

УДК 533.9.082.5

## ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРОННОГО КОМПОНЕНТА ПЛАЗМЫ В ДИВЕРТОРНОЙ ЗОНЕ ТОКАМАКА ИТЭР

*Е.Е. Мухин, С.Ю. Толстяков, М.М. Кочергин, В.В. Семёнов, Г.С. Курские, А.Г. Раздобарин,  
К.А. Подушникова, С.В. Масюкевич (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург,  
Россия), В.С. Лисица, А.Б. Кукушкин (РНЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия), А.С. Кукушкин  
(ITER Organization, Cadarache, Saint-Paul-Lez-Durance, France)*

Основной задачей диагностического комплекса ИТЭР является мониторинг параметров плазмы в наружной ноге дивертора для различных режимов работы. Проект диагностической системы томсоновского рассеяния в диверторе рассматривается с точки зрения стоящих перед диагностикой задач, технических требований к диагностике и технических возможностей существующего проекта диагностики.

**Ключевые слова:** ИТЭР, дивертор, диагностика томсоновского рассеяния.

THOMSON SCATTERING IN ITER DIVERTOR. E.E. MUKHIN, S.Yu. TOLSTYAKOV, M.M. KOCHERGIN, V.V. SEMENOV, G.S. KURSKIEV, A.G. RAZDOBARIN, K.A. PODUSHNIKOVA, S.V. MASYUKEVICH, V.S. LISITSA, A.B. KUKUSHKIN, A.S. KUKUSHKIN. ITER design has highlighted the fundamental need to monitor the machine operation in more detail. Mission of the Thomson scattering (TS) diagnostic in ITER divertor and the details of its implementation are discussed in the paper with proper attention paid to challenges and margins of the existing design. The requirements to the range and accuracy of the electron temperature and density measurements in ITER divertor are based on the results of modelling of the operational conditions and follow from the main objectives of the measurements.

**Key words:** ITER, divertor, diagnostic Thomson scattering.

### ВВЕДЕНИЕ

Важной частью экспериментальной программы ИТЭР станет мониторинг электронных параметров в диверторе. Знание  $T_e$  и  $n_e$  в диверторе необходимо для управления положением плазменного шнура во время срывов, а также для управления потоками в основную плазму примесей, возникающих при взаимодействии плазма—поверхность в диверторе. Эти задачи определяют основные требования к диагностике томсоновского рассеяния (ТР) в наружной ноге дивертора (см. таблицу).

**Основные требования к диагностике ТР в наружной ноге дивертора**

Параметр	Диапазон	Пространственное разрешение	Временное разрешение
$T_e$	1—100 эВ*	5 см вдоль ноги	15 мс (60 Гц)
$n_e$	$10^{19}$ — $10^{21}$ м <sup>-3</sup>		

\* Верхний предел измеряемых электронных температур обсуждается далее.

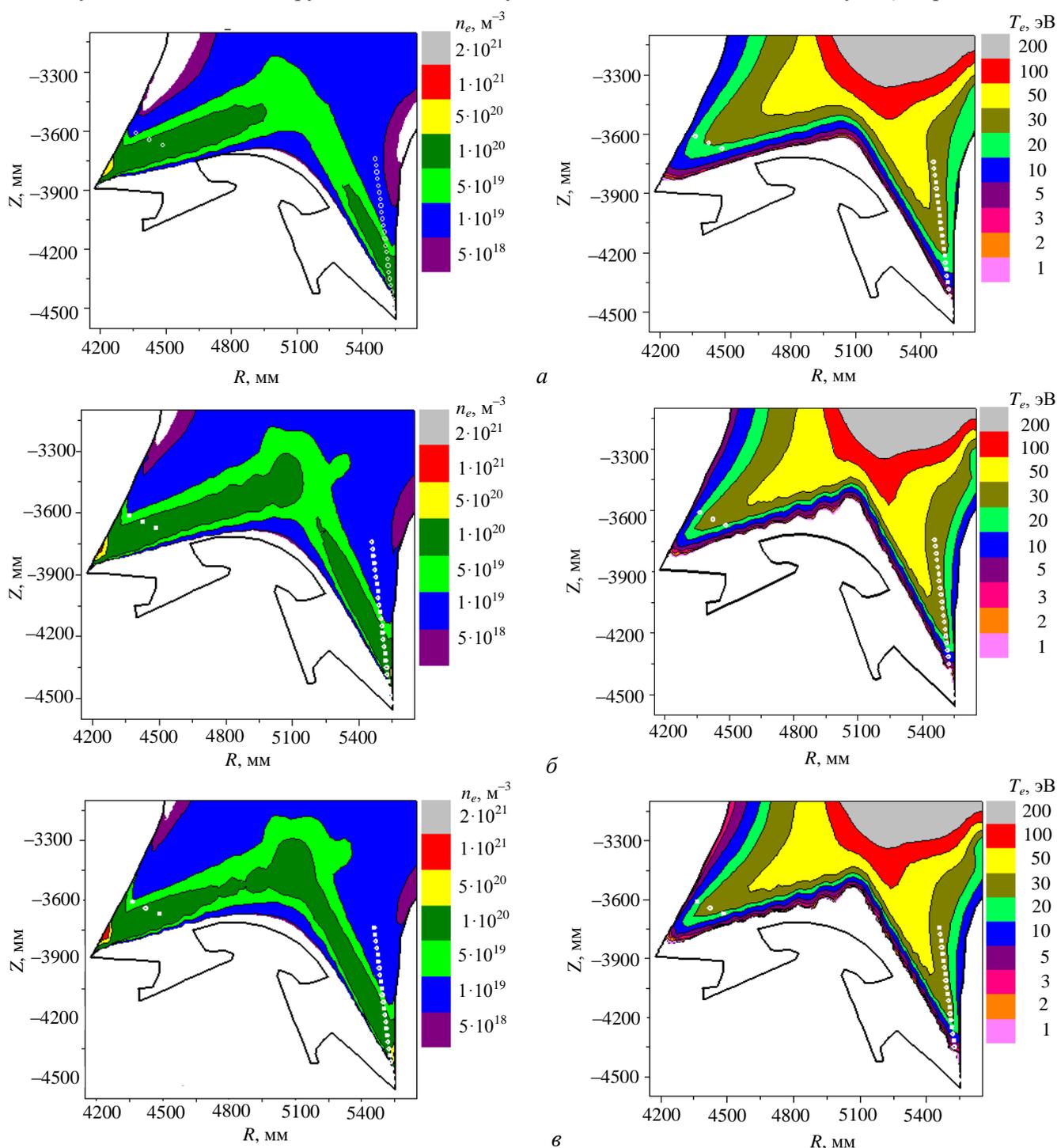
Работа диагностики ТР в диверторе ИТЭР будет проходить в крайне неблагоприятных условиях: высокой радиационной нагрузке на оптические элементы, загрязнении оптических элементов продуктами эрозии первой стенки в виде пылевых и плёночных осадений. Дополнительные трудности в реализации диагностики связаны с ограниченным доступом к плазме и интенсивностью сигнала ТР, зачастую более слабой, чем интенсивность фонового излучения, которое включает линейчатый и непрерывный спектры излучения плазмы, а также излучение нагретых объектов. Основной сложностью создания диагностики ТР в диверторе является ограниченный доступ к плазме и работоспособность оптических компонентов, расположенных в непосредственной близости от диверторной плазмы. Тем не менее технологические проблемы конструирования внутривакуумных элементов диагностического комплекса и проводимые исследования по созданию оптических компонентов, способных работать в сложных условиях ИТЭР, остались за рамками данной статьи, в которой излагаются основные технические возможности и роль диагностики ТР в диверторе. При этом особое внимание уделяется описанию поставленных перед диагностикой задач и путей их решения.

### ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ, СТОЯЩИЕ ПЕРЕД ДИАГНОСТИКОЙ ТР В ДИВЕРТОРЕ ИТЭР

Измерение параметров электронного компонента в диверторе преследует две основные цели: мониторинг режима работы дивертора, в том числе степень контакта плазмы с диверторными пластинами и

изучение потоков примеси в диверторе. Диапазон и точность измерения  $T_e$  и  $n_e$  в диверторе ИТЭР вытекают из основных задач, стоящих перед диагностикой, и базируются на результатах моделирования режимов работы дивертора. Двумерное распределение электронных параметров в диверторной области, ожидаемое в различных рабочих режимах, представлено на рис. 1. При расчёте двумерных распределений использовался код SOLPS4.3 [1].

Режимы работы, в которых ИТЭР сможет работать продолжительное время, соответствуют нагрузкам на диверторные пластины от 6,5 до 10 МВт/м<sup>2</sup> (см. рис. 1, б, в, г), ожидаемый оптимум составляет ~8 МВт/м<sup>2</sup>. Более низкая нагрузка на диверторные пластины (см. рис. 1, д), которая ожидается при повышении давления плазмы на входе в дивертор, приведёт к уменьшению потока в дивертор из основной плазмы и ухудшению удержания плазмы из-за накопления примеси. Ожидается, что более высокую нагрузку диверторные пластины не смогут выдержать в течение длительности рабочего импульса ИТЭР. Так, нагрузка 15 МВт/м<sup>2</sup> допускается только на несколько секунд (см. рис. 1, а).



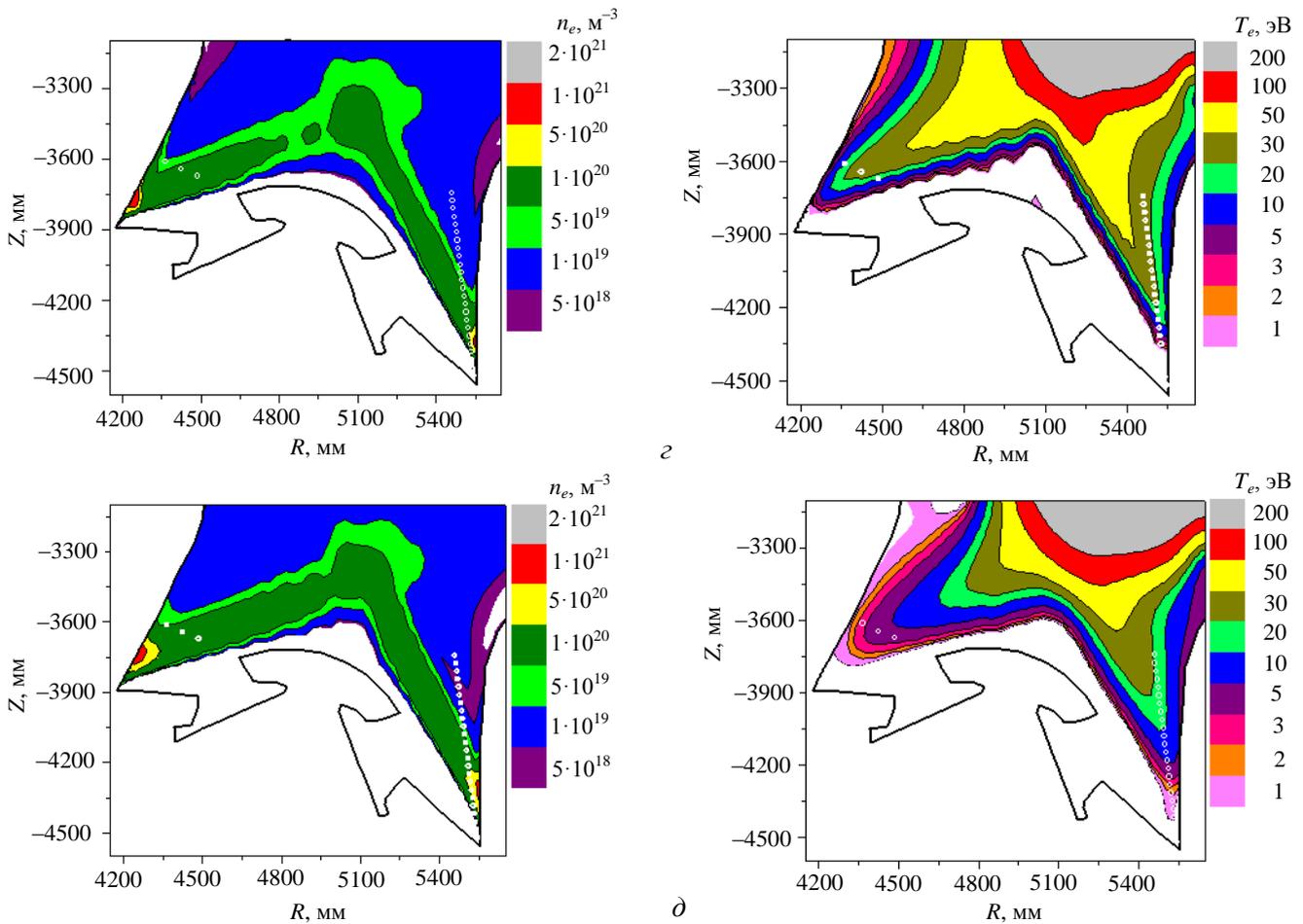


Рис. 1. Двумерное распределение  $T_e$  и  $n_e$  в диверторной области для режимов, отличающихся нагрузкой на диверторные пластины: 15 МВт/м<sup>2</sup> (1537) (а); 10 МВт/м<sup>2</sup> (1511) (б); 8 МВт/м<sup>2</sup> (1514) (в); 6,5 МВт/м<sup>2</sup> (1540) (г); 0,5 МВт/м<sup>2</sup> (1538) (д). В скобках указаны номера численных экспериментов, проведённых в программе SOLPS4.3 [1] для различных режимов работы дивертора. Точки вдоль хорды зондирования соответствуют положению пространственных каналов

На рис. 2 представлено распределение электронных параметров вдоль хорды зондирования в наружной ноге дивертора. Ожидаемый диапазон электронных параметров заметно варьируется вдоль хорды зондирования и особенно вблизи ионизационного фронта. Основной задачей, стоящей перед диагностикой ТР в диверторе, является отслеживание изменения режима работы, соответствующего изменению максимальной плотности мощности, выделяемой на диверторных пластинах, более чем на 10% от

