

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 $70\text{—}80^\circ$), 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.

ВЫБОР ГЕОМЕТРИИ НАБЛЮДЕНИЯ И ОПТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИСТЕМЫ

При выборе геометрии наблюдения мы исходили из того, что для Т-10 особенно важно обеспечение возможности тангенциального наблюдения лимитерного сечения установки. До последнего времени такой ракурс был невозможен из-за отсутствия в установке тангенциальных патрубков. Между тем спектроскопические исследования лимитерной зоны плазмы в Т-10 крайне важны, поскольку именно здесь процессы рециклинга наиболее интенсивны [3].

В камере установки Т-10 в настоящее время размещены два лимитера: апертурный, имеющий форму кольца с внутренним диаметром около 34 см (диафрагма), и подвижный (рис. 1). Наиболее удобным для обеспечения тангенциального наблюдения лимитерного сечения установки является размещение в малом диагностическом патрубке вакуумной камеры токамака Т-10, расположенном между сечениями А и D установки (рис. 2).

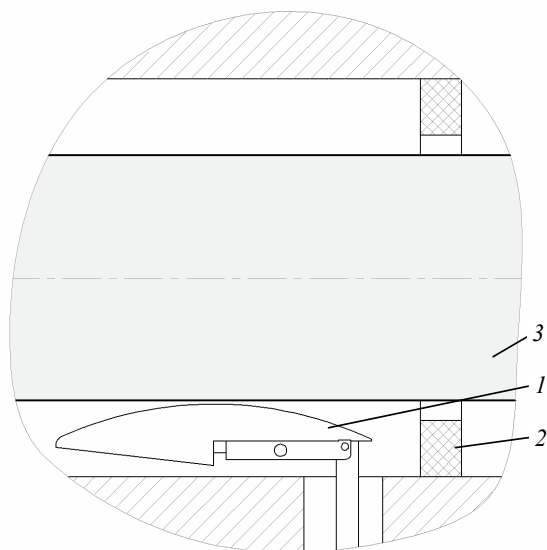


Рис. 1. Вертикальный разрез лимитеров Т-10: 1 — подвижный лимитер; 2 — кольцевой апертурный лимитер (диафрагма); 3 — плазменный шнур

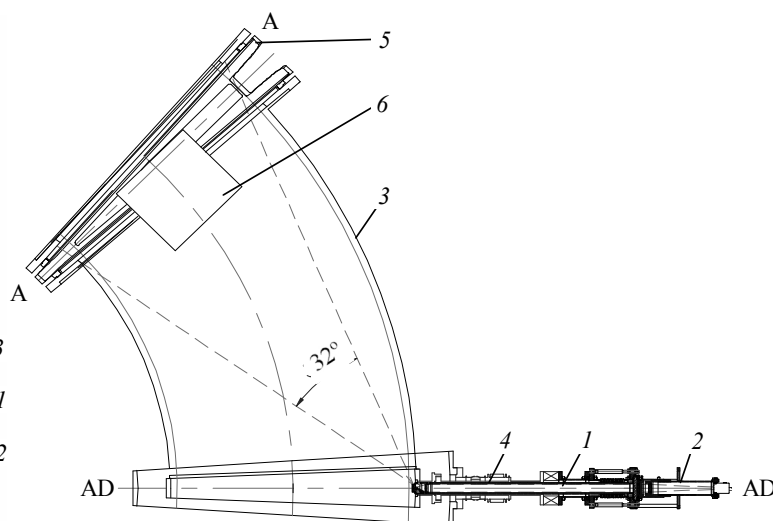


Рис. 2. Расположение и геометрия наблюдения широкоугольной оптической системы: 1 — вакуумная часть системы; 2 — внешняя (атмосферная) часть; 3 — вакуумная камера; 4 — патрубок; 5 — кольцевой апертурный лимитер; 6 — подвижный лимитер

В качестве исходных данных для расчета оптической системы использовались следующие параметры:

Спектральный диапазон, нм ...	400—1000
Входная угловая апертура не менее, град ...	32
Диаметр светового пучка на выходе патрубка не более, мм ...	27
Диаметр изображения на поверхности детектора, мм ...	4,8
Линейное увеличение ...	1/160
Разрешающая способность не менее, линий ...	600

Поскольку наряду с измерениями в видимой области спектра при помощи эндоскопа предполагалось проводить термографические измерения, спектральный диапазон оптики желательно расширить в ближний ИК-диапазон.

