

УДК 533.9.082.5

## ПРОЕКТ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ТОКАМАКА Т-15МД

© 2025 г. Д. С. Панфилов<sup>a,b,\*</sup>, Г. М. Асадулин<sup>a,\*\*</sup>, И. С. Бельбас<sup>a</sup>, А. В. Горшков<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

<sup>b</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

\*e-mail: Panfilov\_DS@nrcki.ru

\*\*e-mail: 217508@mail.ru

Поступила в редакцию 13.11.2024 г.

После доработки 20.12.2024 г.

Принята к публикации 24.12.2024 г.

Для измерения параметров электронной компоненты плазмы токамака Т-15МД готовится комплекс диагностик томсоновского рассеяния, позволяющий проводить исследования различных зон плазменного шнуря. Данная работа посвящена разработке системы томсоновского рассеяния Т-15МД с вертикальным зондированием, которая дает информацию о параметрах плазмы вдоль вертикального диаметра плазменного шнуря. Зондирование плазмы производится Nd:YAG-лазером с многопроходной системой ввода лазерного излучения в камеру токамака. Лазер работает на второй гармонике  $\lambda = 532$  нм. Сбор рассеянного излучения осуществляется одним широкоугольным объективом. В систему регистрации свет передается оптоволоконным коллектором, состоящим из 159 оптоволоконных сборок размером  $2 \times 1$  мм. Система регистрации состоит из трех узлов, каждый из которых включает в себя систему согласующей оптики и полихроматор с детектором. Регистрация спектра рассеяния осуществляется при помощи ЭОПа и CMOS-камеры. Для достижения высокого коэффициента пропускания света оптической системы диагностики был проведен детальный расчет параметров и конструкции каждого оптического узла: собирающего объектива, системы согласующей оптики и полихроматора. В сравнении с диагностикой томсоновского рассеяния Т-10 значительно улучшен коэффициент пропускания системы за счет тщательного подбора оптических материалов, а также новой конструкции системы согласующей оптики, состоящей в основном из зеркал. При помощи синтетической диагностики проведена оценка точности измерения температуры и плотности электронов. В качестве фона плазмы используются спектры плазмы из области лимитера Т-15МД. Система диагностики томсоновского рассеяния в плазме токамака Т-15МД с вертикальным зондированием позволит измерять электронную температуру с ошибкой менее 10% в диапазоне от 80 эВ до 6 кэВ при плотности электронов более  $6 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$  в центральной области плазмы. На периферии ошибка <10% для диапазона  $T_e$  от 100 эВ до 2 кэВ при  $n_e > 1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Пространственное разрешение диагностики составит  $\sim 11$  мм для центра плазменного шнуря и  $\sim 22$  мм для периферийной области плазмы.

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

**DOI:** 10.31857/S0367292125010019, **EDN:** DWCP0P

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Диагностика томсоновского рассеяния (ТР), как один из наиболее информативных инструментов для исследования электронной компоненты плазмы, будет использоваться на токамаке Т-15МД. Из-за сложной формы плазменного шнуря планируется создать диагностический комплекс ТР, который будет включать несколько систем. Первая система — для измерения параметров плазмы вдоль большого радиуса установки (тангенциальная си-

стема) [1]; вторая — вдоль вертикальной хорды (вертикальная система [2]); третья — в диверторе токамака (диверторная система [3]). Данная статья посвящена разработке вертикальной системы томсоновского рассеяния.

Вертикальная система ТР основывается на использовании второй гармоники Nd:YAG-лазера и регистрации света усилителем яркости (ЭОП) с CMOS-камерой. Подобная схема диагностики успешно работала на токамаке Т-10 [4], опыт

разработки и эксплуатации системы на Т-10 перенесен на новую вертикальную систему токамака Т-15МД.

В настоящее время телевизионная диагностика ТР применяется на современных установках в качестве диагностики, обеспечивающей уникальное пространственное разрешение параметров плазмы вдоль лазерного луча, что дает возможность для исследования транспортных барьеров в плазменном шнуре [5–8]. Вертикальная диагностика ТР Т-15МД разрабатывается для таких задач, как исследование внутренних транспортных барьеров, улучшение достоверности восстановления магнитной конфигурации и т. п.

К данной диагностике на установки Т-15МД предъявляются следующие требования: диапазон измеряемых температур от 100 эВ до 8 кэВ при электронной плотности  $10^{18} < n_e < 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , ошибки измерения должны быть меньше 10%, пространственное разрешение должно составлять от 1 до 2% от малого радиуса токамака [4, 7, 8].

В статье представлены принцип построения диагностики, краткое описание основных узлов, методика юстировки системы. Приведена оценка точности измерения  $T_e$  и  $n_e$  на основе синтетической диагностики с учетом фонового излучения плазмы токамака Т-15МД.

## 2. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ

Сечение установки Т-15МД, в котором будет находиться вертикальная диагностика ТР с телевизионной регистрацией спектра рассеяния, приведено на рис. 1. Зондирующий лазерный пучок вводится в камеру токамака через нижний патрубок. Для увеличения энергии рассеянного света предлагается использовать многопроходную систему ввода-вывода лазерного излучения [9, 10]. Размеры входного и выходного патрубков позволяют применить 7-проходную систему. Рассеянный плазмой свет собирается объективом и с помощью оптоволоконного коллектора передается на спектральный прибор (приборы), где регистрируется детектором (ЭОПом с СМОС-камерой). Для выбора оптимальных параметров оптических компонентов диагностики произведен предварительный расчет системы.

Основным параметром, который характеризует количество собираемого света, является величина  $S_{det} d\Omega_{det}$  системы сбора — произведение суммарной площади фотокатодов системы сбора и телесного угла в поле изображения перед детектором. Величина  $d\Omega_{det}$  и количество детекторов определяет максимально возможное количество собранного света, а, следовательно, точность определения параметров плазмы. В согласованной оптической системе параметр  $Sd\Omega$  в любом сечении остается инвариантом. Собирающая оптика проектируется таким образом, чтобы весь лазерный луч в попе-

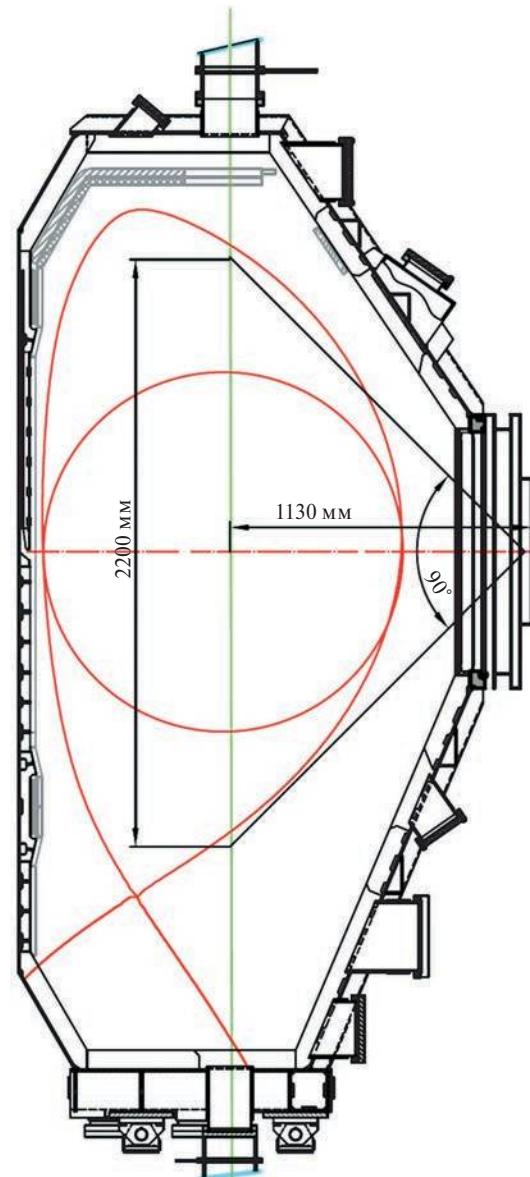


Рис. 1. Сечение токамака Т-15МД с геометрией вертикальной диагностики ТР.

