

УДК 621.039

О ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ СКРЫТЫХ МИКРОТЕЧЕЙ ВОДЫ В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ

*А.Б. Антипенков (Институт технической физики, Карлсруэ), О.Н. Афонин, В.Н. Колесников
(Физический институт РАН), И.В. Визгалов, В.А. Курнаев (Московский инженерно-физический институт)*

В статье обсуждается вариант спектроскопического метода обнаружения «скрытых» микротечей воды в камере токамака ИТЭР. Приведены результаты экспериментов на установке ПР-2 в МИФИ, подтверждающие высокую обнаружительную способность $\dot{n} \leq 10^{10} \text{ с}^{-1}$ спектроскопического метода диагностики микротечей воды в вакуумной камере по свечению (0—0) полосы радикала OH^* . Эксперименты проводились в трех буферных газах (Ar , D_2 , воздух) при давлении $\sim 10^{-2}$ Па.

ABOUT OF POSSIBILITY OF DETECTION OF THE LATENT MICROLEAKS IN THE VACUUM CHAMBER. A.B. ANTIPENKOV, O.N. AFONIN, V.N. KOLESNIKOV, I.V. VIZGALOV, V.A. KURNAEV. The spectroscopic method of detection of the «latent» microleaks of water in the chamber tokamak ITER is discussed. The results of experiments on installation PR-2 in MEPhI confirming high ability of a spectroscopic method of detection microleaks of water in the vacuum chamber are presented. The method is based on the measurement of the intensity of OH^* (0—0) band. Results show, that the received sensitivity is at a level $n \leq 10^{10} \text{ s}^{-1}$. Experiments are fulfill in Ar, D_2 and air at the pressure $\sim 10^{-2} \text{ Pa}$.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема оперативного дистанционного обнаружения микротечей воды возникает при контроле работоспособности ряда устройств, эксплуатируемых в условиях экстремальных энергетических и радиационных нагрузок, например, в твэлах ядерных реакторов, камерах токамаков и т.д. Так, она была отмечена в заключительном отчете по техническому проекту ИТЭР [1] как одна из существенных задач, не получивших пока достаточного решения. Здесь имеются в виду микротечи в системе охлаждения, через которые происходит натекание паров воды. В отчете установлена предельно допустимая глобальная граница натекания на уровне $10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, обусловленная требованием поддержания должной чистоты плазмы. Но поскольку камера состоит из примерно 10^3 индивидуальных частей, вероятность образования микротечей в которых принята в первом приближении сопоставимой, то возникает дополнительное требование: натекание в каждой такой части не должно превышать $10^{-10} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (или $2 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$). Тем самым задан необходимый уровень обнаружительной способности системы поиска, измерения и мониторинга микротечей, которую следует создать. Эта система должна обладать также достаточным пространственным разрешением, чтобы контролировать по возможности каждую из индивидуальных частей камеры по отдельности.

На рис. 1, воспроизведенном из доклада [2], показан в разрезе типичный фрагмент конструкции стенки камеры ИТЭР. Охлаждаемые панели первой стенки прикрывают охлаждаемые модули blankets, смонтированные на охлаждаемом вакуумном корпусе. Наиболее вероятно образование микротечей в модулях первой стенки и blankets. Их типичные габариты составляют $1 \times 1 \times 1,4 \text{ м}$. Следовательно, пространственное разрешение системы обнаружения должно быть не хуже 1 м.

Есть два сценария обнаружения и ремонта прохудившихся модулей. Рутинный сценарий: длительная остановка реактора, введение детектируемого маркера последовательно в каждый из пяти контуров теплоносителя, обнаружение с его помощью дефектного контура глобальной системой течеискания, извлечение 90 модулей, питаемых от него, наконец, индивидуальное обследование каждого из этих модулей в горячей камере и ремонт. Понятно, что этот длительный и дорогой путь может быть использован лишь в случае крайней необходимости. Поэтому в техническом проекте предусмотрен другой сценарий: обнаружение дефектного модуля во время паузы подходящей системой поиска микротечей и замена этого модуля на месте с помощью манипулятора. Конечно, реализация этого сценария возможна только при наличии соответствующей системы поиска, которую надо создать.

