

УДК 533.9.07

ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ В ДИВЕРТОРЕ T-15МД: ЗАДАЧИ, ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ

© 2024 г. К. Ю. Вуколов^{а, б, *}, Е. Н. Андреев^а, М. Ю. Бузмаков^{а, б},
В. С. Неверов^а, И. И. Орловский^а, Ю. И. Толпегина^а, Д. А. Федоров^а

^аНИИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

^бМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*e-mail: vukolov_ky@nrcki.ru

Поступила в редакцию 10.07.2024 г.

После доработки 11.08.2024 г.

Принята к публикации 15.08.2024 г.

Рассматриваются различные методы диагностики диверторной плазмы, планируемые к применению на токамаке T-15МД. Обсуждаются технические проблемы, возникающие при эксплуатации оптических систем в диверторной зоне, в том числе деградация внутрикамерных оптических элементов. Основное внимание уделено концептуальному проекту диагностической системы “пассивная спектроскопия в диверторе”. Подробно описаны оптическая система, включающая внутривакуумные зеркала, и способы защиты ее компонентов от негативного воздействия плазмы. С помощью методов синтетической диагностики и численного моделирования показана возможность решения задачи томографического восстановления двумерного профиля излучения плазмы в диверторе T-15МД. На основе представленных результатов сделано заключение о возможности применения пассивной спектроскопии для получения данных о параметрах плазмы в диверторе с хорошим пространственным разрешением, что позволит исследовать физику процессов и контролировать работу дивертора T-15МД, включая режим детачмента.

Ключевые слова: токамак, дивертор, синтетическая диагностика плазмы, спектроскопия

DOI: 10.31857/S0367292124100027, EDN: FCUMJI

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение диверторной плазмы является важной задачей экспериментальной программы токамака T-15МД [1]. Для ее решения необходимо разработать и создать диагностические системы для исследования плазмы в диверторной зоне. Основными задачами диагностики диверторной плазмы являются измерения концентрации и температуры плазмы во всем диверторном объеме, концентрации (потоков) примесей и атомов водорода, а на стадии получения режимов с высоким уровнем дополнительного нагрева необходим контроль перехода в режим детачмента и определение положения ионизационного фронта.

Для диагностики диверторной плазмы традиционно используются зондовые [2–4],

болометрические [5] и лазерные методы [6, 7]. Широкое применение находят и различные спектроскопические методы [8, 9], которые могут быть активными (при воздействии на плазму пучком частиц или лазером) или пассивными (когда просто регистрируется излучение плазмы). Диагностический комплекс должен обеспечивать измерения с хорошим пространственным и временным разрешением с момента формирования диверторной конфигурации (появление X-точки и сепаратрисы) и до конца разряда. Указанный набор диагностик и применение численного моделирования на основе плазменных кодов и методов синтетической диагностики позволит получить информацию о параметрах диверторной плазмы и исследовать физику процессов [10].

В статье рассматриваются возможности измерения параметров диверторной плазмы токамака T-15МД с помощью спектроскопии, включая лазерные методы диагностики. Рассмотрены основные задачи по исследованию плазмы в диверторной зоне. Проанализированы инженерно-физические проблемы, касающиеся диагностических систем в диверторе, в том числе: проблема первого зеркала, подвижки камеры относительно фундамента здания и вибрация установки, наличие магнитных полей рассеяния, нагрев внутрикамерных элементов. Особое внимание уделено концептуальному проекту диагностической системы “пассивная спектроскопия в диверторе” (ПСД) на основе тангенциального обзора диверторной зоны T-15МД с использованием внутрикамерных оптических элементов. Методами синтетической диагностики для ПСД получены изображения диверторной зоны в линиях атомарного водорода H_α , H_γ , H_ϵ и ионов углерода C III (465 нм), и показана возможность решения задачи томографического восстановления двумерного (осесимметричного) профиля излучения.

2. СПЕЦИФИКА ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ В ДИВЕРТОРЕ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В диверторе имеются два значительно различающихся объекта диагностики: 1) так называемые «ноги» дивертора, т. е. тонкие слои плазмы, примыкающие к сепаратрисе, вдоль которых в дивертор поступают потоки частиц из основной плазмы; 2) плазма с пониженной относительно основной плазмы температурой и плотностью, занимающая практически весь остальной объем дивертора. Диверторная плазма неоднородна, ее параметры имеют большой разброс и могут значительно изменяться на протяжении разряда.

Как известно, работа дивертора может протекать в различных режимах [11], которые в основном определяются мощностью, сбрасываемой плазмой через сепаратрису. При достаточно высокой мощности может происходить переход в режим детачмента, когда между стенкой и плазмой образуется газовая подушка, переизлучающая поступающую с ионами из основной плазмы энергию. Это позволяет значительно сократить нагрузку на диверторные пластины, поэтому такой режим является предпочтительным для термоядерного реактора.

Переход к режиму детачмента характеризуется снижением ионного тока, приходящего на пластины дивертора, и резким уменьшением скорости ионизации около ударной точки. Ударными точками называют места выхода сепаратрисы на стенку или диверторную пластину (см. рис. 1а, где на эти точки опираются внешняя и внутренняя ноги дивертора в полоидальном сечении камеры

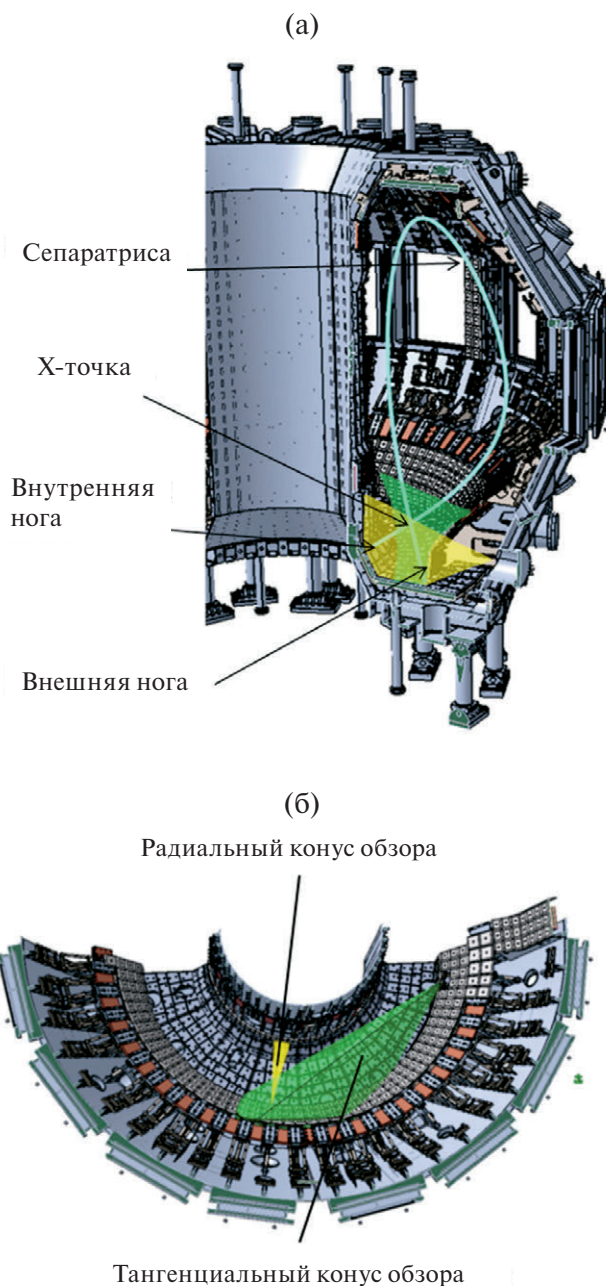


Рис. 1. Конфигурация диверторной плазмы T-15МД и планируемые обзоры диверторной зоны: а) варианты обзора дивертора в изометрии; б) вид на горизонтальное сечение камеры T-15МД в плоскости диверторных патрубков.

токамака). Режим, в котором только часть плазменного потока достигает мишени, называют частичным детачментом; это понятие довольно расплывчатое и не имеет четких границ. Например, в [12] при спаде ионного тока на 80% пикового значения уже говорят о переходе к полному детачменту. Переход в режим детачмента происходит при значительном снижении плотности электронов и почти неизменной температуре вдоль ног дивертора по направлению к ударной точке. При полном детачменте ионный ток на диверторные пластины стремится к нулю, то есть поток плазмы вдоль сепаратрисы становится практически полностью экранирован нейтральной по составу газовой мишенью.

Для контроля перехода к детачменту и управления установкой в этом режиме широко используются спектроскопические диагностики, которые позволяют осуществлять визуализацию плазмы и контролировать положение ионизационного фронта, а также измерять параметры диверторной плазмы. Например, в диверторе JET [12] с помощью пассивной спектроскопии были получены профили электронной температуры T_e и концентрации электронов n_e . Более того, по линиям бальмеровской серии восстанавливали профили плотности не только атомарного, но и молекулярного водорода [13]. Успешные исследования режима детачмента выполнены на токамаке TCV, где для этого были созданы многоканальные спектральные системы [14–16] для осуществления тангенциального обзора диверторной области с захватом ударных точек, а также X-точки — так называемого “магнитного ноля” или точки пересечения ветвей сепаратрисы в полоидальном сечении, см. рис. 1а). С помощью таких систем удалось получить 2D-распределения интенсивности линий бальмеровской серии атомов дейтерия, ионов углерода C III (465 нм), а также линий атомов гелия (667, 706, 728 нм) [15]. Кроме того, в [16] показана возможность использования этих систем для обратной связи в системе управления установкой.

На основании анализа возможностей пассивной спектроскопии предлагается ее использование для исследований диверторной плазмы на T-15МД. Кроме этого, в области дивертора будут применяться и другие диагностики. Для получения данных о мощности, выносимой плазмой в дивертор, используются болометры [5, 17]. Широко применяются активные диагностики:

спектроскопия на гелиевом пучке [18], лазерные методы, диагностика томсоновского рассеяния (ТР) и лазерного индуцированного тушения (ЛИТ) [19], магнитные и ленгмюровские зонды. Магнитные катушки (зонды) дают информацию о магнитной конфигурации, а ленгмюровские зонды позволяют проводить измерения n_e и T_e вблизи стенки, а также контролировать ионный ток на зонд в ударных точках.

Большим преимуществом активных методов диагностики является получение локализованных данных о параметрах плазмы, однако область измерений ограничена траекторией зондирующего пучка или местом расположения зонда. В связи с этим применение лазерных диагностик у внутренней стенки камеры в диверторной зоне крайне затруднено. Эта область доступна для измерений методами пассивной спектроскопии. Возможные ракурсы наблюдений для пассивной спектроскопии диверторной зоны в T-15МД с использованием горизонтальных диверторных патрубков показаны на рис. 1.