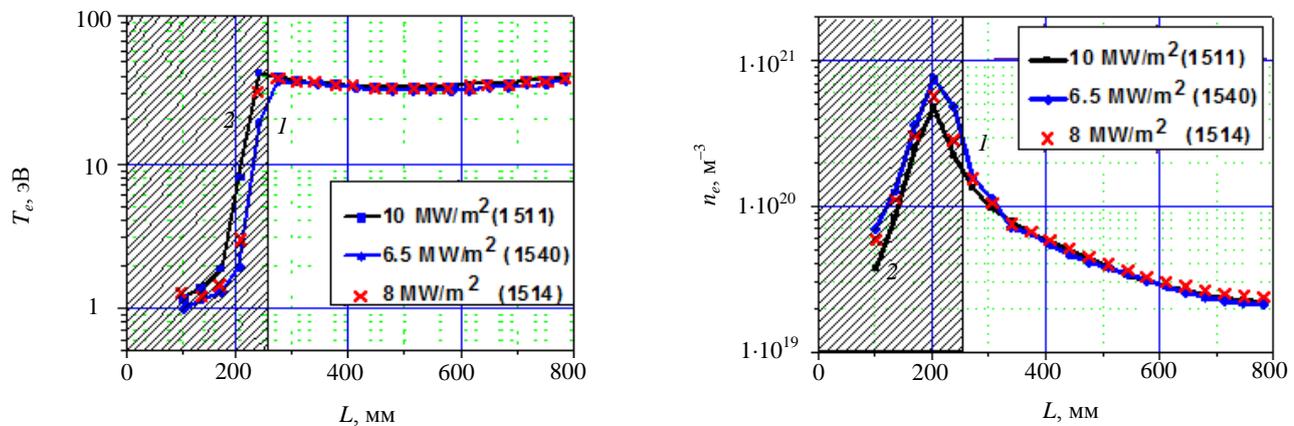


Рис. 2. Распределение  $T_e$  и  $n_e$  вдоль хорды зондирования диагностической системы ТР в наружной ноге дивертора ИТЭР представлено для трёх основных режимов работы: 1 — с минимальной (6,5 МВт/м<sup>2</sup> (1540)), 2 — максимальной (10 МВт/м<sup>2</sup> (1511)) нагрузкой на диверторные пластины. × — оптимальный режим работы (8 МВт/м<sup>2</sup> (1514))

оптимального значения (8 МВт/м<sup>2</sup>). Наиболее сильное влияние на параметры электронного компонента при этом ожидается в нижней части наружной диверторной ноги (рис. 3), где изменение  $T_e$  и  $n_e$ , соответствующее 10%-ному отклонению нагрузки на диверторные пластины от 8 МВт/м<sup>2</sup>, вполне измеримо.

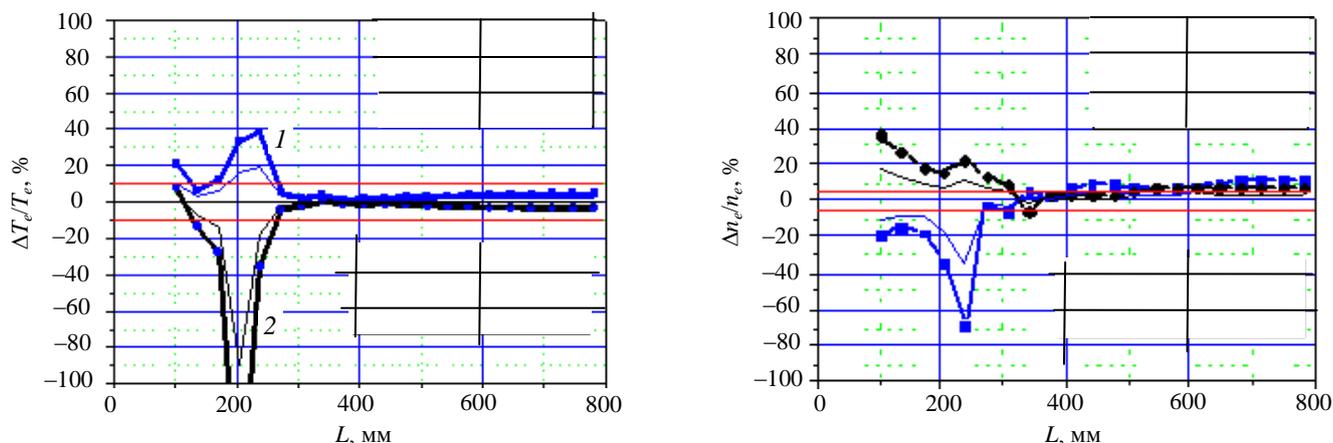


Рис. 3. Относительное изменение  $T_e$  и  $n_e$  вдоль хорды зондирования при переходе из основного режима в режимы с большим и меньшим значением максимальной плотности мощности, выделяемой на диверторных пластинах: 1 — соответствует изменению максимальной нагрузки на диверторные пластины с 8 до 10 МВт/м<sup>2</sup>; 2 — с 8 до 6,5 МВт/м<sup>2</sup>. Тонкие линии получены из 1 и 2 двукратным масштабированием для оценки изменения максимальной нагрузки на 10%. Горизонтальные линии обозначают относительные ошибки измерения электронных параметров, заложенные в технических требованиях к диагностике

При переходах между различными режимами работы (см. рис. 3)  $T_e$  и  $n_e$  в верхней части диверторной ноги изменяются незначительно. Тем не менее знание электронной температуры и концентрации может оказаться весьма полезно при интерпретации данных спектроскопии, которая обычно даёт информацию о концентрации возбуждённых атомов/ионов, а для расчёта полной концентрации необходимо знать параметры электронного компонента. Данные по  $T_e$  и  $n_e$  из верхней части диверторной ноги могут также потребоваться при изменении конфигурации магнитных полей, которая может сдвигаться из-за задержки срабатывания системы управления положением плазменного шнура или во время переходных процессов [2] (рис. 4, а). Кроме того, различные режимы работы дивертора предполагают исследование материалов диверторных пластин на основе CFC и вольфрама без нарушения вакуума. Для этого нижняя часть диверторных пластин должна быть изготовлена из CFC, а верхняя — из вольфрама (рис. 4, б).