В составе технического проекта ИТЭР был выполнен определенный объем НИОКР по методам обнаружения течей. В частности, был предложен спектроскопический метод обнаружения течи по ИК-линии кислорода, возбуждаемой в тлеющем разряде, однако достигнутая обнаружительная способность оказалась недостаточной — всего $10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, при пространственном разрешении несколько м^2 . Хорошее пространственное разрешение могут дать лазерные методы (по резонансной флуоресценции и поглощению),

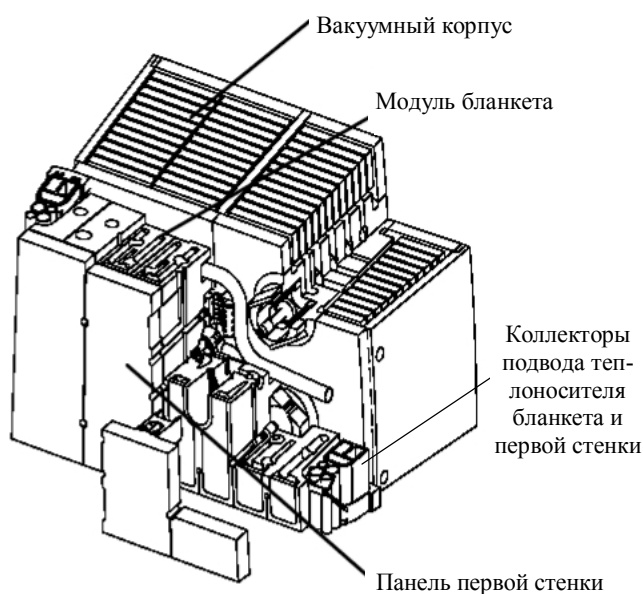


Рис. 1. Конструкция стенки камеры ИТЭР, вид со стороны плазмы (модуль условно разрезан, первая стенка отодвинута)

но их обнаружительная способность оказалась не лучшей. Обсуждаются предложения о введении в воду каких-либо газообразных маркеров (например, ксенона), но обнадеживающих оценок их эффективности пока нет. Гелиевый течеискатель обладает необходимой чувствительностью, но его применение требует полной осушки системы охлаждения, т.е. для оперативного контроля он не пригоден.

В этой ситуации мы обратили внимание на принципиальную возможность достижения требуемых значений обнаружительной способности и пространственного разрешения путем измерения интенсивности излучения в полосе $0-0$ радикала OH^* [3, 4], возбуждаемой в газовой «шапке» над течью вспомогательным тлеющим разрядом. В [3] было установлено, в частности, что в типичных условиях ИТЭР при давлении воды в системе охлаждения камеры 4 МПа, температуре 450 К и длине цилиндрического канала отверстия 1 см скорость поступления воды составит $1,5 \cdot 10^{-4}$ Па·м³/с (или $3 \cdot 10^{16}$ с⁻¹) через отверстие радиусом 1 мкм, 10^{-8} Па·м³/с — через отверстие радиусом 0,1 мкм и 10^{-10} Па·м³/с — через отверстие 0,03 мкм. Скорость потока в канале отверстия v_k составит, соответственно, 1 м/с, 1 см/с и 0,1 см/с. Таким образом, основной интерес представляют течи через субмикронные отверстия $r < 0,1$ мкм. Обнаружить такие течи известными методами входного контроля изделия практически невозможно. Кроме того, такие микротечи возникают, как правило, в процессе эксплуатации изделия и, постепенно расширяясь, могут привести к аварийной ситуации.

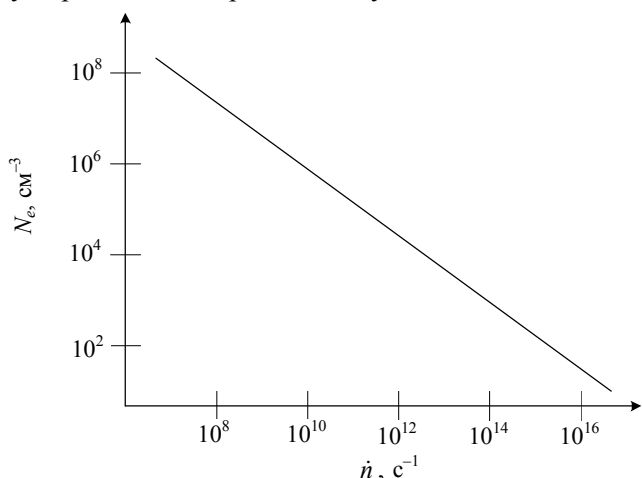


Рис. 2. Минимальная концентрация N_e быстрых электронов над «точечной» течью, необходимая для обнаружения натекания $\dot{n}$ спектроскопическим методом по полосе $0-0$ OH^*

