

ДИАГНОСТИКА ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ С ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ЗОНДИРОВАНИЯ НА ТОКАМАКЕ T-15МД

© 2024 г. Г.М. Асадулин^{a,b,*,**}, И. С. Бельбас^a, А. В. Горшков^a, Н. А. Кирнева^{a,b},
Д. С. Панфилов^{a,b}, Ю. И. Толпегина^a, Н. С. Жильцов^c, Г. С. Курские^c, Е. Е. Ткаченко^c

^aНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

^bНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

^cФизико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: asadulingm@gmail.com

**e-mail: asadulin_GM@nrcki.ru

Поступила в редакцию 19.07.2024 г.

После доработки 10.09.2024 г.

Принята к публикации 15.09.2024 г.

В 2023 г. на токамаке T-15МД была установлена и введена в эксплуатацию диагностика томсоновского рассеяния с тангенциальной геометрией зондирования. Новая система основана на 100-Гц Nd:YAG лазере, с энергией в импульсе до 3 Дж энергии на первой гармонике, $\lambda = 1064$ нм. Система позволяет проводить измерения на протяжении всего плазменного разряда при его длительности до 10 с с временным интервалом в 10 мс. Лазерное излучение вводится в камеру токамака в экваториальной плоскости, проходя через весь плазменный объем от внутренней до внешней периферии плазмы. Система сбора рассеянного излучения расположена внутри экваториального патрубка установки. Диапазон углов рассеяния составляет от 11° до 56° . Системы регистрации основана на 10 полихроматорах на интерференционных фильтрах. С помощью диагностики были проведены измерения электронной температуры и плотности в экспериментальной кампании конца 2023 г. Продемонстрирована работа системы в течение всего разряда токамака в широком диапазоне температур и при длительности разряда до 2 с.

Ключевые слова: токамак T-15МД, лазерная диагностика, томсоновское рассеяние

DOI: 10.31857/S0367292124110018, **EDN:** FCIPPK

1. ВВЕДЕНИЕ

Весной 2023 г. на токамаке T-15МД (токамак D-образного сечения, $R = 1.5$ м, $a = 0.67$ м) была получена первая плазма. Осенью 2023 г. состоялась вторая экспериментальная кампания, в ходе которой был получен ток плазмы до 260 кА с длительностью плазменного разряда до 2 с [1].

Диагностический комплекс томсоновского рассеяния на токамаке T-15МД является одним из основных инструментов для изучения электронной компоненты плазмы. По плану он будет включать в себя несколько систем, с различной геометрией зондирования [2–4]. В настоящий момент на установке смонтирована и введена в строй диагностическая система томсоновского рассеяния с тангенциальной геометрией зондирования (ТТР). В основе новой системы лежит 100-Гц Nd:YAG-лазер, с энергией в импульсе до 3 Дж на первой гармонике ($\lambda = 1064$ нм) при длительности в 10 нс (ООО “ЛОС”, <https://los.su/ru>). При диаметре лазерного пучка в 15 мм расходимость составляет менее 0.5 мрад. Система позволяет проводить измерения эволюции электронной температуры и плотности плазмы на протяжении всего плазменного раз-

ряда с длительностью до 10 с в 10 пространственных точках. Временной интервал между измерениями составляет 10 мс.

В работе представлено описание диагностической системы, а также первые результаты работы системы в эксперименте.

2. ГЕОМЕТРИЯ СИСТЕМЫ

Лазерное излучение вводится в камеру токамака в экваториальной плоскости, проходя через весь плазменный объем от внутренней до внешней периферии плазмы (рис. 1). Система сбора рассеянного излучения расположена в экваториальном патрубке установки, через который осуществляется вывод лазерного излучения.

Расположение узла сбора позволяет видеть весь плазменный шнур от внутренней до внешней периферии. Диапазон углов рассеяния при этом составляет от 11° до 56° . Это приводит к заметно неравномерному распределению пространственных каналов по большому радиусу установки. На рис. 2 представлено вертикальное сечение камеры токамака и расположение

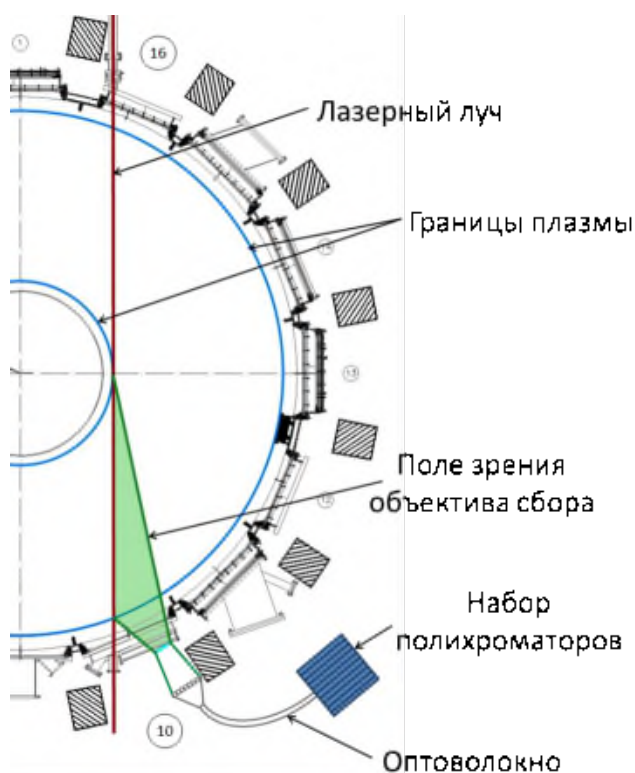


Рис. 1. Экваториальное сечение камеры токамака и схема расположения диагностической системы.

пространственных каналов ТТР в проекции на большой радиус.

3. ОПТИЧЕСКИЙ ТРАКТ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Одной из особенностей системы является длинный оптический тракт ввода лазерного излучения в камеру установки. Он включает в себя 9 поворотных зеркал: два в лазерном помещении и семь в шести поворотных узлах в зале токамака. Все зеркала оптимизированы на отражение первой и второй гармоники излучения лазера под углом 45° . Это позволяет проводить юстировку оптического тракта в видимом диапазоне спектра. Общая длина тракта до точки фокусировки излучения в камере токамака превышает 40 м. Из-за большой длины оптического пути на форме лазерного пучка начинают сказываться дифракционные эффекты, которые могут привести к повреждению зеркал и других оптических элементов. Для снижения влияния этих эффектов размер пучка увеличивается с помощью расширяющего телескопа с 15 до 45 мм. В последнем поворотном узле устанавливается ахроматический фокусирующий объектив, состоящий из двух подвижных линз, для возможности настройки положения точки фокусировки.