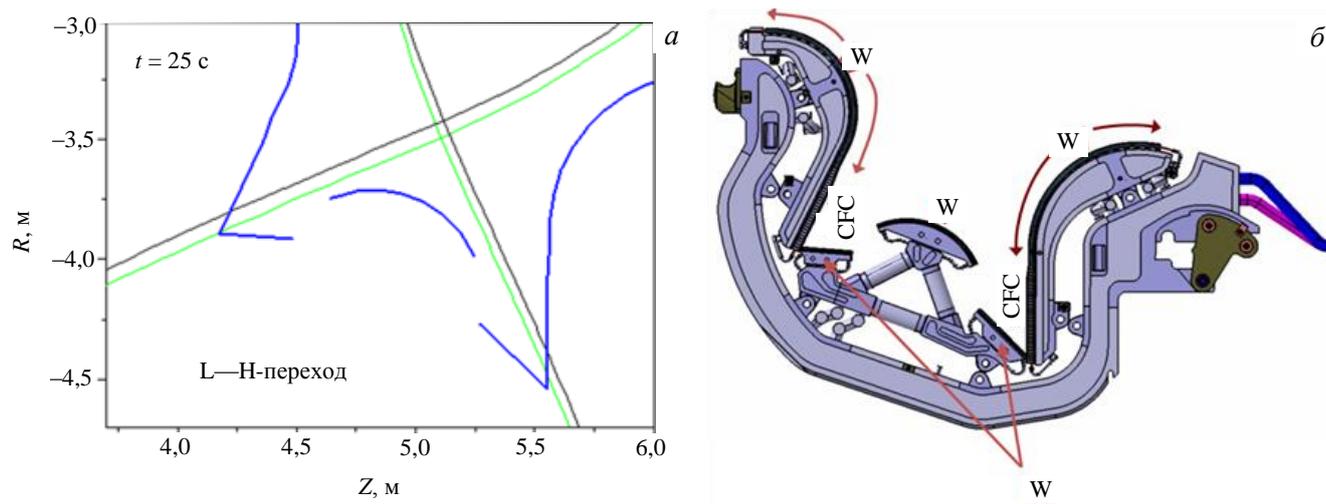


Рис. 4. Пример изменения конфигурации магнитного поля при L—H-переходе (а); вид диверторной кассеты с указанием материалов (б)

При такой конструкции для перехода из режима с CFC-дивертором в режим с вольфрамовым дивертором достаточно изменить конфигурацию магнитных полей так, чтобы место максимальной нагрузки сместилось на поверхность из другого материала. Таким образом, возможные изменения магнитной конфигурации приводят к необходимости иметь однородное пространственное распределение каналов измерения вдоль хорды зондирования.

### ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ ТР В ДИВЕРТОРЕ ИТЭР

Хорду зондирования можно условно разделить на две области, которые требуют различного инструментального подхода диагностики ТР. Плазма из области, соответствующей верхней части хорды зондирования, обладает характерными для краевой плазмы токамаков параметрами:  $n_e \sim 10^{19} - 10^{20} \text{ м}^{-3}$  и  $T_e \sim 20 - 50 \text{ эВ}$ . В нижней части диверторной ноги ожидаются значительные градиенты электронных параметров и сверхнизкая температура электронов:  $n_e \sim 10^{19} - 10^{21} \text{ м}^{-3}$ ,  $T_e \sim 1 - 50 \text{ эВ}$ . Требование измерения узких томсоновских спектров ( $T_e \sim 1 \text{ эВ}$ ) может осложняться сильной паразитной засветкой на лазерной длине волны из-за возможной запылённости плазмы в окрестности максимальной нагрузки на диверторные пластины.

Для исследования областей плазмы со стандартными параметрами предполагается преимущественное использование спектрометров на основе интерференционных светофильтров. Фильтровые спектрометры, не обладая рекордными параметрами, относительно дешёвы, просты, надёжны и нашли широкое применение в диагностических системах ТР на различных плазменных установках. Более дорогие и сложные дифракционные спектрометры [3] позволяют достигать рекордных параметров по режекции монохроматической засветки и потому выбраны для исследования нижней части диверторной ноги. С паразитной засветкой сложнее всего справиться в спектральных каналах, расположенных вплотную к каналу, соответствующему лазерной длине волны. Поэтому паразитная засветка наиболее опасна при измерении узких спектральных контуров, соответствующих сверхнизким электронным температурам.

На рис. 5 показан результат расчёта ошибок измерения  $T_e$  для значений плотности, находящихся на нижней границе измеряемого диапазона, равной  $10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Указанные в технических требованиях точности измерения  $T_e$  — 10% и  $n_e$  — 5% определяют рабочий диапазон дифракционного прибора от 1 до 100 эВ и фильтрового прибора от 4 до 100 эВ. Неопределённость магнитной конфигурации накладывает требование оптимизации распределения спектральных приборов по пространственным каналам диагностики.

Предлагаемый подход заключается в том, чтобы максимально упростить процедуру замены одного типа спектрального прибора на другой, а также предусматривает, что в режимах с возможным резким сдвигом ионизационного фронта более простые фильтровые спектрометры будут дополняться дифракционными спектрометрами с более низким пределом измеряемых  $T_e$ .

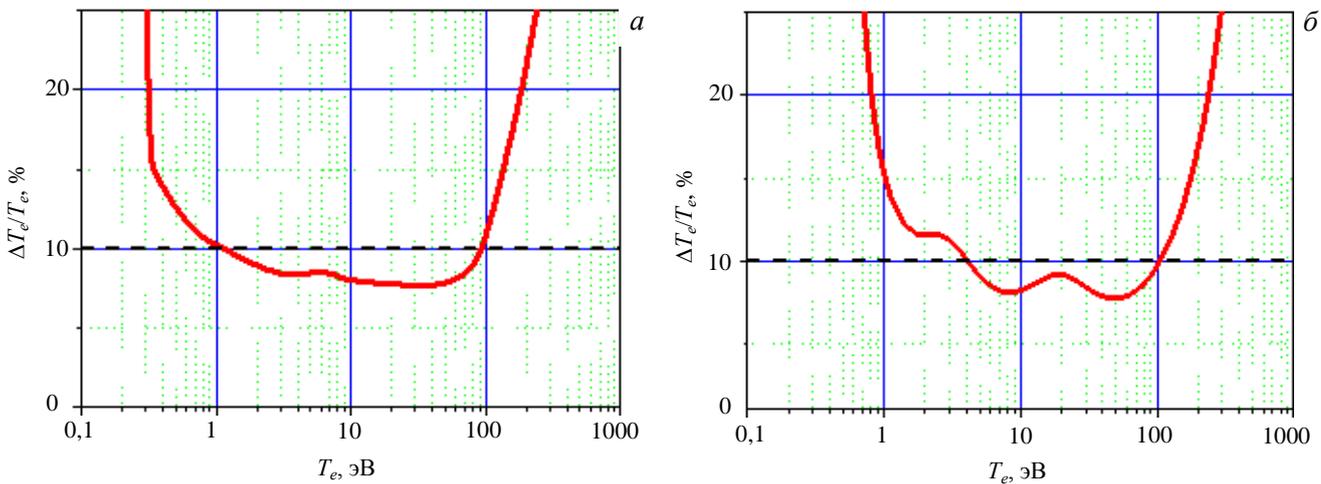


Рис. 5. Ожидаемые ошибки измерения  $T_e$  для дифракционного спектрометра (а) и фильтрового спектрометра (б). Расчет сделан для энергии лазера 1,5 Дж,  $n_e = 10^{19} \text{ м}^{-3}$  (оценка снизу) и фонового излучения 100 фотонов/нм (оценка сверху)

Измерение  $T_e$  вблизи ионизационного фронта представляется одним из наиболее трудновыполнимых требований. В холодной плотной плазме, где дебаевская длина становится сравнима с лазерной длиной волны, отклонения формы спектра ТР от гауссовского могут становиться заметными. Параметр Солпитера  $\alpha = 1/kD$ , где  $D$  — дебаевский радиус,  $k$  — изменение волнового вектора в акте рассеяния зондирующего излучения, показывает степень проявления коллективных явлений в спектре рассеяния: высокая величина соответствует коллективному рассеянию, низкая — независимому (так называемому некогерентному) рассеянию на отдельных частицах.