В [4] был проведен детальный расчет обнаружительной способности и пространственного разрешения системы наблюдения подобной «точечной» течи на базе компактного автоматического спектрометра «Сирис-УФ» [5]. На рис. 2 приведен полученный график величины натекания $\dot{n}$ (с⁻¹), которое можно обнаружить в зависимости от концентрации быстрых электронов $v_e \sim 10^8$ см·с⁻¹ в зоне отрицательного свечения тлеющего разряда над «точечной» течью. Как видно на графике, требуемая обнаружительная способность вполне достижима. Пространственное разрешение составляет ~ 10 см и ограничивается только диафрагмой поля зрения. Реальность предлагаемого метода была подтверждена в [4] экспериментально.

Рассмотренная модель может быть применена в условиях ИТЭР также и для аппроксимации натекания через короткие трещинки в панели первой стенки. Однако, как видно на рис. 1, значительно больше течей может образовываться внутри модулей. Сложность их диагностики определяется тем, что они скрыты от прямого наблюдения самой конструкцией стенки. В данной статье мы рассмотрим возможность обнаружения натекания через такие скрытые течи.

МОДЕЛЬ СКРЫТОЙ ТЕЧИ

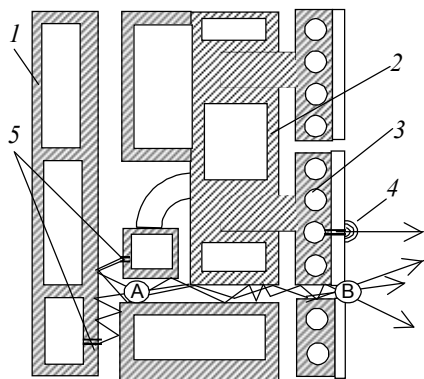


Рис. 3. Схема возможных траекторий миграции молекул воды: 1 — вакуумный корпус; 2 — модуль blankets; 3 — первая стенка; 4 — «точечная» микротечь; 5 — «скрытые» микротечи; АВ — щель между модулями

На рис. 3 схематически показано сечение типичного участка стенки камеры ИТЭР (без соблюдения пропорций) и обозначены основные варианты возможного расположения микротечей.

Как видно на рисунке, молекулы H_2O , инжектированные скрытыми течами, должны заполнить многочисленные пазухи и каналы, прежде чем они вылетят через щели между модулями в камеру. Во всех этих объемах на этапе обезгаживания стенок давление газа будет несколько выше, чем в камере, но все же останется достаточно низким, так что длина свободного пробега молекул H_2O будет

ограничиваться только стенками, расстояние между которыми варьируется в пределах нескольких сантиметров. Это означает, что:

- молекулы H_2O быстро приобретут приблизительно максвелловское распределение по скоростям с температурой, близкой к температуре стенок;
- поток молекул Q ($\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$) будет течь в молекулярном режиме;
- перепад давления по длине канала ΔP (Па) будет определяться его проводимостью U ($\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$): $\Delta P = Q/U$;
- установится квазистационарное распределение давления по каналам и пазухам;
- независимо от этого распределения поток газа через щели в камеру будет равен скорости натекания через течи.

С учетом этих соображений была рассмотрена простейшая модель скрытой течи.

Для полного числа молекул H_2O в некоторой щели между модулями АВ было получено выражение

$$N_{\text{полное}} = ab \int_0^l N(x) dx \ln \left(\frac{1}{v_m} + 3 \cdot 10^{-4} \frac{l}{b} \right), \quad (1)$$

где a , b , l — длина, ширина и глубина щели соответственно; множитель $3 \cdot 10^{-4}$ имеет размерность с/см. Первое слагаемое отражает эффект накопления молекул в щели за счет многократных отражений от стенок, второе обусловлено конечной проводимостью канала щели и образующимся вследствие этого перепадом давления. Как видно из этой формулы, основной вклад обусловлен перепадом давления, поскольку значение v_m лежит в диапазоне 10^3 — 10^5 см/с. Приняв $\frac{l}{b} \approx 100$, $l = 100$ см, окончательно получим

$$N_{\text{полное}} \approx 3 \dot{n} \text{ молекул}. \quad (2)$$

Это количество на 2—3 порядка превышает предельное число молекул, которые заключены при той же скорости натекания в «шапке» над точечной течью.