Для того чтобы конус наблюдения включал кольцевой и подвижный лимитеры, необходимо обеспечить входную угловую апертуру системы не менее 32°.

Диаметр светового пучка на выходе из патрубка ограничивается внутренним диаметром патрубка, размерами механических элементов эндоскопа (в первую очередь внутренним диаметром цилиндрического тубуса) и небольшим зазором между границей пучка и внутренними стенками тубуса, позволяющим избежать появления рассеянного света при разъюстировке системы.

В качестве детектора предполагается использовать камеру с типоразмером ПЗС кристалла 1/2 дюйма. Такие камеры имеют размер светочувствительной области около 5×7 мм. Поскольку изображение на выходе оптической системы имеет круглую форму и должно быть вписано в размер светочувствительной области, выбираем его диаметр равным 4,8 мм.

Разрешающая способность должна позволять полностью использовать разрешение существующих лабораторных ПЗС-камер, которое в большинстве случаев составляет не менее 500—600 линий.

При разработке концепции оптической системы учитывалось, что первым оптическим элементом, обращенным к плазме, должно быть зеркало, что позволяет проводить исследования, связанные с деградацией коэффициента отражения металлических зеркал. Для наибольшей релевантности упомянутых исследований желательно, чтобы конструкция узла входного зеркала прототипа была построена на базе той же концепции, что применена для узла первого зеркала диагностической системы бальмеровской спектроскопии ИТЭР. Более того, необходимо, чтобы параметр S_p/L^2 , где S_p — площадь входного зрачка, L — расстояние между входным зрачком и поверхностью зеркала, по порядку величины совпадал с таковым в ИТЭР. Использовать же зеркала в качестве промежуточных элементов в Т-10 смысла не имеет, поскольку использование отражательной оптики в узком канале сильно снижает лучевую емкость системы, а с плазмой промежуточные зеркала взаимодействовать не будут.

Исходя из изложенных соображений, была разработана принципиальная оптическая схема, показанная на рис. 3. На входе системы расположена апертурная диафрагма с небольшим отверстием (входным зрачком). За ней располагается плоское входное зеркало, которое обеспечивает ориентацию оптической оси системы таким образом, чтобы последняя проходила через центр лимитерного сечения. Конус световых лучей преобразуется входным объективом в параллельный пучок. При этом изображение объекта формируется за этим объективом на расстоянии, примерно равном фокусному. Пройдя через вакуумное окно, световой пучок попадает на выходной объектив, который преобразует промежуточное изображение объекта с таким линейным увеличением, чтобы изображение на детекторе имело необходимые размеры. Эскиз узла входного зеркала системы показан на рис. 4. В качестве материала входного зеркала на первом этапе работ было решено использовать поликристаллический молибден, который является одним из материалов-претендентов для первого зеркала оптических систем ИТЭР.

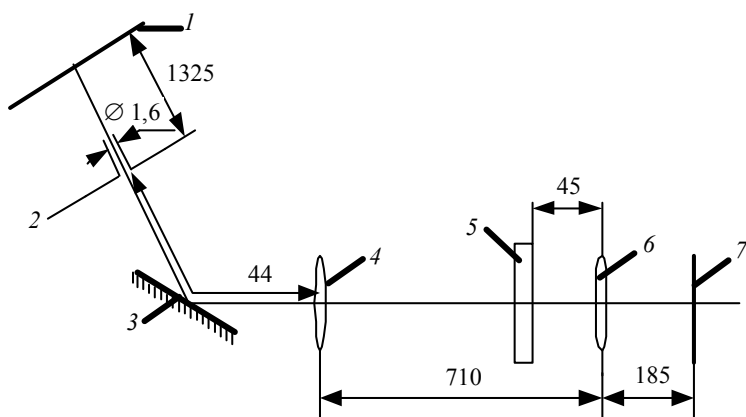


Рис. 3. Исходная оптическая схема эндоскопа: 1 — объект, размер 800 мм; 2 — апертурная диафрагма; 3 — зеркало; 4 — входной объектив, световой диаметр 27 мм; 5 — вакуумное окно (кварцевое окно, толщина 10 мм, диаметр 34 мм); 6 — выходной объектив; 7 — плоскость изображения