Проект диагностики ТР [20] для измерения локальных значений электронной температуры T_e и концентрации n_e в диверторе T-15МД предполагает зондирование плазмы через нижний вертикальный патрубок. Сбор рассеянного лазерного излучения из нижней части дивертора осуществляется внутривакуумной оптикой, а в верхней части до X-точки — атмосферным объективом (рис. 2).

Существенным конструктивным ограничением, обусловленным расположением патрубков и геометрией установки, является возможность зондирования лазером только небольшого участка внешней ноги дивертора. При этом луч попадает на внутреннюю стенку камеры, вызывая интенсивное рассеяние лазерного излучения, на фоне которого сложно измерить полезный сигнал. Решить эту проблему можно, выбирая угол ввода луча таким образом, чтобы точка падения луча на камеру была максимально удалена от области сбора излучения, увеличивая тем самым задержку по времени между полезным сигналом и паразитным сигналом от рассеянного стенкой излучения. Сокращая при этом длительность импульса лазера, можно полностью отстроиться от паразитного сигнала. Пространственное разрешение системы, по предварительным оценкам, составит несколько миллиметров. Диагностика ТР во внутренней ноге возможна только при вводе

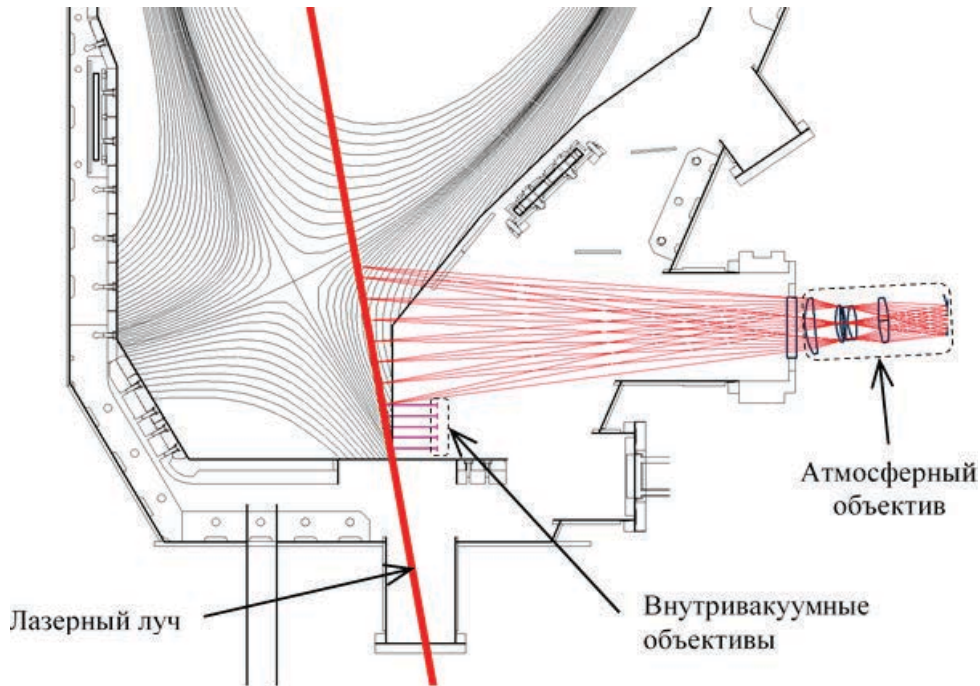


Рис. 2. Схема предполагаемого лазерного зондирования плазмы и сбора излучения в диверторе T-15МД.

лазера через верхние патрубки и на данном этапе не предусматривается.

Еще одна активная диагностика, используемая для измерений T_e и n_e в пристеночной и диверторной плазме — это метод теплового гелиевого пучка (ТГП). Метод измерений основан на одновременном наблюдении синглетных и триплетных линий атомарного гелия, дополнительно инжектируемого в исследуемый объем плазмы. Отношение интенсивностей линий, соответствующих переходам между синглетными уровнями, имеет сильную зависимость от n_e , а отношение интенсивностей триплетных линий к синглетным — от T_e . Сделав расчеты отношений интенсивности выбранных линий в столкновительно-излучательной модели (СИМ) плазмы и экспериментально измерив эти интенсивности, можно получить значения n_e и T_e на основании сравнения результатов эксперимента с данными моделирования [18].

В T-15МД гелиевый пучок планируется инжектировать в дивертор со стороны слабого магнитного поля. Такая схема инжекции позволит измерять n_e и T_e в области вблизи стенки и примерно до 10 см вглубь плазмы, вплоть до внешней границы сепаратрисы, где инжектируемый атомарный пучок гелия полностью ионизируется.

Из-за быстрой ионизации атомов может возникать необходимость в многократной импульсной инжекции гелия или постоянного напуска в процессе разряда токамака для сбора информации о параметрах плазмы. Метод ТГП относительно прост в техническом исполнении, для его применения отсутствует необходимость в абсолютной калибровке системы, так как достаточно знать лишь относительные интенсивности линий гелия. Метод обеспечивает пространственное (≈ 5 мм) и временное (≈ 1 мс) разрешения, позволяющие исследовать взаимодействие плазма-стенка [18]. Для сбора излучения ТГП диагностики можно будет использовать тангенциальный обзор, показанный на рис. 1.

3. ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

В ходе эксплуатации токамака различные компоненты диагностической системы испытывают негативное воздействие окружающей среды. Характер и степень этого воздействия зависит от расположения диагностического компонента, что необходимо учитывать при проектировании системы. Диагностическую систему можно разделить на вакуумную часть, включающую вакуумное окно и компоненты, расположенные

внутри вакуумной камеры, и атмосферную часть, элементы которой расположены как в непосредственной близости от установки, так и в удаленной пультовой.

Внутривакуумные компоненты оптических диагностик, как правило, включают в себя одно или несколько зеркал и/или объективов, позволяющих организовать сбор излучения из заданного поля зрения и передачу его через вакуумное окно. Для упрощения монтажа и юстировки оптические элементы целесообразно объединять в единый оптический узел. Этот оптический узел находится вблизи плазмы и может испытывать существенные радиационные, электромагнитные (ЭМ) и вибрационные нагрузки. Для снижения ЭМ-нагрузок при изготовлении корпуса узла следует по возможности избегать материалов с высокой электропроводностью, а также электрически изолировать отдельные компоненты. Радиационные нагрузки могут приводить к неравномерному нагреву узла, что вместе с вибрационными нагрузками способно вызвать рассогласование оптической системы. Все это необходимо учитывать при проектировании.

Наиболее уязвимым внутривакуумным компонентом является первый оптический элемент, обращенный к плазме. Часто таким элементом является зеркало, которое в таком случае называют “первым зеркалом”. На его поверхности протекают одновременно несколько процессов. Во-первых, происходит физическое распыление поверхности потоком атомов перезарядки из плазмы (H, D). Интенсивность этого процесса определяется величиной потока и коэффициентом распыления материала зеркала, зависящим от энергии и массы распыляющих частиц, а также структуры материала [21]. Распыление поверхности на значительную глубину (> 100 нм) у поликристаллических материалов часто приводит к росту шероховатости поверхности и, следовательно, к росту коэффициента диффузного рассеяния [22, 23], что может негативно сказываться на разрешающей способности оптической системы. Во-вторых, на поверхность зеркала могут переосаждаться распыленные материалы первой стенки, в случае Т-15МД, — это, в основном, углерод. Особенно интенсивно этот процесс протекает в режиме кондиционирования камеры, т. е. при обработке стенки камеры в газовых разрядах. В результате на зеркале образуются углеводородные пленки [24], приво-

дящие к падению коэффициента зеркального отражения [23, 25, 26]. В-третьих, происходит имплантация в материал зеркала атомов легких элементов (водорода, гелия) с последующей их диффузией вглубь материала и накоплении в подповерхностном слое. При повышении температуры в вакуумных условиях легкие атомы постепенно выходят на поверхность и при наличии на поверхности осажденной пленки или специально нанесенного покрытия могут образовывать газовые пузыри, приводящие впоследствии к отслаиванию и растрескиванию покрытия (т. н. эффект блистеринга) [27, 28]. Примечательно, что иногда блистеринг наблюдался у металлических зеркал без какого-либо покрытия: его роль играл аморфно-дефектный поверхностный слой, образующийся при полировке зеркала [29].

Важно заметить, что интенсивность этих процессов зависит от множества факторов: расположения диагностического порта, параметров плазменного разряда, локального газового давления и температуры зеркала. Например, на первом зеркале спектральной диагностики в экваториальном порту установки Т-10 за год работы образовывалось небольшое пятно из углеводородов толщиной ≈ 100 нм [30], а тестовые зеркала в диверторе установки JET за то же время полностью покрылись металлосодержащей пленкой толщиной ≈ 200 нм [31] (рис. 3).

Перечисленные проблемы первого зеркала могут приводить к значительному ухудшению работоспособности диагностики, что требует предусмотреть возможность оперативной замены зеркал. Если зеркало имеет высокую стоимость или процедура замены слишком сложна, то на этапе разработки в конструкцию системы следует заложить элементы защиты зеркала. Например, в узле внутривакуумных зеркал (УВЗ) диагностики “Спектроскопия водородных линий” (СВЛ) [32, 33] для установки ИТЭР защита зеркал обеспечивается несколькими способами (рис. 4). Свет поступает в УВЗ через узкий входной зрачок ($\varnothing 10$ мм), что на несколько порядков снижает потоки частиц на первое зеркало. Зрачок перекрывается подвижной шторкой, которая позволяет избежать загрязнения оптики во время режима кондиционирования камеры. Также в УВЗ установлена система очистки зеркал, основанная на ионном распылении поверхности зеркал в сеточном полом катоде в разряде постоянного

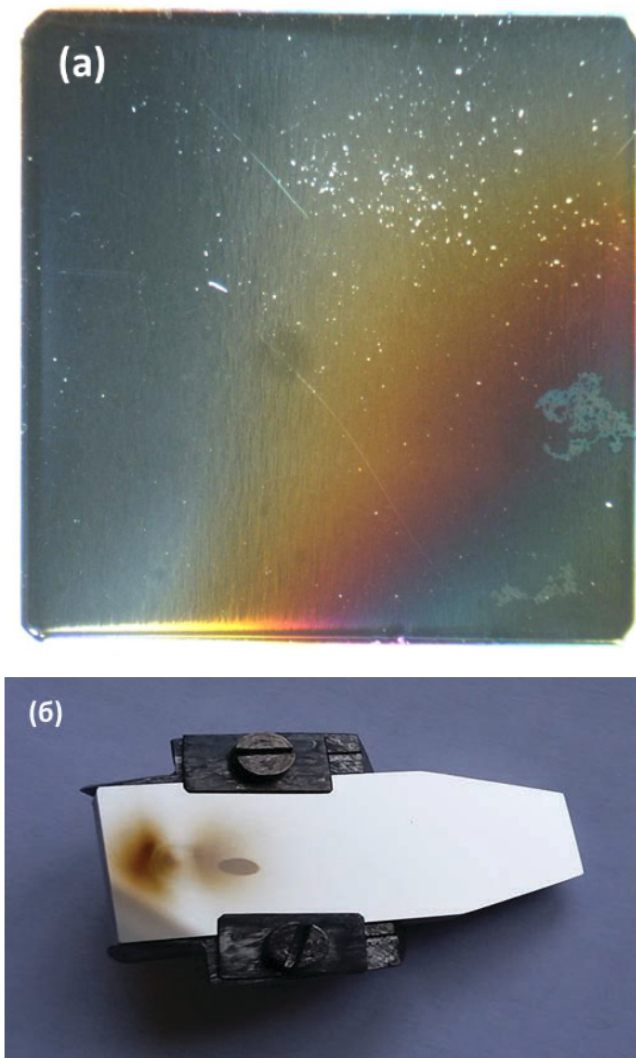


Рис. 3. Зеркала после года эксплуатации: а) в диверторе токамака JET [31]; б) в экваториальном порту токамака T-10 [30].

