагностик для установок Т-10 и Т-15 в 1985-2005 гг. Подробно описывается разработка автором CXRS-диагностики установки Т-10 на базе диагностического инжектора “ДИНА-6” с энергией атомов пучка $E_0 = 30$ кэВ и с оригинальной системой прерывания света, позволившей провести синхронизацию работу пучка и CCD камер и организовать разностное выделение активного CXRS сигнала на фоне пассивных засветок. В схеме CXRS-диагностики Т-10 использовались уникальные высокоэффективные спектрометры HES-370, созданные Тугариновым С.Н. и прошедшие тестирование на установке Т-10 с целью их дальнейшего применения в составе CXRS диагностики ИТЭР. Спектры излучения регистрировались профессиональными CCD и EMCCD камерами с квантовым выходом $Q_E \approx 1$ в области CXRS-линии C^{5+} 5291 Å. Описана программа обработки CXRS-спектров в среде “MatLab”, предназначенная для определения с ее помощью профилей $T_i(r)$.

С использованием CXRS-диагностики Т-10 изучено негативное влияние эффекта “гало” на результаты CXRS-измерений профиля $T_i(r)$ по линии рабочего газа D_α 6561 Å. Проведено сравнение величин $T_i(0)$, измеряемых CXRS-методом по линии C^{5+} 5291 Å, с величинами, определяемыми из анализа спектров атомов перезарядки и из абсолютной интенсивности теплового нейтронного излучения. Измерения показывают, что, в отличие от данных CXRS, величины $T_i(0)$, измеряемые по перезарядке и нейтронам, демонстрируют при низких величинах $\bar{n}_e \leq 10^{19} \text{ м}^{-3}$ аномально высокие значения, на порядок превышающие величины $T_i(0)$, задаваемые неоклассической формулой Арцимовича. При более высоких плотностях плазмы наблюдается хорошее (до 10-20%) согласие величин $T_i(0)$, измеренных 3-мя указанными методами.

Совместное применение CXRS и “пассивного” методов дало возможность измерять профиль $T_i(r)$ от центра шнура до области SOL в различных режимах работы установки Т-10. На Рис. 1 в качестве примера приведены результаты таких измерений в разрядах с вариацией тока плазмы [3].

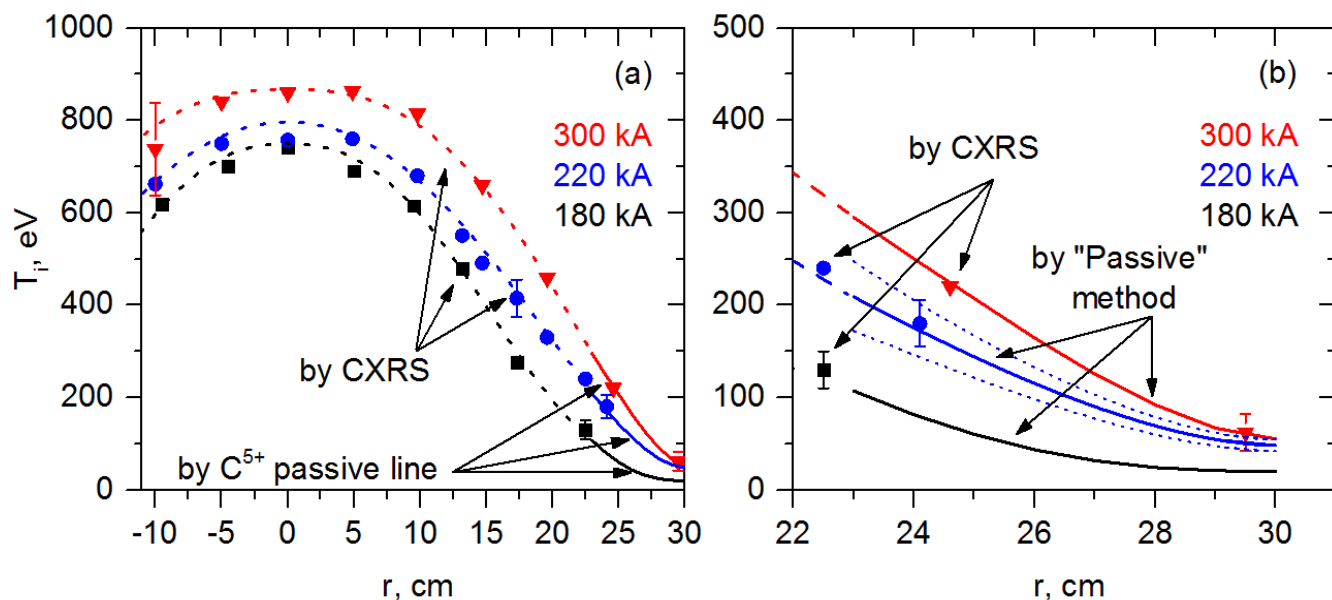


Рис. 1. Профили $T_i(r)$, измеренные по линии C^{5+} 5291 Å в омическом режиме $\bar{n}_e = 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $B_t = 2.4 \text{ Тл}$: а) во всем сечении шнура, б) на его периферии (точки и пунктирные линии – CXRS метод, сплошные линии – “пассивный” метод) в разрядах Т-10 с токами: $I_{pl} = 300, 220$ и 180 кА . На Рис. 1б для тока 220 кА синим пунктиром указан коридор ошибок измерения $T_i(r)$ “пассивным” методом.