речном сечении регистрировался системой сбора света. Целью собирающего объектива является передача света с лазерной хорды, а не всего получаемого изображения. Поэтому собранный рассеянный свет пропорционален  $Ld\Omega_{plasma}$ , где  $L$  — длина отрезка лазерной хорды.  $Ld\Omega_{plasma}$  не является инвариантом. Эту особенность можно использовать для увеличения собираемого рассеянного света в каждом пространственном канале. Оптоволокно используется для соединения собирающего объектива и спектральных приборов. При трансформации выходного торца оптоволокна, имеющего ширину  $b$ , относительно входного торца с шириной  $a$ , можно добиться увеличения собранного света в одном пространственном канале в  $1/m^2$  раз, где  $m = a/b$  — коэффициент трансформации оптоволоконной сборки.

Основные параметры спектрального прибора, необходимые для расчета оптической схемы диагностики, приведены в табл. 1.

Используя представленные значения, рассчитаны несколько вариантов системы регистрации вертикального ТР с различной трансформацией оптоволоконного коллектора и количества спектральных приборов.

Наиболее оптимальным выглядит вариант с трансформацией оптоволоконного коллектора 1 : 2 и с тремя спектральными приборами. В этом случае мы имеем максимальное количество собранного света ( $Ld\Omega_{plasma} 5 \times 10^{-5}$  м·ср) при пространственном разрешении, удовлетворяющем требованиям к диагностике (1–2%). Требования по пространственному разрешению ставятся с учетом характерного пространственного разрешения телевизионных диагностик ТР. В плазме токамака T-10 разрешение составляет 1.7% от малого радиуса [4], MAST 1.1% [7], TEXTOR 0.9% [8].

При разработке оптических узлов диагностики был проведен тщательный подбор оптических материалов в рабочем спектральном диапазоне (400–700 нм) с целью получения максимально возможного коэффициента пропускания света. Также к оптической системе предъявлялось требование по оптическому разрешению. При юстировке положения оптоволоконного коллектора относи-

тельно лазерного луча необходимо оптически разрешать изображение лазерного луча на коллекторе. Для этого необходимо разрешать изображение оптоволокна с диаметром 200 мкм в каждом оптическом узле. Разрешающая способность определяется при помощи частотно-контрастной характеристики или MTF (modular transfer function), критерий разрешения MTF = 0.15, который соответствует критерию Рэлея [11].

### 3. РАЗМЕЩЕНИЕ ДИАГНОСТИКИ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД

Диагностика основывается на Nd:YAG-лазере с длинной волны 532 нм; энергией в импульсе 2.5 Дж при длительности 10 нс и частотой следования импульсов 100 Гц. Зондирование плазмы осуществляется в вертикальном направлении. Принципиальная схема диагностики показана на рис. 3.

Лазерное излучение транспортируется через систему зеркал, которые располагаются в подвальном помещении установки. Для проведения юстировки системы ввода-вывода лазерного излучения в плазму последние два зеркала тракта установлены на моторизированные линейные платформы, а последнее зеркало имеет моторизированную оправу для качания. Линза обеспечивает фокусировку лазерного излучения в экваториальной плоскости вакуумной камеры.

Зеркала многопроходной системы установлены в моторизованные оправы для проведения юстировки системы удаленно. Рассматривается возможность автоматической подстройки зеркал во время импульса токамака, если это будет необходимо. Узел сбора света располагается в экваториальном патрубке.

### 4. ОПТИЧЕСКИЕ УЗЛЫ ДИАГНОСТИКИ

Разработанный собирающий объектив состоит из трех линз, склеенных друг с другом. Передняя и задняя поверхности объектива имеют асферическую форму для выполнения условий по оптическому разрешению. Расстояние от передней поверхности объектива до лазерного луча равно 1150 мм. Характеристики объектива получились следующими: относительное отверстие 1 : 2.1, фокусное расстояние 187 мм, угол поля зрения 90°. Средний коэффициент увеличения 1/8.2. Средний коэффициент пропускания света для рабочего диапазона длин волн составил ~93%. Поверхность изображения имеет сферическую форму с главными лучами, идущими по радиусам этой сферы. Все точки изображения имеют числовую апертуру 0.202. Габариты и график MTF объектива представлены на рис. 4, 5.

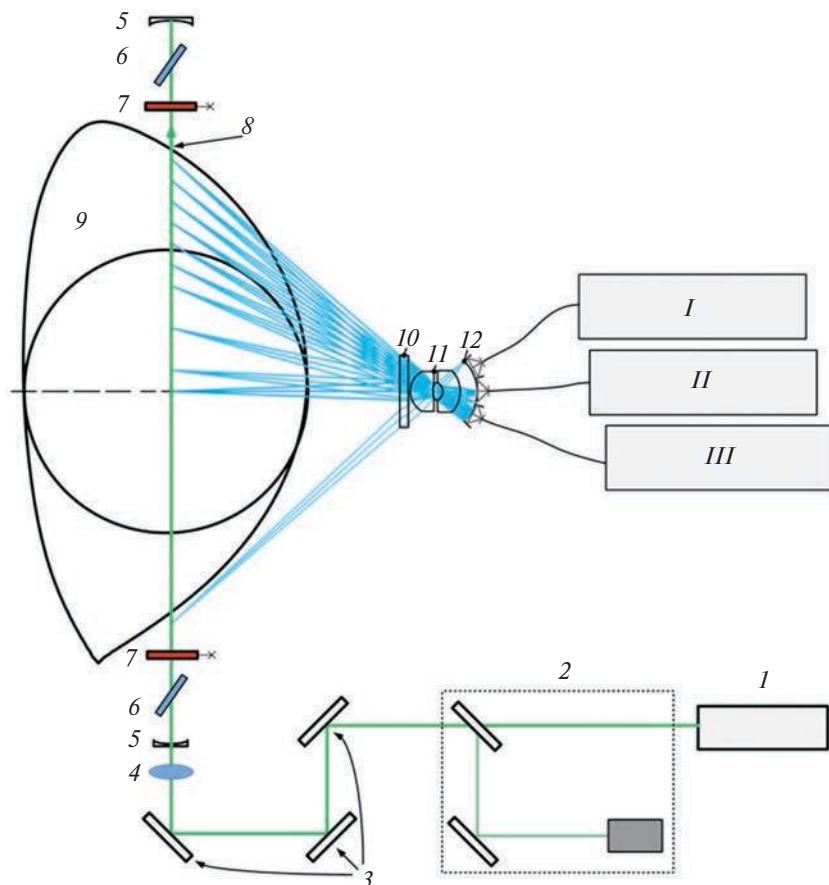
Объектив собирает рассеянный свет на входном торце оптоволоконного коллектора. Торец имеет сферическую форму с радиусом  $R = 202.4$  мм и соответствует поверхности изображения объектива.

