

РЕГИСТРАЦИЯ ВНУТРЕННЕГО ТРАНСПОРТНОГО БАРЬЕРА С ПОМОЩЬЮ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА ТОКАМАКЕ T-10

© 2024 г. Г. М. Асадулин^{a,*,**}, Н. А. Кирнева^{a,b}, И. С. Бельбас^a, А. В. Горшков^a,
Д. С. Панфилов^{a,b}, С. В. Крылов^a, А. Р. Немец^a, Д. С. Сергеев^a, Н. А. Соловьев^a

^a Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

^b Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

* e-mail: asadulingm@gmail.com

** e-mail: Asadulin_GM@nrcki.ru

Поступила в редакцию 14.11.2023 г.

После доработки 25.12.2023 г.

Принята к публикации 25.12.2023 г.

В 2016 г. модернизирована диагностика томсоновского рассеяния токамака T-10. Новая система основана на 100-Гц Nd: YAG-лазере и может проводить измерения на протяжении всего плазменного разряда с интервалом в 10 мс и пространственным разрешением до 5 мм. С помощью модернизированной диагностики проводились измерения электронной температуры в экспериментальных кампаниях токамака T-10 в 2016–2018 гг. В режимах с электронно-циклотронным нагревом продемонстрировано формирование областей с повышенным градиентом температуры, которое было интерпретировано как формирование внутреннего транспортного барьера. Проведенное моделирование эволюции профиля тока в коде ASTRA позволило связать положение барьера с положением рациональной поверхности $q = 1$.

Ключевые слова: токамак T-10, лазерная диагностика, томсоновское рассеяние, внутренний транспортный барьер

DOI: 10.31857/S0367292124020016, EDN: SDCITL

1. ВВЕДЕНИЕ

Создание режимов улучшенного удержания плазмы — одно из необходимых условий для реализации энергетически выгодного режима работы токамаков следующего поколения, в том числе и установки-реактора [1]. К режимам улучшенного удержания относятся режимы с внешним (H-мода) и внутренним транспортным барьером. Транспортным барьером обычно называется область со сниженным аномальным переносом тепла и/или частиц вследствие частичного или полного подавления турбулентности, определяющей перенос в этой области.

Если уменьшение переноса (снижение турбулентных потоков и снижение соответствующих коэффициентов переноса) наблюдается в центральной части плазменного шнура, $0.1 < \rho_{ITB} < 0.8$, то говорят о формировании внутреннего транспортного барьера (ВТБ) [2].

Режимы с ВТБ были получены на всех действующих токамаках как при ионном, электронном, так и смешанном нагреве [3–6]. Особенности формирования ВТБ в различных условиях и теоретические подходы к описанию физических механизмов формирования ВТБ подробно рассмотрены в [3]. Многочисленные

эксперименты [7–9] показали, что конфигурация со слабым магнитным широм вблизи рациональной поверхности является благоприятной для формирования ВТБ. Особенно это является критичным в режимах с преобладающим электронным нагревом плазмы.

Формирование ВТБ определяется по появлению области с повышенным градиентом температуры, плотности и скорости вращения плазмы при неизменных источниках. При наличии соответствующих измерений в области ВТБ отмечается возникновение особенности на профиле радиального электрического поля E_r [3] и подавление турбулентности в зоне барьера [7, 10].

Для надежной регистрации и изучения транспортных барьеров используются следующие диагностики [3]:

- активная спектроскопия (CXRS) для определения профилей ионной температуры, скорости вращения плазмы, восстановления профиля E_r ;
- зондирование плазмы пучком тяжелых ионов (НВР) для измерения профиля потенциала плазмы и определения $E_r(r)$;
- рефлектометрия для регистрации изменения турбулентности в области ВТБ;

– электронно-циклотронное излучение (ЭЦИ) для регистрации момента формирования ВТБ и эволюции профиля электронной температуры во времени;

– томсоновское рассеяние (ТР) для исследования формирования барьера на профилях электронной плотности и температуры.

В экспериментах на установке Т-10 формирование ВТБ наблюдалось при электронно-циклотронном (ЭЦ) нагреве в режиме с отрицательным магнитным широм [10], в режимах со слабым широм вблизи рациональной поверхности $q = 1$ [7, 8], в режимах с инъекцией водородных пеллет [12], а так же ВТБ события, связанные со спонтанной инъекцией примесей в плазму [13] и с перестройкой профиля q в пилообразных колебаниях [14]. Отметим, что особенность в поведении электронной температуры и рентгеновского излучения вблизи поверхности $q = 1$ в экспериментах Т-10 отмечалось уже в [15].

В работе [7] зона слабого шира вблизи рациональной поверхности $q = 1$ создавалась с помощью нецентрального ЭЦ-нагрева в области $\rho = 0.6$. Увеличение градиента электронной температуры наблюдалось по ТР и ЭЦИ. Система ТР имела всего 9 точек на малый радиус, что позволяло получить пространственное разрешение ~ 2 см в области формирования ВТБ.

В данной работе представлены новые диагностические возможности системы ТР на токамаке Т-10 [16]. Для демонстрации возможностей модернизированной системы приведены результаты регистрации ВТБ в режимах с нецентральным ЭЦ нагревом. Проведено моделирование эволюции профиля тока с помощью кода ASTRA [17] для определения взаимосвязи положения ВТБ с положением рациональной поверхности.

2. ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Основу обновленной диагностики ТР на установке Т-10 составляет 100-Гц Nd: YAG-лазер, выдающий в импульсе до 2.5 Дж энергии на второй гармонике, $\lambda = 532$ нм. Для регистрации используется телевизионная система на основе CMOS-камеры и усилителя яркости (ЭОП). Излучение вводится в камеру токамака в вертикальном направлении с помощью многопроходной системы. Геометрия зондирования и сбора света представлена на рис. 1. Подробно техническое оснащение модернизированной диагностики рассмотрено в работе [16].