Обычно классический анализ спектра ТР, предполагающий гауссовскую форму спектра рассеяния, считается применимым при параметре Солпитера, не превышающем 0,25 [4]. Максимальная величина параметра Солпитера в одном из представленных центральной командой режимов работы дивертора достигла 0,43 (рис. 6). Это не основной режим работы, соответствующий максимальной плотности плазмы на входе в дивертор, когда дивертор фактически перестаёт выполнять свою функцию. Тем не менее и в таком режиме диагностика ТР в диверторе останется вполне работоспособной.

На рис. 7 приведены спектральные кривые пропускания первых каналов дифракционного спектрометра и нормированные на единицу спектры ТР для температуры электронов 1 эВ, рассчитанные для классического случая ( $n_e \sim 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , параметр Солпитера 0,055) и для параметра Солпитера 0,43. Очевидно, что для режима с высокой плотностью сигнал первого канала должен быть исключён из рассмотрения. Такой режим обработки сигнала вполне допустим, учитывая, что амплитуда томсоновского сигнала пропорциональна электронной плотности, и при исследовании плотной плазмы интенсивность сигнала ТР будет столь велика, что 2-го и 3-го спектральных каналов будет вполне достаточно для надёжного измерения температуры.

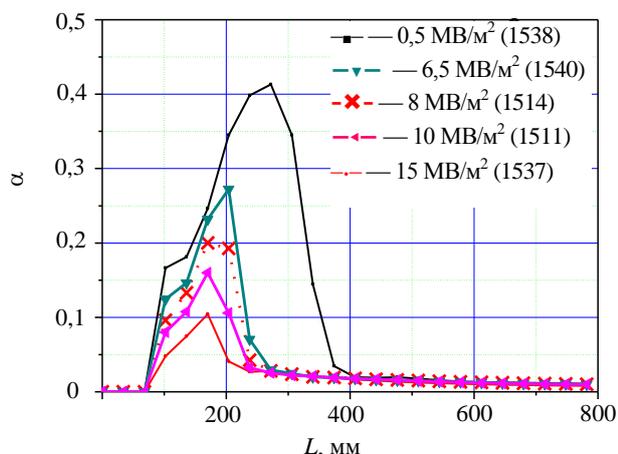


Рис. 6. Величина параметра Солпитера  $\alpha = 1/kD$ , где  $k$  — волновой вектор рассеяния,  $D$  — радиус Дебая, вдоль хорды зондирования для различных режимов работы, отличающихся максимальной нагрузкой на диверторные пластины

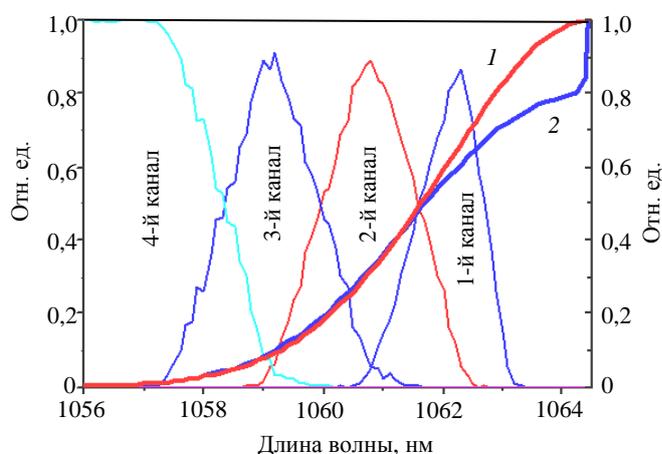


Рис. 7. Кривые 1, 2 показывают нормированные на единицу томсоновские спектры для  $T_e = 1 \text{ эВ}$ ,  $n_e \sim 10^{19} \text{ м}^{-3}$  ( $\alpha \sim 0,055$ ) и  $n_e \sim 6 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  ( $\alpha \sim 0,43$ ) соответственно. Тонкие кривые соответствуют спектральному пропусканию каналов дифракционного спектрометра

Одним из обсуждаемых электронных параметров является верхний порог возможности измерения электронной температуры 200 эВ [5]. Проблема диагностики ТР, использующей для зондирования диверторной плазмы длину волны 1064 нм, заключается в сложности измерения электронной температуры в промежутке между 100 и 200 эВ из-за сильного линейчатого излучения в диапазоне 1004—1012 нм. Наибольшую опасность представляет линия Р7 (1004,6 нм) пашеновской серии дейтерия, которая может своим излучением на крыльях засветить крайние спектральные каналы и осложнить измерение томсоновских контуров, соответствующих температурам в диапазоне 100—200 эВ.

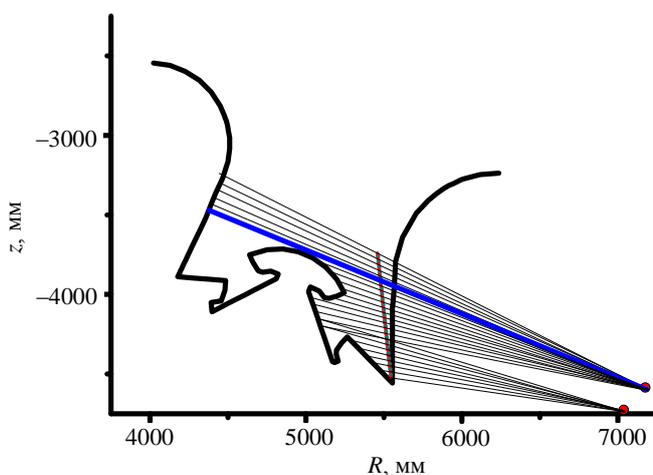


Рис. 8. Наклонные линии соответствуют хордам наблюдения диагностики ТР. Жирной линией выделена хорда, для которой представлена оценка формы спектральной линии

Для оценки влияния такого излучения в диверторе ИТЭР на точность томсоновских измерений была проведена оценка ширины спектральной линии Р7 (переход  $n = 7 \rightarrow n = 3$ ) [5]. При расчёте ширины линии были использованы упрощённые модели [6, 7] расчёта статической зееман-штарковской структуры спектральных линий, а динамически уширенные контуры линии были получены на основе новой кинетической теории уширения [8]. На рис. 8 приведены результаты расчёта формы спектральной линии Р7, учитывающие вклад различных механизмов уширения линии для одной из хорд наблюдения (см. жирную линию на рис. 7).