В четвертой главе приведены результаты исследования зависимости энергетического времени жизни плазмы τ_E и ее электронной τ_{Ee} и ионной τ_{Ei} компонент от величин электронной плотности \bar{n}_e и эффективного заряда Z_{eff} плазмы T-10. Исследования опираются на созданную с использованием CXRS и пассивных измерений базу данных по профилям $T_i(r)$, в которой содержатся профили $T_i(r)$, измеренные при различных плотностях плазмы n_e , величинах разрядного тока I_{pl} , магнитного поля B_t и эффективного заряда Z_{eff} , а также в экспериментах с C и W лимитерами, проведенных в режимах T-10 с омическим нагревом и ЭЦР нагревом.

Полученные величины и профили $T_i(r)$ определяются как процессами переноса ионного тепла в шнуре, так и поведением источника нагрева ионов, (связанного с передачей ионам энергии от электронов, а на больших токамаках – от быстрых ионов и α -частиц). Этот источник может существенно отличаться для установок с различными конструкциями, параметрами разрядов, режимами работы и методами нагрева.

В этом отношении более универсальными зависимостями от условий разряда должны обладать характеристики и коэффициенты переноса. Важной характеристикой переноса тепла в ионах является время удержания энергии в ионной компоненте τ_{Ei} , представляющее собой хотя и интегральный параметр, но независимый от предположений о виде тепловых потоков в шнуре.

Созданная база профилей $T_i(r)$ и данные экспериментальной базы “DasTools” установки T-10 позволили исследовать зависимость энергетического времени жизни плазмы τ_E и ее электронной и ионной компонент τ_{Ee} и τ_{Ei} от величин электронной плотности \bar{n}_e и эффективного заряда плазмы Z_{eff} в омических разрядах T-10 [4]. Из приведенных на Рис. 2 зависимостей времен τ_E , τ_{Ee} , τ_{Ei} от величин \bar{n}_e и Z_{eff} могут быть сделаны следующие выводы:

- энергетическое время τ_E практически не зависит от величины Z_{eff} (Рис. 2а), как, в частности, и от мощности радиационных потерь;

- удержание энергии в ионной компоненте при переходе к разрядам с большой плотностью плазмы заметно ухудшается, приводя к снижению до 2-х раз энергетического времени жизни ионов τ_{Ei} (Рис. 2с);
- появление характерного насыщения энергетического времени τ_E при переходе к большим значениям \bar{n}_e (область SOC на Рис. 2а) можно связать с ухудшением удержания энергии в ионной компоненте при больших плотностях плазмы.