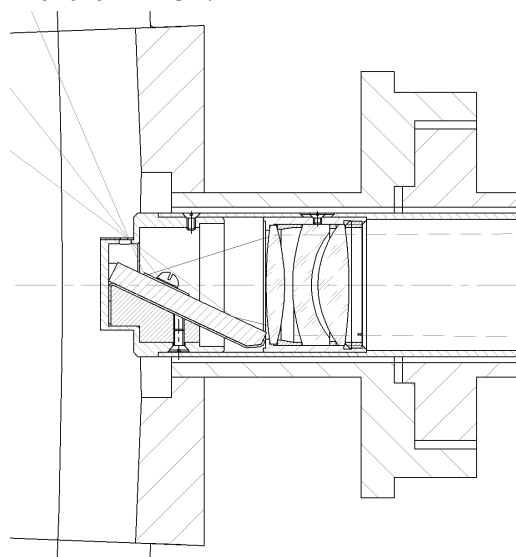


Рис. 4. Узел входного зеркала

Очевидно, что в такой схеме лучевая емкость диагностического канала (в нашем случае — тубуса эндоскопа) будет максимально использована в том случае, когда периферийные световые лучи примерно параллельны стенкам. Это условие соблюдается, если изображение отверстия апертурной диафрагмы создается входным объективом на выходе из канала. Отсюда определяем фокусное расстояние входного объектива:

$$F = \frac{a_2 a_1}{a_2 + a_1},$$

где a_1 — расстояние между плоскостью апертурной диафрагмы и главной плоскостью входного объектива; a_2 — расстояние между главной плоскостью входного объектива и выходом из диагностического канала. Расстояния измеряются вдоль оптической оси системы.

Диаметр входного зрачка рассчитывается по формуле

$$d = D \frac{a_1}{a_2},$$

здесь D — диаметр светового пучка на выходе канала.

После разработки концепции оптической системы и создания эскизного проекта, позволившего уточнить необходимые размеры, была проведена серия габаритно-абберационных расчетов. Моделирование проводилось при помощи кода Optical Design Program ZEMAX-SE.

В качестве исходных данных использовались описанные технические требования, а также базовые размеры, приведенные на рис. 3.

Уже после первой серии расчетов стало ясно, что получить требуемую разрешающую способность даже для одной длины волны при использовании однолинзовых объективов не удастся. Поэтому в качестве входного и выходного объективов были использованы многолинзовые системы. Оптимальным оказалось применение трехлинзового входного и двухлинзового выходного объективов, изготовленных из различных типов оптического стекла (КУ-1, К8 и ТФ10). Расчет показал, что в этом случае качество изображения на поверхности детектора удовлетворяет поставленным требованиям (рис. 5). Полная оптическая схема системы показана на рис. 6.

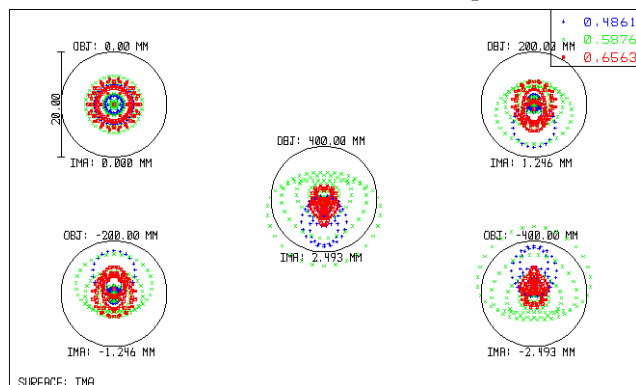


Рис. 5. Спот-диаграмма для выхода оптической системы

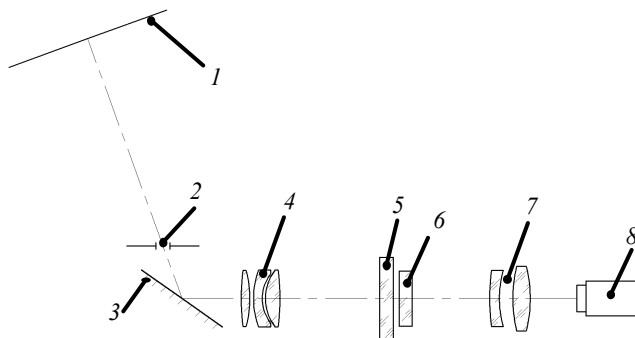


Рис. 6. Полная оптическая схема эндоскопа: 1 — объект; 2 — входной зрачок; 3 — зеркало; 4 — входной объектив; 5 — кварцевое окно; 6 — оптический фильтр; 7 — выходной объектив; 8 — видеокамера

КОНСТРУКЦИЯ

Эндоскоп (рис. 7) состоит из узла, размещенного в вакуумной зоне I, и внешней (атмосферной) части II.