Таблица 1. Основные параметры спектрального прибора

Относительное отверстие ЭОПа	объектива	1/0.85
Диаметр ЭОПа, мм		25
Высота входной щели, мм		200
Числовая апертура оптоволокна		0.22



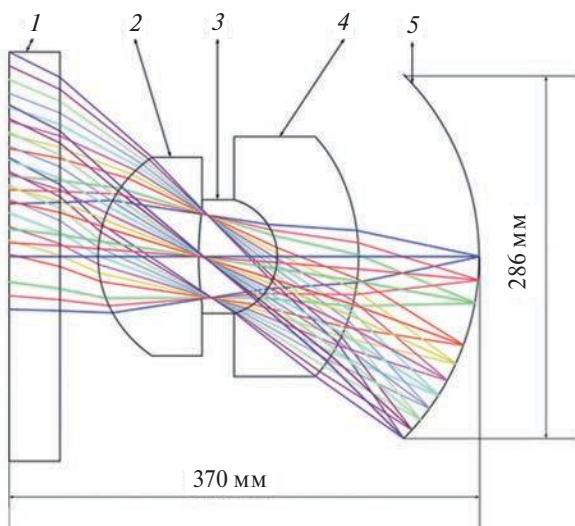
Рис. 2. Трансформация оптоволоконного коллектора.



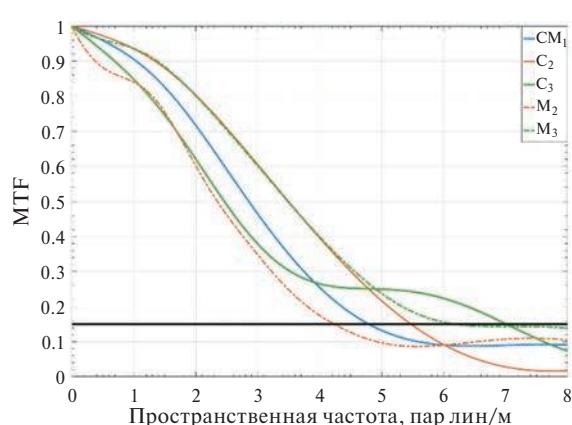
**Рис. 3.** Принципиальная схема вертикальной диагностики ТР Т-15МД. I — лазер; 2 — узел контроля тракта; 3 — зеркала оптического тракта; 4 — фокусирующая линза; 5 — зеркала многопроходной системы; 6 — вакуумные окна; 7 — шибера; 8 — лазерный луч; 9 — плазма; 10 — вакуумное окно; 11 — собирающий объектив; 12 — оптоволоконный коллектор; I, II, III — согласующая оптика и спектральные приборы с регистрирующими камерами.

Коллектор состоит из 159 отдельных оптоволоконных сборок, размером  $1 \times 2$  мм с упорядоченным расположением волокон. Они состоят из кварцевого оптоволокна с диаметром 200 мкм, толщина

оболочки 10 мкм, числовая апертура  $NA = 0.22$ . Отдельные оптоволоконные сборки располагаются радиально, и их торцы перпендикулярны главным лучам собирающего объектива. Изображение входного торца оптоволоконного коллектиора представлено на рис. 6.



**Рис. 4.** Конструкция собирающего объектива: 1 — вакуумное окно из плавленого кварца; 2 — линза, передняя поверхность асферическая; 3 — линза; 4 — линза, задняя поверхность асферическая; 5 — сферическое поле изображения.



**Рис. 5.** MTF объектива: С — сагиттальная плоскость; М — меридиональная плоскость; 1 — центральная точка изображения; 2 — средняя точка; 3 — краевая точка. Горизонтальная черная линия соответствует критерию Рэлея.

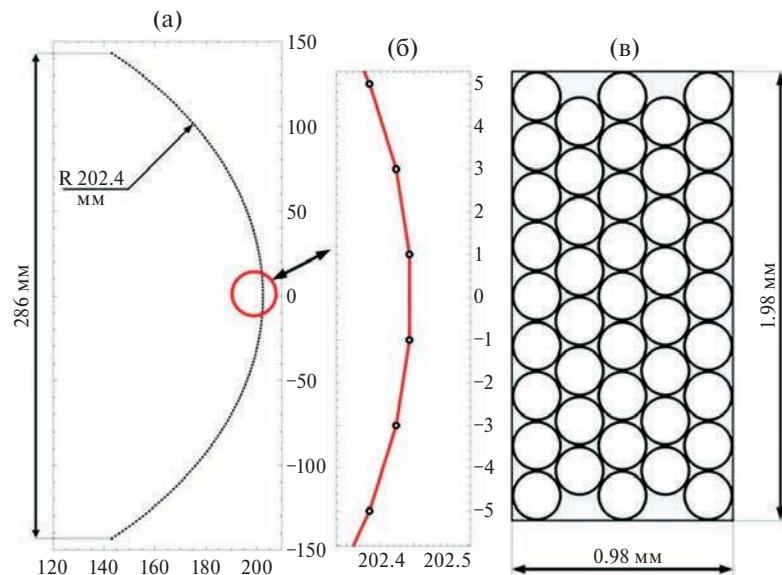


Рис. 6. Входной торец оптоволоконного коллектора: а) вид сбоку; б) увеличенное изображение сборки; в) оптоволоконная сборка. Размеры — в мм.

Пространственное разрешение диагностики определяется размером изображения отдельной оптоволоконной сборки на лазерном луче и представлено на рис. 7. Оно составляет от 11 мм в центральной зоне шнура до 22 мм на краю. Система сбора света позволяет регистрировать лазерный луч по всей ширине полностью, наибольшая ширина лазерного луча в зоне наблюдения составляет 4.3 мм.

В диагностическом помещении оптоволокно разделяется на три части и подводится к отдельным приборам. Входной торец оптоволоконного жгута имеет размер  $318 \times 1$  мм, три выходных оптоволоконных ферулы —  $53 \times 2$  мм. Каждая состоит из 53 оптоволоконных сборок.

Для сопряжения апертур полихроматоров и оптоволоконных коллекторов используется система согласующей оптики. В отличие от диагностики на токамаке Т-10, на Т-15МД удалось реализовать согласующую систему практически полностью на основе зеркал.

