

УДК 533.9

## ВОЗМОЖНОСТИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРИМЕСЕЙ И ВОДОРОДА В ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЕ TRT

© 2022 г. К. Ю. Вуколов<sup>a, b, \*</sup>, Е. Н. Андреев<sup>a</sup>, А. В. Горбунов<sup>a</sup>, А. С. Кукушкин<sup>a</sup>,  
А. А. Морозов<sup>a</sup>, А. А. Пшенов<sup>a</sup>

<sup>a</sup> НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

<sup>b</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

\*e-mail: vukolov\_ky@nrcki.ru

Поступила в редакцию 16.03.2022 г.

После доработки 12.05.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

Рассматриваются возможности определения положения ионизационного фронта, контроля скорости поступления (потоки) примесей, обеспечения контроля нагрева и эрозии диверторных пластин. Основной задачей является исследование режимов работы дивертора и эффективности откачки примесей. Обсуждается построение диагностики в предложенном эскизном варианте установки, состав оборудования и методика экспериментов, включая постановку задач, требования к измерениям и оценку уровня сигналов.

*Ключевые слова:* спектральная диагностика плазмы, дивертор, ионизационный фронт, примеси, режим детачмента, рекомбинация

DOI: 10.31857/S0367292122100110

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Высокий поток мощности из основной плазмы токамака в дивертор, предполагает работу установки с частичным или полным отрывом плазмы от диверторных пластин за счет перехода в режим газовой мишени (так называемый режим детачмента). Это позволяет снизить пиковую нагрузку на диверторные пластины за счет перераспределения поступающей в дивертор мощности на большую площадь, достигающегося преобразованием кинетической и потенциальной энергии заряженных частиц, удерживаемых магнитным полем, в излучение примесей и рабочего газа, а также кинетическую энергию нейтральных атомов в плазменно-газовом облаке в районе выхода сепаратрисы на диверторные пластины [1]. Контроль и управление режимом работы дивертора (переход в режим детачмента, определение положения ионизационного фронта, контроль потока тепла на диверторные пластины) является критически важной задачей в установках с высокой вложенной мощностью, к которым относится токамак с реакторными технологиями (TRT) [2].

Для снижения нагрузок на диверторные пластины в установке TRT предлагается применять следующие меры: использование закрытого дивертора, оптимизация геометрии мишеней, поддержание высокого давления нейтралов в дивер-

торной камере, подача в дивертор примесных газов (неон) [3]. Увеличение потерь тепла из плазмы в режиме газовой мишени в основном достигается за счет излучения в процессах рекомбинации и возбуждения рабочего газа и примесей [4]. Предварительные расчеты показывают, что в номинальном режиме TRT с мощностью дополнительного нагрева 40 МВт пиковая нагрузка на диверторные пластины может превышать 15 МВт/м<sup>2</sup>, что в полтора раза выше проектных требований для дивертора ИТЭР. В связи с этим необходимо обеспечить тщательный контроль режима работы дивертора на основе сигналов от диагностических систем.

Диагностика диверторной плазмы в токамаках опирается на результаты зондовых и лазерных методов измерений, но широко используется и эмиссионная (пассивная) спектроскопия плазмы [5]. Применение спектроскопических измерений с обзором диверторной зоны из нескольких точек (в различных ракурсах) позволит проводить томографию плазменно-газовой мишени в различных линиях атомов и ионов. Это дает возможность диагностировать отрыв плазмы от диверторных пластин [6, 7], судить о нагрузках во внешней и внутренней ногах дивертора и др.

Статья посвящена разработке концептуально-го проекта спектроскопических диагностических систем для контроля примесей и водорода в ди-