Оптический тракт вакуумной части конструкции состоит из тубуса 1, на обращенном к плазме торце которого закреплен узел входного зеркала 2. Зрачок 3 расположен на боковой поверхности передней части насадки. Внутри тубуса установлен объектив 4 в цилиндрическом корпусе, конструкция крепления которого к тубусу позволяет регулировать положение объектива вдоль оси тубуса в пределах нескольких миллиметров для фокусировки системы. На цилиндрической поверхности тубуса имеются отверстия для входа и выхода газа. Внешний фланец тубуса соединяется с патрубком токамака через переходник системы импульсного напуска газа 5 и сильфонный узел 6, который позволяет перемещать входную часть оптической системы в осевом направлении. Такое перемещение необходимо, поскольку положение поверхности внутренней камеры установки изменяется из-за механических и тепловых на-

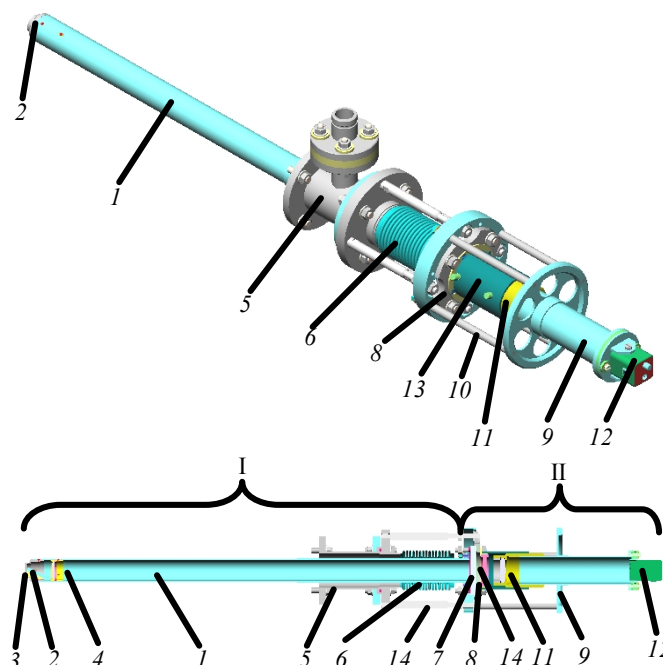


Рис. 7. Общий вид и горизонтальный разрез эндоскопа: I — вакуумная часть; II — атмосферная часть; 1 — тубус; 2 — насадка; 3 — зрачок; 4 — линзовый объектив; 5 — переходник системы газонапуска; 6 — сильфонный узел; 7 — кварцевое окно; 8 — обойма-держатель фильтра; 9 — тубус; 10 — клетка; 11 — линзовая насадка; 12 — видеокамера; 13 — подвижный кожух; 14 — интерференционный фильтр

грузок, а длина части конструкции, выходящая внутрь камеры, должна быть минимальной (4—6 мм), чтобы избежать нежелательного взаимодействия с плазмой. Границей вакуумной зоны тракта служит кварцевое окно 7, расположенное на фланце сильфонного узла.

Атмосферная часть тракта состоит из тубуса 9, вставленного в цилиндрическую клетку 10. На обращенный к окну резьбовой конец тубуса навинчивается насадка 11 с размещенным внутри объективом, противоположный конец тубуса снабжен фланцем для крепления держателя видеокамеры 12. Клетка закрепляется болтами на фланце сильфонного узла, а дополнительные болты, вворачиваемые в резьбовые отверстия на ее фланце, позволяют производить юстировку для обеспечения соосности обеих частей тракта. Конструкция клетки обеспечивает удобный доступ к деталям крепления и обойм-держателю оптического фильтра 8. На корпус линзовой насадки надет подвижный цилиндрический кожух 13, предохраняющий оптический тракт от паразитной засветки.