Лазер может работать на протяжении нескольких секунд, позволяя наблюдать изменение профилей температуры и плотности на протяжении всего плазменного разряда с интервалом в 10 мс. В разрядах с невысокой плотностью из-за недостаточного количества собираемого света и низкого соотношения

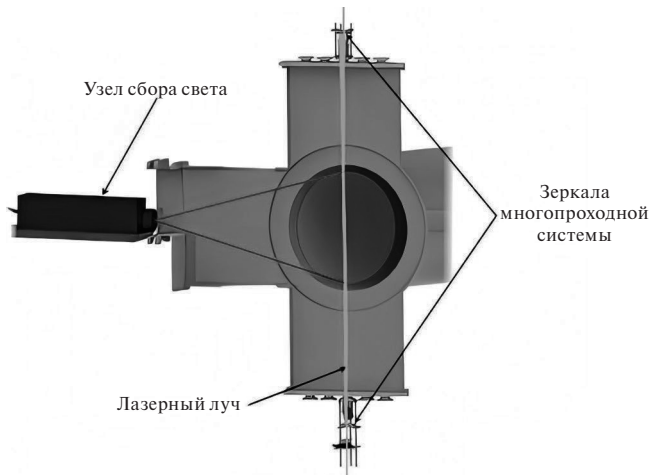


Рис. 1. Геометрия зондирования и сбора света системы ТР на токамаке Т-10.

сигнал-шум профили температуры предпочтительно определять по усредненным по нескольким лазерным импульсам кадрам. Усреднение используется на стационарных участках разряда с постоянными или слабо меняющимися параметрами плазмы.

Следует отметить, что в данной работе диагностика томсоновского рассеяния использовалась только для измерения профиля электронной температуры. Профили плотности восстанавливались из интерферометрических измерений. Измерения плотности с помощью томсоновского рассеяния не проводились из-за технических особенностей системы, что подробно обсуждается в работе [16].

3. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились на токамаке Т-10 (большой радиус тора $R = 1.5$ м, малый радиус $a = 0.3$ м, круглое поперечное сечение плазмы) в режимах с неосевой генерацией ЭЦ-тока. Нагрев плазмы в этих экспериментах осуществлялся с помощью двух групп гиротронов.

Первая группа — гиротроны с частотами 139.9 и 140.4 ГГц. Ввод мощности от этих гиротронов происходил под углом к большому радиусу тора (18° на границе плазмы), поэтому они осуществляли одновременно и нагрев плазмы и генерацию электронно-циклотронного тока.

Вторая группа — гиротрон с частотой 129 ГГц. Ввод мощности от этого гиротрона осуществлялся строго вдоль большого радиуса, поэтому он не давал вклад в ЭЦ-ток. В рассматриваемом диапазоне магнитных полей поглощение мощности от гиротрона с частотой 129 ГГц происходило вблизи центра плазменного шнура, $r_{\text{heat}} \sim 5\text{--}6$ см.

Таблица 1. Параметры типичных импульсов Т-10 с ВТБ при неосевой генерации ЭЦ-тока

Разряд	I_p , кА	B_T , Т	q_a	r_{cd} , см	f_{cd} , ГГц	P_{cd} , МВт	P_{ECRH} , МВт
#70289	220	2.26	3—3.1	10.0	139.9	0.8	0.8
#72766		2.31		7.6	140.4	0.75	1.2
#72767		2.28		9.2	140.4	0.75	1.2

Параметры рассматриваемых импульсов приведены в табл. 1.

Здесь I_p — ток плазмы, B_T — магнитное поле на оси плазменного шнура, $q_a = 2\pi a^2 B_T / (\mu_0 I_p R)$ — коэффициент запаса устойчивости на границе плазмы, μ_0 — магнитная постоянная; r_{cd} — положение максимума (по профилю) плотности генерируемого ЭЦ-тока, отсчитанное от магнитной оси шнура; f_{cd} — частота гиротрона, используемого для создания ЭЦ-тока; P_{cd} — ЭЦ-мощность, использованная для создания неиндукционного тока; P_{ECRH} — полная мощность ЭЦ-нагрева/генерации тока; $P_{ECRH} = P_{cd} + P_{heat}$, где $P_{heat} = 0.45$ МВт — мощность гиротрона с частотой 129 ГГц, идущая только на нагрев плазмы и не дающая вклад в генерацию тока.

На рис. 2 представлены временной ход центральной температуры, измеренной с помощью диагностики ЭЦИ [18], средней плотности, измеренной с помощью интерферометра вдоль центральной хорды, и суммарной мощности ЭЦ-нагрева. Отметим,

что гиротроны включаются на плато тока плазмы (момент выхода тока на плато $t_{pl} = 400$ —430 мс). На стадии электронно-циклотронного нагрева/генерации тока омическая мощность не превышает 200 кВт.

Во всех рассматриваемых импульсах в омической части разряда (до включения ЭЦ-мощности) наблюдаются пилообразные колебания (ПК). Это говорит о наличии в плазме поверхности с $q = 1$. Радиус переворота фазы пилообразных колебаний был определен из данных многоканальных рентгеновских измерений и составил: $r_s \sim 8$ —10 см (с учетом наличия измерительных каналов в области переворота фазы ПК).

На стороне сильного магнитного поля радиус переворота фазы ПК лежит в интервале -7 ... -10.5 см; на стороне слабого магнитного поля — в интервале 7.5 ... 9 см. Включение неосевой генерации тока приводит к стабилизации (исчезновению) пилообразных колебаний ($t = 550$ мс в импульсах #72766 и #72767; $t = 750$ мс в импульсе #70289). Последующее включение центрального нагрева в импульсах #72766 и #72767 вновь инициирует пилообразные колебания. Радиус переворота фазы пилообразных колебаний на стадии ЭЦ-нагрева ($t > 680$ мс) составляет 7.5 — 8.5 см.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

На рисунках 3—5 представлены результаты измерения профиля температуры с помощью диагностики томсоновского рассеяния в каждом из рассматриваемых импульсов для нескольких характерных моментов до и во время дополнительного нагрева. Для сравнения приведены профили, измеренные с помощью диагностики ЭЦИ, в те же моменты времени. Для характеристики величины градиента температуры были рассчитаны профили нормализованного градиента электронной температуры $R/L_{T_e} = (R/T_e)dT_e/dr$ и профили плотности, полученные из интерферометрических измерений путем решения обратной задачи. Импульсы приведены в порядке возрастания тороидального магнитного поля, что соответствует смещению области вклада СВЧ-мощности и области создания электронно-циклотронного тока от периферии к центру плазменного шнура.