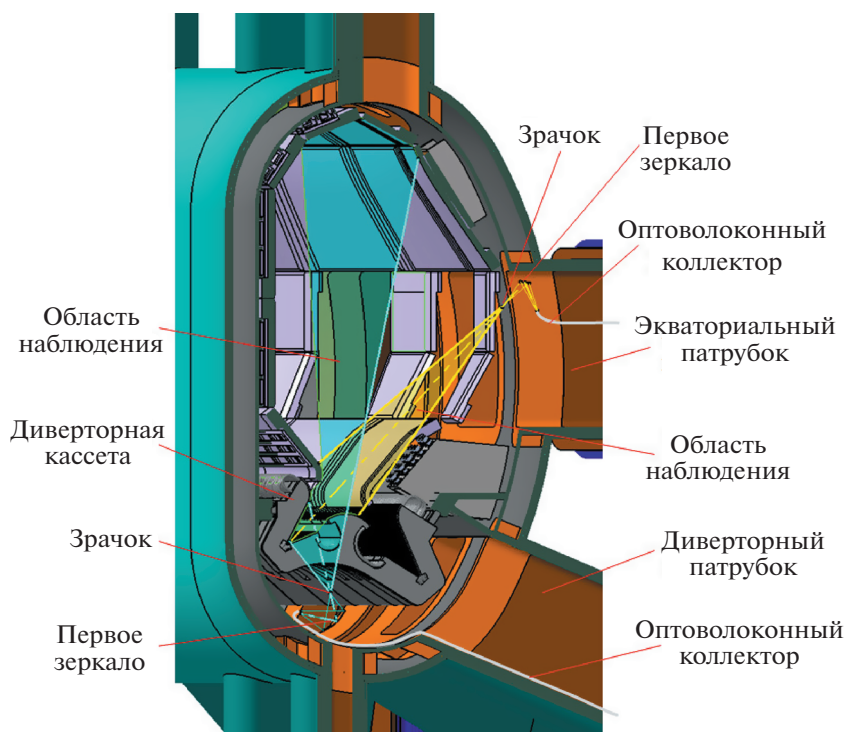


Рис. 1. Схема сбора излучения для томографии внутренней ноги дивертора.

верторе TRT. Рассматриваются возможности определить положение ионизационного фронта, проконтролировать скорость поступления (потоки) примесей. Основной задачей является исследование режимов работы дивертора и эффективности откачки примесей. Обсуждается построение диагностики в предложенном эскизном варианте установки, состав оборудования и методика экспериментов, включая постановку задач, требования к измерениям и оценку уровня сигналов.

## 2. ПОСТРОЕНИЕ ДИАГНОСТИКИ И ОРГАНИЗАЦИЯ СБОРА ИЗЛУЧЕНИЯ

Работа в стационарном режиме длительностью 100 с с сильным магнитным полем (8 Тл в центре плазмы), током плазмы до 5 МА и дополнительным нагревом до 40 МВт приводят к необходимости использования прочной конструкции вакуумной камеры с длинными патрубками [2]. Для такой конструкции в случае DD-плазмы удается снизить ядерный нагрев катушек тороидального поля до допустимых  $1 \text{ мВт/см}^3$  при полном нейтронном выходе  $10^{18} \text{ н/с}$  [8]. С другой стороны, из-за длинных патрубков спектроскопия диверторной плазмы становится возможной только с использованием внутрикамерных зеркал (как в ИТЭР), так как из атмосферной зоны в экваториальных и в диверторных патрубках нет прямой

видимости области как внешней, так и внутренней ноги дивертора.

В TRT планируется использовать классический однонулевой дивертор в нижней части камеры, который состоит из 54 кассет с 10 мм щелью между ними [3]. Диверторная плазма TRT будет содержать ионы, атомы и молекулы дейтерия, ионы и атомы неона, вводимого в плазму для увеличения радиационных потерь в диверторе, а также атомы и ионы бериллия (материал первой стенки). Напуск газов ( $\text{D}_2$  и Ne) будет проводиться через экваториальный порт, а откачка вакуумной камеры – через диверторные патрубки.

Для проведения измерений в диверторе предлагается спектральный диапазон от 400 до 700 нм. На рис. 1 показан вариант обзора дивертора в вертикальной плоскости. Обзор обеспечивается системой зеркал, расположенных в экваториальном и диверторном патрубках и позволяет наблюдать за плазмой во внутренней ноге дивертора. Наблюдение в системах сбора излучения, размещенных в диверторе, ведется через щель между диверторными кассетами.

Предложения по диагностике внешней ноги дивертора из диверторного патрубка с использованием внутрикамерных зеркал показаны на рис. 2. В этом случае наблюдение вдоль всех хорд ведется через щель между диверторными кассетами.

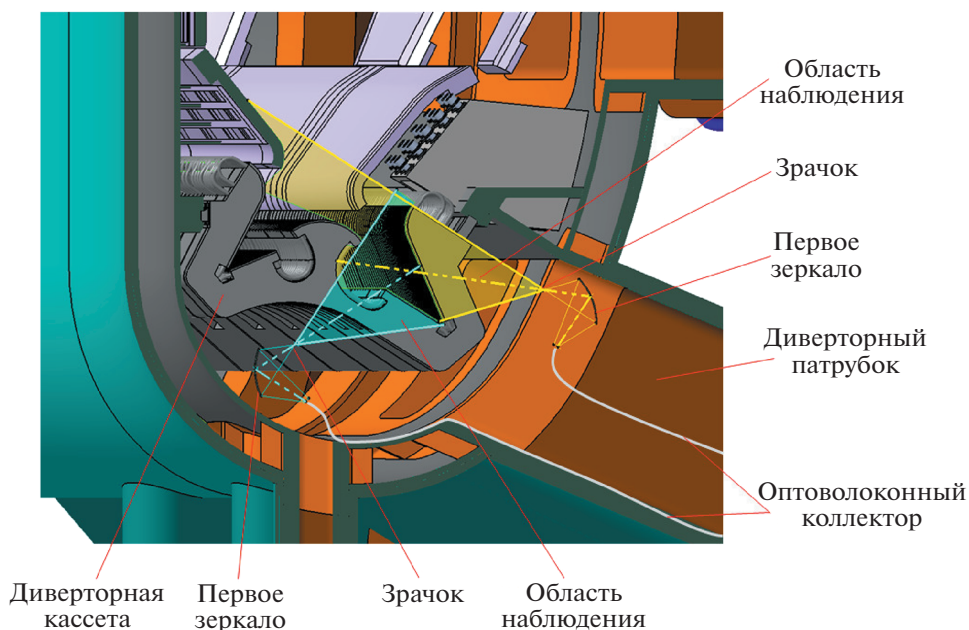


Рис. 2. Схема сбора излучения для томографии внешней ноги дивертора.