Первоначальная юстировка всего тракта осуществлялась с помощью вспомогательного узла на основе фотоаппарата с перестраиваемым фокусным расстоя-

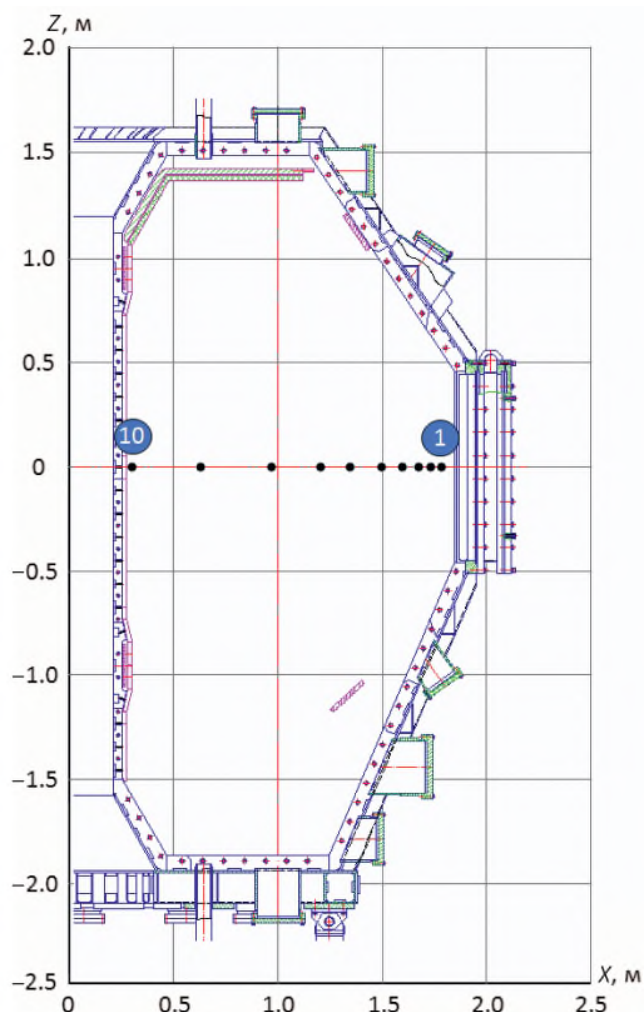


Рис. 2. Расположение пространственных каналов ТТР на токамаке (черные точки), цифрами отмечены номера крайних каналов.

нием. Фотоаппарат устанавливался на лазерную оптическую ось с помощью двух зеркал, одно из которых вводилась в основной тракт с помощью моторизованного позиционера на время проведения юстировки. С его помощью при последовательной фокусировке все зеркала тракта были выставлены так, чтобы их изображения были концентрическими. Таким образом выставляется оптическая ось тракта, и промежуточные зеркала более не участвуют в дальнейшей юстировке. Благодаря данному узлу можно осуществлять визуальный контроль за всем трактом вплоть до выходного окна из камеры токамака.

Завершается юстировка тракта с помощью лазерной указки небольшой мощности (видимый диапазон, $\lambda = 532$ нм), излучение которой заводится в основной тракт с помощью зеркал вспомогательного узла. Ввод луча в вакуумную камеру осуществляется с помощью зеркал в последнем поворотном узле.



Рис. 3. Расположение узла сбора света на фланце токамака.

4. СИСТЕМА СБОРА И РЕГИСТРАЦИИ

Для сбора рассеянного света используется 6-линзовый объектив, проецирующий свет от лазерной хорды на входные торцы оптоволоконных жгутов, передающих свет к спектральным приборам. Во всех пространственных каналах лазерный луч полностью перехватывается по ширине. Используется волокно с числовой апертурой $NA = 0.22$. Все элементы системы сбора и регистрации света рассчитаны на полную апертуру оптоволоконна. Волоконные жгуты устанавливаются в отдельные посадочные места на специальной пластине, закрепленной на платформе из нескольких моторизированных трансляторов для прецизионной юстировки относительно объектива. Корпус объектива и все несущие элементы узла сбора изготовлены из пластика, так как узел сбора располагается в непосредственной близости от вакуумной камеры, внутри обмотки тороидального поля установки (рис. 3).

Для регистрации собранного рассеянного света используются шестиканальные полихроматоры на основе интерференционных фильтров и лавинных фотодиодов, ранее проходивших испытание на инструментальной базе установки T-10 [5–7]. Пять каналов из шести являются измерительными. Шестой же отведен под лазерную длину волны для возможности проведения калибровок по релеевскому рассеянию. Спектральные характеристики каналов в сравнении со спектрами томсоновского рассеяния, рассчитанными для различных температур в центральной зоне плазмы, приведены на рис. 4.

5. ПАРАЗИТНОЕ РАССЕЯНИЕ И КАЛИБРОВКИ

В процессе настройки диагностики было обнаружено, что в нескольких пространственных каналах наблюдается паразитный сигнал рассеяния лазерного излучения на конструктивных элементах камеры то-

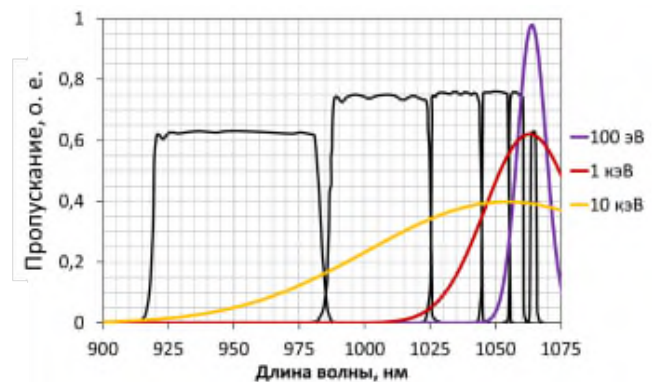


Рис. 4. Спектральная характеристика каналов полихроматора (черные кривые) и расчетные спектры рассеяния для различных температуры (показаны цветом) при угле рассеяния 21° (центр вакуумной камеры).