тока с D, He, Ne или Ar в качестве рабочего газа [34]. Зеркала изготовлены из монокристаллического молибдена, поэтому их оптические характеристики не ухудшаются при физическом распылении (вплоть до нескольких микрон) [35], а их конструкция с развитой поверхностью с тыльной стороны позволяет улучшить отвод тепла [36].

В установках с углеродной первой стенкой для борьбы с высокой скоростью осаждения углеводородных пленок на первом зеркале может также применяться дополнительный нагрев зеркал с целью стимулирования химической эрозии [25, 37]. Также, при наличии свободного места в патрубке можно рассмотреть возможность применения револьверного или кассетного механизма с дешевыми прозрачными защитными окнами,

защищающими дорогостоящий первый оптический элемент диагностики.

Описанные выше проблемы первого зеркала в равной степени относятся и к внутривакуумным объективам. В частности, их применение в составе диагностик ТР и ЛИТ для токамака T-15МД в обязательном порядке потребует использования защитной шторки при кондиционировании камеры. Следует учесть, что скорость осаждения пленок в стационарном режиме в диверторной зоне значительно выше, чем в горизонтальных патрубках, и может привести к существенному падению пропускания оптической системы в течение экспериментальной кампании. Для диагностики ТР это будет означать невозможность измерения n_e из-за потери актуальности абсолютной калибровки, проведенной до начала кампании. По этой причине использование внутривакуумных объективов в диагностике ТР предполагается совместно с объективами, расположенными в атмосферной части. Для диагностик ЛИТ и ТГП абсолютные калибровки не требуются, поэтому их работоспособность будет ограничиваться только минимально допустимым уровнем соотношения сигнал/шум.

Для атмосферной части диагностики условия значительно менее строгие, но и здесь существуют по крайней мере три проблемы: смещение установки относительно здания, рассеянное магнитное поле и рентгеновское излучение из плазмы. Смещение установки связано с кратковременной деформацией ее конструкции под воздействием сильного импульсного магнитного поля. В результате может происходить виньетирование светового пучка и общая расфокусировка оптической системы. Самым простым решением является крепление атмосферного оптического узла непосредственно к установке (например, к фланцу диагностического патрубка). В случае, если это невозможно, может потребоваться разработка специального согласующего оптического узла. В диагностике СВЛ ИТЭР для этой цели используется длиннофокусный телескоп с двумя эллиптическими зеркалами и системой электрических приводов для дистанционной юстировки системы [38].

Наличие магнитного поля и рентгеновского излучения в атмосферной зоне может негативно влиять как на функционирование электроники (в частности, детекторов), так и наводить шумы в сигналах, передаваемых по электрическим

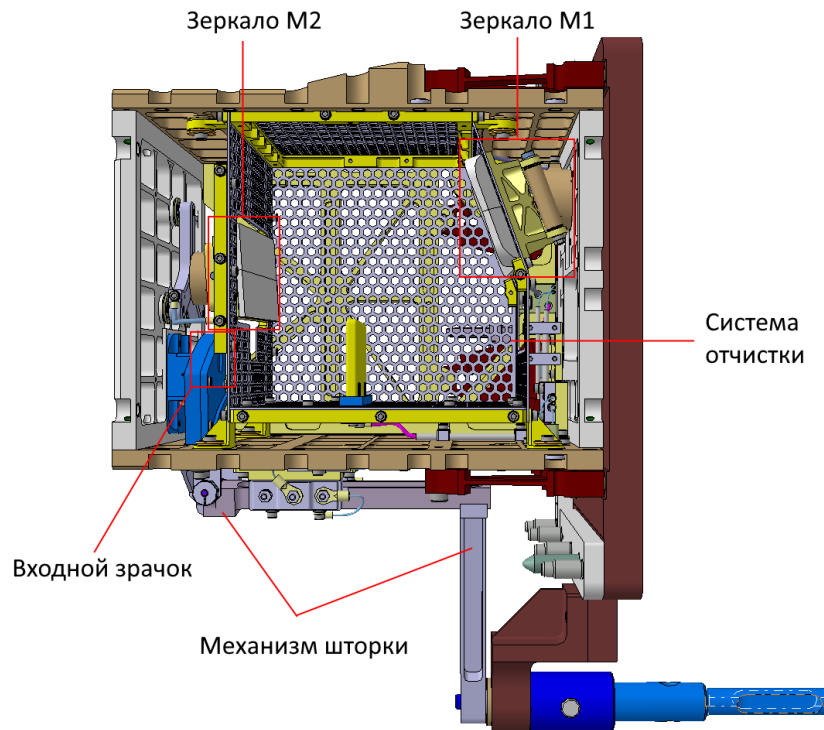


Рис. 4. UV3-диагностики СВЛ в установке ИТЭР [33].

кабелям. Для решения этой проблемы необходима экранировка кабелей и электронных компонент. Альтернативным решением является перенос всей электроники в пульговую и передача экспериментального сигнала в нее с помощью оптоволоконных коллекторов.

4. ПАССИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ В ДИВЕРТОРЕ

Использование пассивной спектроскопии (ПСД) для диагностики плазмы в диверторе позволяет получать данные из всего объема диверторной области, что важно, так как плазма здесь неоднородна. К основным задачам ПСД относятся: 1) визуализация положения плазмы в диверторе, 2) определение режима работы дивертора, включая возможность контроля перехода к детачменту, 3) определение положения ионизационного фронта, 5) измерения T_e и n_e , а также контроль уровня рециклинга. Требования к измерениям будут сформулированы на следующем этапе работы.

Развитие этой диагностики на Т-15МД предлагается начать с тангенциального обзора в торoidalном направлении с захватом всей диверторной области, включая X-точку и возможные

положения ударных точек. Для вывода излучения из вакуумной камеры будет использован узел внутривакуумных зеркал. На первом этапе предполагается возможность измерения во времени линий атомарного водорода H_α , H_γ , H_ϵ и линии углерода С III (465 нм). Измерение отношений плотности мощности излучения в линиях водорода в диверторе позволит определять температуру и плотность электронов [12], а линия С III удобна для определения положения ионизационного фронта и контроля за переходом в режим детачмента [14, 15]. Кроме того, наблюдение этих линий водорода в пространстве и времени позволяет судить о влиянии процессов рекомбинации и рециклинга на режим работы дивертора, что полезно для его оптимизации.

В дальнейшем планируется добавление других линий примесей атомарного азота и гелия ($N II$, $He I$, $He II$). Целью диагностики ПСД является определение положения плазменного шнура (сепаратриса, X-точка, ударные точки), исследование режима работы дивертора (определение электронной температуры и плотности), оценка уровня рециклинга и контроль перехода в режим детачмента [10]. Ниже представлен концептуальный проект диагностики ПСД и расчеты,

выполненные для его обоснования. Схема диагностики ПСД на T-15МД показана на рис. 5.

Для сбора излучения применяются три внутривакуумных зеркала, смонтированные внутри УВЗ. Регистрация изображения осуществляется при помощи видеокамер с интерференционными фильтрами (ИФ). Для крепления составляющих элементов диагностики в атмосферной части использована легкая несущая рама из стержней и колец (см. рис. 5).

Конструкцию диагностики ПСД можно разделить на две части: внутривакуумную и атмосферную. Главным элементом внутривакуумной

части является УВЗ (рис. 6). УВЗ включает корпус с крышкой, входной зрачок, держатели для крепления и юстировки зеркал; алюминиевые зеркала с защитным покрытием. Зрачок прикрывается шторкой в процессе кондиционирования вакуумной камеры, которая будет защищать зеркала от загрязнения. УВЗ располагается на жесткой опоре (балке), крепление к которой осуществляется с помощью винтов. Сама балка закрепляется с помощью болтов на ребра жесткости камеры T-15МД вдоль радиуса тора, а с противоположной от УВЗ стороны она опирается на фланец и фиксируется на нем штифтом. Для сбора

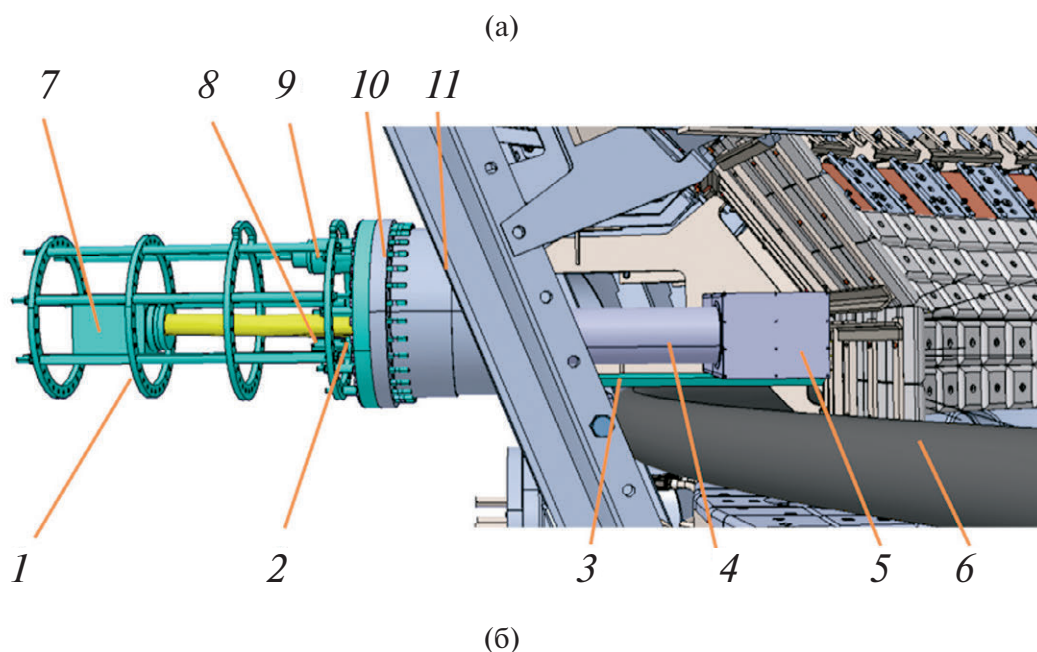


Рис. 5. Пассивная спектроскопия в диверторе: а) элементы диагностики: 1 – несущая рама, 2 – вакуумное окно, 3 – балка, 4 – защитный кожух, 5 – УВЗ, 6 – криогенный насос, 7 – видеокамера, 8 – объектив и ИФ, 9 – узел привода защитной шторки, 10 – фланецпереходник, 11 – горизонтальный диверторный патрубок T-15МД; б) 40° конус обзора диверторной плазмы (вид из зрачка).