Для контроля и исследования процесса отрыва плазмы от поверхности диверторных пластин может быть применена томография диверторной области в линиях бальмеровской серии водорода, как это делалось в токамаке TCV [6, 7]. Как видно из рис. 1 и 2 в TRT такая возможность существует с применением двух ракурсов наблюдения вдоль нескольких пересекающихся хорд, выходящих на диверторные пластины. Из-за того, что область под дивертором относительно небольшая могут возникнуть сложности интеграции двух оптических систем рядом, в этом случае томография внешней и внутренней ноги может выполняться в разных сечениях.

Предложенные оптические системы построены на принципе камеры-обскуры с малым входным зрачком (в рамках концептуального проекта предлагается использование входного зрачка  $\varnothing 10$  мм). Это сделано для защиты зеркал от загрязнений, что особенно актуально для диверторных систем [9]. Для систем наблюдения, размещенных в диверторе, телесный угол обзора ограничен щелью между диверторными кассетами и составляет  $\sim 0.1$  стерadian, для экваториальной системы  $\sim 0.01$  стерadian. В работе [10] показано, что основная часть загрязнений поступает на первые зеркала в режиме кондиционирования камеры, поэтому для продления срока службы зеркал необходимо предусмотреть шторку для входного зрачка. Зрачок, первое зеркало и ближайшие оптические элементы (головка оптоволоконного коллектора, линза, второе зеркало и т.д.) обычно объединяют в узел входного зеркала [11] и выпол-

няют в одном максимально закрытом корпусе для защиты всех элементов от загрязнений.

В предложенной системе сбора излучения первое зеркало, обращенное непосредственно к плазме, является самым нагруженным элементом. Для оценки времени жизни первого зеркала можно использовать методику, описанную в работе [11], однако для этого необходимы расчетные значения потоков атомов водорода и примесей на первую стенку, которых в данный момент для TRT нет. Если расчеты покажут, что скорость деградации первого зеркала не позволяет обеспечить надежную работу диагностики, хотя бы в течение одной кампании (6–9 месяцев), то в этом случае можно будет уменьшить размер входного зрачка, что, однако, приведет к потере в светосиле системы сбора излучения. Кардинальный вариант решения этой проблемы – использовать активную очистку зеркал за счет распыления осадений в плазменном разряде, как это предлагается для диагностик в ИТЭР [12].

Для увеличения пропускной способности системы сбора излучения необходимо минимизировать количество оптических элементов, для этого можно закрепить головку оптоволоконного коллектора в плоскости изображения первого зеркала (сферического или параболического). К минусам такого подхода можно отнести проблему эффективного использования заливки оптоволоконна в системе сбора типа камеры-обскуры (из-за разности числовых апертур оптоволоконна и системы сбора). Кроме того, при размещении оптоволоконного коллектора внутри вакуумной каме-

ры на него будет воздействовать гамма-нейтронное излучение из плазмы, что может приводить к постепенной деградации его пропускания. Этого можно избежать при использовании радиационно-стойких коллекторов на основе легированного водородом оптоволокна. В работах [13, 14] показано, что такое волокно способно работать под серьезными радиационными нагрузками начиная от 400–450 нм (при набранной дозе 15 кГр наведенное оптическое поглощение не превышает 0.15 дБ/м), а при облучении в импульсном режиме, такое волокно практически полностью восстанавливается в паузах между импульсами токамака.

Размещение оптоволоконной оптики прямо внутри вакуумной камеры упростит калибровку системы и исключит проблему вибраций и смещения камеры относительно внекамерной оптики. Кроме того, при использовании нелегированного водородом волокна с низким содержанием ОН-групп, не имеющего полос поглощения в ближней ИК-области, остается возможность использовать данные оптические системы для ИК-спектроскопии, в частности, для измерения температуры диверторных пластин.

Помимо основных задач – контроля отрыва плазмы от диверторных пластин и мониторинга их эрозии, предложенная диагностика должна решать классическую задачу пассивной спектроскопии по определению относительного содержания примесей в плазме. В случае TRT это, прежде всего, бериллий, неон и литий, во время проведения экспериментов с литиевой диверторной пластиной. Атомы и водородоподобные ионы этих элементов имеют достаточно интенсивные спектральные линии в планируемой области наблюдения для того, чтобы рассчитывать на их регистрацию с помощью предлагаемой диагностической системы с учетом вклада рекомбинации в заселение верхних уровней. Выбор линий примесей для наблюдения и оценки сигналов – задача следующего этапа разработки проекта.

Отметим, что при использовании вместо оптоволокна внутрикамерных зеркал для вывода излучения из плазмы появляется возможность передачи части света для построения изображения на матрице видеокамеры и визуального контроля состояния диверторных пластин, что также может быть актуальной задачей.