камака. Однако наличие достаточной временной задержки ≥ 15 нс от полезного сигнала позволяет проводить измерения и обрабатывать экспериментальные данные с минимальным влиянием паразитного сигнала на результаты.

Для подавления паразитного рассеяния установлены диафрагмы в трубы ввода/вывода лазерного излучения в камеру токамака и ловушка света для бликов от входного вакуумного окна. Предпринятые меры позволили значительно, но не полностью, подавить паразитный сигнал (рис. 5).

Достичь практически полного подавления остаточного паразитного излучения удалось с помощью дополнительной ловушки света, изготовленной из черенной нержавеющей стали, установленной в трубу вывода лазерного излучения. Схематичное изображение формы и расположения ловушки представлено на рис. 6. Результат ее влияния на уровень паразитного сигнала при выстреле лазером в пустую камеру

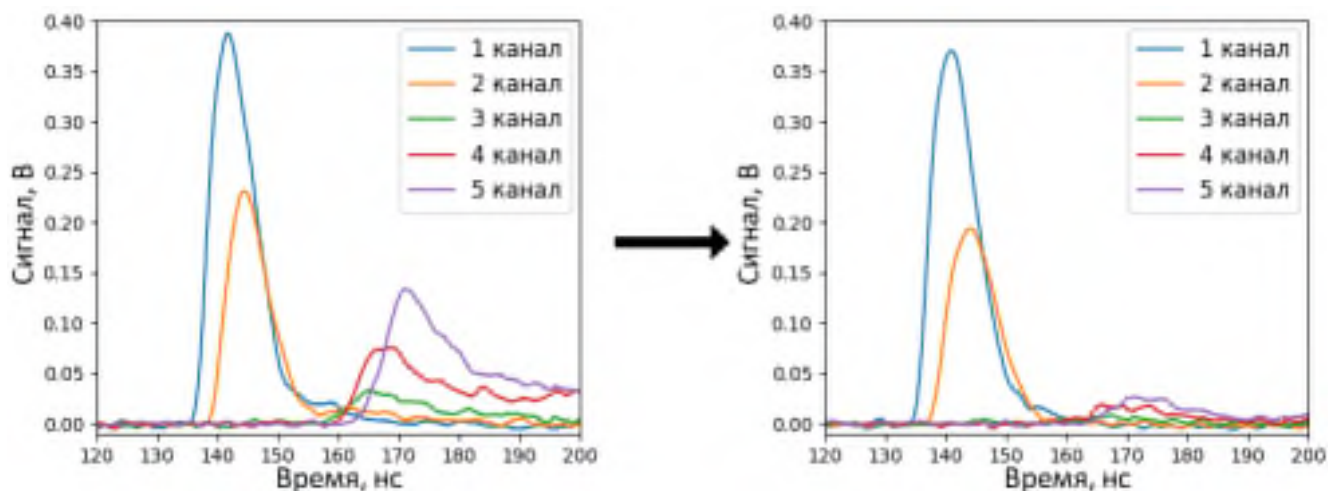


Рис. 5. Сигнал паразитного рассеяния на фоне сигнала рамановского рассеяния на остаточном воздухе до (слева) и после (справа) установки ловушки света.

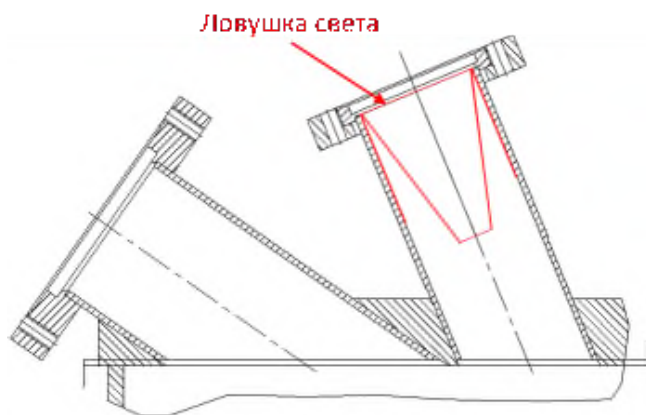


Рис. 6. Схема расположения ловушки света в трубе вывода лазерного излучения.

токамака показан на рис. 7.

Относительная спектральная калибровка проводилась с использованием стабильного широкополосного источника с известной цветовой температурой — лампа с вольфрамовой нитью СИРШ-40. Абсолютная калибровка проводилась с помощью рамановского рассеяния на азоте (рис. 8). Из рисунка видно, что вся коротковолновая часть спектра рассеянного излучения попадает в первый и второй канал полихроматора. Пример зарегистрированного сигнала рамановского рассеяния можно наблюдать на рис. 5. Для проверки отсутствия компоненты паразитного рассеяния, неразличимого на фоне контура полезного сигнала, и отсутствия других эффектов (например, заметного влияния вынужденного комбинационного рассеяния), измерения осуществляются при нескольких значениях давления газа. На рис. 9 приведена зависимость сигнала рассеяния от давления для одного из полихроматоров. Линейность зависимости свидетельствует об отсутствии паразитной компоненты в сигнале.

6. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

На рис. 10 представлен пример зарегистрированных сигналов томсоновского рассеяния для центрального пространственного канала в импульсе #892. Для получения сигнала рассеяния берется интеграл зарегистрированных в спектральных каналах сигналов и производится пересчет в фотоэлектроны исходя из параметров лавинных фотодиодов и усилительных каскадов. Фоновый сигнал восстанавливается из флуктуаций нулевого уровня. Для определения электронной температуры и плотности полученные экспериментальные точки методом наименьших квадратов аппроксимируются функцией, описывающей форму спектра томсоновского рассеяния, с амплитудным коэффициентом. Для удобства и снижения времени обработки предварительно производится расчет зависимости ожидаемых сигналов в каналах полихроматоров от температуры. Полученные значения используются в аппроксимации для определения электронной температуры. На рис. 11 приведен пример расположения экспериментальных точек на предварительно рассчитанных кривых.

Амплитудный коэффициент зависит от плотности электронов, энергии лазера, измеряемой при каждом выстреле, и абсолютной чувствительности системы, определяемой в ходе абсолютной калибровки. Более подробное описание принципов аппроксимации можно найти в [8].

7. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Диагностика работала в осенней экспериментальной кампании 2023 г. Система была протестирована в плазменных режимах с различной длительностью и широким диапазоном электронной температуры [1].

На рис. 12 представлен временной ход тока плазмы и время работы гиротрона, а также временной ход электронной температуры и плотности, измерен-

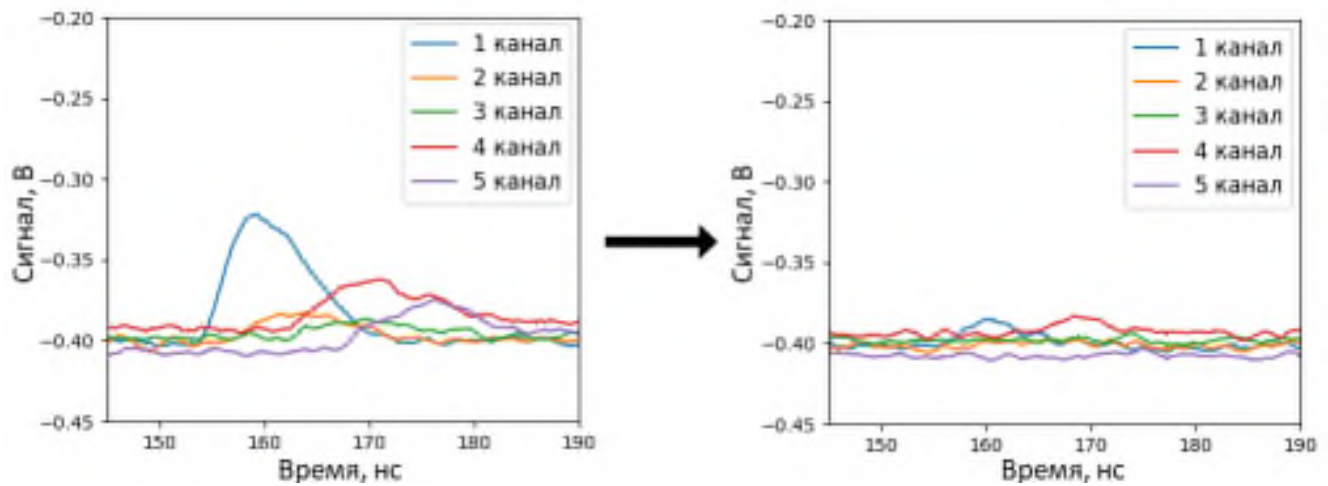


Рис. 7. Сигнал паразитного рассеяния в разных измерительных каналах диагностики при выстреле в пустую камеру до (слева) и после (справа) установки ловушки света.

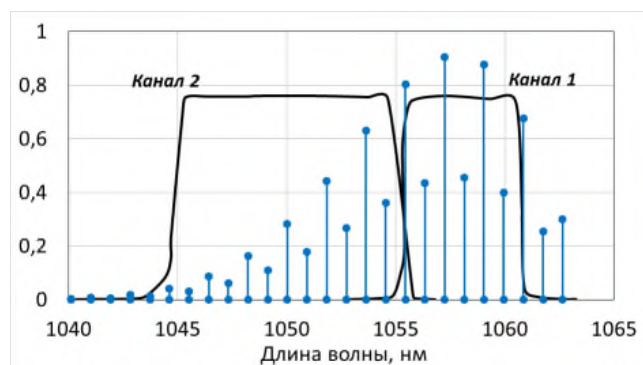


Рис. 8. Форма спектра рамановского рассеяния на азоте (синяя линия), спектральные характеристики 1 и 2 каналов полихроматоров (черная линия).

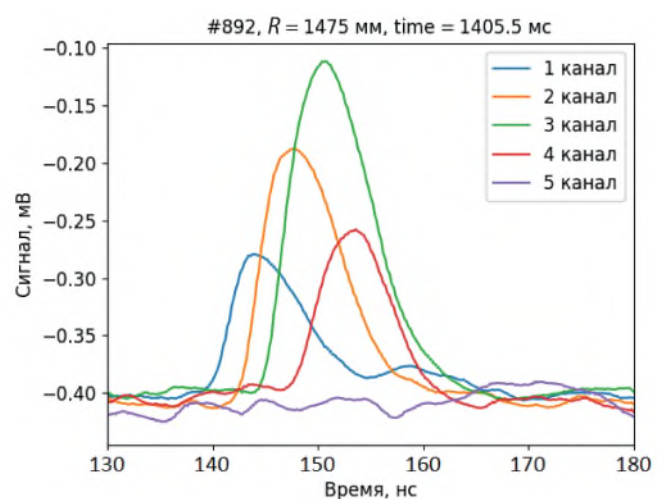


Рис. 10. Зарегистрированные сигналы томсоновского рассеяния пространственного канала с $R = 1475$ мм.

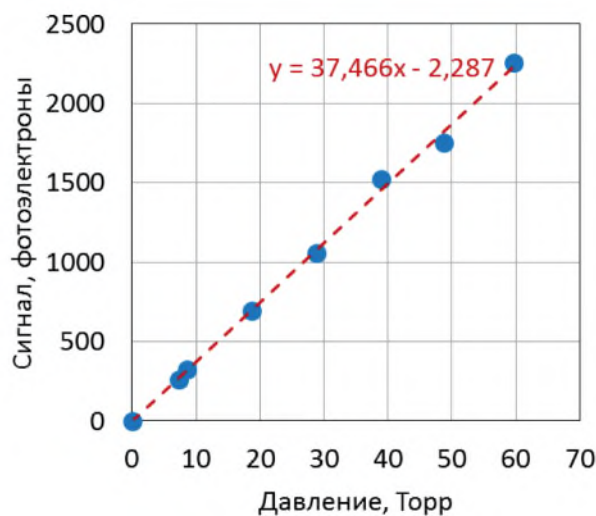


Рис. 9. Зависимость сигнала рамановского рассеяния от давления газа.