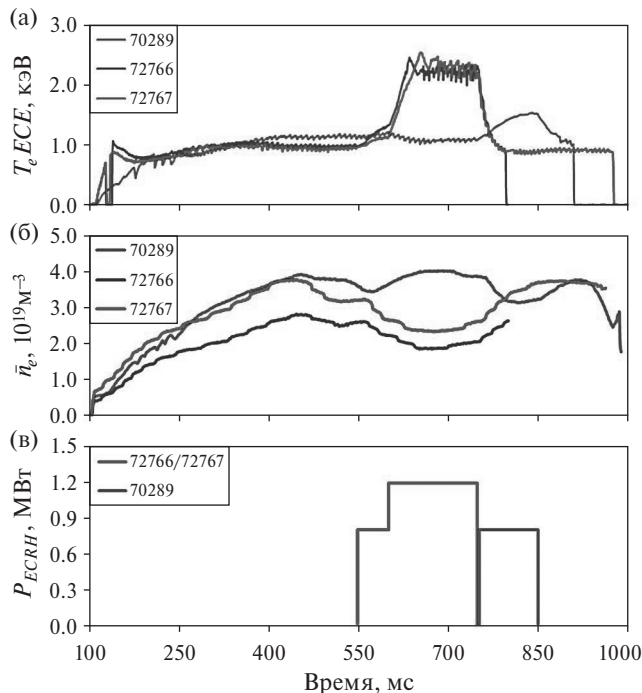


Рис. 2. Временной ход $T_e(0)$, полученной из измерений ЭЦИ (а), средней плотности (б), вложенной СВЧ-мощности (в).

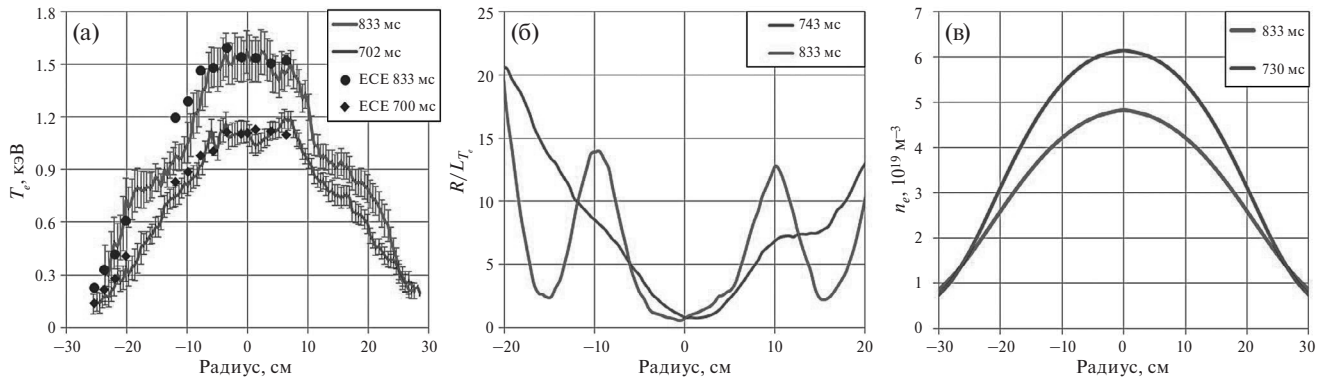


Рис. 3. Профили электронной температуры (а), нормализованного градиента температуры (б) и электронной плотности (в) в импульсе #70289, $B_T = 2.26$ Т.

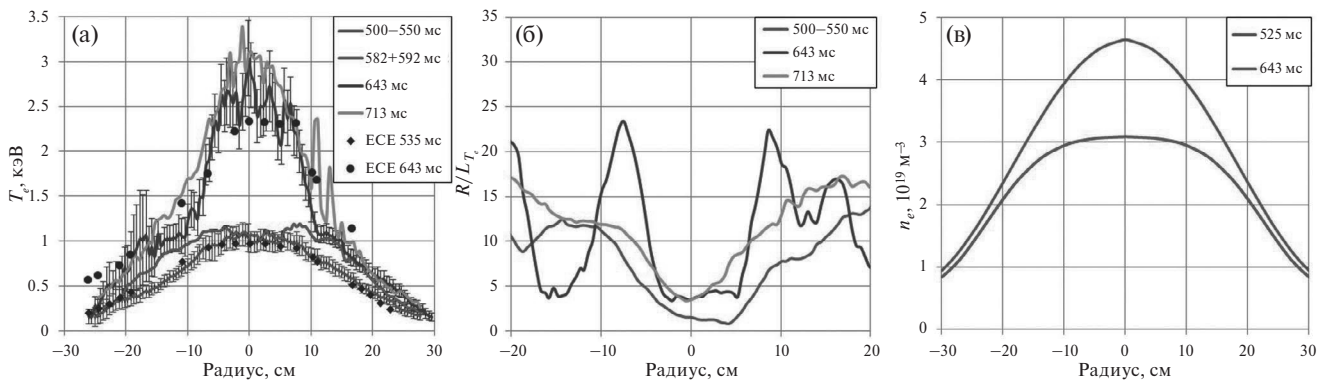


Рис. 4. Профили электронной температуры (а), нормализованного градиента температуры (б) и электронной плотности (в) в импульсе #72767, $B_T = 2.28$ Т.

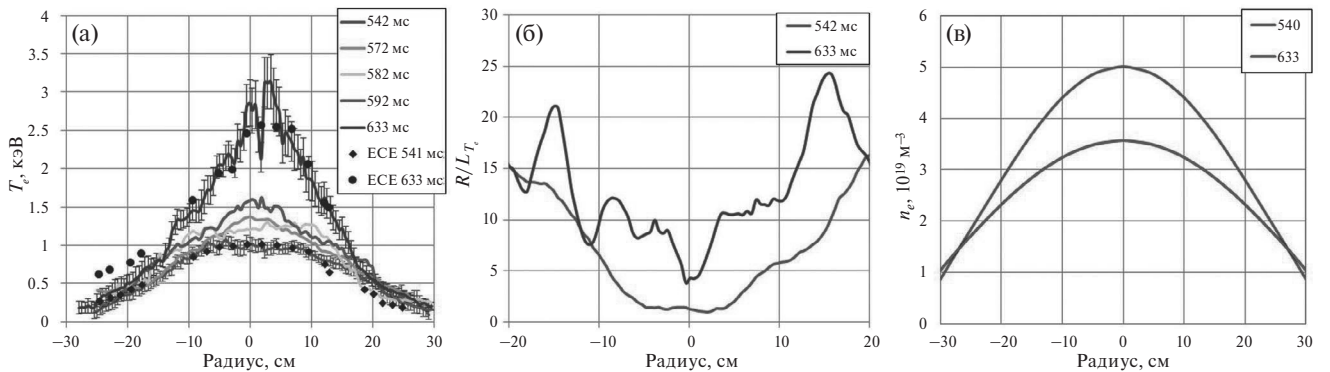


Рис. 5. Профили электронной температуры (а), нормализованного градиента температуры (б) и электронной плотности (в) в импульсе #72766, $B_T = 2.31$ Т.