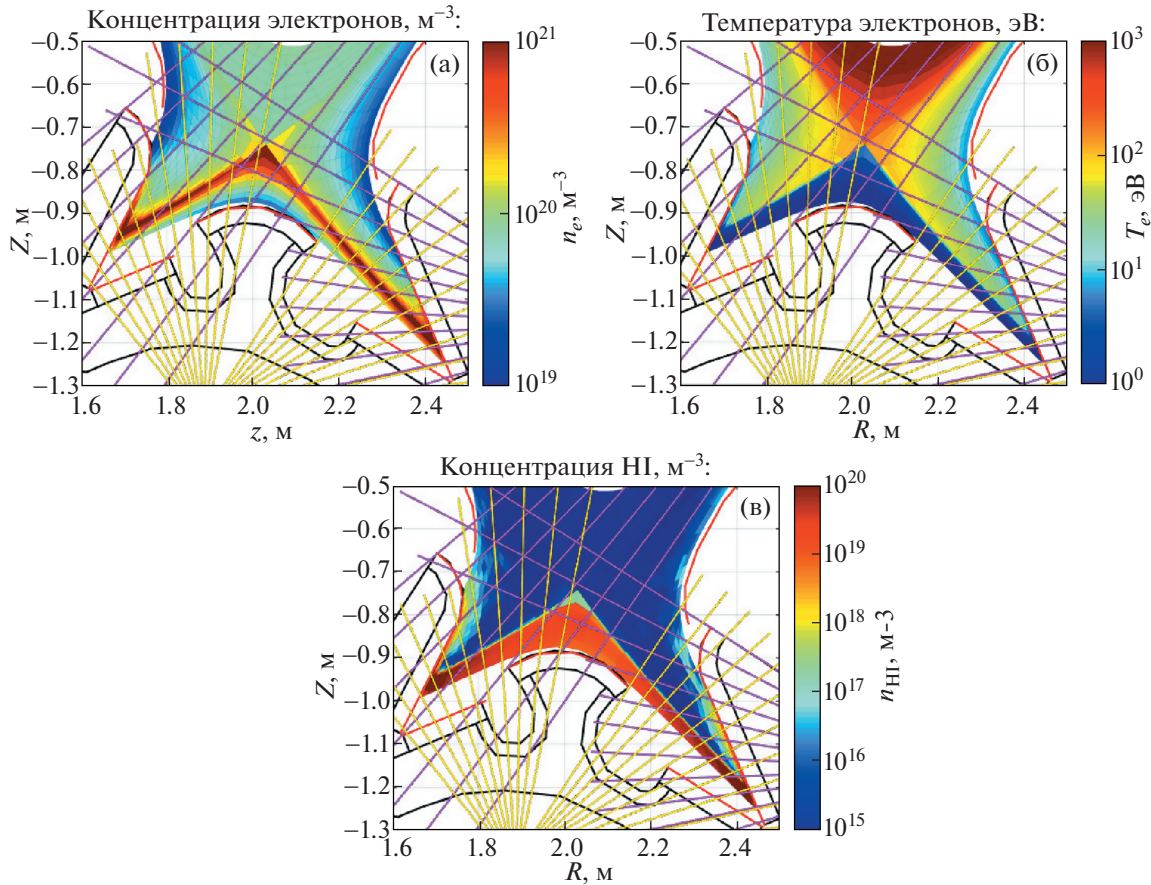
### 3. ОЦЕНКА ОЖИДАЕМЫХ СИГНАЛОВ ДИАГНОСТИКИ

На основе двумерных распределений параметров плазмы, полученных при помощи кода SOLPS4.3 [4], для сценариев с мощностью, поступающей в пристеночный слой (scrape-off layer, SOL) из области удержания,  $P_{SOL} = 20$  МВт, и раз-

ной концентрацией неона в SOL (2–4%), были рассчитаны ожидаемые сигналы в линиях бальмеровской серии атомарного водорода. Для расчетов использовалась модифицированная столкновительно-излучательная модель, разработанная для диагностики лазерного индуцированного тушения (решение статической задачи). Пример двумерных распределений концентрации и температуры электронов, а также концентрации атомов водорода в диверторе показан на рис. 3. На рисунке также отмечены хорды сбора света всех четырех ракурсов наблюдения: желтыми линиями – хорды оптических систем установленных под диверторными кассетами, пурпурными линиями – оптических систем, установленных в диверторном и экваториальном патрубках. Для удобства все хорды наблюдения пронумерованы по следующему правилу: для систем сбора света из патрубков нумерация идет снизу вверх (нижняя хорда #1), для систем сбора, установленных под диверторными кассетами, первая хорда – нижняя, смотрит в самую нижнюю часть диверторной зоны, последняя хорда (#11) – ближайшая к X-точке.