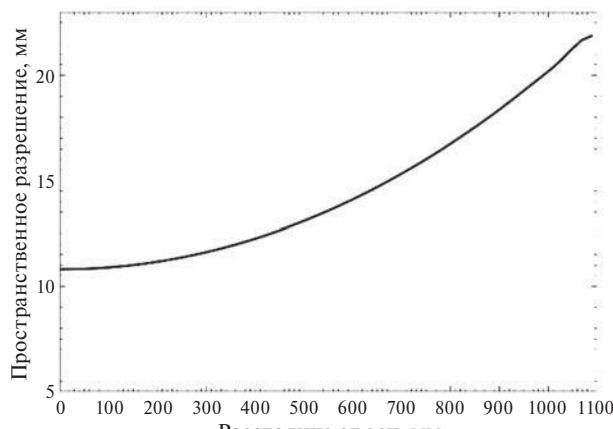


Рис. 7. Пространственное разрешение диагностики ТР токамака Т-15МД.

Благодаря этому значительно повышен коэффициент пропускания света (86%) и уменьшены хроматические aberrации. График МТФ согласующей системы представлен на рис. 8. Конструкция согласующей системы представлена на рис. 9.

Для регистрации собранного света разработаны полихроматоры на основе тороидальной голограммической дифракционной решетки. Их конструкция показана на рис. 10. За основу взята схема Литтрову, использовавшаяся на установке Т-10 [4]. В новой конструкции используется тороидальная голограммическая дифракционная решетка, что позволяет отказаться от двухлинзового объектива (дублет Литтрову) в конструкции прибора. Благодаря этому удается повысить контраст изображения спектров ТР и значительно снизить влияния паразитной засветки от лазерного излучения. Центральный полихроматор планируется изготовить

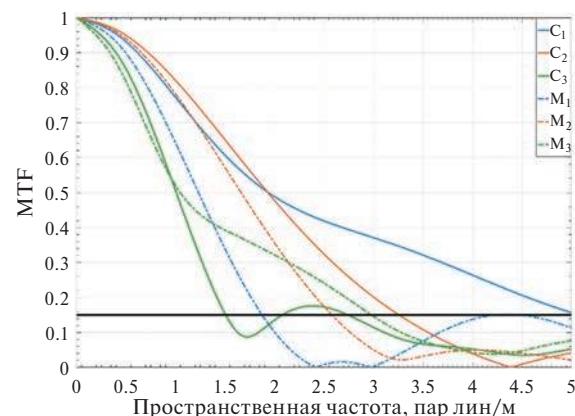


Рис. 8. МТФ согласующей оптики: С — сагиттальная плоскость; М — меридиональная плоскость; 1 — центральная точка изображения; 2 — средняя точка; 3 — краевая точка. Горизонтальная черная линия соответствует критерию Рэлея.

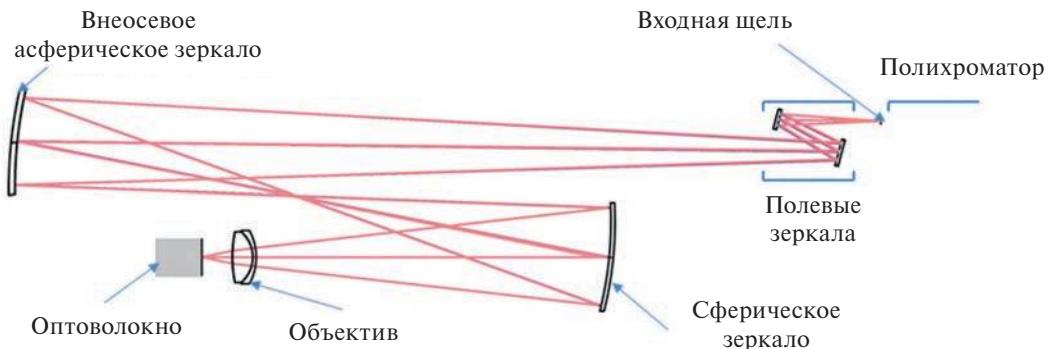


Рис. 9. Оптическая схема зеркальной системы согласующей оптики.

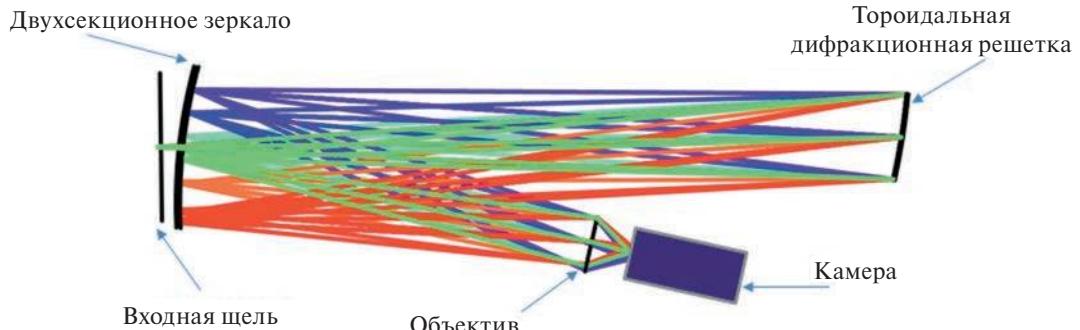


Рис. 10. Оптическая схема модернизированного полихроматора Литтрову.

с дифракционной решеткой  $\sim 700$  шт/мм. Два краевых полихроматора будут регистрировать более низкие  $T_e$  по сравнению с центром плазмы, поэтому они будут комплектоваться решетками с большей дисперсией  $\sim 900$  шт/мм. Диаметр дифракционных решеток 110 мм. Свет от входной щели ( $200 \times 8$  мм) падает на тороидальную голограммическую решетку и раскладывается в спектр. Далее свет попадает на двухсекционное сферическое зеркало ( $200 \times 200$  мм), между секций которого располагается входная щель. Вырез в зеркале имеет размеры  $12 \times 200$  мм. Обратная линейная дисперсия  $D_\lambda$  на двухсекционном зеркале равна 1.67 нм/мм для центрального и 1.1 нм/мм для краевых полихроматоров. Прибор настраивается так, что свет с лазерной длинной волны попадает в щель между секциями зеркал и не регистрируется детектором. Двухсекционное зеркало передает свет через светосильный объектив ( $F\# = 0.85$ ) на CMOS-камеру с ЭОПом. На ЭОПе дисперсия  $D_\lambda = 16$  нм/мм для центрального полихроматора и  $D_\lambda = 11$  нм/мм для краевых. График МТФ полихроматора для лазерной длины волны показан на рис. 11.

## 5. ЮСТИРОВКА ПОЛОЖЕНИЯ ОПТОВОЛОКОННОГО КОЛЛЕКТОРА

Для юстировки оптоволоконного коллектора относительно лазерного луча предполагается использовать оптическую систему диагностики. Отдельные оптоволоконные сборки имеют упорядоченное расположение волокон, т. е. изображение с входного торца передается на выходной торец.