На омической стадии разряда профили температуры во всех рассмотренных импульсах не имеют заметных особенностей. Значения нормализованных градиентов умеренные, $R/L_{T_e} \leq 10$, что соответствует обычно наблюдаемым величинам в режимах без ВТБ. При нецентральной ЭЦ-нагреве ($P_{ECRH} = 0,8$ МВт) в импульсе #70289 к моменту $t \sim 830$ мс нормализованный градиент температуры увеличивается до

$R/L_{T_e} \sim 15$ (рис. 3б), что может свидетельствовать о формировании ВТБ.

В импульсе #72767 через 50 мс после включения нецентрального нагрева ($P_{ECRH} = 0,75$ МВт) дополнительно включается гиротрон, обеспечивающий центральный вклад мощности ($P_{ECRH} = 0,45$ МВт), что приводит к формированию зоны повышенного градиента (рис. 4 а, б) с $R/L_{T_e} \sim 22$.

После возобновления пилообразных колебаний, $t > 680$ мс, зона повышенного градиента исчезает (профили в $t = 713$ мс на рис. 4а, б). В импульсе #72766, имеющем схожий сценарий нагрева, увеличение градиента температуры выражено довольно невнятно (рис. 5). Импульс #72766 отличается наибольшей величиной магнитного поля, а значит, область, где генерируется ЭЦ-ток, смещается ближе к центру. По-видимому, это приводит к разнице в формировании барьера.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для определения положения транспортного барьера относительно положения рациональных поверхностей и проверки предположений, высказанных выше, были выполнены расчеты эволюции профиля тока и профиля фактора запаса устойчивости q с помощью транспортного кода ASTRA.

Профили электронной температуры и плотности и их изменение во времени являлись входными данными для расчетов и брались из экспериментальных данных, полученных с помощью диагностик ТР и интерферометрии (см. рис. 3—5) соответственно. Эволюцию профиля тока моделировали в предположении о неоклассической проводимости по формуле Сотера—Ангиони [19] и с учетом бутстреп-тока. Величина и профиль электронно-циклотронного тока брались из расчетов по коду OGRAY [20] (рис. 6). Величина генерируемого тока в каждый момент корректировалась с учетом изменения температуры и плотности плазмы:

$$I_{cd}(t) = I_{cd}(t_{calc}) \cdot \frac{T_e(t)}{T_e(t_{calc})} \cdot \frac{n_e(t_{calc})}{n_e(t)}.$$

Эффективный заряд плазмы Z_{eff} принимался равным ≈ 3 , что соответствует оценке Z_{eff} из видимого континуума на омической стадии перед включением гиротронов.

Соответствие между расчетом и экспериментальными данными контролировалось по временному ходу напряжения на обходе. Как будет показано ниже, величины напряжения на обходе, полученные в расчете для всех трех импульсов, находятся в удовлетворительном согласии с измеренными значениями. Для разрядов #70289 и #72766 сравнивались расчетные и экспериментальные величины β_p и энергосодержания плазмы, W , на стационарных стадиях разряда. Отклонение расчетных величин от измеренных значений не превышает 15%.

Результаты расчетов показаны на рис. 7—9. На рис. 7а, 8а, 9а показано расчетное изменение профилей фактора запаса устойчивости $q(r)$. На рис. 7б, 8б, 9б для этих профилей $q(r)$ построены распределения магнитного шира $shear(r) = (r/q) \cdot dq/dr$. Временной ход напряжения на обходе, демонстрирующий удовлетворительное согласие между расчетными и экспериментальными данными приведен на рис. 7в, 8в, 9в.

Из приведенных рисунков видно, что расчетное положение поверхности $q = 1$ на омической стадии согласуется с оценкой положения r_s из многоканальных рентгеновских измерений. Включение нецентрального ЭЦ-нагрева и генерации тока приводит к снижению магнитного шира в зоне вклада мощности. В рассматриваемых экспериментах она соответствует области вблизи поверхности r_s .

При включении нагрева и генерации тока, согласно результатам моделирования, поверхность $q = 1$ не исчезает, но снижается магнитный шир вблизи нее. Этим может быть объяснено появление области увеличенного градиента температуры в импульсах #70289 и #72767.

В соответствии с теоретическими представлениями [3, 7, 22], формирование транспортного барьера в зоне слабого шира вблизи рациональной поверхности связано с образованием разрежения рациональных поверхностей (так называемый гар).

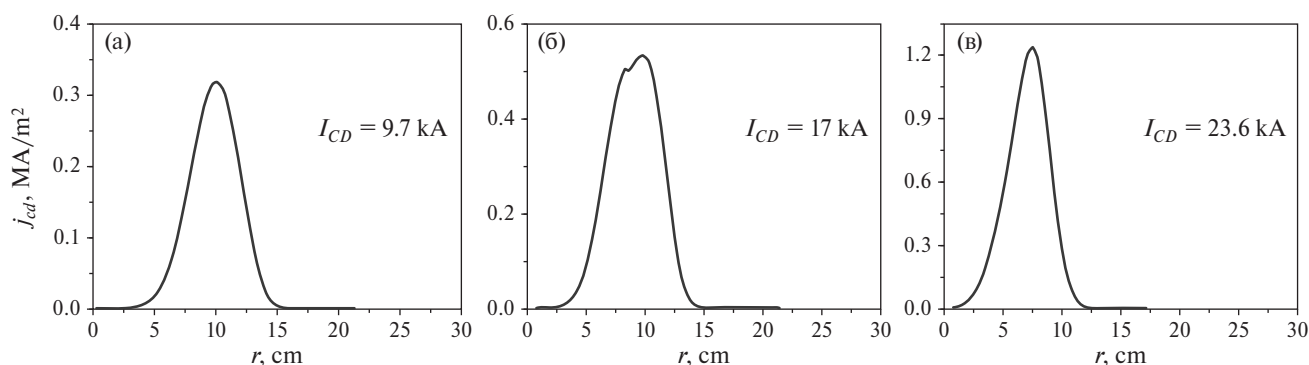


Рис. 6. Профили электронно-циклотронного тока, рассчитанные по коду OGRAY: а) импульс #70289, $t = 833$ мс, $B_T = 2.26$ Т; б) импульс #72767, $t = 643$ мс, $B_T = 2.28$ Т; в) импульс #72766, $t = 633$ мс, $B_T = 2.31$ Т. Величины генерируемого ЭЦ-тока указаны в поле рисунка.