Таким образом, при наблюдении скрытой течи в принципе можно достичь даже более высокой обнаружительной способности, чем при наблюдении точечной течи на лицевой панели, но для этого необходимо выполнить следующие, отнюдь не тривиальные условия: обеспечить не менее эффективное возбуждение молекул во всем объеме глубокой щели и создать систему наблюдения и регистрации излучения, способную «заглянуть» вглубь каждой щели. Сложность выполнения этих условий обусловлена спецификой ИТЭР.

ВОЗБУЖДЕНИЕ МОЛЕКУЛ В ОБЪЕМЕ ЩЕЛИ

Как известно, глубина щелей в стенке камеры ИТЭР варьируется в пределах 0,1—1,0 м. При небольших глубинах весьма эффективное возбуждение молекул, причем по всему объему щели одновременно, можно обеспечить, переводя тлеющий разряд в хорошо изученный режим «полого катода». В условиях ИТЭР это вполне осуществимо. Эффективность возбуждения, как и в случае точечной течи, определяется частотой $N_e \overline{\sigma v_e}$, но в режиме полого катода она несколько выше, чем в обычном тлеющем разряде. Другое дело — зажигание разряда в щелях глубиной $l \sim 1$ м, имеющих огромный объем alb . Вообще говоря, это требует особого, мало изученного режима, и пока трудно сказать, насколько он совместим с условиями ИТЭР, необходимы специальные экспериментальные исследования.

Альтернативные способы возбуждения также хорошо известны — это простреливание щели лазерным лучом либо пучком электронов. Эффективность единичных актов возбуждения при этом велика, но принципиальный недостаток заключается в том, что простреливаемый объем всегда на много порядков меньше полного объема щели, т.е. обнаружительная способность будет резко снижена.

Таким образом, более перспективным представляется все же режим «полого катода».

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА

В экспериментах, описанных в [4], скорость натекания воды была большой, $\sim 10^{15} \text{ с}^{-1}$. Поэтому в следующей серии экспериментов, выполненных также на установке ПР-2, была поставлена задача: об-

наружить свечение полосы 0—0 гидроксила при минимальной фоновой концентрации паров воды в установке, соответствующей уровню остаточного давления буферного газа. В этом случае пары воды через натекаль не вводились, в качестве буферного газа использовались дейтерий, аргон или воздух. С помощью монохроматора МУМ выделялась область спектра от 260 до 350 нм и с помощью ФЭУ-142 измерялось распределение интенсивности в ней с целью обнаружения полосы гидроксила $\text{OH } \lambda = 306 \text{ нм}$.

Условия проведения экспериментов:

— остаточное давление $1 \cdot 10^{-5}$ торр, затем напускался аргон до давления $2 \cdot 10^{-4}$ торр, ток разряда 60 мА, напряжение 1,8 кВ, $n_e \sim 10^{10}$, входная щель монохроматора 4 мм. Измеренное распределение интенсивности свечения плазмы показано на рис. 4, а;

— напускался дейтерий до давления $6 \cdot 10^{-4}$ торр, ток разряда 200 мА, напряжение 2 кВ, $n_e \sim 10^{10}$, входная щель монохроматора 1 мм. Измеренное распределение интенсивности свечения плазмы показано на рис. 4, б;