Выполненные в SOLPS расчеты показывают, что в диверторе ожидается очень высокая концентрация электронов ( $n_e > 10^{21} \text{ м}^{-3}$ ) не только в области выхода сепаратрисы на диверторные пластины (strike points), но и вдоль всей сепаратрисы вплоть до X-точки. Высокая плотность, в совокупности с низкой температурой электронов приводит к активной рекомбинации ионов рабочего газа (при переходе через сепаратрису температура быстро падает до значений меньше 1 эВ, см. рис. 3). В процессе рекомбинации заселяются преимущественно верхние уровни, поэтому вклад рекомбинации в диагностические сигналы в линиях бальмеровской серии водорода на хордах наблюдения, которые пересекают междиверторное пространство (область дивертора между внешними и внутренними усами сепаратрисы), будет существенным в сравнении с вкладом возбуждения электронным ударом. Возбуждение электронным ударом является доминирующим каналом заселения верхних уровней в более горячей диверторной плазме с верхней стороны от усов сепаратрисы.

При одновременной регистрации нескольких линий бальмеровской серии атомарного водорода можно рассчитать вклад рекомбинации в населенности верхних уровней по сравнению с возбуждением электронным ударом [7]. А на основе расчетов – оценить снижение потока энергии, приходящей на диверторные пластины, за счет рекомбинации горячих ионов водорода (при рекомбинации иона водорода на поверхности мишени высвобождается 13.6 эВ потенциальной энергии). Кроме этого, атомы водорода, возник-



**Рис. 3.** Расчетные (SOLPS) распределения параметров плазмы в диверторе TRT для сценария  $P_{SOL} = 20$  МВт,  $n_e^{sep} = 7.3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ : концентрация электронов,  $\text{м}^{-3}$  (а), температура электронов, эВ (б), концентрация атомов водорода,  $\text{м}^{-3}$  (в). Желтыми и пурпурными линиями также отмечены хорды сбора света из внутренней и внешней ног дивертора.

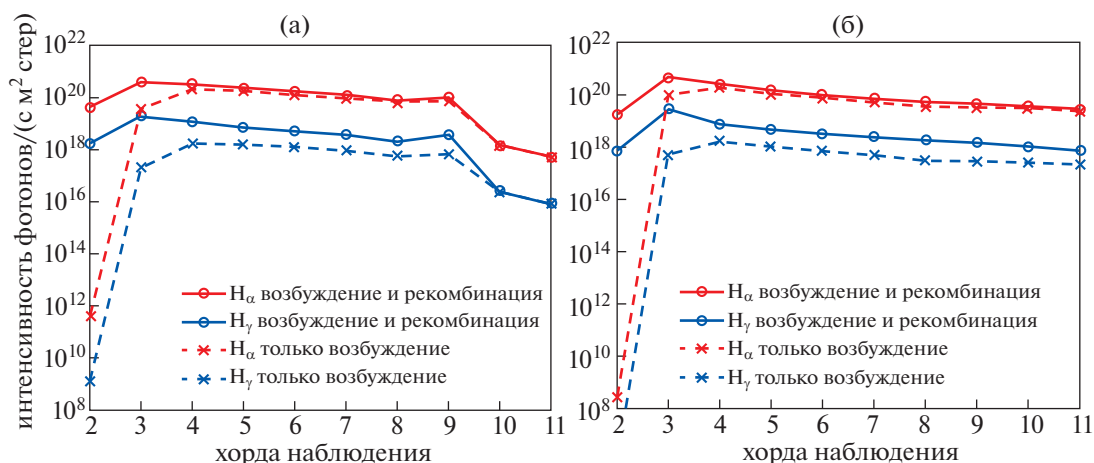
шие в результате рекомбинации, дополнительно снижают нагрузку на стенку (рассеивают локализованный около сепаратрисы поток энергии) за счет многократного излучения фотонов в линиях до тех пор, пока не будут ионизованы. Наблюдение линий бальмеровской серии атомарного водорода дает возможность исследовать ионизационно-рекомбинационный баланс в диверторной плазме, определять положение ионизационного и рекомбинационного фронтов, и, в результате, контролировать эффективность утилизации мощности, приходящей из основной плазмы в дивертор.

В диверторе TRT ожидаются сильные градиенты температуры и концентрации электронов как поперек, так и вдоль магнитных поверхностей (см. рис. 3), что приводит к неоднородности светимости линий водорода по пространству. Поэтому в диверторе актуальны топографические измерения, позволяющие локализовать точки регистрации сигналов излучения атомов рабочего газа