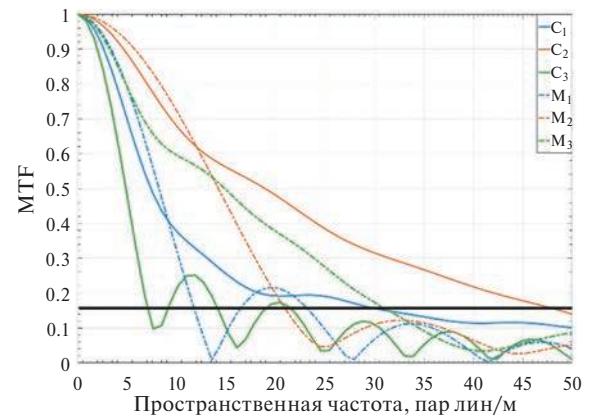


Рис. 11. МТФ полихроматора  $\lambda = 532$  нм: С — сагиттальная плоскость; М — меридиональная плоскость; 1 — центральная точка изображения; 2 — средняя точка; 3 — краевая точка. Горизонтальная черная линия соответствует критерию Рэлея.

Если повернуть дифракционную решетку ( $\sim 1irc$ ) так, чтобы лазерная линия попала на ближний край двухсекционного зеркала спектрального прибора, то можно с помощью рэлеевского рассеяния зарегистрировать положение лазерного луча на входном торце оптоволокна. Только изображения луча будет проходить поперек входной щели в каждой сборке (рис. 2). Для удобства восприятия можно развернуть изображение каждой сборки на  $90^\circ$  с помощью программного обеспечения и восстановить реальное положение изображения лазерного луча на коллекторе. Такое изображение позволяет оценить необходимую коррекцию положе-

ния входного торца оптоволоконного коллектора для идеальной центровки изображения лазерного луча на нем. Для осуществления таких настроек предполагается установить входной конец оптоволоконного коллектора на гексапод. Проведение такой юстировки требует обеспечения оптического разрешения сравнимого с изображением оптоволокна. Необходимое и расчетное разрешение для каждого оптического узла представлено в табл. 2.

## 6. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ

Оценка точности измерения температуры и плотности электронов выполнялась при помощи синтетической диагностики. Такой подход позволяет учесть в совокупности влияние дисперсии дифракционной решетки, фонового излучения плазмы, шума ЭОПа и ширины входной щели на точность и диапазон измерения параметров плазмы. Алгоритм оценки точности выглядит следующим образом. Вертикальная диагностика ТР Т-15МД работает в двухкадровом режиме. Первый кадр включает в себя сигнал рассеяния с фоновым излучением плазмы, второй кадр только с фоном плазмы. Генерируется массив кадров с сигналом рассеяния для набора значений  $n_e$  от  $1 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$  до  $1 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$  и  $T_e$  от 20 эВ до 10 кэВ с учетом пропускания оптической системы (21%) и квантового выхода фотокатода ЭОПа (GaAsP). Предполагается, что уровень фонового излучения не зависит от параметров

плазмы. Размер пространственных каналов на матрице регистрирующей камеры определяется с учетом увеличения оптической системы и размера ЭОПа. Далее кадры зашумляются при помощи распределения Пуассона. Для учета влияния шумовых характеристик ЭОПа дисперсия сигналов увеличивается в два раза. После зашумления из полезного кадра вычитается фоновый и сигнал суммируется по вертикали (по области одного пространственного канала). Далее сигнал суммируется по горизонтали (по длинам волн), чтобы уменьшить время оценки параметров плазмы. Затем производится аппроксимация спектра для определения  $n_e$  и  $T_e$ . Аппаратная функция спектрального прибора вносит значительную систематическую ошибку в определении  $n_e$  и  $T_e$ . Для снижения этого вклада производится деконволюция спектра рассеяния, полученного после аппроксимации, с аппаратной функцией полихроматора. Итоговый спектр рассеяния аппроксимируется вновь для получения конечных значений параметров плазмы. Повторяя многократно зашумление кадров и их обработку для одних значений температуры и плотности электронов, определяется статистическая и систематическая ошибки измерения. Алгоритм работы синтетической диагностики показан на рис. 12.

В расчете учитываются основные характеристики оптической схемы диагностики: пропуска-

Таблица 2. Разрешение оптических узлов диагностики ТР Т-15МД

Узел	Требуемое оптическое разрешение, пар линий/мм	Минимальное расчетное оптическое разрешение, пар линий/мм
Собирающий объектив	> 2.5	4.1
Согласующая система	> 1	1.5
Спектральный прибор для $\lambda = 532 \text{ нм}$	> 7	12 (меридиональная плоскость)



Рис. 12. Алгоритм работы синтетической диагностики.

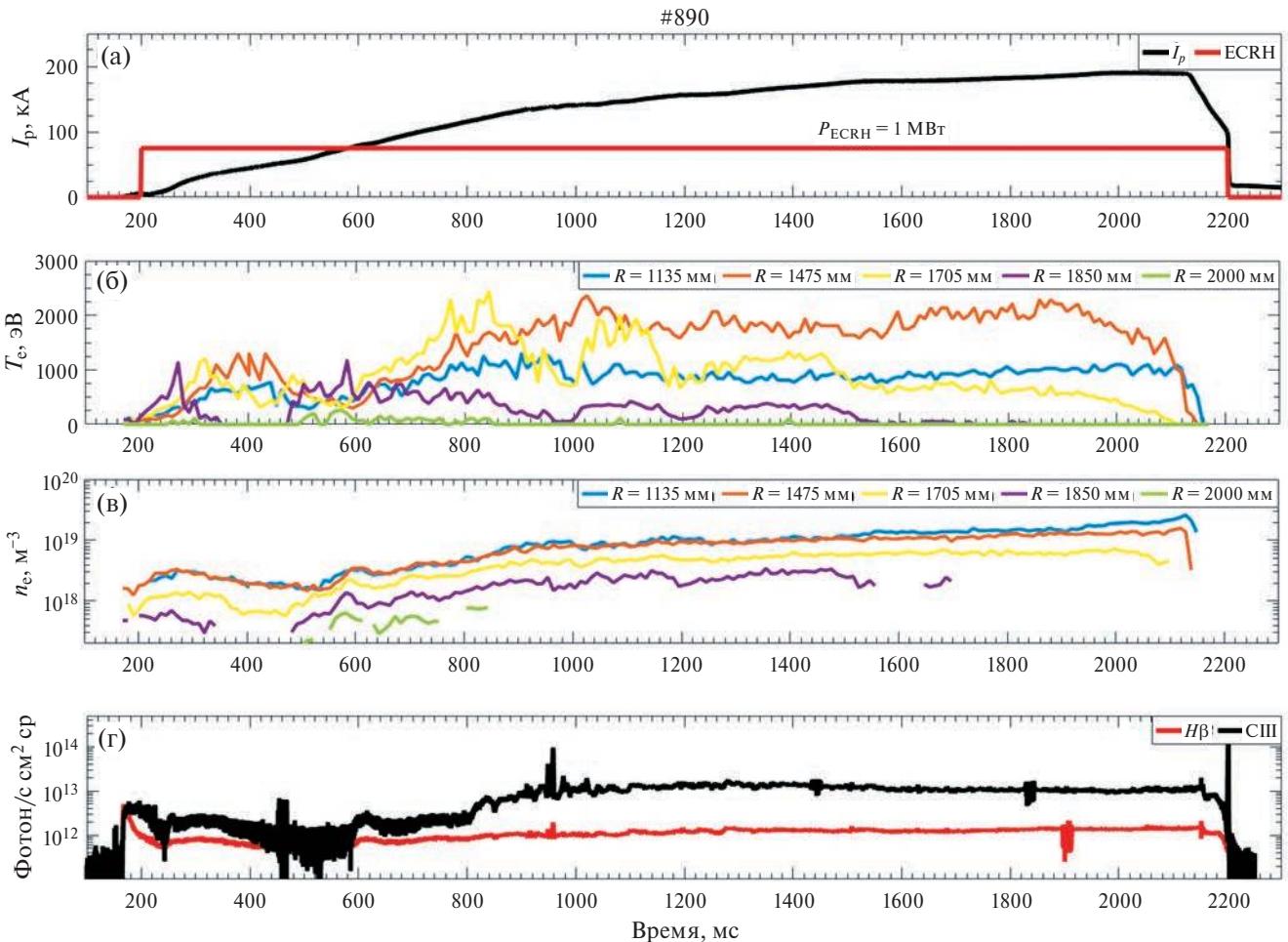
ние объектива, системы согласующей оптики и полихроматора, коэффициент пропускания оптоволокна, телесный угол сбора света, ширина выреза в двухсекционном зеркале, а также квантовый выход фотокатода GaAsP. Наличие выреза в зеркале приводит к возникновению ограничения на минимальную ширину спектра рассеяния и соответственно минимальную измеряемую температуру. При оценке учитывается наложение спектров рассеяния, изменяющих форму при прямом и обратном проходе излучения в многопроходной системе зондирования. Длина лазерного луча, которая используется в расчете точности для каждой пространственной точки, варьируется от 11 до 22 мм, телесный угол сбора света — от  $5 \times 10^{-3}$  до  $2 \times 10^{-3}$  ср.