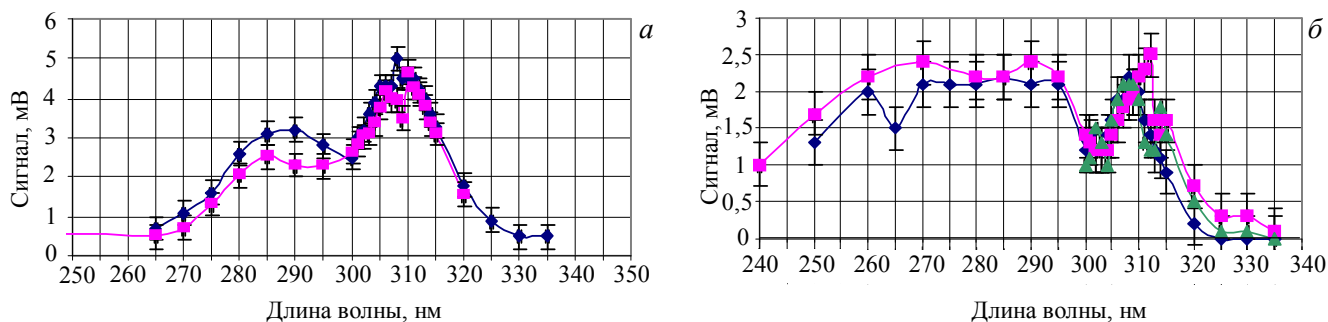


Рис. 4. Спектры свечения аргонной (а) и дейтериевой плазмы (б)

— напускался дейтерий до давления $6 \cdot 10^{-3}$ торр, ток разряда 200 мА, напряжение 2 кВ, $n_e \sim 10^{10}$, входная щель монохроматора 4 мм. Измеренное распределение интенсивности свечения плазмы показано на рис. 5, а;

— буферный газ—воздух, давление $2 \cdot 10^{-4}$ торр, ток разряда 60 мА, напряжение 1,8 кВ, $n_e \sim 10^{10}$, входная щель монохроматора 4 мм. Измеренное распределение интенсивности свечения плазмы показано на рис. 5, б.

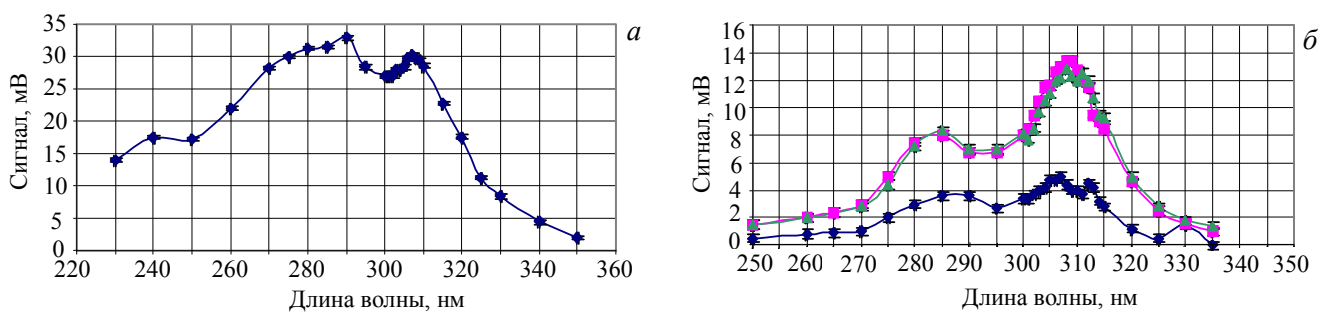


Рис. 5. Спектры свечения дейтериевой (а) и воздушной плазмы (б)

В каждом случае было проведено по несколько измерений, воспроизводимость результатов удовлетворительная.

Как видно на приведенных рисунках, вид спектра довольно слабо зависит от буферного газа, хотя примеси могут активно влиять на эффективность возбуждения гидроксила. По-видимому, он определяется, главным образом, присутствием во всех случаях одного и того же легкоионизируемого компонента. В выделенном диапазоне в состав спектра могут в принципе входить, помимо полосы 0—0 ОН, также полосы γ -системы NO и 3^+ системы CO. Относительные распределения интенсивности в этих ЭКВ-полосах определяются факторами Франка—Кондона, оттением полос, а также колебательной и вращательной температурой. Для оценок разумно принять типичные значения $T_{\text{vib}} \sim (2—3)10^3 \text{ K}$, $T_{\text{rot}} \sim T_0$. На рис. 6 показаны в относительных единицах реконструкции распределений интенсивностей в этих полосах, построенные с учетом аппаратной функции нашей измерительной установки. Как видно из сопоставления рис. 4—6, наблюдаемый спектр в аргоне и воздухе хорошо соответствует расчетной структуре спектра ОН. В нем нет даже следов полос CO и NO. Полоса 0—0 интенсивна и в дейтерии.