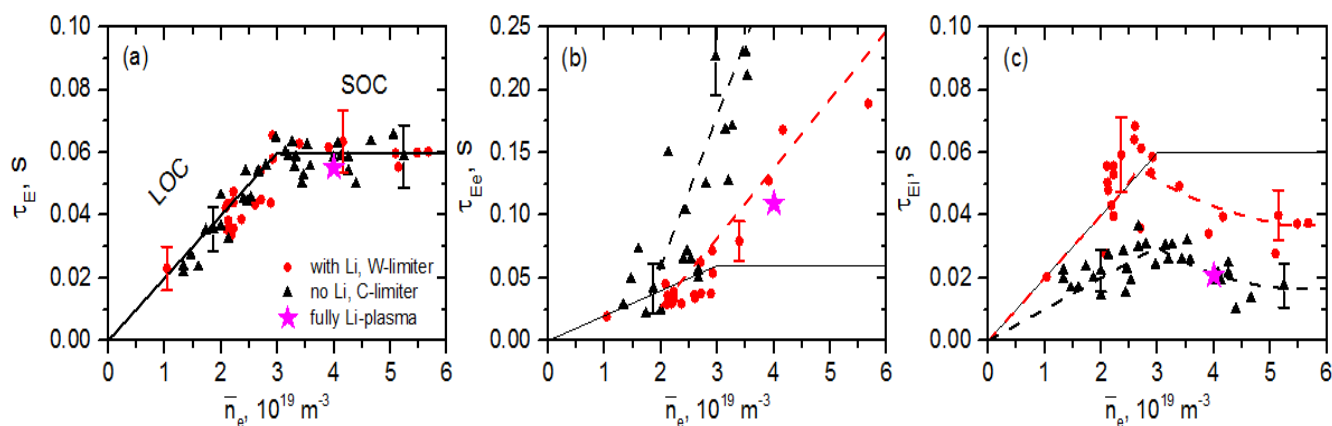


Рис. 2. Зависимость времен удержания энергии от величины \bar{n}_e в омической плазме с высоким ($Z_{eff} \sim 3-4$) и низким ($Z_{eff} \sim 1.5-2$) уровнем эффективного заряда, в разрядах с $I_{pl} = 220-230$ кА, $B_t = 2.4$ Тл: (а) – для времени τ_E , (б) – для времени τ_{Ee} , (с) – для времени τ_{Ei} .

Показано также (Рис. 3) [4], что центральный ЭЦР нагрев оказывает негативное влияние на удержание энергии в ионной компоненте плазмы, ухудшая энергетическое время τ_{Ei} до 2-3 раз в области LOC при мощностях ЭЦР нагрева 0.8–1.6 МВт.

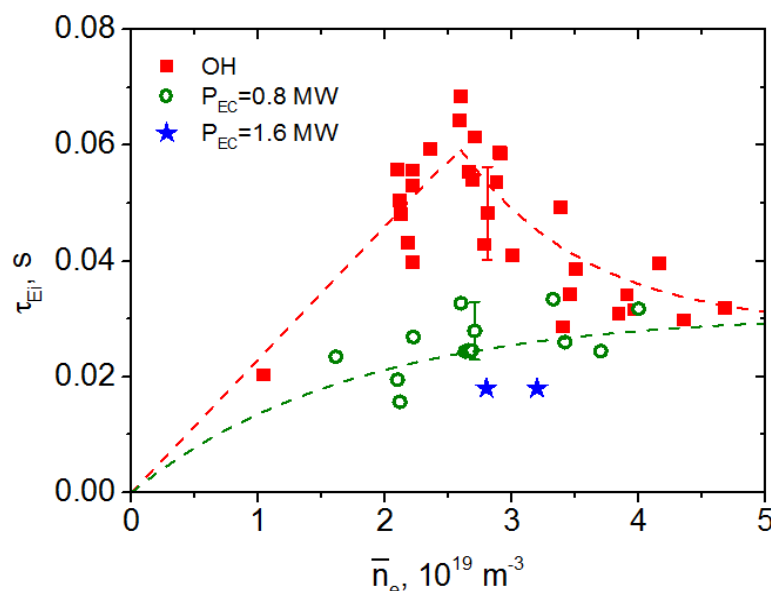


Рис. 3. Зависимость времени τ_{Ei} от величины \bar{n}_e для омических разрядов с $Z_{eff} = 1.5$ (красные квадраты), с центральным ЭЦР нагревом: $P_{EC} \approx 0.8$ МВт и $Z_{eff} = 1.5-2$ (зеленые кружки), с $P_{EC} \approx 1.6$ МВт и $Z_{eff} = 2-3.5$ (синие звездочки).

Пятая глава посвящена разработке многофункциональной CXRS диагностики для установки Т-15МД. В ней рассмотрены физические задачи, которые будут решаться с использованием данной диагностики, ее элементный состав, включающий диагностический инжектор с энергией атомов $E_0 = 60$ кэВ и мощностью пучка $P_{DNB} \approx 150$ кВт, высокоэффективную систему регистрации активного и пассивного излучений, а также программы определения ионной температуры и других параметров из активных CXRS спектров.

В главе выполнен модельный анализ ожидаемой ошибки CXRS измерений центральной ионной температуры на Т-15МД, который включил в себя расчеты:

- параметров $n_e(r)$, $T_e(r)$, $T_i(r)$ в ОН разряде Т-15МД с круглым сечением в программе “ASTRA”;
- профилей концентрации ядер углерода $n_{C6+}(r)$, а также профилей интенсивности тормозного континуума в видимой области спектра и пассивной линии $C^{5+} 5291 \text{ \AA}$ в программе “ASTRA” + “Strahl”;
- проникновения диагностического пучка в плазменный шнур;

- абсолютной величины активного CXRS сигнала на линии C^{5+} 5291 Å и его контраста на фоне интенсивностей тормозного континуума и пассивной линии C^{5+} 5291 Å, излучаемых плазмой;
- временного и пространственного разрешения измерений параметров T_i , n_Z , V_{pol} и V_{tor} , а также ошибок их измерений.