Для учета фонового излучения плазмы использовались спектроскопические данные, полученные в экспериментальной кампании установки Т-15МД [12]. На рис. 13 показаны основные характеристики разряда #890, который использовался для оценки фонового излучения.

При оценке точности используется спектр излучения из области лимитерной диафрагмы (рис. 14), которая была установлена на 65 см

ниже экваториальной камеры установки. Вследствие того, что полихроматор вертикальной диагностики ТР Т-15МД работает с широкой входной щелью (~8 мм), необходимо свернуть исходный спектр с его аппаратной функцией — в нашем расчете используется гауссова функция с полной шириной на полувысоте в 20 нм для центрального полихроматора и 13 нм для краевого. Ширина аппаратной функции соответствует ширине выреза в двухсекционном зеркале. Предполагается, что вертикальная диагностика ТР Т-15МД не будет работать в условиях прямой засветки из области лимитера (дивертора). Поэтому спектр был нормирован на измерения линий  $H\beta$ , СIII по центральной хорде. Сравнение интенсивности светимости линий из центральной области плазмы и лимитера дано на рис. 15.

Из представленных данных видно, что светимость отличается минимум на порядок. Поэтому в синтетической диагностике исходный спектр с лимитера Т-15МД был уменьшен в 10 раз. На рис. 16 представлены примеры кадров, которые генерируются в ходе работы синтетической диагностики для  $n_e = 3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$   $T_e = 1 \text{ кэВ}$ .



**Рис. 13.** Параметры разряда #890 Т-15МД  $B_t = 1.2$  Т. а)  $I_p$  ток плазмы,  $P_{\text{ECRH}} = 1$  МВт; б) температура электронов; в) плотность электронов; г) светимость линий  $H\beta$ , СIII из центральной хорды.

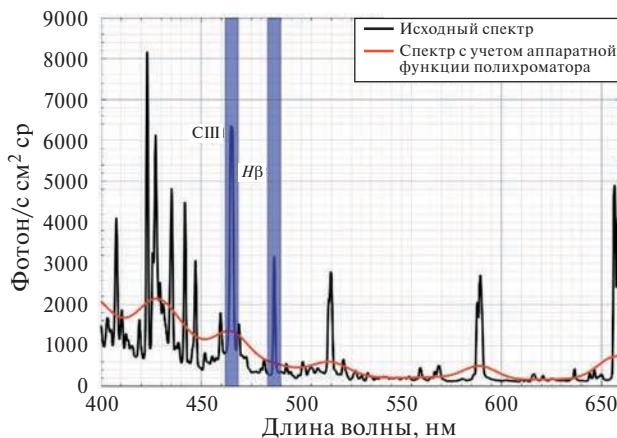


Рис. 14. Спектр из области лимитера токамака Т-15МД. Красной кривой показан спектр с учетом аппаратной функции полихроматора вертикальной диагностики ТР токамака Т-15МД.

На рис. 17 и 18 представлены результаты оценки точности измерения температуры и плотности электронов для центрального и краевого кан-

лов. Для центрального канала при  $n_e = 6 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$ , ошибка измерения  $T_e < 10\%$  и  $n_e < 10\%$  для диапазона температур 80 эВ — 6 кэВ. В случае периферийного канала при  $n_e = 1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , ошибка измерения  $T_e < 10\%$  и  $n_e < 10\%$  для диапазона температур 100 эВ — 2 кэВ. Разница в двумерных распределениях ошибки измерения параметров для центрального и периферийного каналов заключается в разном угле рассеяния света и величине  $Ld\Omega_{\text{plasma}}$ .

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана система томсоновского рассеяния для токамака Т-15МД с вертикальным зондированием плазменного шнуря. В ходе разработки спроектирована зеркальная схема согласующей оптики, благодаря которой удалось значительно повысить коэффициент пропускания света и снизить уровень хроматических aberrаций. Также была улучшена оптическая схема полихроматора Лит-