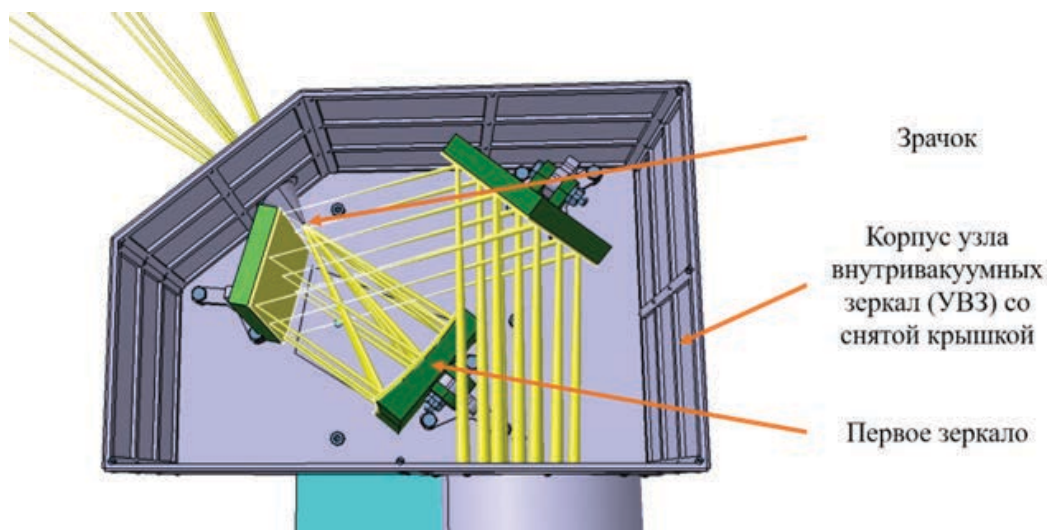


Рис. 6. Размещение зеркал внутри УВЗ (желтые пучки — ход световых лучей).

света из плазмы с первой стенки снимаются несколько графитовых плиток и рейка для их крепления (рис. 7).

Атмосферная часть представляет собой несущую раму, на которой размещены детектор и оптические элементы. Рама присоединяется к фланцу и закреплена на горизонтальном диверторном патрубке Т-15МД (см. рис. 5а). Для регулировки расстояния между поддерживающими кольцами использованы вставные трубки необходимых размеров, что обеспечивает дополнительную жесткость конструкции. Оптические элементы закрепляются на специальных базах, которые располагаются между кольцами.

Оптическая схема ПСД была рассчитана в специализированном программном пакете Ze-

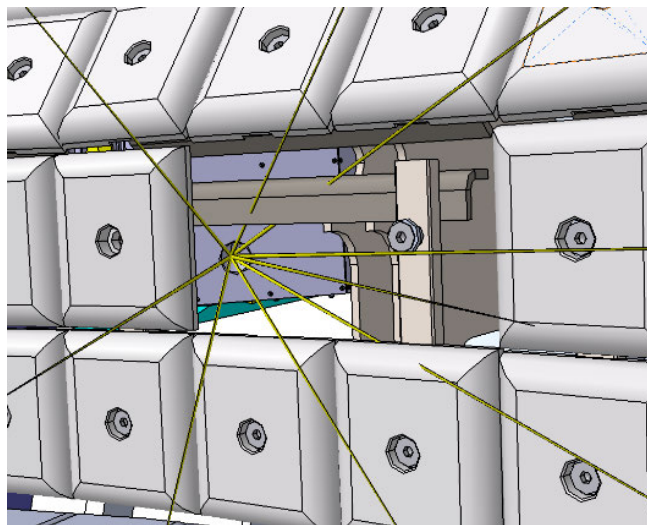


Рис. 7. Вид на входной зрачок УВЗ из камеры Т-15МД.

max OpticStudio. Общий вид оптической схемы представлен на рис. 8. Для защиты зеркала от запыления использован малый входной зрачок диаметром 3 мм. Расстояние от первой стенки до зрачка 110 мм, а расстояние между зрачком и первым зеркалом 90 мм. Данная схема похожа на описанную выше схему УВЗ СВЛ в ИТЭР, эффективность защиты которой была продемонстрирована в работе [27]. По предварительной оценке, такая схема в предложенной для Т-15МД геометрии обеспечивает снижение прямого потока частиц из плазмы на первое зеркало на четыре порядка по сравнению с потоком на первую стенку токамака.

На представленной схеме для сбора излучения и вывода его из вакуумной камеры использован УВЗ, включающий три оптических элемента — внеосевое параболическое первое зеркало с радиусом кривизны поверхности 170 мм (М1) и два плоских зеркала (М2 и М3). Система из трех зеркал позволяет развернуть пучок света вдоль оси патрубка на 40° и отрегулировать его положение по высоте, а также минимизировать угол наклона первого зеркала относительно оптической оси для снижения aberrаций. В данной схеме угол наклона первого зеркала составляет 9° . Все три зеркала УВЗ имеют квадратную апертуру с размерами 60×60 мм. Размер зеркал ограничивается наличием свободного места для УВЗ, который можно разместить в пространстве в районе диверторного патрубка Т-15МД. Размер зеркал влияет на минимально возможный размер вакуумного окна и оптических элементов в атмосферной части диагностики.

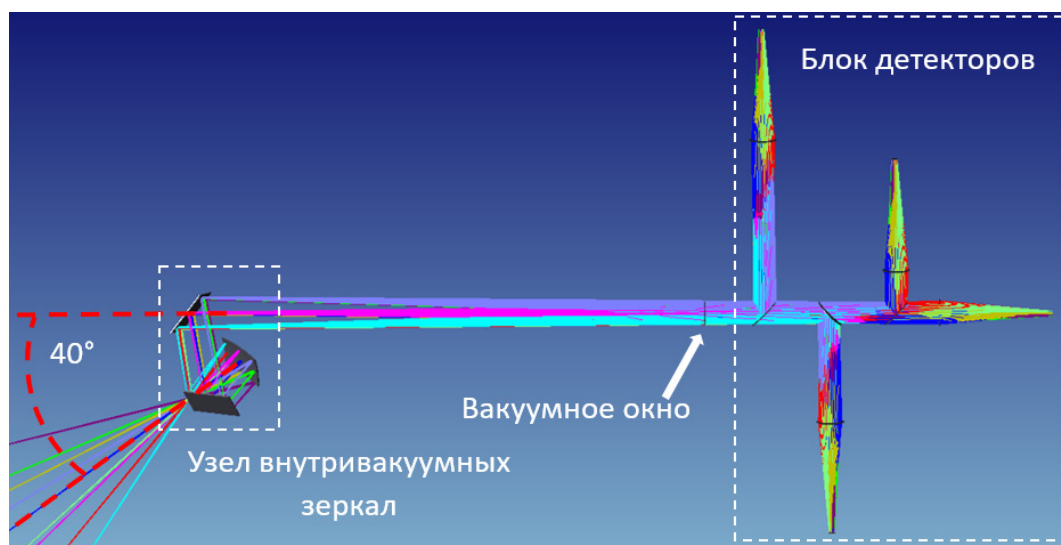


Рис. 8. Оптическая схема ПСД на T-15МД с 4-мя каналами регистрации.

Описанный узел входных зеркал обеспечивает угол визирования и по вертикали, и по горизонтали — 30° (40° по диагонали), такие углы обзора обеспечивают наблюдение ударных точек и X-точки. На рис. 9 показана схема размещения зеркал внутри УВЗ вместе с ходом световых лучей.

В качестве альтернативы был рассмотрен вариант с использованием сферического первого зеркала (без изменения остальных элементов). Было показано, что параболическое зеркало позволяет лучше собрать пучки света из разных углов наблюдаемой области на входной линзе объектива (рис. 10) и, соответственно, значительно снизить требования к диаметру объектива. На рис. 10 цветами показаны лучи из разных областей объекта наблюдения с указанием полярного и азимутального углов в наблюдаемой области.

За вакуумным окном последовательно установлены 3 делительные пластины, направляющие часть света на 4 канала регистрации (см. рис. 8). Оптическая длина пути равна для всех каналов, что позволяет использовать одинаковые объективы с фокусным расстоянием 135 мм и получать изображение в одном и том же масштабе на всех детекторах. Детекторы снабжены интерференционными фильтрами для регистрации излучения на выбранной длине волны (фильтры не показаны на схеме рис. 10). При необходимости, без изменения оптической схемы может быть добавлен еще один детектор.

Спот-диаграммы для оптической системы с параболическим и со сферическим первым зер-

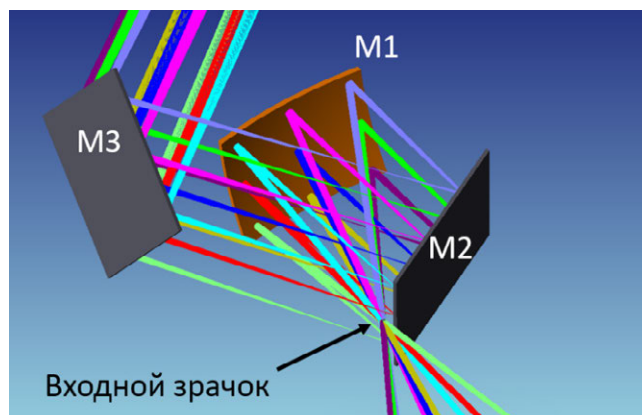


Рис. 9. Схема размещения зеркал внутри УВЗ.

калом представлены на рис. 11. Спот-диаграмма наглядно демонстрирует распределение лучей от точки объекта наблюдения в виде пятна на плоскости изображения. Для оценки количества разрешаемых точек на изображении нужно размер изображения разделить на характерный размер пятна на спот-диаграмме. Оптическое разрешение системы при этом равно отношению размера объекта к полученному количеству разрешаемых точек в плоскости изображения. Ожидаемое оптическое разрешение одинаково при использовании как сферического, так и параболического зеркала и составляет $0,5\text{--}2\text{ см}$ в зависимости от расстояния до наблюдаемого объекта.