Модельный анализ дает ошибку определения ионной температуры в центре плазмы разряда Т-15МД с параметрами: $B_t = 2$ Тл, $I_{pl} = 2$ МА, $\bar{n}_e = 3.7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $Z_{eff} = 3$ на уровне $\Delta T_i(0)/T_i(0) \approx \pm 2.5\%$ при длительности регистрации CXRS сигналов в течение $\tau_{col} = 3$ мс (или $\pm 4\%$ за время $\tau_{col} = 1$ мс). Пространственное разрешение CXRS измерений в районах внутреннего и наружного транспортных барьеров достигает 3-4 см и 0.7-1 см соответственно.

В заключении изложены основные результаты работы, а именно:

1. Разработка пассивного спектроскопического метода определения профиля ионной температуры на периферии плазмы, построение соответствующей спектроскопической диагностики $T_i(r)$ и измерение периферийных профилей $T_i(r)$ в различных разрядах Т-10;

2. Разработка активного спектроскопического CXRS метода определения профиля $T_i(r)$ в плазменном шнуре, создание CXRS диагностики установки Т-10, измерение $T_i(r)$ в различных режимах с одновременным применением CXRS и периферийного методов, создание на Т-10 базы данных профилей $T_i(r)$;

3. Исследование зависимости энергетического времени жизни плазмы τ_E и ее электронной τ_{Ee} и ионной τ_{Ei} компонент от величин средней концентрации электронов \bar{n}_e и эффективного заряда плазмы Z_{eff} в омических разрядах Т-10, где получены следующие новые результаты:

- удержание энергии в ионной компоненте при переходе к разрядам с большой концентрацией \bar{n}_e заметно ухудшается, приводя к снижению до 2 раз энергетического времени жизни ионов τ_{Ei} ;

- характерное насыщение энергетического времени плазмы τ_E , наблюдаемое в области SOC при больших величинах \bar{n}_e , связано с ухудшением удержания энергии в ионной компоненте при высоких плотностях плазмы;
- центральный ЭЦР нагрев негативно влияет на удержание энергии в ионной компоненте, ухудшая энергетическое время ионов τ_{Ei} до 2-3 раз при мощностях ЭЦР нагрева 0.8-1.6 МВт.

4. Разработка CXRS и “пассивной” диагностики $T_i(r)$ для токамака Т-15МД, которая включает в себя:

- стендовые испытания изготовленного диагностического инжектора с энергией атомов 60 кэВ и мощностью пучка ≈ 150 кВт, тестирование изготовленной спектроскопической аппаратуры в схеме CXRS диагностики установки Т-10;
- создание и использование программ “SOS” и “CXSFIT” для определения профилей ионной температуры из измеряемых CXRS и “пассивных” спектров линий;
- расчетный анализ ошибки измерения центральной ионной температуры CXRS диагностикой Т-15МД, демонстрирующий высокую точность измерений центральной ионной температуры $T_i(0) \approx \pm 2.5\%$, достигаемую за время накопления сигналов 3 мс в разряде Т-15МД с омическим нагревом и средними расчетными параметрами. Пространственное разрешение CXRS измерений в районах внутреннего и наружного транспортных барьеров достигает 3-4 см и 0.7-1 см соответственно.
- оценку влияния на точность CXRS измерения $T_i(r)$ таких эффектов, как паразитные засветки из областей бампер-лимитера и дивертора установки.

5. Разработана схема совместных измерений $T_i(r)$ профилей CXRS и “пассивным” методами на Т-15МД.

Список цитируемой литературы

1. Viezzer E. Investigation of passive edge emission in charge exchange spectra at the ASDEX Upgrade tokamak / Viezzer E., Putterich T., Dux R., Kallenbach A., ASDEX Upgrade Team // Plasma Phys. Controlled Fusion – 2011. – Т. 53 – № 3 (035002).
2. Bell R. Utilization of passive emission contributing to charge exchange spectra in NSTX / Bell R., Diallo A., LeBlanc B., Podest`a M., Scotti F. // 54th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics – 2012. – Providence, Rhode Island, <http://meetings.aps.org/Meeting/DPP12/Session/PP8.36>.
3. Klyuchnikov L.A. Spatially resolved spectroscopic ion temperature measurements at plasma edge of the T-10 tokamak / Klyuchnikov L.A., Krupin V.A., Nurgaliev M.R., Nemets A.R., Zemtsov I.A., Tugarinov S.N., Naumenko N.N. // Review of Scientific Instruments – 2017 – Т. 88 – 093508.
4. Krupin V.A. Study of lithium influx, radiation, transport and influence on plasma parameters in the T-10 tokamak / Krupin V.A., Klyuchnikov L.A., Nurgaliev M.R., Nemets A.R., Zemtsov I.A., Dnestrovskiy A.Yu., Grashin S.A., Kislov A.Ya., Myalton T.B., Sarychev D.V., Sergeev D.S., Solovev N.A., Trukhin V.M. // Plasma Phys. Control. Fus. – 2019 – V. 62 – № 2 – 025019 (25 p).