Как видно на рис. 9, *а*, полуширина линии излучения плазмы вдоль хорды зондирования, проходящей над домом, составляет на полувысоте от 0,4 до 0,7 нм. Интегральные контуры линии P7 имеют значительно более скромную ширину и составляют 0,467 и 0,546 нм (см. рис. 9, *б*). Вместе с тем необходимо помнить, что важна не ширина линии сама по себе, а расстояние от центра линии, на котором интенсивность линейчатого излучения сравнима с сигналом ТР. Для оценки на рис. 9, *б* показан уровень тормозного излучения, интенсивность которого для хорд № 8—23 сравнима по порядку величины с интенсивностью сигнала ТР. Для хорд № 1—7 определяющей фоновой составляющей будет интенсивность теплового излучения диверторных пластин. Исходя из такой грубой

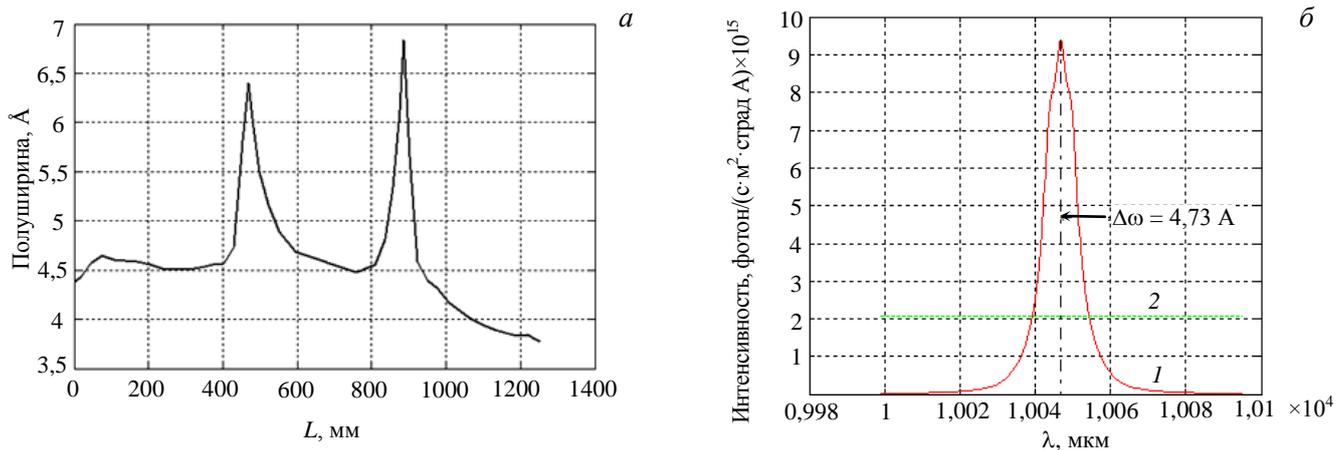


Рис. 9. Результаты расчёта формы спектральной линии P7 (переход  $n = 7 \rightarrow n = 3$ ), учитывающие вклад различных механизмов уширения линии вдоль хорды наблюдения для основного режима работы дивертора ИТЭР с максимальной нагрузкой на диверторные пластины  $8 \text{ МВт/м}^2$ : *а* — изменение полуширины спектральной линии на полувысоте вдоль хорды наблюдения, проходящей над домом; *б* — интегральные интенсивности свечения линии P7(1) и тормозного излучения (2) вдоль хорды наблюдения, проходящей над домом

оценки, требуемая спектральная ширина фильтра-пробки может составлять  $\sim 4 \text{ нм}$  (см. форму спектрального канала № 9 на рис. 10). Более точные оценки ширины фильтра-пробки требуют тщательной проработки всех хорд наблюдения диагностики ТР в различных режимах работы дивертора и являются темой отдельной публикации.

На рис. 10 приведено распределение пропускания в каналах № 1—9 дифракционного полихроматора ТР (рис. 11), разрабатываемого в настоящее время. Первые три узких канала используются прежде всего для измерения сверхнизких электронных температур  $T_e \geq 1 \text{ эВ}$ . Последний канал (9) позволит расширить диапазон измеряемых  $T_e$  до 200 эВ при условии, что в этом канале удастся избежать фоновой засветки уширенной линией P7 (1004 нм) и линией 1012 нм, соответствующей излучению HeII, NII и NI [5]. На основе сделанных оценок предложено распределение спектральных каналов дифракционного полихроматора, которое должно обеспечить требуемую точность измерения  $\leq 5\% n_e$  и  $\leq 10\% T_e$  в диапазоне  $n_e = 10^{19}—10^{21} \text{ м}^{-3}$  и  $T_e = 1—200 \text{ эВ}$ .

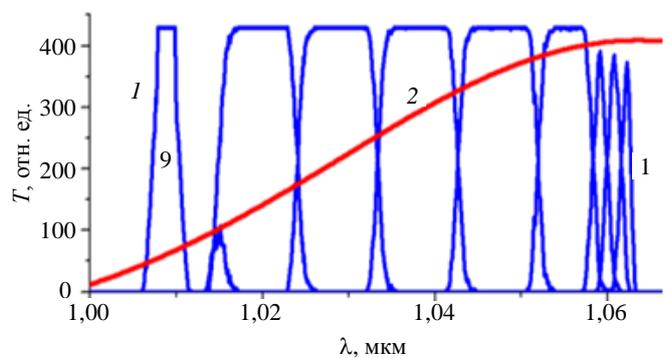


Рис. 10. Распределение чувствительности в каналах № 1—9 дифракционного полихроматора ТР (1) и контур ТР для температуры 200 эВ (2)

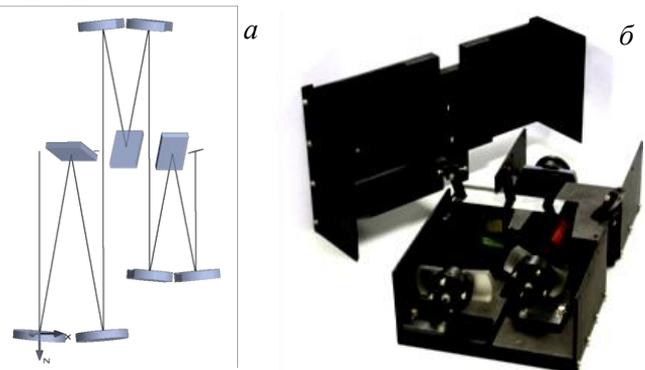


Рис. 11. Схема оптического хода лучей (*а*) и фотография прототипа дифракционного полихроматора ТР (*б*)

## ВЛИЯНИЕ ФОНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СО СПЛОШНЫМ СПЕКТРОМ НА ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА ТР В ДИВЕРТОРЕ

Вклад в фоновую засветку в пределах спектральных каналов ТР дивертора ИТЭР могут вносить тормозное и фоторекомбинационное излучение диверторной плазмы, тепловое излучение диверторных пластин, линейчатое излучение нейтрального/ионного компонента и паразитная засветка лазерным излучением, рассеянным на пылевых частицах и элементах конструкции. Фоновое излучение сплошного спектра включает излучение поверхности нагретых элементов дивертора, находящихся в поле зрения системы сбора света, сильное тормозное ( $\sim n_e^2$ ) и фоторекомбинационное излучение холодной плотной ( $n_e \sim 10^{20} - 10^{21} \text{ м}^{-3}$ ) плазмы дивертора. Фоновое излучение сплошного и линейчатого спектра неизменно во временном масштабе лазерного импульса и потому может быть измерено и вычтено, что, однако, приведёт к увеличению ошибки измерения сигнала [5].