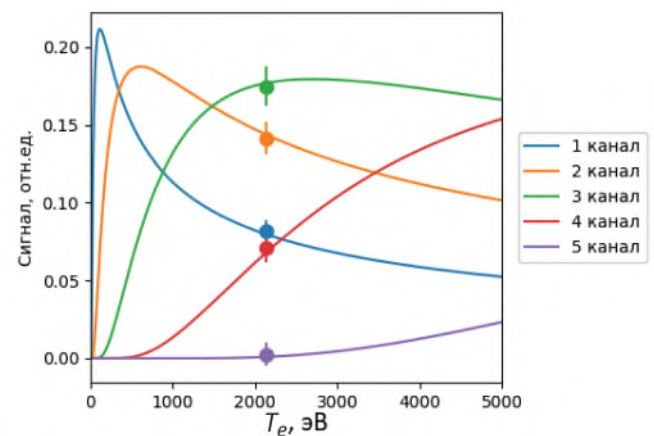


Рис. 11. Расположение экспериментальных точек на пред-расчетных кривых.

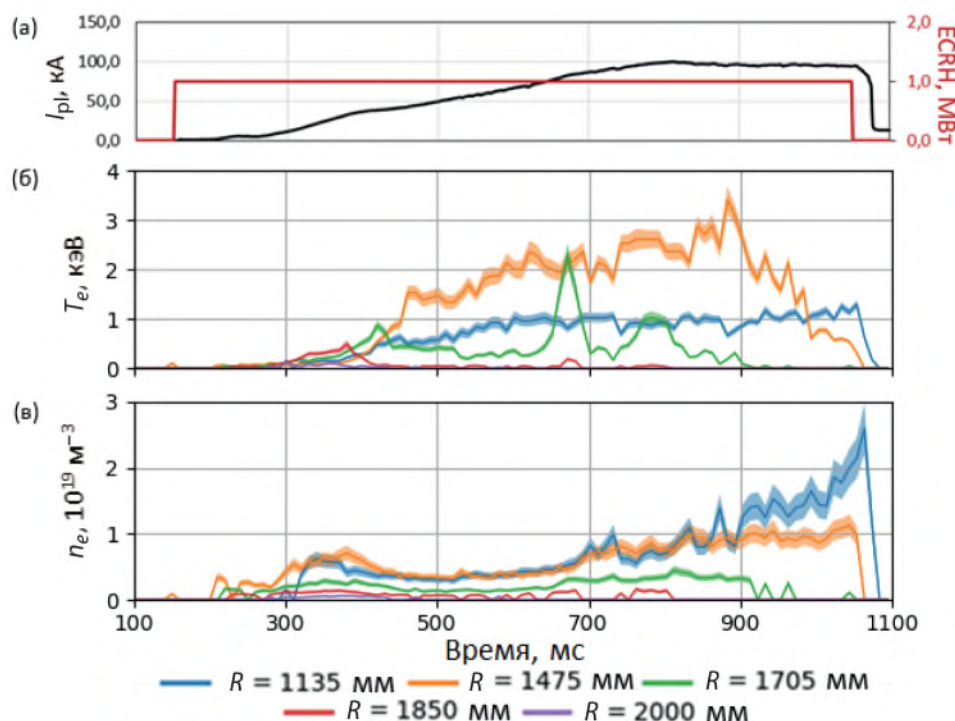


Рис. 12. Импульс #814. Временной ход тока плазмы и вводимой мощности гиротрона (а), температуры (б) и плотности электронов, измеренных ТР (в).

ные диагностикой томсоновского рассеяния в импульсе #814. В данном импульсе при токе плазмы в 100 кА и мощности дополнительного СВЧ-нагрева ~1 МВт температура электронов достигала значений более 3 кэВ.

В табл. 1 представлены сигналы в спектральных каналах полихроматора ($R = 1475$ мм) на 500 мс. Этот момент времени характеризуется довольно низкой плотностью, $n_e \sim 4 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$, при высокой температуре, $T_e \sim 1.5$ кэВ. При этом шум в основных измерительных для этой температуры каналах (каналы 1–3) составляет менее 12% от полезного сигнала, что является хорошим показателем, учитывая довольно низкую используемую энергию лазерного импульса в экспериментальной кампании, $E_{las} \sim 1.2$ Дж.

В импульсе #845 ток плазмы достигал 210 кА. В разряде наблюдалась стадия с омическим поддержанием тока в течение 250 мс после отключения гиротрона на 1150 мс. На рис. 13 вместе с данными ТР представлен временной ход тока плазмы, мощность СВЧ-нагрева. Также приведен сигнал с болометра на основе пироэлектрического датчика, который падает с ростом плотности и выходит на стационарное значение к 800 мс. К этому моменту значения температуры и плотности в центральной зоне плазменного шнура достигают величины порядка 1 кэВ и $9 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ соответственно. Снижение сигнала болометра говорит об увеличении доли поглощенной СВЧ-мощности с ростом температуры и плотности вплоть до ~100%. Полученные значения электронной плотности не проти-

ворчат результатами СВЧ-интерферометра [1].

На рис. 14 приведен временной ход тока плазмы и время работы гиротрона, сигнал с многопроволочного датчика мягкого рентгеновского излучения [9], а также временной ход электронной температуры и плотности, измеренные диагностикой томсоновского рассеяния в импульсе #892. Это один из импульсов серии экспериментов с наибольшей длительностью разряда ~2 с. Следует отметить, что диагностика ТТР обеспечивала измерения в течение всего разряда и способна обеспечивать измерения в разрядах со значительно большей длительностью. При токе плазмы до 175 кА и мощности дополнительного СВЧ-нагрева в 1 МВт на квазистационарной стадии разряда продемонстрирована температура плазмы в 2.5 кэВ при плотности в центре плазменного шнура $\sim 1.2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Полученные значения электронной температуры согласуются с результатами рентгеновского спектрометра (SXR, рис. 14) для пространственной точки $R = 1475$ мм, находящейся вблизи центра вакуумной камеры.

При обработке экспериментальных данных было отмечено, что в ряде случаев наблюдается расхождение между положениями максимума измеренных профилей температуры и плотности (рис. 15, #892). Для понимания причин этого эффекта проведен специальный анализ. Было замечено, что в импульсе #892 наблюдается смещение плазменного шнура по большому радиусу и касание ограничивающей диафрагмы на внутренней стенке вакуумной камеры,

Таблица 1. Сигналы в спектральных каналах.