На этапе концептуальной разработки спектроскопической диагностики важно определить условия измерений параметров плазмы и достижимую точность. Подобная работа для T-15МД началась с разработки синтетической диагностики для

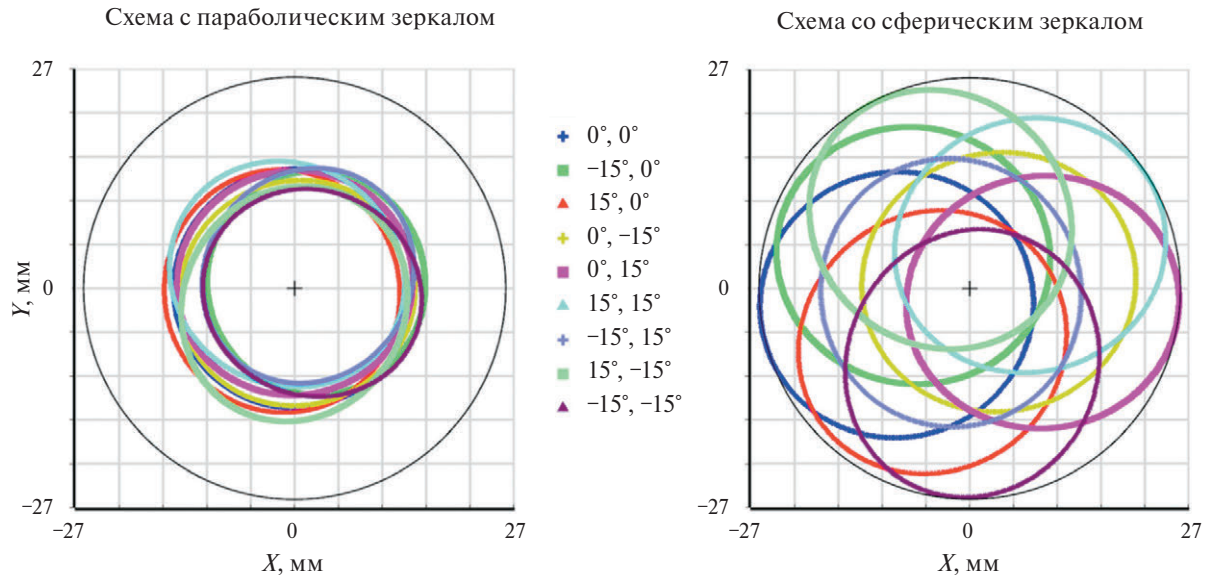


Рис. 10. Положение оптических пучков на входной апертуре объектива.

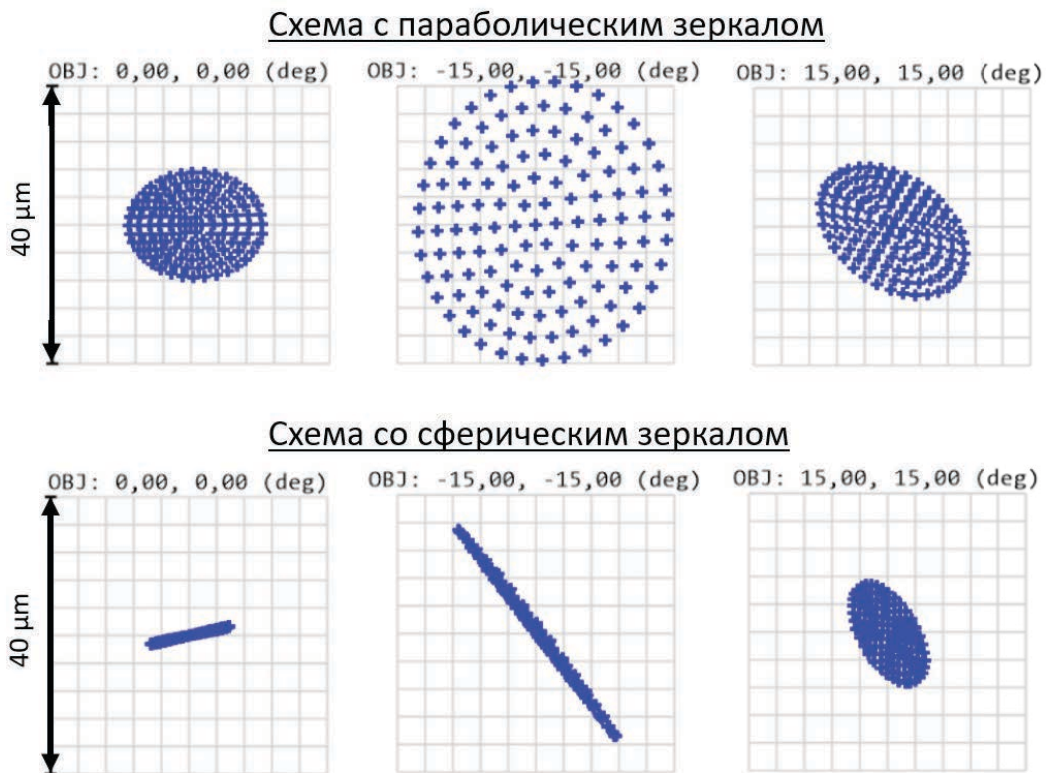


Рис. 11. Спот-диаграммы для оптической системы с параболическим и со сферическим первым зеркалом.

пассивной спектроскопии плазмы [39] и созданием модуля библиотеки Cherab [40] для Т-15МД. Для сценариев с мощностью дополнительного нагрева более 10 МВт и при значениях плотности электронов на сепаратрисе $(2,5 \div 3,8) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$

показано, что интенсивность излучения на линии H_{α} , приходящая из диверторной области, на 2–3 порядка величины выше интенсивности излучения на этой линии, приходящего из пристеночного слоя плазмы в основной камере.

Для анализа эффективности предлагаемого концептуального дизайна ПСД в модуле Cherab для T-15МД была создана синтетическая диагностика, включающая вышеописанные модели УВЗ и оптической схемы со сферическим первым зеркалом. По сравнению с [39] была использована обновленная модель первой стенки T-15МД.

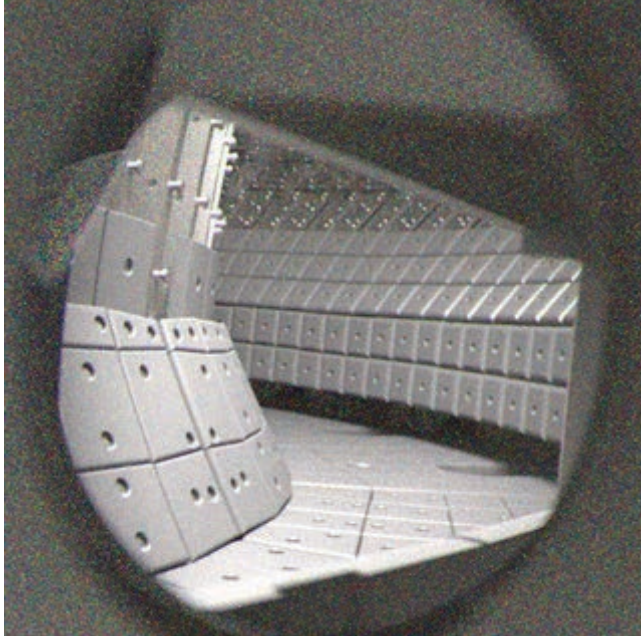


Рис. 12. Тестовое изображение на матрице детектора диагностики ПСД для T-15МД, рассчитанное методом трассировки лучей.

Рассчитанное методом трассировки лучей с помощью библиотек Raysect [41] и Cherab изображение на матрице детектора показано на рис. 12. Из-за отражения от зеркал внутренний обвод камеры токамака оказывается слева на изображении. Сферический источник белого света с радиусом 30 см расположен внутри вакуумной камеры токамака выше поля обзора диагностики.

В качестве исходных данных для расчета синтетических изображений были использованы результаты моделирования пристеночной плазмы с помощью кода SOLPS 4.3 [42] для режимов с мощностью P_{SOL} 2 и 10 МВт теплового потока, выносимого из основной плазмы в пристеночный слой, что соответствует мощности дополнительного нагрева плазмы 2,9 и 14,3 МВт. Для режима с $P_{SOL} = 2$ МВт средняя плотность электронов на сепаратрисе составляет $5.3 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$, а для режима с $P_{SOL} = 10$ МВт она составляет $2.6 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

На рис. 13 показаны результаты расчета двумерных профилей плотности мощности излучения в спектральных линиях H_α , H_γ , H_ϵ и С III (465 нм) в диверторе T-15МД для двух указанных режимов. Учтено испускание излучения вследствие возбуждения атомов водорода электронным ударом и рекомбинации ионов водорода, а необходимые атомные данные (т. н. коэффициенты излучения фотонов), рассчитываемые с по-

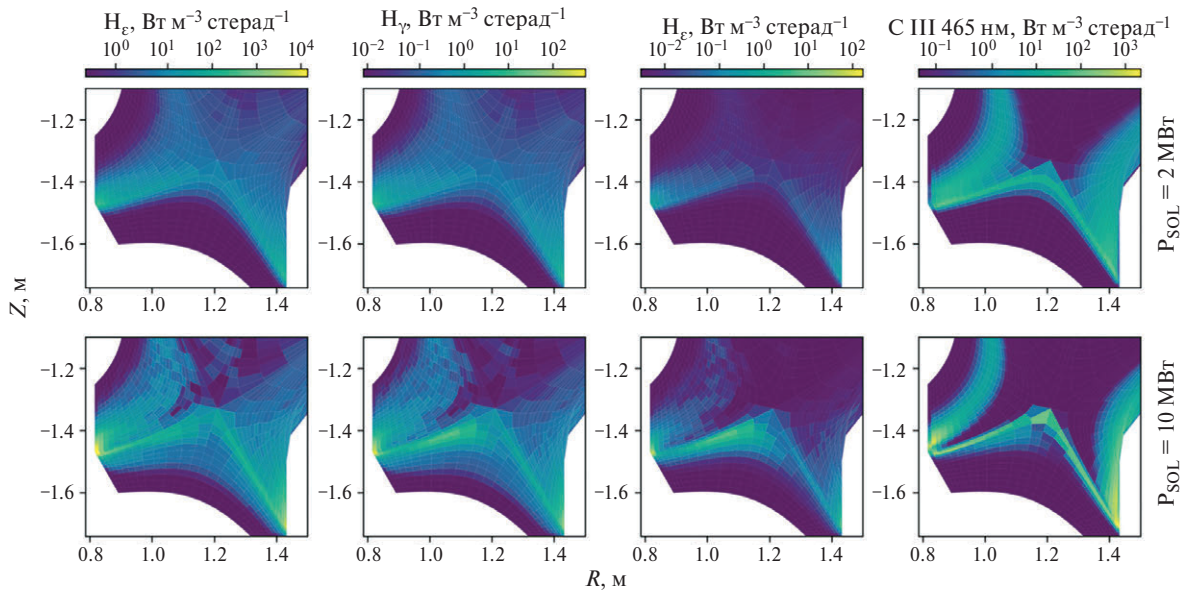


Рис. 13. Плотность мощности излучения в линиях H_α , H_γ , H_ϵ и С III (465 нм) для двух режимов с $P_{SOL} = 2$ МВт (верхний ряд) и $P_{SOL} = 10$ МВт (нижний ряд) рассчитанные по результатам моделирования пристеночной плазмы кодом SOLPS 4.3.