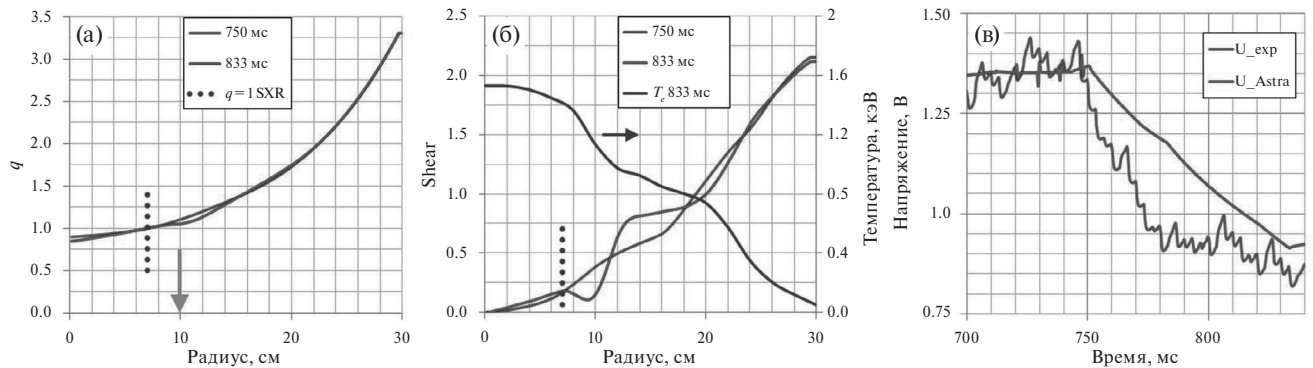


Рис. 7. Рассчитанные профили q (а), магнитный шир (б) и временной ход напряжения на обходе (в) для импульса #70289 для двух моментов. Для удобства на рис. (б) приведен профиль электронной температуры, измеренный с помощью ТР. Стрелкой на рис. (а) показано положение максимума плотности генерируемого ЭЦ-тока, пунктирные линии на рис. (а) и (б) — положение радиуса переворота фазы пилообразных колебаний в омической фазе разряда.

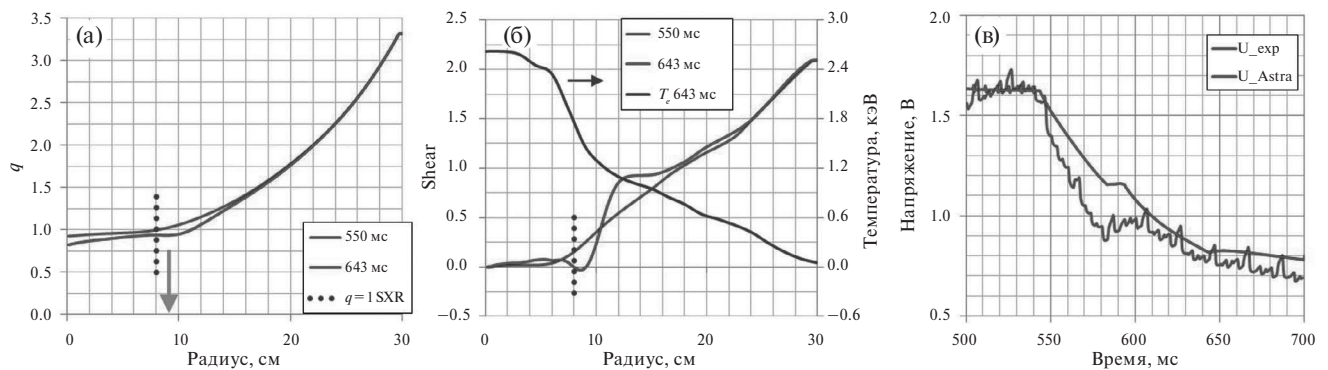


Рис. 8. Рассчитанные профили q (а), магнитный шир (б) и временной ход напряжения на обходе (в) для импульса #72767 для двух моментов. Для удобства на рисунке (б) приведен профиль электронной температуры, измеренный с помощью ТР. Стрелкой на рисунке (а) показано положение максимума плотности генерируемого ЭЦ-тока, пунктирные линии на рисунке (а) и (б) — положение радиуса переворота фазы пилообразных колебаний в омической фазе разряда.

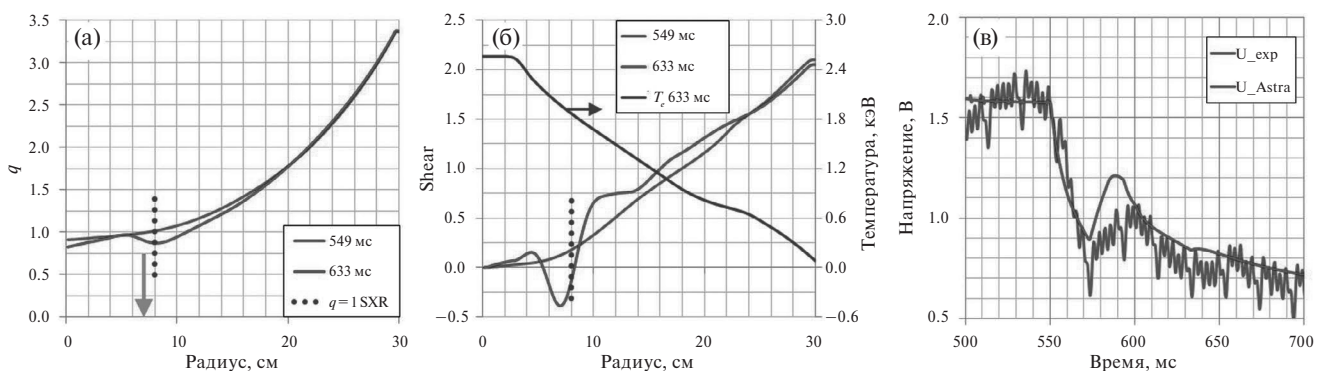


Рис. 9. Рассчитанные профили q (а), магнитный шир (б) и временной ход напряжения на обходе (в) для импульса #72766 для двух моментов. Для удобства на рисунке (б) приведен профиль электронной температуры, измеренный с помощью ТР. Стрелкой на рисунке (а) показано положение максимума плотности генерируемого ЭЦ-тока, пунктирные линии на рисунке (а) и (б) — положение радиуса переворота фазы пилообразных колебаний в омической фазе разряда.