Наиболее ощутимый вклад фонового излучения плазмы ожидается в каналах, соответствующих верхним хордам наблюдения (11 верхних хорд, рис. 12), которые проходят через протяженную область плотной и холодной плазмы, пересекая наружную и внутреннюю части дивертора. Более того, в пространственных каналах, соответствующих верхним хордам наблюдения,

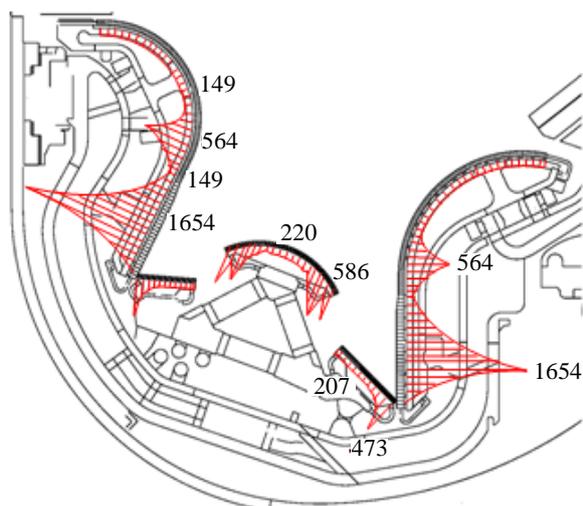


Рис. 12. Карта распределения температуры по поверхности дивертора, рассчитанная для усредненных по времени потоков плазмы в установившемся режиме работы (°C)

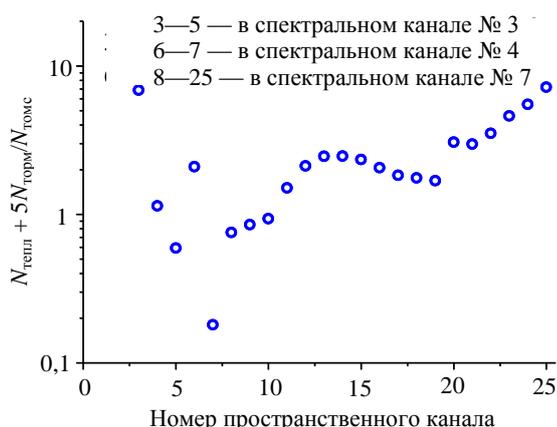


Рис. 13. Отношение интенсивности непрерывного излучения, включая тормозное излучение и излучение нагретых диверторных пластин, к сигналу ТР, рассчитанное для режима, соответствующего нагрузке на диверторные пластины  $8 \text{ МВт/м}^2$  в крайнем спектральном канале, расположенном на крыле спектрального контура томсоновского рассеяния по хордам с номерами, отсчитываемыми снизу вверх (см. рис. 8), и времени накопления 3 нс

детектируемый сигнал ТР слабее потому, что, во-первых, относительно низка концентрация ( $n_e \sim (1 - 3)10^{19} \text{ м}^{-3}$ ) и, во-вторых, из-за относительно высоких электронных температур ( $T_e$  — десятки эВ) спектр ТР распределяется по большому числу спектральных каналов.

Вклад тормозного излучения оценивался, исходя из расчетного распределения плазменных параметров вдоль хорд наблюдения для режима работы с максимальной нагрузкой на диверторные пластины  $8 \text{ МВт/м}^2$ . Оценка интенсивности тормозного излучения для других режимов работы дивертора, а также фоторекомбинационного излучения диверторной плазмы входит в планы проводимых в настоящее время исследований.

Наиболее ощутимый вклад теплового излучения плазмы ожидается в каналах, соответствующих нижним хордам наблюдения (3—6-й каналы, рис. 13), которые могут быть засвечены отраженным светом раскалённых диверторных пластин в районе пересечения с сепаратрисой. При этом необходимо учитывать, что повышение температуры приводит к резкому росту интенсивности излучения нагретых тел (рис. 14). В работе [9] показано, что цветовая температура поверхности может существенно превышать температуру самих стенок из-за разогрева образовавшихся на поверхностях плёнок. Это возможно при плохом тепловом контакте плёнки со стенками, и, как показали эксперименты на JET, в некоторых режимах излучение стенок дивертора соответствует цветовой температуре  $\sim 2000 \text{ °C}$  [10].

Точность измерения  $n_e$  и  $T_e$ , рассчитанная для основного режима работы дивертора с нагрузкой на диверторные пластины  $8 \text{ МВт/м}^2$  в различных пространственных каналах, представлена на рис. 15, 16. В проведённых расчётах была сделана оценка сверху, при этом интенсивность фонового излучения плазмы принималась равной интенсивности тормозного излучения, умноженной на 5. Как видно на рис. 15, 16, расчётные значения погрешности измерения  $n_e$  и  $T_e$  для основного режима работы дивертора не превышают 5 и 10% соответственно.

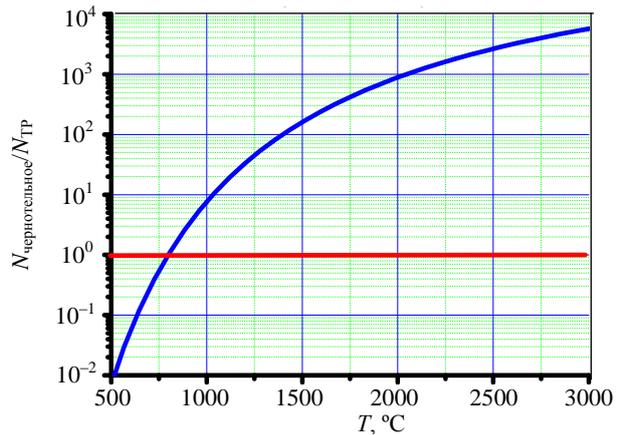


Рис. 14. Отношение интенсивности излучения нагретой поверхностью к сигналу ТР, рассчитанное для спектрального канала № 5:  $T_e = 50 \text{ эВ}$ ,  $n_e = 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , время накопления 3 нс

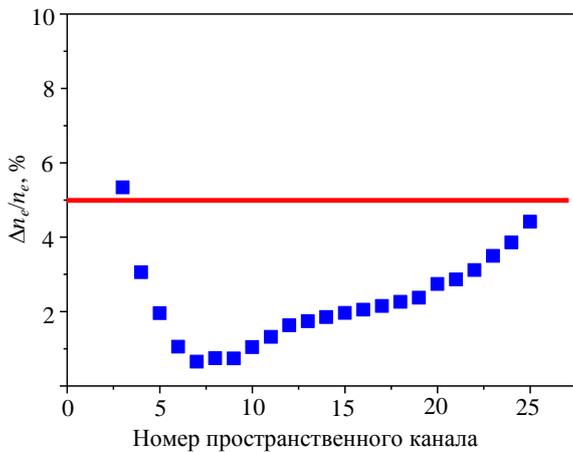


Рис. 15. Результаты расчёта погрешности измерения  $n_e$  для различных пространственных каналов диагностики ТР в диверторе ИТЭР. Нумерация каналов идёт снизу вверх в соответствии с рис. 8. Расчет проводился в следующих предположениях: максимальная нагрузка  $8 \text{ МВт/м}^2$ ; пропускание оптики 0,05; тормозное излучение  $\times 5$ ; тепловое излучение; квантовый выход ЛФД с30955e