Сигнал, фотоэлектроны	Канал 1	Канал 2	Канал 3	Канал 4	Канал 5
ТР	374	551	489	138	47
Фон	23	36	60	122	85
Шум	43	52	51	35	25

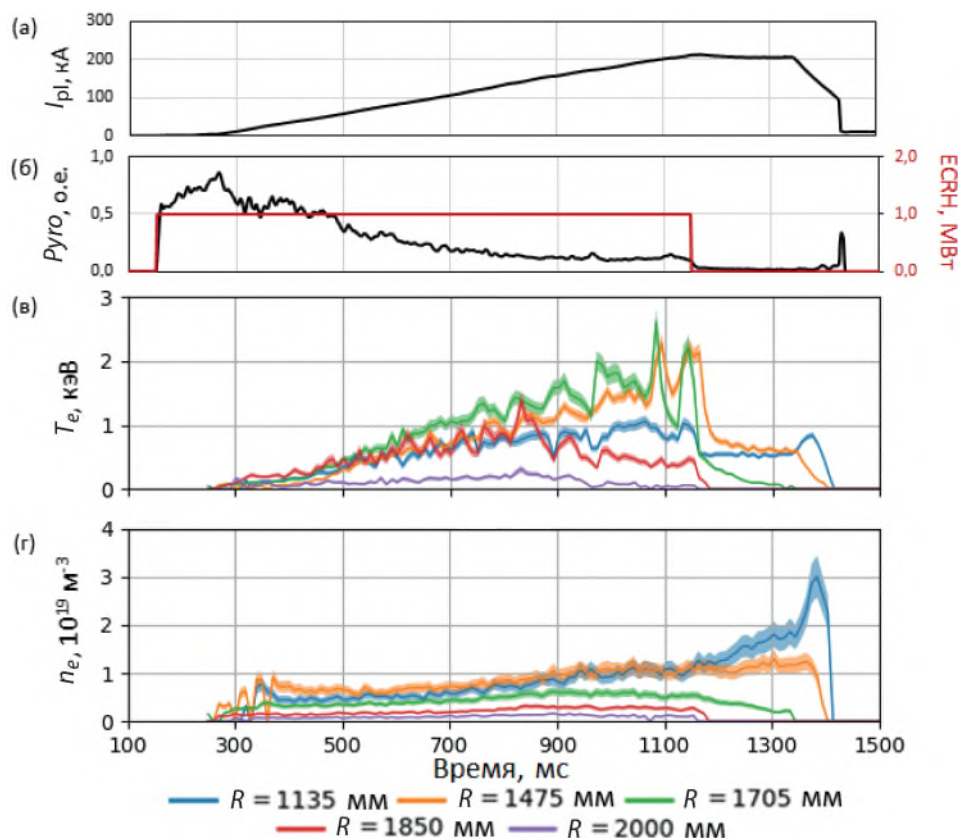


Рис. 13. Импульс #845. Временной ход тока плазмы (а); сигнала болометра и вводимой мощности гиротрона (б); температуры (в) и плотности электронов, измеренных ТР (г).

аналогично рассмотренному в [1]. По-видимому, повышенное взаимодействие плазмы со стенкой приводит к росту поступления примесей с центральной колонны в плазму. Это, в свою очередь, может приводить к асимметрии профиля плотности и возникновению неустойчивостей, обуславливающих колебания температуры и сигнала мягкого рентгеновского излучения (рис. 14б, в). Для анализа достоверности этих предположений был рассмотрен импульс #823 (рис. 16) из серии, в которой осуществлялась попытка отодвинуть плазменный шнур от центральной колонны наружу с помощью уменьшения инкремента тока в управляющих катушках, а следовательно снижения магнитного давления на плазму со стороны слабого поля [1, 10]. По рис. 16б видно, что, в отличие от импульса #892 (рис. 14), в импульсе #823 не наблюдается заметных осцилляций сигнала датчика мягкого рентгеновского излучения и резких спадов температуры в интервале времени с 1400 по 1650 мс. В дан-

ной фазе разряда положение максимумов профилей электронной температуры и плотности, измеренных диагностикой томсоновского рассеяния, находится в значительно лучшем соответствии (рис. 15). Более подробный анализ данного эффекта в настоящее время затруднен из-за малого количества точек измерения, попадающих в зону плазменного шнура. К следующей экспериментальной кампании планируется перераспределить их положение, для более равномерного расположения каналов по сечению плазменного шнура.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На токамаке Т-15МД установлена и введена в эксплуатацию диагностика томсоновского рассеяния с тангенциальной геометрией зондирования на основе Nd:YAG-лазера и полихроматоров на основе интерференционных фильтров и лавинных фотодиодов. Проведены первые измерения профилей электрон-