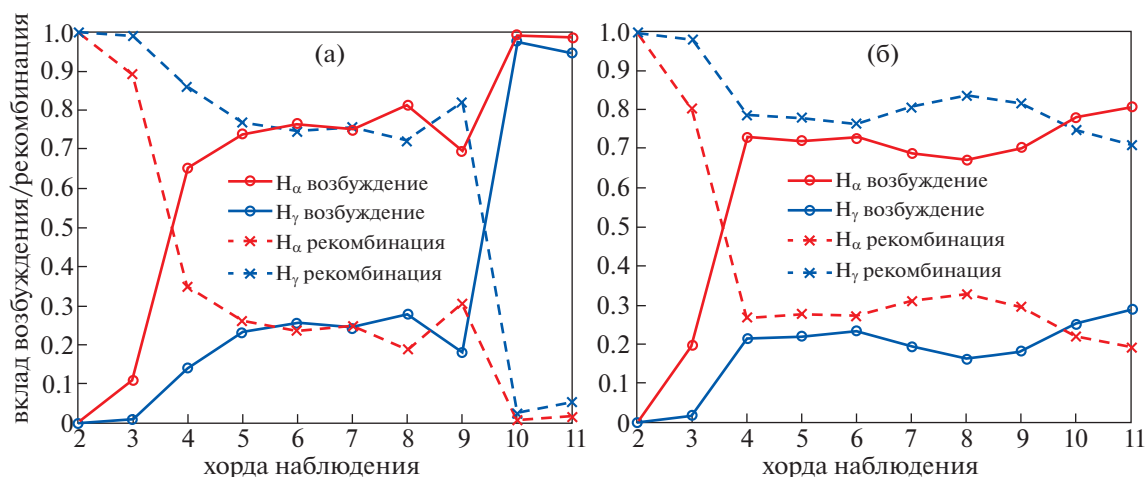
и примесей. Одновременное наблюдение внешней и внутренней ног дивертора дает возможность оценивать распределение мощности между ними, что важно для получения оптимального режима дивертора.

Результаты расчета удельной интенсивности светимости линий  $H_\alpha$  (656 нм) и  $H_\gamma$  (434 нм), проинтегрированных вдоль хорд наблюдения ( $I_{H_\alpha}$ ,  $I_{H_\gamma}$ ), для системы сбора света из внешней ноги дивертора, приведены на рис. 4 (для сценария SOLPS #180 [4]:  $P_{SOL} = 20$  МВт, 3% Ne,  $q_{out}^{pk} = 2.6 \text{ МВт/м}^2$ ,  $n_e^{sep} = 7.3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ): сплошными линиями показана интенсивность, рассчитанная с учетом возбуждения электронным ударом и рекомбинации, штриховыми линиями — только за счет возбуждения (без учета рекомбинации).

Расчет показывает, что рекомбинация играет роль в заселении высоковозбужденных состояний ( $n > 3$ ) практически для всех хорд наблюде-



**Рис. 4.** Интенсивность свечения линий бальмеровской серии во внешней ноге дивертора по хордам наблюдения с учетом (сплошные) и без учета (штриховые) заселения возбужденных состояний в процессе рекомбинации для внутрипортовой системы сбора света (а) и системы сбора, расположенной под диверторными кассетами (б).



**Рис. 5.** Вклад возбуждения электронным ударом и рекомбинации в заселение  $n = 3$  ( $H_\alpha$ ) и  $n = 5$  ( $H_\gamma$ ) возбужденных состояний атомов водорода для разных хорд наблюдения внешней ноги дивертора: внутрипортовой системы сбора света (а) и системы сбора, расположенной под диверторными кассетами (б).

ния. Нижние хорды направлены на области холодной плотной плазмы у поверхности внешней диверторной пластины, где произошел отрыв плазмы и образовалась “газовая мишень”, в этой области рекомбинация является основным механизмом заселения не только верхних, но и нижних возбужденных состояний атома. В зависимости от сценария, расчетная интенсивность линии  $H_\alpha$  варьируется от  $10^{18}$  до  $10^{21}$  фотонов/(с · м<sup>2</sup> · ср).

Вклад возбуждения электронным ударом и рекомбинации в заселение  $n = 3$  и  $n = 5$  возбужденных состояний атомов водорода для разных хорд наблюдения на внешней ноге дивертора показан на рис. 5: сплошными линиями — вклад возбуж-

дения электронным ударом, штриховыми — вклад рекомбинации.

Хорошо видно, что в районе выхода сепаратрисы на диверторные пластины рекомбинация полностью определяет свечение линий водорода бальмеровской серии. По мере приближения к X-точке вдоль сепаратрисы роль рекомбинации снижается, однако все еще остается существенной из-за высокой концентрации электронов. Рекомбинация является ключевым механизмом, обеспечивающим отрыв плазмы. По ее активизации можно судить о переходе из режима с сильным рециклингом (high-recycling режим) в режим детачмента [1].

Используя рассчитанные в столкновительно-излучательной модели потока фотонов в линиях водорода и геометрические параметры системы сбора света, можно рассчитать ожидаемые сигналы на матрице фотодетектора  $I_{PD}$  (для ракурса зондирования из диверторного патрубка):

$$I_{PD_{H\alpha}} = I_{H\alpha} \Omega_{ch} \Delta h T = 3.5 \times 10^{-10} I_{H\alpha} \text{ фотонов/с.}$$

Здесь  $\Omega_{ch} \approx 3.5 \times 10^{-4}$  ср — телесный угол сбора света для хорд наблюдения (варьируется от  $1.6 \times 10^{-4}$  до  $4.5 \times 10^{-4}$  в зависимости от хорды наблюдения),  $\Delta = 10$  мм — ширина хорд наблюдения, которая равна ширине щели между диверторными кассетами, через которую идет наблюдение, высота хорд  $h \approx 1$  мм примерно соответствует 1 пикселю на матрице фотодетектора (при полной высоте отрезка наблюдения 400 мм и числу строк пикселей на матрице — 512), и суммарное пропускание всех оптических элементов, включая пропускание спектрального прибора, равно  $T = 10\%$ .