мощью СИМ, были взяты из базы данных OpenADAS [43].

Интенсивность излучения на матрице детектора ПСД, отвечающая профилям рис. 13, рассчитанная в коде Cherab методом трассировки лучей, приведена на рис. 14. Использовались те же модели двулучевых функций отражательной способности графитовых и стальных элементов стенки Т-15МД, что и в [39], с параметрами, соответствующими новой стенке (см. табл. 2 в [39]). Из рис. 14 видно, что в рассмотренной магнитной конфигурации X-точка находится практически на границе наблюдаемой области камеры ПСД. Для расширения области обзора необходимо убрать, или модифицировать верхнюю рейку для крепления графитовых плиток (см. рис. 7).

Так как на первом этапе не планируется установка отдельного интерференционного фильтра для измерения фонового излучения, для оценки соотношения сигнал/фон был выполнен расчет интенсивности тормозного излучения на длине волны линии H_ϵ , как наиболее слабой из измеряемых линий. На рис. 15 показано сравнение плотности мощности излучения в линии H_ϵ и тормозного излучения, а также их отношение. Ширина пропускания интерференционного фильтра принималась равной 2 нм. Отметим, что линия H_ϵ подвержена сильному штарковскому

уширению. В сценарии с $P_{SOL} = 2$ МВт везде в диверторной области в диапазон фильтра 2 нм попадает более 99.95% излучения в линии H_ϵ . В сценарии с $P_{SOL} = 10$ МВт, в районе внутренней ударной точки, где плотность электронов достигает значения 10^{21} м^{-3} , в диапазон фильтра попадет около 93% излучения в линии H_ϵ , а интегрально по объему дивертора в фильтр попадет около 98.5% излучения. Расчеты штарковского уширения линии H_ϵ были выполнены с помощью параметрической модели [44]. Из рисунка видно, что практически во всей области обзора интенсивность излучения в линии H_ϵ превосходит интенсивность тормозного излучения более чем в 8 раз в сценарии с $P_{SOL} = 10$ МВт и более чем в 100 раз в сценарии с $P_{SOL} = 2$ МВт.

Для демонстрации возможности восстановления профилей плотности мощности излучения для четырех рассматриваемых спектральных линий по изображениям с камеры ПСД, была решена томографическая задача, аналогичная таковой в [45]. Сетка осесимметричных источников излучения, тороидальных колец с квадратным поперечным сечением 1 см^2 , светимость которых требуется восстановить по изображениям с камеры, насчитывала 3562 источника. Разрешение изображения составляло 512×512 пикселя, а количество полезных (наблюдающих плазму) пик-

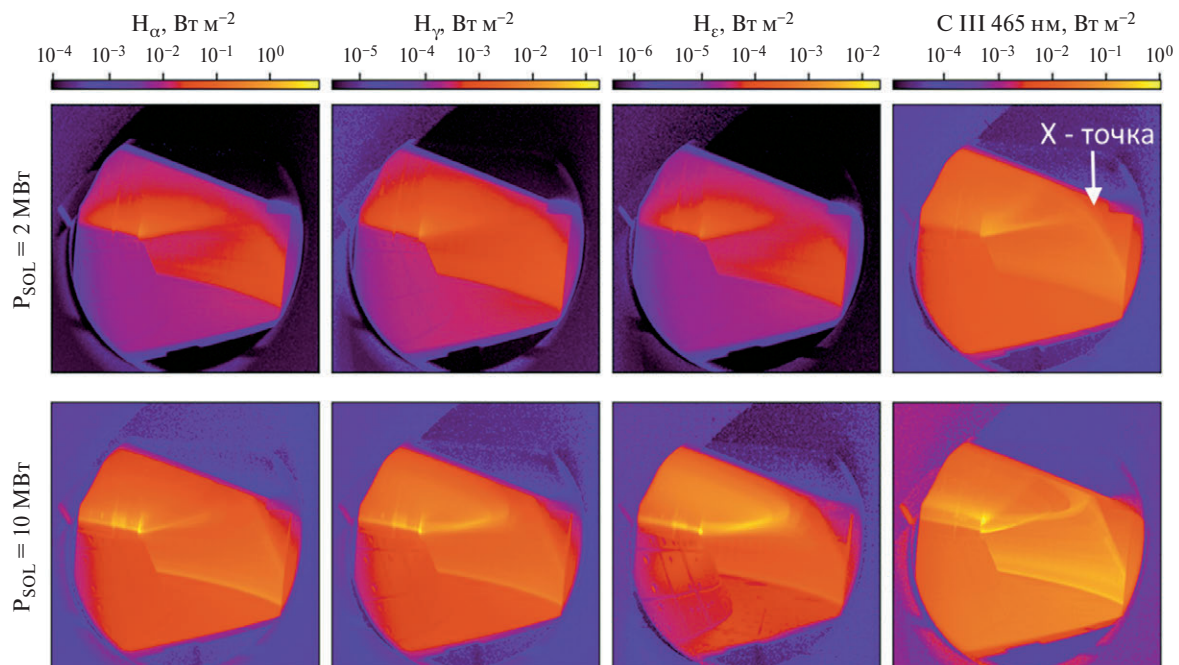


Рис. 14. Интенсивность излучения в линиях H_α , H_γ , H_ϵ и C III (465 нм) на матрице детектора ПСД для двух режимов с $P_{SOL} = 2$ МВт (верхний ряд) и $P_{SOL} = 10$ МВт (нижний ряд), соответствующая профилям на рис. 13. Стрелкой отмечено положение X-точки.

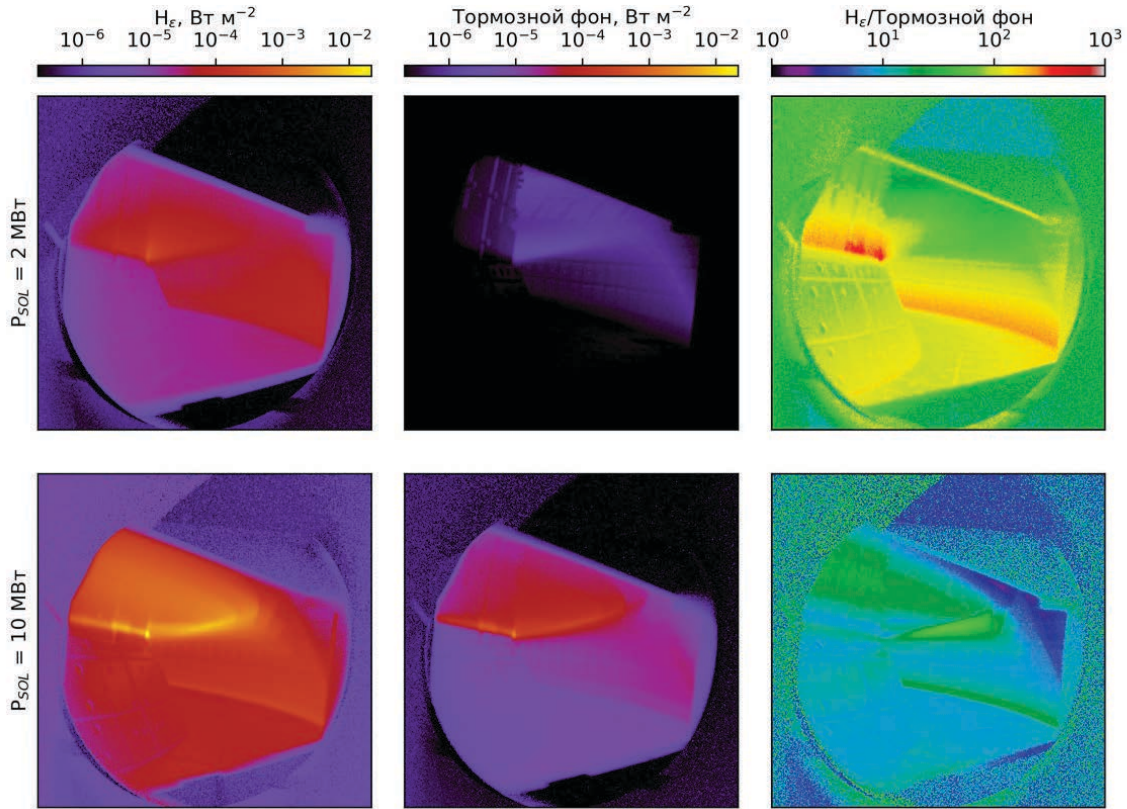


Рис. 15. Сравнение плотности мощности излучения в линии $H\epsilon$ и тормозного излучения, а также их отношение при ширине пропускания интерференционного фильтра, равной 2 нм, для двух режимов с $P_{SOL} = 2$ МВт (верхний ряд) и $P_{SOL} = 10$ МВт (нижний ряд).

селей составило 119 847. Геометрическая матрица (матрица переноса лучей) была рассчитана с учетом отражения излучения от стенок камеры токамака. Томографическая задача решалась методом SART [46] без регуляризации. Результаты ее решения, а именно сравнение истинных и восстановленных по изображениям профилей светимости, даны на рис. 16 и 17 для значений P_{SOL} 2 и 10 МВт, соответственно.

Из рис. 16 и 17 видно, что профили плотности мощности излучения в диверторе могут быть восстановлены с удовлетворительной точностью, но не выше уровня $Z = -1.3$ м. Восстановленный профиль светимости вблизи внешней ударной точки оказывается немного размытым. Так происходит потому, что эта область наблюдается под относительно большими углами к нормали к полоидальной плоскости, а для успешного восстановления осесимметричного профиля эти углы должны быть малы. Отметим, что дополнительная информация, учтенная в операторе регуляризации (результаты измерений n_e и T_e с помощью ТР и ТПГ, данные магнитных и ленгмюровских зондов), а также методы машин-

ного обучения для распознавания изображений должны улучшить точность решения обратной задачи.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перечислены и кратко обсуждены основные задачи исследования диверторной плазмы токамака T-15МД и методы ее диагностики, включая ТР — томсоновское рассеяние, ЛИТ — лазерное индуцированное тушение, ТПП — тепловой гелиевый пучок, ПСД — пассивная спектроскопия в диверторе. Описаны проблемы эксплуатации оптических систем в диверторе, наиболее критическими из которых является проблема первого зеркала для пассивной спектроскопии дивертора (ПСД) и деградация внутривакуумного объектива для ТР/ЛИТ.