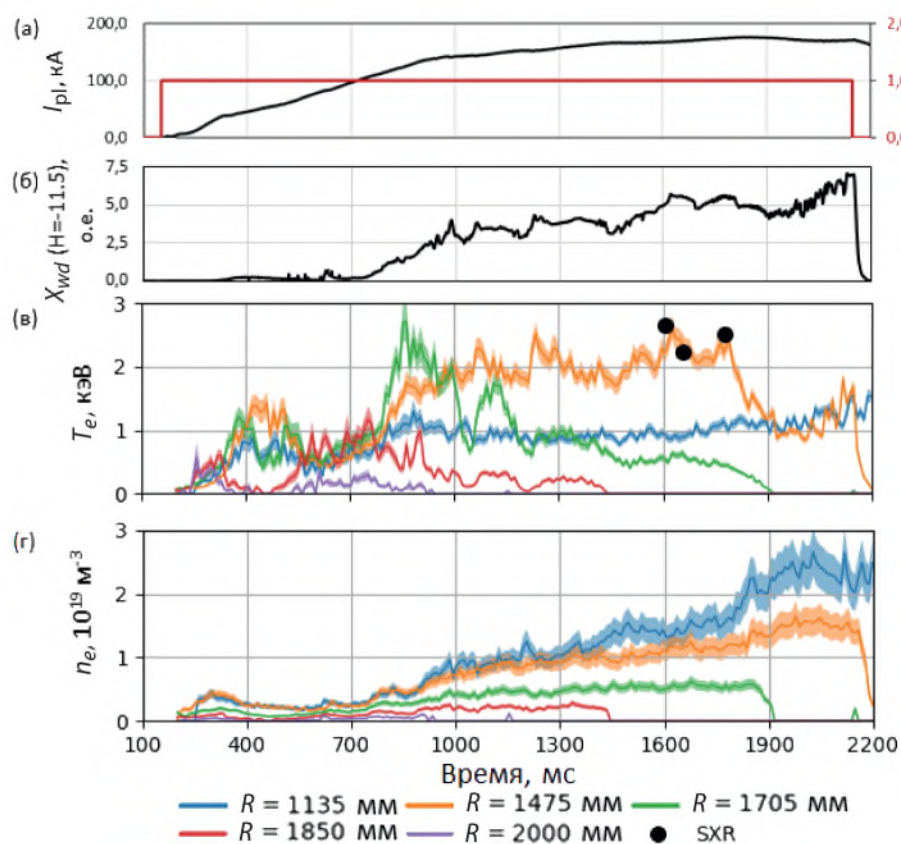


Рис. 14. Импульс #892. Временной ход тока плазмы и вводимой мощности гиротрона (а); сигнал с многопроволочного детектора мягкого рентгеновского излучения (б); температуры электронов, измеренной ТР и SXR (в); плотности электронов, измеренной ТР (г).

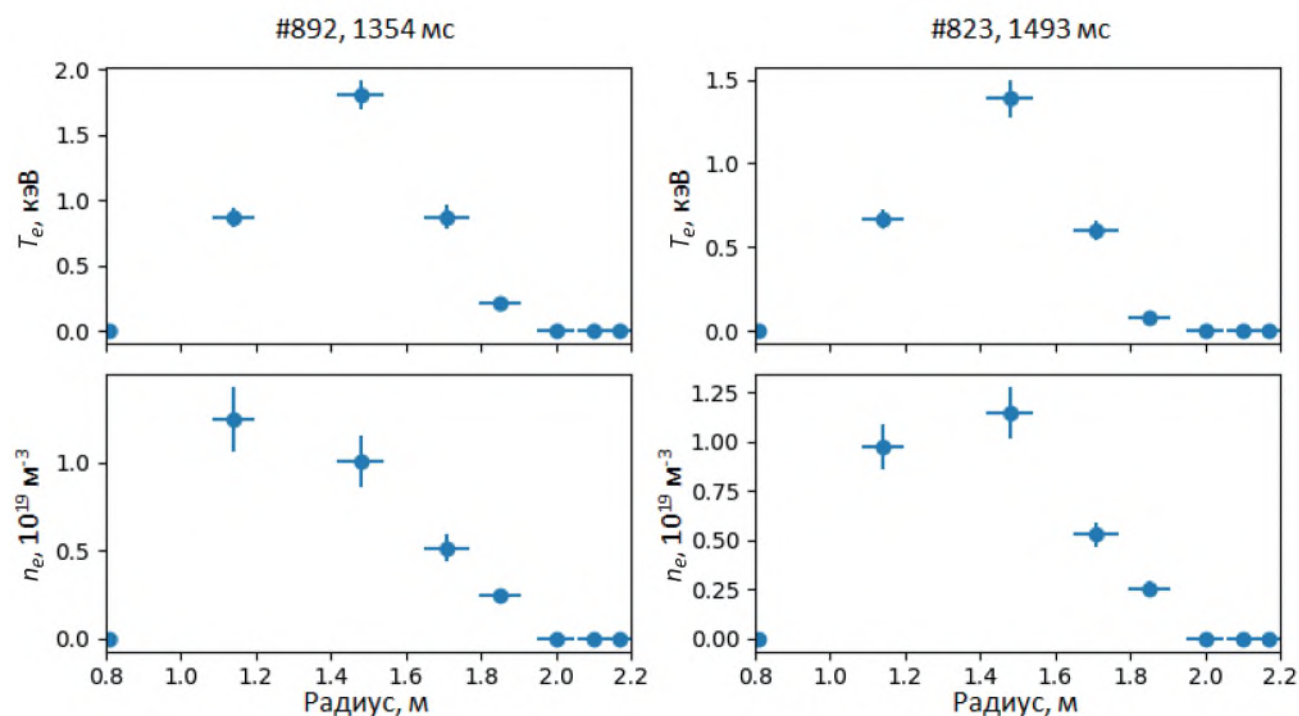


Рис. 15. Профили электронной температуры и плотности в импульсах #892 и #823. Горизонтальные планки отражают размер зоны измерения.