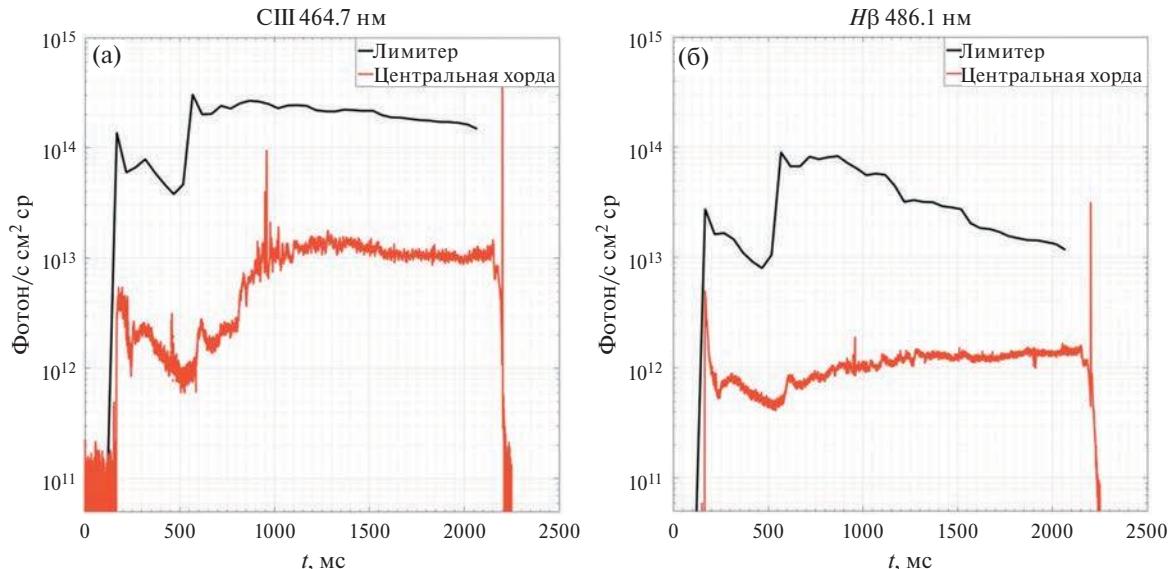


Рис. 15. Интенсивность свечения спектральных линий по центральной хорде и из области лимитера; а)  $H\beta$ ; б) СIII.

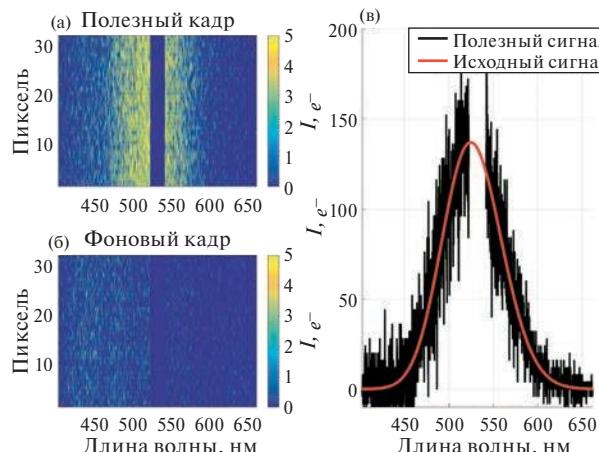
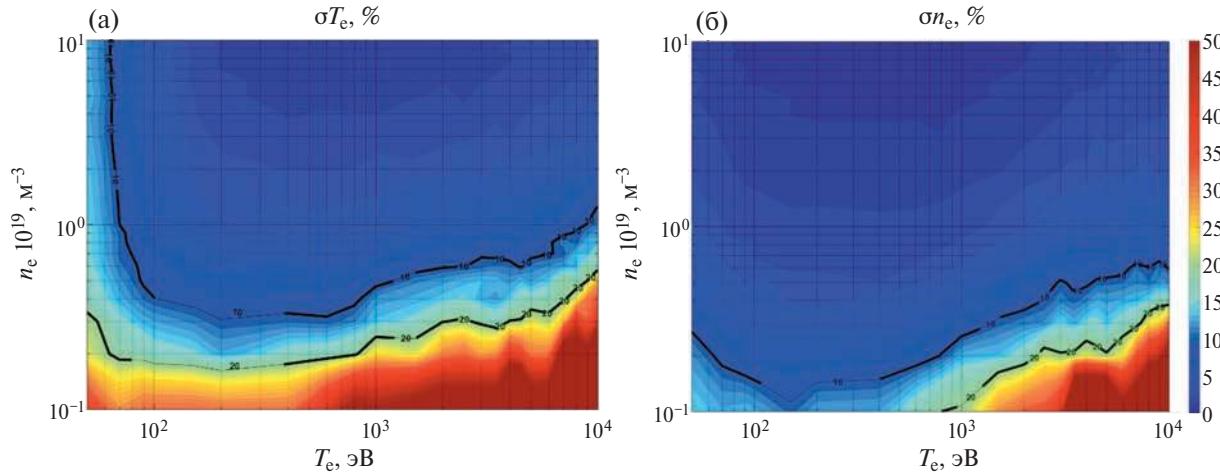
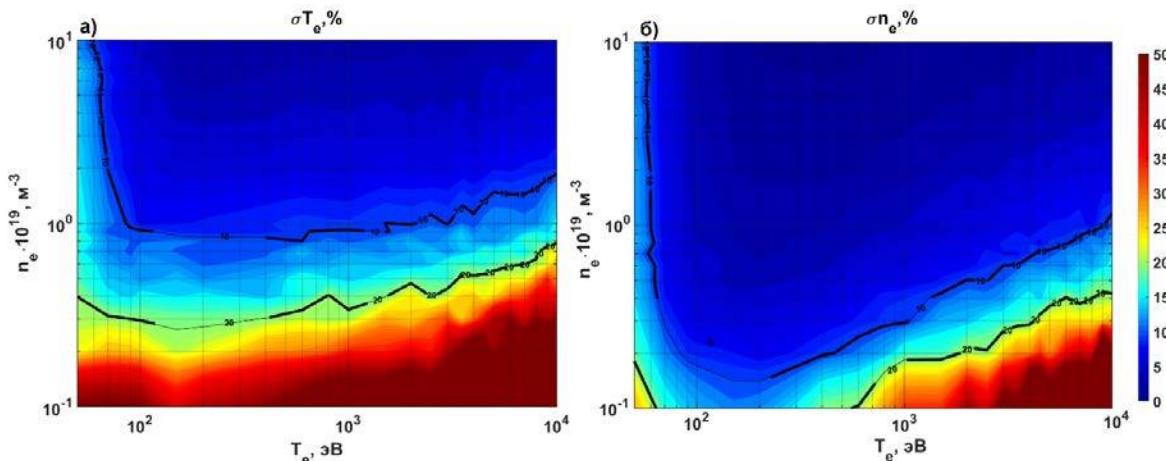


Рис. 16. Кадры, генерируемые синтетической диагностикой ТР Т-15МД. а) полезный кадр; б) фоновый кадр; в) полезный и исходный сигналы.



**Рис. 17.** Ошибки определения параметров плазмы для центрального канала. Дифракционная решетка 700 штр/мм. а) график точности определения температуры электронов; б) график точности определения плотности плазмы. Цветом показана точность в %.



**Рис. 18.** Ошибки определения параметров плазмы для периферийного канала. Дифракционная решетка 900 штр/мм. а) график точности определения температуры электронов; б) график точности определения плотности плазмы. Цветом показана точность в %.

роу с помощью использования тороидальной голограммической решетки взамен плоской дифракционной решетки и двухлинзового объектива. Эта модернизация позволяет значительно увеличить контраст спектрального прибора.

Высокое оптическое разрешение всей оптической системы регистрации — собирающего объектива, согласующей оптики и полихроматора — позволяет контролировать юстировку положения оптоволоконного коллектора лазерного луча относительно лазерного луча.

Была проведена оценка точности измерения параметров плазмы. Оценка ошибки измерения температуры и плотности выполнена при помощи синтетической диагностики со спектром с экспериментальной кампанией Т-15МД из области лимитера. С учетом занижения фоновой засветки в 10 раз в центральной области плазмы диагностика позволяет проводить измерения с точностью 10% от 80 эВ до 6 кэВ при  $n_e > 6 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$ . Централь-

ный полихроматор будет комплектоваться дифракционной решеткой 700 штр/мм, два периферийных решеткой 900 штр/мм. В области периферии ошибка <10% достигается в диапазоне  $T_e$  от 100 эВ до 2 кэВ при  $n_e > 1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ .

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асадуллин Г.М., Бельбас И.С., Горшков А.В. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2016. Т. 39. Вып. 2. С. 91.
2. Панфилов Д.С., Горшков А.В., Асадуллин Г.М., Бельбас И.С. Современные средства диагностики плазмы и их применение / Сб. тез. докл. XII конф. М. 16–18 декабря 2020. С. 26.
3. Толпегина Ю.И., Горшков А.В., Асадуллин Г.М., Бельбас И.С., Горбунов А.В., Криворучко Д.Д.,

- Пшенов А.А.* // Тез. докл. XIX Всероссийской конф. Диагностика высокотемпературной плазмы, Сочи, 27 сентября – 1 октября, 2021 г. С. 142.
4. *Asadulin G.M., Bel'bas I.S., Gorshkov A.V.* // Fusion Engineering and Design. 2022. Т. 177. С. 113066. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2022.113066>
  5. *Zhu Y.X., Zang Q., Chu W., Kantor M.Yu., Lin G.L., Ren M.F.* // Fusion Engineering and Design. 2024. 208. 114696. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114696>
  6. *Асадулин Г.М., Кирнева Н.А., Бельбас И.С., Горшков А.В., Панфилов Д.С., Крылов С.В., Немец А.Р., Сергеев Д.С., Соловьев Н.А.* // Физика плазмы. 2024. Т. 50. №. 2. С. 159. doi: 10.1134/S1063780X23602080
  7. *O'Gorman T., Mc Carthy P.J., Prunty S., Walsh M.J., Dunstan M.R., Huxford R.B., Naylor G., Maguet E., Scannell R., and Shibaev S.* // Review of Scientific Instruments. 2010. Т. 81. №. 12. <https://doi.org/10.1063/1.3511556>
  8. *Kantor M.Y., Donné A.J.H., Jaspers R., Van Der Meiden H.J., Textor Team* // Plasma physics and controlled fusion. 2009. Т. 51. №. 5. С. 055002. <http://dx.doi.org/10.1088/0741-3335/51/5/055002>
  9. *Акатова Т.Ю., Булыгинский Д.Г., Гончаров С.Г., Гусев В.К., Ильин В.С., Кантор М.Ю., Раздобабрин Г.Т., Шильников А.Н.* // Диагностика плазмы. 1989. Вып. 6. С. 102.
  10. *Горшков А.В., Ильин В.С., Потемкин Н.Р., Санников В.В., Шильников А.Н.* // Физика плазмы. 1990. Т. 16. №. 11. С. 1276.
  11. *Gorshkov A.V., Alekseev A.G., Andreenko E.N., Asadulin G.M., Ageorges N., Kampf D., Naumenko N.N.* // Fusion Engineering and Design. 2019. Т. 146. С. 329. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.12.061>
  12. *Велихов Е.П., Ковальчук М.В., Анашкин И.О., Андреев В.Ф., Асадулин Г.М., Ахметов Э.Р., Балашов А.Ю., Бегишев Р.А., Белов А.М., Бельбас И.С., Бондарчук Э.Н., Борщеговский А.А., Вершиков В.А., Горбунов А.В., Горшков А.В., Грашин С.А., Громурова А.В., Диас Михайлова Д.Е., Дремин М.М., Дрозд А.С., Дубинецкий А.Ф., Земцов И.А., Ильгисонис В.И., Ильин И.С., Карпов А.В., Качкин А.Г., Кирнева Н.А., Кислов Д.А., Кочин В.А., Кручин В.А., Кузнецова Л.К., Левин И.В., Лисовой П.Д., Лутченко А.В., Матвеев Ю.В., Машункин М.В., Минеев А.Б., Модяев А.Л., Мустафин Н.А., Мялтон Т.Б., Немец А.Р., Николаев А.В., Новиков В.Н., Ноткин Г.Е., Нургалиев М.Р., Образцов И.С., Панфилов Д.С., Пименов И.С., Рогозин К.А., Рой И.Н., Романников А.Н., Рыжаков Д.В., Саврухин П.В., Сарычев Д.В., Сергеев Д.С., Смирнов В.В., Соловьев Н.А., Степин А.В., Сушкин А.В., Сычугов Д.Ю., Тарасян К.Н., Теникин В.И., Толлегина Ю.И., Уласевич Д.Л., Хайрутдинов Э.Н., Хвостенко А.П., Хвостенко П.П., Чудеснов А.И., Чудновский А.Н., Шелухин Д.А., Шестаков Е.А.* и коллектив установки Т-15МД // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2024. Т. 47. С. 5.

## DESIGN OF VERTICAL THOMSON SCATTERING DIAGNOSTICS FOR THE T-15MD TOKAMAK

D. S. Panfilov<sup>a,b,\*</sup>, G. M. Asadulin<sup>a,\*</sup>, I. S. Bel'bas<sup>a</sup>, and A. V. Gorshkov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123098 Russia*

<sup>b</sup>*National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, 115409 Russia*

\*e-mail: Panfilov\_DS@nrcki.ru

\*\*e-mail: 217508@mail.ru

For measuring the parameters of the plasma electron component in the T-15MD tokamak, the complex of Thomson scattering diagnostics is being designed, which will make it possible to study different regions of the plasma. In this work, we discuss the design of the Thomson scattering system with vertical probing for T-15MD, which provides for information on the plasma parameters along the vertical diameter of the vacuum vessel. Plasma probing is performed using the Nd:YAG laser with multipass system for inject laser beam into the tokamak. The laser operates at the second harmonic  $\lambda = 532$  nm. Scattered radiation is collected by one wide-angle lens. Light is transmitted to the registration system by the fiber-optic collector consisting of 159 fiber-optic assemblies with the size  $2 \times 1$  mm. The registration system consists of three units; each unit includes relay optical system and polychromator with detector. The spectrum of scattered radiation is recorded using image intensifier with CMOS camera. For achieving high light transmittance of the diagnostics optical system, the parameters and design of each optical unit were calculated in detail: the collecting lens, the relay optical system, and the polychromator. As compared to the T-10 Thomson scattering diagnostics, the system transmittance was considerably improved due to selecting rigorously the optical materials, as well as applying new design of the relay optical system, consisting mainly of mirrors. Using synthetic diagnostics, the accuracy of measuring the electron temperature and density was estimated. The plasma spectra from the region of T-15MD limiter are used as the plasma background. The Thomson scattering diagnostics system with vertical probing will make it possible to measure the electron temperature of plasma of the T-15MD tokamak with an error of less than 10% in the range from 80 eV to 6 keV at an electron density of more than  $6 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  in the central plasma region. At the plasma edge, the error will be less than 10% for the  $T_e$  range from 100 eV to 2 keV at densities  $n_e > 1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ . The spatial resolution of the diagnostics will be  $\sim 11$  mm at the center of the plasma and  $\sim 22$  mm in the edge plasma.

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