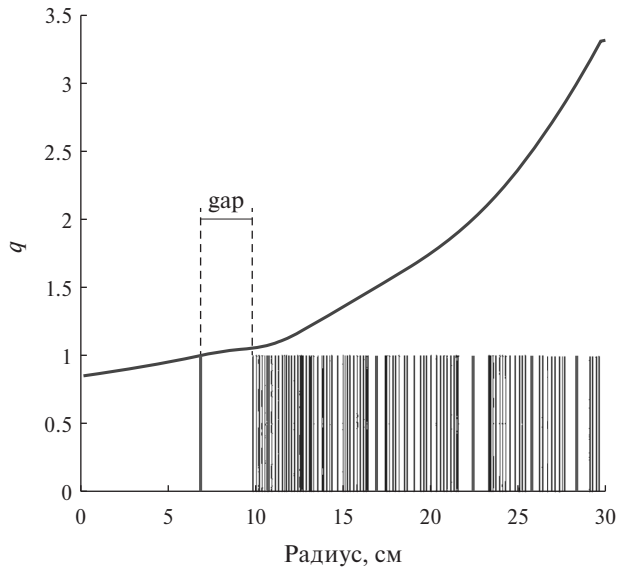


Рис. 10. Расчетный профиль q и расположение рациональных поверхностей (вертикальные линии) в импульсе #70289 на 833 мс. Красным отмечены поверхности $q = 1; 1.5; 2; 2.5; 3$.

На рис. 10 проиллюстрировано разрежение рациональных поверхностей в импульсе #70289.

На изображении приведены расчетный профиль $q(r)$ и расположение рациональных поверхностей $q = m/n$ для полоидального модового числа $m \leq 20$ в мо-

мент $t = 833$ мс. Четко видно разрежение магнитных поверхностей вблизи поверхности $q = 1$. Аналогичная картина наблюдается в импульсе #72767.

Результаты моделирования позволяют интерпретировать различие между импульсами #72766 и #72767. В импульсе #72766 из-за более высокого значения тороидального магнитного поля область генерации ЭЦ-тока оказывается расположена внутри поверхности $q = 1$. Это приводит не к снижению, а к увеличению магнитного шира вблизи поверхности $q = 1$ (ср. рис. 86 и 96), и как следствие, к уменьшению разреженности магнитных поверхностей вблизи $q = 1$.

Как было сказано, формирование ВТБ является результатом снижения турбулентного переноса и связанных с ним транспортных коэффициентов. При несколько упрощенном рассмотрении (без разделения переноса на диффузионную и недиффузионную составляющую) изменение коэффициентов переноса при формировании транспортного барьера может быть количественно охарактеризовано с использованием эффективных транспортных коэффициентов.

На рисунке 11 представлен результат оценки эффективной электронной температуропроводности $\chi_{e,eff}$ в одном из представленных импульсов (#70289). Для определения эффективной температуропроводности использовалась формула

$$\chi_{e,eff}(r) = \frac{Q_e^{TOT}(r)}{V'(r) \cdot n_e(r) \cdot grad(T_e(r))},$$

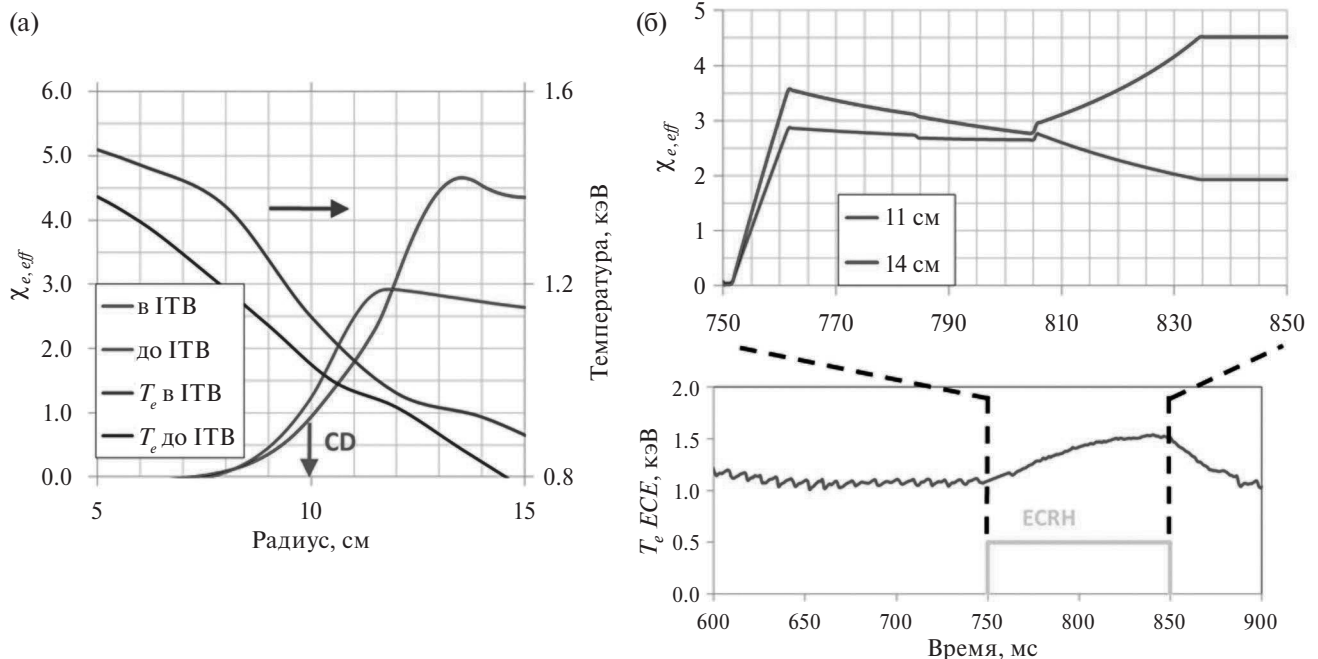


Рис. 11. а) Расчетные профили эффективной электронной температуропроводности в импульсе #70289 до формирования транспортного барьера и на стадии сформированного ВТБ; б) временной ход эффективной электронной температуропроводности в зоне барьера и вне ее (11 и 14 см соответственно).