Представлена концепция диагностической системы для измерения параметров диверторной плазмы с помощью ПСД. Для ее реализации рассчитана оптическая система с использованием внутрикамерных зеркал для наблюдения диверторной зоны токамака T-15МД в тангенци-

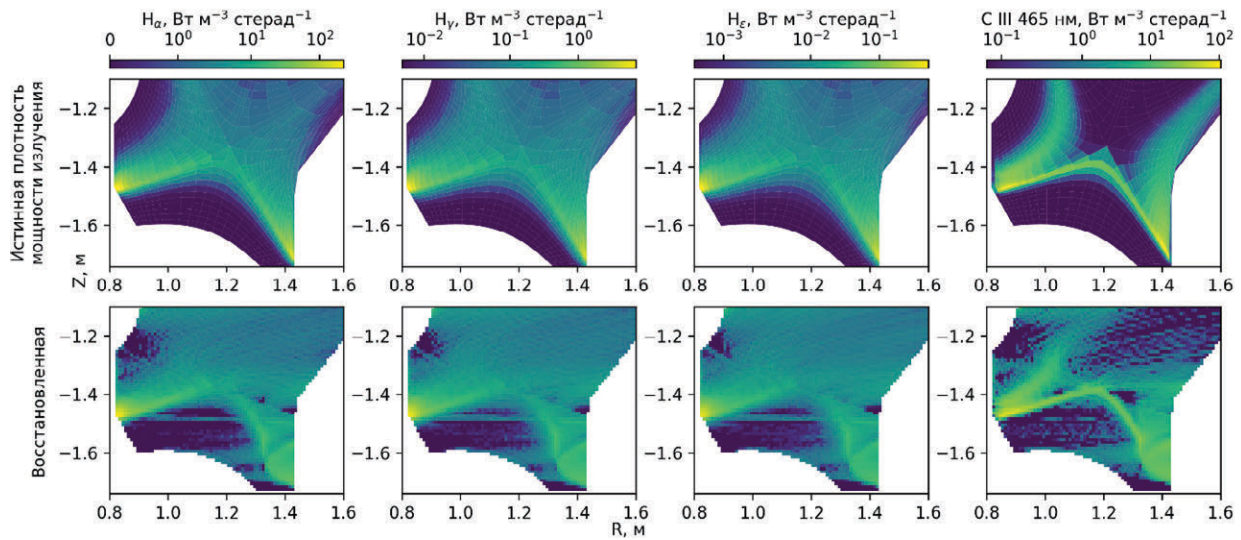


Рис. 16. Профили истинной (верхний ряд) и восстановленной по изображению с камеры (нижний ряд) светимости в спектральных линиях для режима с $P_{\text{SOL}} = 2$ МВт.

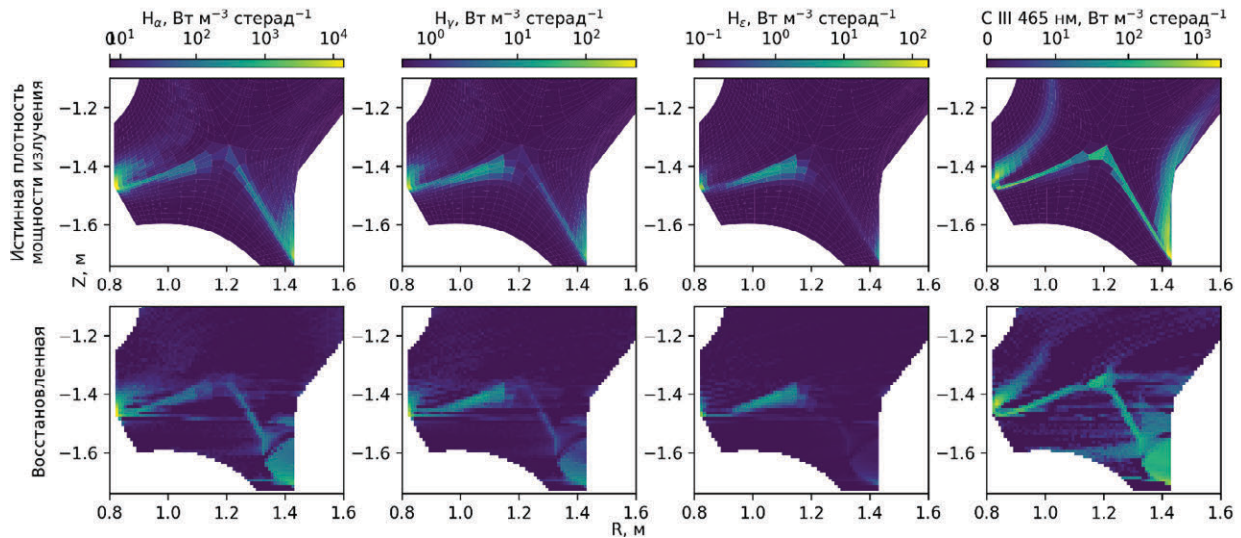


Рис. 17. То же, что и на рис. 16, но для режима с $P_{\text{SOL}} = 10$ МВт.

альном ракурсе. Рассмотрены варианты конструкции оптической системы и разработан концептуальный дизайн с использованием параболического первого зеркала, предусматривающий меры защиты оптики от негативных воздействий. Оптическая схема с малым входным зрачком значительно снижает поток частиц из плазмы на первое зеркало. Применение шторки защищает внутривакuumную оптику от загрязнения в режиме кондиционирования вакуумной камеры. Крепление атмосферной части системы к фланцу токамака позволит избежать рассогласования оптики при вибрационных нагрузках.

С помощью кодов Cherab и Raysect получено ожидаемое изображение наблюдаемой дивер-

торной зоны. На основе синтетической спектроскопической диагностики для конфигураций плазмы в двух реперных режимах работы дивертора T-15MD, рассчитанных кодом SOLPS 4.3, рассчитаны возможные двумерные распределения плотности мощности излучения в плазме и интенсивности свечения в линиях бальмеровской серии водорода и линии углерода на матрице детектора. Показано, что диагностику ПСД можно использовать для томографического восстановления профилей плотности мощности излучения в указанных спектральных линиях.

В ходе следующего этапа разработки эскизного проекта диагностики ПСД на токамаке T-15MD будет оптимизирована оптическая схема и более

подробно проработана атмосферная часть диагностики. В дальнейшем будет проработано размещение в другой патрубке системы с радиальным обзором для определения электронной температуры и плотности плазмы, а также для более детального наблюдения за эрозией и нагревом внутренней стенки камеры.

Авторы выражают благодарность А.В. Горбунову за постоянный интерес к работе и полезные обсуждения, А.В. Горшкову за ценные советы при проведении оптических расчетов в программном пакете Zemax, С.А. Грашину за материалы по ленгмюровским зондам в диверторе T-15МД и А.А. Пшенову за консультации по физике диверторного режима.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хвостенко П.П., Анашкин И.О., Бондарчук Э.Н., Инютин Н.В., Крылов В.А., Левин И.В., Минеев А.Б., Соколов М.М. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2019. Т. 42. Вып. 1. С. 15.
<https://doi.org/10.21517/0202-3822-2019-42-1-15-38>.
2. Theiler C., Lipschultz B., Harrison J., Labit B., Reimerdes H., Tsui C., Vijvers W.A.J., Boedo J.A., Duval B.P., Elmore S., Innocente P., Kruezi U., Lunt T., Maurizio R., Nespoli F., Sheikh U., Thornton A.J., van Limpt S.H.M., Verhaegh K., Vianello N., TCV team and the EUROfusion MST1 team // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. P. 072008.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa5fb7>.
3. De Oliveira H., Theiler C., Elaian H., TCV Team // Rev. Sci. Instrum. 2021. V. 92. P. 043547.
<https://doi.org/10.1063/5.0043523>.
4. Хромов Н.А., Векшина Е.О., Гусев В.К., Литуновский Н.В., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В. // ЖТФ. 2021. Т. 91. № 3. С. 421.
<https://doi.org/10.21883/JTF.2021.03.50518.227-20>.
5. Сарычев Д.В., Соловьев Н.А., Диас-Михайлова Д.Е., Плоскирев Е.Г., Орловский Д.А., Сергеев Д.С. // 51-я Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 2024, г. Звенигород: Сб. тез. докл. М.: АО НТЦ “ПЛАЗМАИОФАН”, 2024. С. 292.
doi: 10.34854/ISPAF.51.2024.1.1.241.
6. Mukhin E.E., Kurskiev G.S., Gorbunov A.V., Samsonov D.S., Tolstyakov S.Yu., Razdobarin A.G., Babinov N.A., Bazhenov A.N., Bukreev I.M., Dmitriev A.M., Elets D.I., Koval A.N., Litvinov A.E., Masyukevich S.V., Senitchenkov V.A., Solovoi V.A., Tereschenko I.B., Varshavchik L.A., Kukushkin A.S., Khodunov I.A., Levashova M.G., Lisitsa V.S., Vukolov K.Yu., Berik E.B., Chernakov P.V., Chernakov A.I.P., Chernakov An.P., Zaitilkin P.A., Zhiltsov N.S., Krivoruchko D.D., Skrylev A.V., Mokeev A.N., Andrew P., Kempenaars M., Vayakis G., Walsh M.J. // Nucl. Fusion. 2019. V. 59. P. 086052.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab1cd5>.
7. Arnichand H., Andrebe Y., Blanchard P., Antonioni S., Couturier S., Decker J., Duval B.P., Felici F., Galperti C., Isoz P.-F., Lavanchy P., Llobet X., Marletaz B., Marmillod P., Masur J. // Journal of Instrumentation. 2019. V. 14. P. C09013.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/09/C09013>.
8. Ravensbergen T., van Berkel M., Silburn S.A., Harrison J.R., Perek A., Verhaegh K., Vijvers W.A.J., Theiler C., Kirk A., de Baar M.R. and the EUROfusion MST1 team // Nucl. Fusion. 2020. V. 60. P. 066017.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab8183>.
9. Harrison J.R., Vijvers W.A.J., Theiler C., Duval B.P., Elmore S., Labit B., Lipschultz B., van Limpt S.H.M., Lisgo S.W., Tsui C.K., Reimerdes H., Sheikh U., Verhaegh K.H.A., Wischmeier M., the MST1 and TCV Teams // Nuclear Materials and Energy. 2017. V. 12. P. 1071.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.10.020>.
10. Verhaegh K., Lipschultz B., Duval B.P., Harrison J.R., Reimerdes H., Theiler C., Labit B., Maurizio R., Marini C., Nespoli F., Sheikh U., Tsui C.K., Vianello N., Vijvers W.A.J., TCV team and the EUROfusion team // Nuclear Materials and Energy. 2017. V. 12. P. 1112.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2017.01.004>.
11. Krashenninnikov S.I., Kukushkin A.S., Pshenov A.A. // Phys. Plasmas. 2016. V. 23. P. 055602.
<https://doi.org/10.1063/1.4948273>.
12. Karhunen J., Lomanowski B., Solokha V., Aleiferis S., Carvalho P., Groth M., Lawson K.D., Meigs A.G., Shaw A. and JET Contributors // Plasma Phys. Control. Fusion. 2021. V. 63. P. 085018.
<https://doi.org/10.1088/1361-6587/ac0b9e>.
13. Karhunen J., Holm A., Lomanowski B., Solokha V., Aleiferis S., Carvalho P., Groth M., Lawson K.D., Meigs A.G., Shaw A. and JET Contributors // Plasma Phys. Control. Fusion. 2022. V. 64. P. 075001.
<https://doi.org/10.1088/1361-6587/ac6ae3>.
14. Linehan B.L., Mumgaard R.T., Wensing M., Verhaegh K., Andrebe Y., Harrison J.R., Duval B.P., Theiler C., TCV team // Rev. Sci. Instrum. 2018. V. 89. P. 103503.
<https://doi.org/10.1063/1.5058224>.
15. Perek A., Vijvers W.A.J., Andrebe Y., Classen I.G.J., Duval B.P., Galperti C., Harrison J.R., Linehan B.L., Ravensbergen T., Verhaegh K., de Baar M.R., EUROfusion MST1 Teams // Rev. Sci. Instrum. 2019. V. 90. P. 123514.
<https://doi.org/10.1063/1.5115569>.