Концентрацию молекул воды в остаточном газе можно оценить на основе ранее проведенных масс-спектрометрических измерений. Масс-спектр в режиме горения разряда в дейтерии, близкого к нашему, показан на рис. 7, на котором показано, что фоновая концентрация паров воды в установке ПР-2 составляет примерно 1% от концентрации буферного рабочего газа.

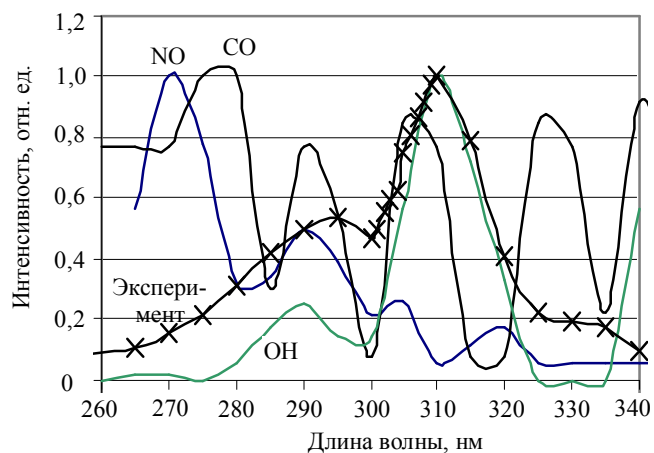


Рис. 6. Реконструкция распределения интенсивностей полос NO, CO и OH

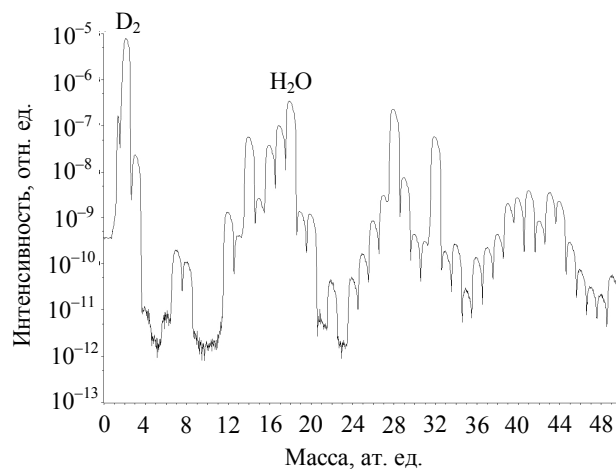


Рис. 7. Массовый анализ газа в камере ПР-2

Это означает, что нам удалось зафиксировать свечение гидроксила OH в разряде при давлении $2 \cdot 10^{-4}$ торр с концентрацией паров воды на уровне 10^{10} ч/см³. По порядку величины это уже довольно близко к требуемому уровню обнаружительной способности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотрена модель скрытых течей и расчетами показана возможность их обнаружения. Экспериментально подтверждена высокая обнаружительная способность предлагаемого метода. Возможность и способ эффективного возбуждения молекул по всему объему глубокой (~1 м) щели между модулями требуют специального рассмотрения.

Работа поддержана грантом РФФИ № 06-08-00254а.



Александр Борисович Антипенков, инженер, один из разработчиков проекта ИТЭР



Олег Николаевич Афонин, н.с., кандидат т.н.



Владимир Николаевич Колесников, ведущий н.с., кандидат ф.-м.н.



Игорь Викторович Визгалов, старший н.с., кандидат ф.-м.н.



Валерий Александрович Курнаев, зав. кафедрой, доктор ф.-м.н., профессор

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Технический** проект ИТЭР. Заключительный отчет. ITER, Final Design Report, 2001, G 31 DDD 14 01-07-19 W 0.1, section 3.1 «Vacuum Pumping and Fuelling Systems».
2. **Ioki K., Chuayanov V.** Convergence of design and fabrication methods for ITER vacuum vessel and in-vessel components. — In: Proc. of the 20th IAEA Fusion Energy Conf. Vilamoura, Portugal, 1—6 November 2004.
3. **Визгалов И.В., Курнаев В.А., Колесников В.Н., Мозгрин Д.В., Смирнов В.М., Трифонов Н.Н.** — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2002, вып. 3—4, с. 125—136.
4. **Афонин О.Н., Визгалов И.В., Колесников В.Н., Курнаев В.А., Трифонов Н.Н.** — В сб.: Тезисы докладов X Всероссийской конференции по диагностике высокотемпературной плазмы. Троицк, 2003, с. 22.