где Q_e^{TOT} — поток тепла через поверхность радиуса r , V — элемент объема.

Рисунок 11а демонстрирует профили $\chi_{e, eff}$ и T_e в моменты до формирования транспортного барьера (813 мс) и в течение существования ВТБ (833 мс). Видно, что область повышенного градиента электронной температуры соответствует области сниженного эффективного коэффициента электронной температуропроводности, как и следовало ожидать при формировании транспортного барьера.

На рисунке 11б представлен временной ход $\chi_{e, eff}$ внутри зоны повышенного градиента температуры и вне ее, 11 и 14 см соответственно, в течение импульса ЭЦ-генерации тока. Можно отметить важную особенность: коэффициент температуропроводности на $r = 11$ см снижается не сразу при включении гиротрона, а с задержкой ~ 50 мс. Проведенное моделирование позволяет связать наблюдаемую временную задержку с перестройкой профиля $q(r)$.

Энергетическое время жизни плазмы в обсуждаемых режимах $\tau_E = 24$ мс (#70289), 833 мс. Полная мощность нагрева $P_{полная} = 1$ МВт, $\tau_E = 15$ мс (#72767, 643 мс, $P_{полная} = 1.4$ МВт), $\tau_E = 11$ мс (#72766, 633 мс, $P_{полная} = 1.4$ МВт) — и оказывается несколько ниже значений, предсказываемых скейлингом L -моды [1], но соответствует типичным значениям, наблюдаемым в L -моды Т-10 в разрядах с плотностью $\bar{n}_e \sim 0.3n_{Gw}$ (см. [23], n_{Gw} — плотность Гринвальда). Изменение энергетического времени жизни плазмы вследствие формирования ВТБ находится в пределах экспериментальной погрешности. Анализ собственно изменения удержания в режимах данного типа был проведен в работах [7, 8] и не входит в задачи данной статьи.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новые диагностические возможности модернизированной системы томсоновского рассеяния на токамаке Т-10 позволили наблюдать эволюцию профиля электронной температуры плазмы на протяжении всего плазменного разряда с интервалом в 10 мс и пространственным разрешением до 5 мм. Это позволило более подробно проследить временную эволюцию профилей температуры и описать динамику формирования ВТБ в режимах с нецентральным нагревом и генерацией электронно-циклотронного тока плазмы, исследованных в работах [7, 21].

Показано, что в режимах с нецентральным ЭЦР-нагревом и генерацией тока (вклад мощности вблизи поверхности $q = 1$) наблюдается формирование областей повышенного градиента электронной температуры, что может быть интерпретировано как формирование внутреннего транспортного барьера.

Проведено моделирование эволюции профиля тока плазмы в коде ASTRA с использованием измеренных профилей электронной температуры. Показано, что формирование областей повышенного градиента температуры коррелирует со снижением магнитного шира вблизи поверхности $q = 1$. Это не противоречит существующим представлениям о механизме формирования транспортных барьеров в области слабого магнитного шира вблизи рациональных поверхностей и согласуется с ранее опубликованной в работах [7, 21] интерпретацией результатов Т-10.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ “Курчатовский институт”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ITER Physics Basis* // Nuclear Fusion. 1999. V. 39. P. 2175. DOI: 10.1088/0029-5515/39/12/302.
2. *Ida K., Fujita T.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. V. 60. P. 033001. DOI: 10.1088/1361-6587/aa9b03.
3. *Connor J.W., Fukuda T., Garbet X., Gormezano C., Mukhovatov V., Wakatani M., the ITB Database Group, the ITPA Topical Group on Transport and Internal Barrier Physics* // Nuclear Fusion. 2004. V. 44. R1. DOI: 0.1088/0029-5515/44/4/R01.
4. *Askinazi L.G., Bulanin V.V., Vildjunas M.I., Golant V.E., Gorokhov M.V., Kornev V.A., Krikunov S.V., Lebedev S.V., Petrov A.V., Rozhdestvensky V.V., Tukachinsky A.S. and Zhubr N.A.* // Plasma Phys. Control. Fusion 2004. V. 46. A51. DOI: 10.1088/0741-3335/46/5A/005.
5. *Курский Г.С., Гусев В.К., Толстяков С.Ю., Березуцкий А.А., Буланин В.В., Варфоломеев В.И., Кочергин М.М., Минаев В.Б., Мухин Е.Е., Патров М.И., Петров А.В., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Семёнов В.В., Яшин А.Ю., Хромов Н.А.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 23. С. 82.
6. *Telnova A. Yu., Kurskiev G. S., Kiselev E. O., Bakharev N. N., Gusev V. K., Khromov N. A., Medvedev S. Yu., Miinaev V. B., Miroshnikov I. V., Patrov M. I., Petrov Yu. V., Sakharov N. V., Sladkomedova A. D., Shchegolev P. B., Solokha N. V., Tokarev V. A., Tolstyakov S. Yu. and Tukhmenova E. A.* // Plasma Sci. Technol. 2019. V. 21. P. 115101. DOI: 10.1088/2058-6272/ab2ff6.
7. *Razumova K.A., Donné A. J.H., Andreev V. F., Hoge-weijs G. M.D., Bel’bas I.S., Borschegovskij A. A., Dnestrovskij A. Yu., Chistyakov V. V., Jaspers R., Kislov A. Ya., Ilin V.I., Krupin D. A., Krylov S. V., Kravtsov D. E., Liang Y., Lysenko S. E., Maslov M. V., Min E., Myalton T. B., Notkin G. E., Ossipenko M. V., Piteriskij V. V., Petrov D. P., Roi I. N., Ryzhakov D. V., Shelukhin D. A., Sushkov A. V., Trukhin V. M., Vershkov V. A., Westerhof E., T-10 team and TEXTOR team* // Nucl. Fusion. 2004. V. 44. P. 1067. DOI: 10.1088/0029-5515/44/10/002.
8. *Neudatchin S.V., Kislov A. Ya., Krupin V.A., Lysenko S.E., Pavlov Yu.D., Syshkov A. V., Borshagovskii A. A.,*