Таким образом, при интенсивности линии  $H_{\alpha}$   $I_{H\alpha} = 10^{20}$  фотонов/(с · м<sup>2</sup> · ср) на матрицу фотодетектора будет приходиться примерно  $I_{PD_{H\alpha}} = 3.5 \times 10^{10}$  фотонов/с. Такая высокая интенсивность свечения линий водорода в диверторе позволит проводить регистрацию сигналов с частотой съемки до 1 кГц (время интегрирования сигнала до 1 мс).

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диагностика эмиссионной спектроскопии является универсальным инструментом для исследования физических процессов и контроля работы дивертора в условиях высокой нагрузки на пластины. В основные задачи спектроскопии в диверторе TRT входят: контроль перехода в режим с газовой мишенью (детachment), определение положения ионизационного фронта, оценка уровня рециклинга. Кроме этого диагностика может использоваться для контроля поступления примесей (неон, бериллий, вольфрам и др.) из дивертора в основную плазму и мониторинга эрозии диверторных пластин. Наконец, все современные транспортные коды, применяемые для интерпретации экспериментальных результатов и оптимизации конструкции дивертора, имеют ряд свободных параметров, которые невозможно получить из “первых принципов” (в первую очередь это коэффициент рециклинга на поверхности обращенных к плазме элементов и аномальный перенос частиц и тепла поперек магнитного поля). Определение этих параметров требует калибровки (привязки) относительно экспериментальных данных, в том числе, получаемых из дан-

ных эмиссионной спектроскопии. Диагностика также позволит исследовать влияние запирающего излучения в линиях водорода на работу дивертора, которое для машины масштаба TRT с металлической первой стенкой и контролируемым напуском примеси будет играть важную роль [15].

Выполненное в работе [4] моделирование показывает, что окно рабочих параметров дивертора TRT, ограниченное максимально допустимой нагрузкой на диверторные пластины, предельной плотностью плазмы на сепаратрисе и приемлемой степенью отрыва плазмы от диверторных пластин (глубокий отрыв плазмы от диверторных пластин приводит к уменьшению энергетического времени жизни центральной плазмы), может (при условии, что существующий скейлинг для эффективной ширины слоя, в котором энергия выносится из основной плазмы в дивертор [16], будет справедлив для TRT) оказаться до такой степени узким, что работа на проектных мощностях потребует крайне эффективного контроля режима работы дивертора. Для осуществления контроля режима работы дивертора используются измерения тока плазмы на диверторные пластины, параметров плазмы (температуры и плотности) у поверхности диверторных пластин, положения ионизационного фронта и излучения примесей [17]. Предлагаемая диагностика может обеспечить измерения всех этих величин, кроме тока плазмы на диверторные пластины, измеряемого тривиальным способом на любой установке. Следует также отметить, что изменение режима работы дивертора далеко не всегда происходит плавно, могут возникать как разного рода колебания [18, 19], так и скачкообразные переходы из режима с сильным рециклингом в режим detachment и обратно [20]. Анализ и управление подобными процессами, если они будут возникать в диверторе TRT, принципиально невозможен без диагностики, позволяющей измерять пространственные распределения параметров диверторной плазмы.

Среди проблем спектроскопии в TRT стоит отметить традиционную проблему первого зеркала, которая особенно критична в диверторе. Как способ борьбы с деградацией первого зеркала, предлагается использовать систему сбора света по типу камеры-обскуры с небольшим входным зрачком, а если потребуется, то и очистку зеркала в плазменном разряде. Размер щели между диверторными кассетами ограничивает сбор света в тороидальном направлении из диверторного патрубка и пространства под диверторными кассетами. Проблема радиационной стойкости оптических компонентов системы может возникнуть на финальной стадии эксплуатации установки в разрядах с наличием дейтерия и трития.

Применение вместо оптоволоконна внутрикамерных зеркал для вывода излучения из вакуумной камеры позволяет визуально контролировать состояние диверторных пластин с помощью видеокамеры. На следующей стадии разработки будет принято решение какой вариант использовать, но оптимальным кажется применение отдельной системы контроля эрозии пластин дивертора на основе внутрикамерного объектива.

Апробация предлагаемой для TRT диагностики диверторной плазмы будет проведена на токамаке T-15МД. В настоящее время ведется её активная проработка, включая комплекс оборудования и размещение систем на установке.

Авторы благодарны С.В. Коновалову за ряд полезных обсуждений и материалы по концептуальному проекту TRT.