16. *Vijvers W.A.J., Mumgaard R.T., Andrebe Y., Classen I.G.J., Duval B.P., Lipschultz B.* // Journal of Instrumentation. 2017. V. 12. P. C12058. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/12/C12058>.
17. *Алексеев А.Г., Забродский В.В., Сарычев Д.В., Соловьев Н.А., Сушков А.В.* // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 1206. <https://doi.org/10.31857/S0367292122601035>.
18. *Толпегина Ю.И., Горбунов А.В., Ялынская Н.Д., Тимохин В.М., Сергеев В.Ю., Горшков А.В.* // 50-я Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 2023, г. Звенигород: Сб. тез. докл. М.: АО НТЦ "ПЛАЗМАИОФАН", 2023. С. 101. doi: 10.34854/ICPAF.2023.50.2023.1.1.057.
19. *Криворучко Д.Д., Горбунов А.В., Пшенов А.А., Панфилов Д.С.* // Физика плазмы. 2023. Т. 49. С. 545. <https://doi.org/10.31857/S0367292123600152>.
20. *Толпегина Ю.И., Горшков А.В., Асадулин Г.М., Бельбас И.С., Горбунов А.В., Криворучко Д.Д., Пшенов А.А.* // 19-я Всероссийская конференция "Диагностика высокотемпературной плазмы", 2021, г. Сочи: Сб. тезисов докладов. С. 142.
21. *Eckstein W.* // Sputtering by Particle Bombardment, Topics Appl. Physics. 2007. V. 110. P. 33. https://doi.org/10.1007/978-3-540-44502-9_3.
22. *Wisse M., Eren B., Marot L., Steiner R., Meyer E.* // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. P. 013509. <https://doi.org/10.1063/1.3678640>.
23. *Litnovsky A., Wienhold P., Philipps V., Sergienko G., Schmitz O., Kirschner A., Kreter A., Droste S., Samm U., Mertens Ph., Donné A.H., TEXTOR Team, Rudakov D., Allen S., Boivin R., McLean A., Stangeby P., West W., Wong C., DIII-D Team, Lipa M., Schunke B., Tore-Supra Team, De Temmerman G., Pitts R., TCV Team, Costley A., Voitsenya V., Vukolov K., Oelhafen P., Rubel M., Romanyuk A.* // J. Nuclear Materials. 2007. V. 363. P. 1395. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2007.01.281>.
24. *Vukolov K.Yu., Guseva M.I., Evstigneev S.A., Medvedev A.A., Zvonkov S.N.* // Plasma Devices and Operations. 2004. V. 12. №. 3. P. 193. <https://doi.org/10.1080/1051999042000238040>.
25. *Litnovsky A., Rudakov D.L., De Temmerman G., Wienhold P., Philipps V., Samm U., McLean A.G., West W.P., Wong C.P.C., Brooks N.H., Watkins J.G., Wampler W.R., Stangeby P.C., Boedo J.A., Moyer R.A., Allen S.L., Fenstermacher M.E., Groth M., Lasnier C.J., Boivin R.L., Leonard A.W., Romanyuk A., Hirai T., Pintsuk G., Breuer U., Scholl A.* // Fusion Eng. Des. 2008. V. 83. P. 79. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2007.06.042>.
26. *Garcia-Carrasco A., Petersson P., Rubel M., Widdowson A., Fortuna-Zalesna E., Jachmich S., Brix M., Marot L.* // Nuclear Materials and Energy. 2017. V. 12. P. 506. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.12.032>.
27. *Bardamid A.F., Vukolov K.Yu., Kononov V.G., Naidenkova D.I., Rogov A.V., Ryzhkov I.V., Shapoval A.N., Shtan A.F., Solodovchenko S.I., Voitsenya V.S., Yakimov K.I.* // Plasma Devices and Operations. 2006. V. 14. P. 159. <https://doi.org/10.1080/10519990600673821>.
28. *Soni K., Moser L., Steiner R., Mathys D., Le Guern F., Piqueras J., Marot L., Meyer E.* // Nuclear Materials and Energy. 2019. V. 21. P. 100702. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2019.100702>.
29. *Рогов А.В., Капустин Ю.В., Мартыненко Ю.В.* // ЖТФ. 2021. Т. 91. Вып. 9. С. 1369. <http://dx.doi.org/10.21883/JTF.2021.09.51216.37-21>.
30. *Vukolov K.Yu., Mukhammedzyanov T.R., Andreenko E.N., Arkhipov I.I., Orlovskiy I.I., Tobengauz A.M., Vukolov D.K.* // Fusion Eng. Des. 2013. V. 88. P. 1280. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.03.015>.
31. *Moon S., Petersson P., Rubel M., Fortuna-Zalesna E., Widdowson A., Jachmich S., Litnovsky A., Alves E.* // Nuclear Materials and Energy. 2019. V. 19. P. 59. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2019.02.009>.
32. *Андреев Е.Н., Орловский И.И., Алексеев А.Г., Морозов А.А.* // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2019. Т. 42. Вып. 3. С. 13. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2019-42-3-13-24>.
33. *Орловский И.И., Вуколов К.Ю., Андреев Е.Н., Алексеев А.Г.* // 50-я Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 2023, г. Звенигород: Сб. тез. докл. М.: АО НТЦ "ПЛАЗМАИОФАН", 2023. С. 294. doi: 10.34854/ICPAF.2023.50.2023.1.1.238.
34. *Рогов А.В., Капустин Ю.В.* // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. №3. С. 240.
35. *Litnovsky A., De Temmerman G., Vukolov K., Wienhold P., Philipps V., Schmitz O., Samm U., Sergienko G., Oelhafen P., Büttner M., Orlovskiy I., Yastrebkov A., Breuer U., Scholl A.* // Fusion Eng. Des. 2007. V. 82. P. 123. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2006.07.095>.
36. *Alekseev A., Andreenko E., Orlovskiy I., Gorshkov A., Akhtyrsky S., Kozlov A., Smekalin V., Ulyanitskiy V., Khmelniitskiy R., Evlashin S., Eberle S.* // Fusion Eng. Des. 2019. V. 146. P. 144. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.12.002>.
37. *Вуколов К.Ю., Мухаммедзянов Т.Р., Звонков С.Н., Свечников Н.Ю., Станкевич В.Г., Архипов И.И., Раджаратнам Д.* // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2010. Т. 33. Вып. 4. С. 13. <http://dx.doi.org/10.21517/0202-3822-2010-33-4-13-20>.

38. Gorshkov A.V., Alekseev A.G., Andreenko E.N., Asadulin G.M., Ageorges N., Kampf D., Naumenko N.N. // *Fusion Eng. Des.* 2019. V. 146. P. 329. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.12.061>.
39. Неверов В.С., Андреев Е.Н., Ахтырский С.В., Земцов И.А., Крупин В.А., Кукушкин А.Б., Немец А.Р., Нургалеев М.Р., Пшенов А.А. // *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез.* 2023. Т. 46. Вып.2. С. 23. doi: 10.21517/0202-3822-2023-46-2-23-37.
40. Carr M., Meakins A., Bernert M., David P., Giroud C., Harrison J., Henderson S., Lipschultz B., Reimold F., *EUROfusion MST1 Team and ASDEX Upgrade Team* // *Rev. Sci. Instrum.* 2018. V. 89. P. 083506. <https://doi.org/10.1063/1.5031087>; <https://cherab.info>.
41. Meakins A., Carr M. // *Raysect/source: v0.7.0 Release.* Version v0.7.0. Zenodo. 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1341346>; <https://raysect.org>.
42. Kukushkin A.S., Pacher H.D., Kotov V., Pacher G.W., Reiter D. // *Fusion Eng. Des.* 2011. V. 86. P. 2865. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.06.009>.
43. Summers H.P. *The ADAS User Manual.* 2004. Version 2.6. <http://www.adas.ac.uk>; <https://open.adas.ac.uk/>.
44. Lomanowski B.A., Meigs A.G., Sharples R.M., Stamp M., Guillemaut C. and *JET Contributors* // *Nucl. Fusion* 55 (2015) 123028, <http://dx.doi.org/10.1088/0029-5515/55/12/123028>.
45. Neverov V.S., Khusnutdinov R.I., Alekseev A.G., Carr M., De Bock M., Kukushkin A.B., Lovell J., Meakins A., Pitts R., Polevoi A.R., Veshchev E // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2020. V. 62. P. 115014. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/abb53b>.
46. Andersen A.H., Kak A.C. // *Ultrasonic Imaging.* 1984. V. 6. P. 81. <https://doi.org/10.1177/016173468400600107>.

PLASMA DIAGNOSTICS IN T-15MD DIVERTOR: TASKS, PROBLEMS, AND IMPLEMENTATION POSSIBILITIES

K. Yu. Vukolov^{a,b,*}, E. N. Andreenko^a, M. Yu. Buzmakov^{a,b}, V. S. Neverov^a,
I. I. Orlovskiy^a, Yu. I. Tolpegina^a, and D. A. Fedorov^a

^a*National Research Center “Kurchatov Institute,” Moscow, 123098, Russia*

^b*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia*

*e-mail: vukolov_ky@nrcki.ru

The article considers different methods of divertor plasma diagnostics planned for using in the T-15MD tokamak. Technical problems arising during operation of optical systems in the divertor zone are discussed, including degradation of in-vessel optical elements. The main attention is paid to the conceptual design of the “Passive Spectroscopy in Divertor” diagnostic system. The optical system, including in-vessel mirrors, and methods for protecting its components from the negative effects of plasma are described in detail. Using synthetic diagnostics and numerical simulation methods, the possibility of solving the problem of tomographic reconstruction of the two-dimensional profile of plasma radiation in the T-15MD divertor is demonstrated. Based on the results presented, it was concluded that passive spectroscopy can be used for obtaining data on plasma parameters in the divertor with good spatial resolution, which will make it possible to study the physics of processes and monitor the operation of the T-15MD divertor, including the operation in detachment regime.

Keywords: tokamak, divertor, synthetic diagnostics of plasma, spectroscopy