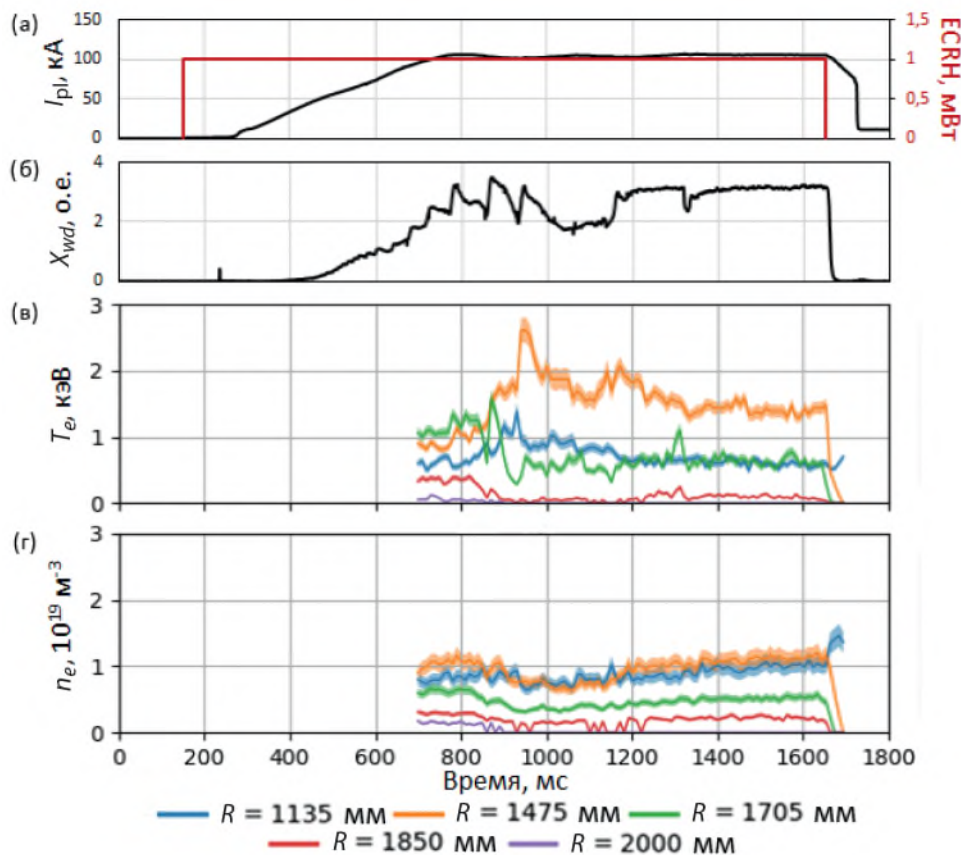


Рис. 16. Импульс #823. Временной ход тока плазмы и вводимой мощности гиротрона (а); сигнал с многопроволочного детектора мягкого рентгеновского излучения (б); температуры (в) и плотности электронов, измеренной ТР (г).

ной температуры и плотности плазмы в осенней экспериментальной кампании 2023 г.

Продemonстрирована работа диагностики в течение всего разряда токамака в широком диапазоне температур и при длительности импульса до 2 с. На основной стадии плазменного разряда рассмотренных импульсов средний показатель уровня шума не превышал 15% от полезного сигнала, даже с учетом использования в этой экспериментальной кампании довольно низкой энергии лазерного излучения ~1.2 Дж. Измеренные значения электронной температуры и плотности находятся в хорошем согласии с результатами спектрометра мягкого рентгеновского излучения и не противоречат данным СВЧ-интерферометра.

Данная работа выполнена в рамках Государственного задания НИЦ “Курчатовский институт”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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., Борщевский 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., Ильги-

сонис 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., Минев 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 T-15МД // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2024. Т. 47. С. 5.

2. Асадулин Г. М., Бельбас И.С., Горшков А.В. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2016. Т. 39. С. 91.
3. Толпегина Ю.И., А.В. Горшков, Г.М. Асадулин, И.С. Бельбас, А.В. Горбунов, Д.Д. Криворучко, А.А. Пшенов // Тез. доклад. XIX Всероссийской конф. “Диагностика высокотемпературной плазмы”, Сочи, 27 сентября – 1 октября, 2021 г. С. 142.

4. Панфилов Д.С., Горшков А.В., Асадулин Г.М., Бельбас И.С. Современные средства диагностики плазмы и их применение / Сб. тез. доклад. XII конф. Москва, 16–18 декабря 2020 г. С. 26.
5. Kurskiev G.S., Chernakov Al.P., Solovey V.A., Tolstyakov S.Yu., Mukhin E.E., Koval A.N., Bazhenov A.N., Aleksandrov S.E., Zhiltsov N.S., Senichenkov V.A., Lukoyanova A.V., Chernakov P.V., Varfolomeev V.I., Gusev, Kiselev E.O., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Minaev V.B., Novokhatsky A.N., Patrov M.I., Gorshkov A.V., Asadulin G.M., Bel'bas I.S. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. 2020. V. 963. P. 163734.
6. Асадулин Г.М., Баженов А.Н., Бельбас И.С., Горшков А.В., Коваль А.Н., Курскиев Г.С., Соловей В.А., Солоха В.В., Чернаков Ал.П. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2019. Т. 42. С. 89.
7. Asadulin G.M., Bel'bas I., Gorshkov A. // Fusion Engineer. Design. 2022. V. 177. P. 113066.
8. Солоха В.В., Курскиев Г.С., Мухин Е.Е., Толстяков С.Ю., Баженов А.Н., Петров Ю.В., Гусев В.К., Сахаров Н.В., Бабинов Н.А., Букреев И.М., Дмитриев А.М., Кочергин М.М., Коваль А.Н., Литвинов А.Е., Масюкевич С.В., Раздобарин А.Г., Самсонов Д.С., Семёнов В.В., Соловей В.А., Чернаков П.В., Чернаков Ал.П., Чернаков Ан.П. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017. Т. 40. С. 5.
9. Sushkov A., Andreev V., Camenen Y., Pochelon A., Klimanov I., Scarabosio A., Weisen H. // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. P. 023506.
10. Сычугов Д.Ю., Рыжиков Д.В., Андреев В.Ф., Балашов А.Ю., Горбунов А.В., Кирнева Н.А., Кислов Д.А., Ноткин Г.Е., Сушков А.В., Тарасян К.Н., Шелухин Д.А., Хайрутдинов Э.Н. // Сб. тез. 51 Междунар. Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС, 18–22 марта 2024. ICPAF-2024. С. 289.

THOMSON SCATTERING DIAGNOSTICS WITH TANGENTIAL PROBING GEOMETRY AT THE T-15MD TOKAMAK

G. M. Asadulin^{a,b,*,**}, I. S. Bel'bas^a, A. V. Gorshkov^a, N. A. Kirneva^{a,b}, D. S. Panfilov^{a,b},
Yu. I. Tolpegina^a, N. S. Zhiltsov^c, G. S. Kurskiev^c, and E. E. Tkachenko^c

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

^b National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, 115409 Russia

^c Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194021 Russia

*e-mail: asadulingm@gmail.com

**e-mail: asadulin_GM@nrcki.ru

In 2023, the Thomson scattering diagnostics with tangential probing geometry was installed and put into operation at the T-15MD tokamak. The new system is based on a 100-Hz Nd:YAG laser with a pulse energy of up to 3 J at the first harmonic, $\lambda = 1064$ nm. The system allows measurements to be carried out throughout the plasma discharge with its duration of up to 10 s with a time interval of 10 ms. Laser radiation is introduced into the tokamak vessel in the equatorial plane, passing through the entire plasma volume from the inner to the outer periphery of the plasma. The scattered radiation acquisition system is located inside the equatorial port of the facility. The range of scattering angles is from 11° to 56° . The recording system is based on 10 polychromators on interference filters. Using this diagnostics, the electron temperature and density have been measured in the experimental campaign at the end of 2023. The system operation was demonstrated throughout the entire tokamak discharge in a wide temperature range and with a discharge duration of up to 2 s.

Keywords: T-15MD tokamak, laser diagnostics, Thomson scattering