Работа была выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования “Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мега-класса” НИЦ “Курчатовский институт”, <http://ckp.nrcki.ru/>.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Krashennnikov S.I., Kukushkin A.S., Pshenov A.A.* // Phys. Plasmas. 2016. V. 23. P. 055602.
2. *Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Э.Н., Мазуль И.В., Родин И.Ю., Минеев А.Б., Кузьмин Е.Г., Кавин А.А., Карпов Д.А., Леонов В.М., Хайрутдинов Р.Р., Кукушкин А.С., Портнов Д.В., Иванов А.А., Бельченко Ю.И., Денисов Г.Г.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 970.
3. *Мазуль И.В., Гиниятулин Р.Н., Кавин А.А., Литунковский Н.В., Маханьков А.Н., Пискарев П.Ю., Танчук В.Н.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 1103.
4. *Кукушкин А.С., Пшенов А.А.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 1123.
5. *Boedo J., McLean A.G., Rudakov D.L., Watkins J.G.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. V. 60. P. 044008. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aaa2ec>
6. *Verhaegh K., Lipschultz B., Duval B.P., Harrison J.R., Reimerdes H., Theiler C., Labit B., Maurizio R., Marini C., Nespoli F., Sheikh U., Tsuid C.K., Vianello N., Vijversfth W.A.J., TCV team and the EURO fusion MST1 team* // Nuclear Materials and Energy. 2017. V. 12. P. 1112. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2017.01.004>
7. *Verhaegh K., Lipschultz B., Duval B., Fil A., Wensing M., Bowman C., Gahle D.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2019. V. 61. P. 125018. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/ab4f1e>
8. *Портнов Д.В., Высоких Ю.Г., Кацук Ю.А., Родионов Р.Н.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 1170.
9. *Litnovsky A., Voitsenya V.S., Reichle R., Walsh M., Razdobarin A., Dmitriev A., Babinov N., Marot L., Moser L., Yan R., Rubel M., Widdowson A., Moon S., Oh S.G., An Y., Shigin P., Orlovskiy I., Vukolov K.Yu., Andreenko E., Krimmer A., Kotov V., Mertens Ph., for the Specialists Working Group on First Mirrors of the ITPA Topical Group on Diagnostics* // Nuclear Fusion. 2019. V. 59. P. 066029. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab1446>
10. *Vukolov K.Yu., Guseva M.I., Evstigneev S.A., Medvedev A.A., Zvonkov S.N.* // Plasma Devices and Operations. 2004. V. 12. P. 193. <https://doi.org/10.1080/1051999042000238040>
11. *Андреев Е.Н., Орловский И.И., Алексеев А.Г., Морозов А.А.* // ВАИТ. Сер. Термоядерный синтез. 2019. Т. 42. С. 13.
12. *Рогов А.В., Капустин Ю.В.* // Приборы и техника эксперимента. 2021. № 3. С. 60. <https://doi.org/10.31857/S0032816221030332>
13. *Gusarov A., Vukolov K.Y., Orlovskiy I.I., Andreenko E.N.* // Fusion Engineering and Design. 2020. V. 151. P. 111356. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.111356>
14. *Vukolov K.Yu., Andreenko E.N., Orlovskiy I.I.* // Fusion Engineering and Design. 2021. V. 170. P. 112465. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112465>
15. *Pshenov A.A., Kukushkin A.S., Marenkov E.D., Krashennnikov S.I.* // Nucl. Fusion. 2019. V. 59. P. 106025. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab3144>
16. *Eich T., Leonard A.W., Pitts R.A., Fundamenski W., Goldston R.J., Gray T.K., Herrmann A., Kirk A., Kallenbach A., Kardaun O., Kukushkin A.S., LaBombard B., Maingi R., Makowski M.A., Scarabosio A., Sieglin B., Terry J., Thornton A., ASDEX Upgrade Team1 and JET EFDA Contributors* // Nuclear Fusion. 2013. V. 53. P. 093031. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/53/9/093031>
17. *Leonard A.W.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. V. 60. P. 044001. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aaa7a9>
18. *Heinrich P., Manz P., Bernert M., Birkenmeier G., Brida D., Cavedon M., David P., Griener M., Haas G., Hapfel T., Plank U., Reimold F., Stroth U., Wischmeier M., Zhang W., ASDEX Upgrade team* // Nuclear Fusion. 2020. V. 60. P. 076013. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab8a05>
19. *Wang H.Q., Watkins J.G., Guo H.Y., Leonard A.W., Thomas D.M., Stepanenko A.A., Krashennnikov S.I.* // Phys. Plasmas. 2020. V. 27. P. 022504. <https://doi.org/10.1063/1.5140354>
20. *McLean A.G., Leonard A.W., Makowski M.A., Groth M., Allena S.L., Boedo J.A., Bray B.D., Briesemeister A.R., Carlstrom T.N., Eldon D., Fenstermacher M.E., Hill D.N., Lasnier C.J., Liu C., Osborne T.H., Petrie T.W., Soukhanovskii V.A., Stangeby P.C., Tsui C., Unterberg E.A., Watkins J.G.* // J. Nuclear Materials. 2015. V. 463. P. 533. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.01.066>