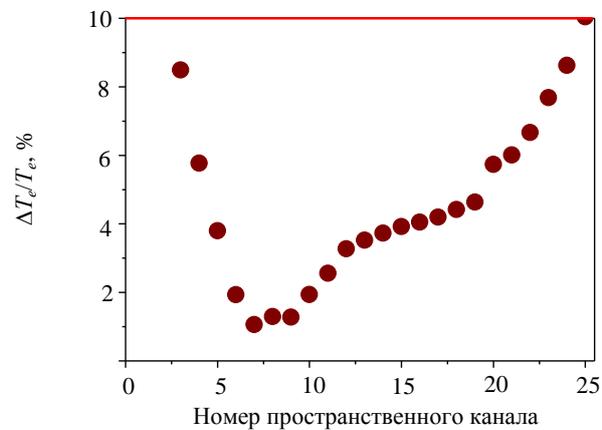


Рис. 16. Результаты расчёта погрешности измерения  $T_e$  для различных пространственных каналов диагностики ТР в диверторе ИТЭР. Нумерация каналов идёт снизу вверх в соответствии с рис. 8. Расчет проводился в следующих предположениях: максимальная нагрузка  $8 \text{ МВт/м}^2$ ; пропускание оптики 0,05; тормозное излучение  $\times 5$ ; тепловое излучение; квантовый выход ЛФД с30955e

## ВЫВОДЫ

Измерения электронных параметров плазмы вдоль диверторной ноги предназначены для контроля за поддержанием необходимого режима работы токамака ИТЭР. В частности, на основании данных диагностики ТР будет определено положение ионизационного фронта, а в совокупности с данными спектроскопии о концентрации примесей будут контролироваться режим работы дивертора и степень эффективности аккумуляции им примесей. Из-за сильной неоднородности плазмы вблизи ионизационного фронта и в силу неопределённости магнитной конфигурации нами предложено однородное распределение пространственных каналов вдоль хорды зондирования. Для изучения плазмы верхней и нижней части диверторной ноги предлагается преимущественно использовать различные спектральные приборы с сохранением возможности оперативной замены одного типа на другой.

Одной из наиболее сложных задач является измерение параметров плотной и холодной плазмы, в которой коллективные эффекты могут искажать форму спектра ТР [4]. Особенно сильно эти эффекты могут проявляться в наиболее критичной области — на ионизационном фронте, в окрестности пересечения сепаратрисой диверторной пластины. Показано, что для наиболее сложного случая с высокой плотностью и низкой температурой искажения спектра ТР можно избежать за счёт исключения из рассмотрения данных первого спектрального канала.

В статье обсуждаются возможные источники фоновой засветки спектральных каналов ТР дивертора ИТЭР, включая тормозное и рекомбинационное излучение диверторной плазмы, тепловое излучение диверторных пластин, линейчатое излучение нейтрального/ионного компонента и паразитная засветка лазерным излучением, рассеянным на пылевых частицах и элементах конструкции. Приведённые в статье оценки являются базовыми для создаваемого Россией проекта диагностического комплекса ТР в диверторе ИТЭР.

Авторы выражают благодарность М.Г. Левашовой (РНЦ «Курчатовский институт») за участие в расчётах формы спектральных линий.

Авторы выражают благодарность Росатому (контракт № 4z.41.03.08.258), финансирующему работы по поставке диагностического комплекса ТР организации ИТЭР. Членами организации ИТЭР являются Китайская Народная Республика, Европейское агентство атомной энергии, Республика Индия, Япония, Республика Корея, Российская Федерация и Соединенные Штаты Америки.

Взгляды и мнения, изложенные в статье, не обязательно отражают мнение всех членов программы ИТЭР или их агентств. Распространение информации, изложенной в статье, управляется международным соглашением ITER Joint Implementation Agreement. Работа поддержана NWO-RFBR Centre-of-Excellence grant 047.018.002.

## REFERENCES

1. **Kukushkin A.S., Pacher H.D., Loarte A. et al.** — Nucl. Fusion, 2009, vol. 49, p. 075008.
2. **Pitts R.A., Kukushkin A., Loarte A. et al.** Status and physics basis of the ITER divertor. — In: 12th Intern. Workshop on Plasma Facing Materials and Components for Fusion Applications. Jülich, Germany, 11—14 May 2009.
3. **Mukhin E.E. et al.** Double-grating polychromator for laser-aided plasma diagnostics. — Rev. Sci. Instrum., 2004, vol. 75, p. 1261.
4. **Pyatnitskiy L.N.** Laser plasma diagnostics. — M.: Atomizdat, 1976 (in Russian).
5. **Tolstyakov S.Yu., Mukhin E.E., Kochergin M.M. et al.** Near-infrared tokamak plasma spectroscopy in support of divertor Thomson scattering diagnostic development for ITER. LAPD-14, 2009.
6. **Mosse C., Calisti A. et al.** — J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 2004, vol. 37, p. 1343.
7. **Stambulchik E., Maron Y.** — J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 2008, vol. 41, p. 095703.
8. **Calisti A., Mossé C., Ferri S., Talin B., Rosmej F., Bureyeva L.A., Lisitsa V.S.** Dynamic Stark broadening as the Dicke narrowing effect. — Phys. Rev. E, 2010, vol. 81, p. 016406.
9. **Reichle R. et al.** Preliminary Final Report for the EFDA Task TWP2002 TW2-TPDS-DIASUP-231. Task 2.3 Thermography \* part II: CEA. 19.12.2004.
10. **Stamp M.** — In: 3rd Sept., Hot. Inner. Divertor at JET, TFE Meeting, JET, 2003.

## AUTHORS

**Mukhin E.E.** A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia; E.Mukhin@mail.ioffe.ru

**Tolstyakov S.Yu.** A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

**Kochergin M.M.** A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

**Semenov V.V.** A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

**Kurskiy G.S.** A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

**Razdobarin A.G.** A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

**Podushnikova K.A.** A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

**Masyukevich S.V.** A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

**Lisitsa V.S.** RRC «Kurchatov Institute», pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

**Kukushkin A.B.** RRC «Kurchatov Institute», pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; kuka@nfi.kiae.ru

**Kukushkin A.S.** ITER Organization, Route de Vinon sur Verdon, Saint-Paul-Lez-Durance, Cadarache, France

Received 6 April 2010  
Problems of Atomic Science and Technology  
Ser. Thermonuclear Fusion, 2010, issue 2, pp. 59—68.