- Chistyakov V.V., Ilin V.I., Piterskii V.V., Poznyak V.I. and Roi I. N. // Nucl. Fusion. 2003. № 1405. DOI: 10.1088/0029-5515/43/11/012.
9. Gormezano C. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1999. V. 41. B367. DOI: 10.1088/0741-3335/41/12B/327.
 10. Burrell K.H. // Phys. Plasmas. 1997. V. 4. № 1499. DOI: 10.1063/1.872367.
 11. Kirneva N.A., Esipchuk Yu.V., Borshegovskij A.A., Chistyakov V.V., Gorbunov E. P., Denisov V. Ph., Dremine M. M., Kakurin A. M., Khimchenko L. N., Kislov D. A., Krylov S. V., Krupin V. A., Myalton T. B., Novikov A. Yu., Orlovskij I. I., Pavlov Yu. D., Petrov D. P., Ploskirev G. N., Roy I. N., Ryjakov D. V., Shelukhin D. A., Skovoroda A. A., Skosirev Yu. V., Slepneva L. I., Sushkov A. V., Trukhin V. M., Trukhina E. V. and the T-10 Team // Plasma Phys. Control. Fusion. 2005. V. 47. № 1787. DOI: 10.1088/0741-3335/47/10/011.
 12. Pavlov Yu. D., Dnestrovskij Yu. N., Borshegovskij A. A., Chistyakov V. V., Dnestrovskij A. Yu., Dremine M. M., Gott Yu. V., Grashin S. A., Gorbunov E. P., Zhuravlev V. A., Khimchenko L. N., Khramenkov A. V., Kislov A. Ya., Krylov S. V., Krupin V. A., Lysenko S. E., Matveev V. V., Myalton T. B., Prut V. V., Roy I. N., Shelukhin D. A., Vershkov V. A., Zaveriaev V. S. // Proc. 28th EPS Conf. Control. Fusion and Plasma Phys. Funchal. 2001. ECA, V. 25A. P. 1409.
 13. Neudatchin S.V., Pimenov I. S., Borshegovskiy A. A., Kislov A. Ya., Kuyanov A. Yu // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1383. P. 012005. DOI: 10.1088/1742-6596/1383/1/012005.
 14. Neudatchin S.V., Shelukhin D. A., Mustafin N. A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 907. P. 012015. DOI: 10.1088/1742-6596/907/1/012015.
 15. Бугаря В. И., Васин Н. Л., Вершков В. А., Егоров С. М., Есипчук Ю. В., Журавлев В. А., Ковров П. Е., Крупин В. А., Пименов А. Б., Разумова К. А., Стрижов В. Ф., Юшманов П. Н. // Физика плазмы. 1983. Т. 9. С. 914.
 16. Asadulin G. M., Bel'bas I. S., Gorshkov A. V. // Fusion Eng. and Design. 2022. V. 177. P. 113066. DOI: 10.1016/J.FUSENGDES.2022.113066.
 17. Pereverzev G. V., Yushmanov P. N. Preprint IPP 5/98. February, 2002.
 18. Позняк В. И., Валенсия О., Гридина Т. В., Путерский В. В., Плоскирев Г. Н., Плоскирев Е. Г. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 9. С. 739.
 19. Sauter O., Angioni C., Lin-Liu Y. R. // Physics of Plasmas. 1999. V. 6. P. 2834. DOI: 10.1063/1.873240.
 20. Zvonkov A. V., Kuyanov A. Yu., Skovoroda A. A., Timofeev A. V. // Plasma Phys. Rep. 1998. V. 24. P. 389.
 21. T-10 Team (prepared by D. A. Kislov) // Nucl. Fusion. 2001. № 1473. DOI: 10.1088/0029-5515/41/10/314.
 22. Garbet X., Bourdelle C., Hoang G. T., Maget P., Benkadda S., Beyer P., Figarella C., Voitkovitch I., Agullo O., Bian N. // Phys. Plasmas. 2001. V. 8. P. 2793. DOI: 10.1063/1.1367320.
 23. Esipchuk Yu. V., Kirneva N. A., Borshegovskij A. A., Chistyakov V. V., Denisov V. Ph., Dremine M. M., Gorbunov E. P., Grashin S. A., Kalupin D. V., Khimchenko L. N., Khramenkov A. V., Kirnev G. S., Krilov S. V., Krupin V. A., Myalton T. B., Pavlov Yu. D., Piterskij V. V., Ploskirev G. N., Poznyak V. I., Roy I. N., Shelukhin D. A., Skosyrev Yu. V., Trukhin V. M., Trukhina E. V., Vershkov V. A., Veschev E. A., Volkov V. V., Zhuravlev V. A. and T-10 Team // Plasma Phys. Control. Fusion. 2003. № 45. P. 793. DOI: 10.1088/0741-3335/45/5/320.

Detection of Internal Transport Barrier in the T-10 Tokamak Using Thomson Scattering Diagnostics

© 2024 G. M. Asadulin^{a,*}, N. A. Kirneva^{a,b}, I. S. Bel'bas^a, A. V. Gorshkov^a,
D. S. Panfilov^{a,b}, S. V. Krylov^a, A. P. Nemets^a, D. S. Sergeev^a, and N. A. Solov'ev^a

^a National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, 123098, Russia

^b National Research Nuclear University "Moscow Engineering Physics Institute", Moscow, 115409, Russia

* e-mail: asadulingm@gmail.com

At the T-10 tokamak, the Thomson scattering diagnostics was upgraded in 2016. The new system is based on the Nd: YAG laser with the pulse repetition frequency of 100 Hz; the measurements can be performed every 10 ms during the entire plasma discharge at the spatial resolution of up to 5 mm. Using the upgraded diagnostics, the electron temperature measurements were performed during experimental campaigns of the T-10 tokamak in 2016–2018. In the regimes with the electron cyclotron resonance heating, it was demonstrated that the regions with increased temperature gradients form in the plasma, which was interpreted as the formation of internal transport barrier. The ASTRA-code-based simulations of the current profile time evolution made it possible to correlate the positions of the barrier and the rational surface $q = 1$.

Keywords: T-10 tokamak, laser diagnostics, Thomson scattering, internal transport barrier