5. Афонин О.Н., Колесников В.Н., Павлычева Н.К., Фуников А.М. — Приборы и техника эксперимента (ПТЭ), 2004, № 2, с. 164—165.
6. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. — М.: Высшая школа, 1990.

Статья поступила в редакцию 26 июля 2007 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2007, вып. 4, с. 44—50.

УДК 533.9.082.5

ЭНДОСКОП ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ В ВИДИМОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА НА ТОКАМАКЕ Т-10. КОНСТРУКЦИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

А.А. Медведев, Е.В. Александров, Д.К. Вуколов, К.Ю. Вуколов, А.В. Горшков (РНИЦ «Курчатовский институт»)

В работе приведены описание конструкции и параметры эндоскопа для видимой и ближней ИК-областей спектра, установленного недавно на токамаке Т-10. Эндоскоп обеспечивает тангенциальное наблюдение сечения, в котором расположены графитовые лимитеры установки. При помощи эндоскопа проведены измерения пространственного распределения излучения для различных областей спектра, а именно: на линиях H_α , H_β , CVI (529 нм), в «окне» тормозного континуума (523,0—524,2 нм), в интервале 700 ± 5 нм, где присутствует большое количество линий молекулярного водорода, а также в ближнем ИК-диапазоне.

ENDOSCOPE FOR VISIBLE RANGE MEASUREMENTS ON T-10 TOKAMAK. DESIGN AND FIRST EXPERIMENTAL RESULTS. A.A. MEDVEDEV, E.V. ALEXANDROV, D.K. VUKOLOV, K.Yu. VUKOLOV A.V., GORSHKOV. In the paper we describe the design and parameters of the endoscope for the visible and the near IR regions of spectrum; this endoscope was recently installed on the T-10 tokamak. The arrangement of the instrument enables the tangential observation of the cross-section where the graphite limiters are situated. With the use of the endoscope we have performed measurements of the space distribution of radiation intensity at different spectral regions, namely: at the H_α , H_β , and CVI (529 nm) lines, at the bremsstrahlung «window» 523,0 to 524,2 nm, at the range of 700 ± 5 nm (hydrogen molecular lines), and at the near IR region.

ВВЕДЕНИЕ

В нескольких оптических диагностиках ИТЭР [1, 2] планируется использование входных оптических систем, основанных на эндоскопической схеме. Такое решение обладает рядом достоинств. Эндоскоп имеет большую входную угловую апертуру (до 70 — 80°), позволяющую обеспечить обширную зону наблюдения. При этом, поскольку световой пучок между входным узлом и фокусирующим объективом почти параллелен, он может без использования дополнительной фокусирующей оптики быть проведен через длинный диагностический канал небольшого диаметра. Конструкция входного узла эндоскопа позволяет избежать ухудшения оптических свойств первого зеркала из-за взаимодействия с плазмой даже без использования защитной шторки. Поэтому эндоскопические оптические системы применяются на многих современных токамаках (TEXTOR, JET и др.).

Было принято решение о создании уменьшенного прототипа входной оптической системы ИТЭР, необходимого для апробации ряда новых конструкторских решений и проверки разработанных технологий изготовления оптических элементов (в частности, металлических зеркал). Вообще говоря, для апробации можно было ограничиться стендовыми измерениями параметров упрощенного макета, однако мы сочли целесообразным изготовить полнофункциональную оптическую систему, которую можно использовать для оптических измерений на токамаке Т-10. Как показал предварительный анализ, помимо простого визуального контроля состояния внутренней поверхности вакуумной камеры, такая система может быть использована для ряда экспериментов по исследованию материального и энергетического баланса плазмы. Также очень важно, что оптическая система, установленная в токамаке, позволяет провести исследование поведения входных зеркал, изготовленных из различных материалов и по различным технологиям, в условиях действующей термоядерной установки.