После изготовления, сборки и юстировки были проведены стендовые испытания прибора. Наряду с другими параметрами было измерено разрешение оптической системы, которое составило не менее 720 линий, что удовлетворяет поставленным требованиям и близко к результатам численного моделирования.

ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

После стендовых испытаний оптическая система смонтирована и налажена на установке. На базе серийной телевизионной камеры фирмы Watec WAT-902H подготовлена временная система регистрации изображения. К сожалению, низкая производительность рабочей станции видеозахвата ограничивала разрешающую способность системы на уровне около 320 линий. Кроме того, камеры данного типа имеют нелинейную электронную АРЧ, что сильно осложняет абсолютные измерения.

В течение кампаний Т-10 2004—2005 гг. при помощи эндоскопа были проведены измерения пространственного распределения яркости излучения в различных областях спектра, в том числе 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.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предварительная юстировка эндоскопа на установке проводилась перед началом кампаний при помощи вводимой в вакуумную камеру лампы (рис. 8).

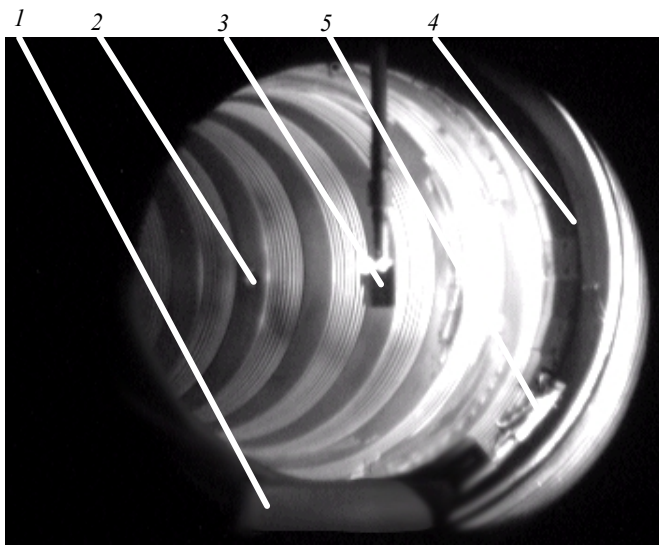


Рис. 8. Вид вакуумной камеры через эндоскоп: 1 — подвижный лимитер; 2 — малый диагностический патрубок, через который в рассматриваемых режимах осуществлялся газонапуск; 3 — лампа подсветки; 4 — апертурный лимитер (диафрагма); 5 — замок диафрагмы

В начале работы были проведены измерения на линии H_{β} (рис. 9). Яркость этой линии примерно пропорциональна потоку атомов в плазменный шнур. Как видно на рисунке, длина пробега атомов значительна, они достигают центральных областей плазменного шнура. Тангенциальная геометрия наблюдения (при условии абсолютной калибровки системы) дает уникальную возможность определить профиль ионизационного источника частиц, определяемого атомами водорода, поступающими с лимитеров.

При температуре поверхности менее 1000 К основной (80—90%) поток нейтралов поступает с поверхности графита в виде молекул. Оценить его можно в результате измерений яркости молекулярных линий водорода. Распределение яркости для диапазона длин волн 700 ± 5 нм, где расположены наиболее интенсивные линии во-

дорода, показано на рис. 10. К сожалению, в этом диапазоне наряду с молекулярными водородными линиями имеются яркие линии низкоионизованного углерода. Поэтому для измерения молекулярных линий водорода в дальнейшем решено перейти на более узкий спектральный участок в районе 600 нм, свободный от ярких атомарных линий примесей.

На рис. 11 показаны траектории макрочастиц. Макрочастицы, которые, по-видимому, представляют собой отслоившиеся фрагменты углеводородной пленки, покрывающей стенку камеры, наблюдаются в большинстве импульсов. Траектории таких частиц весьма разнообразны.

Измерения теплового излучения проводили на длине волны около 900 нм. Типичная картина нагрева лимитеров показана на рис. 12. В некоторых случаях во время электронно-циклотронного нагрева наблюдается аномальный (до 1800 °С) нагрев внутренней части диафрагмы (рис. 13). Как показывает расчет, мощность необходимая для такого нагрева, достигает 0,6 МВт, что составляет значительную долю полной вводимой в плазму мощности. Механизм этого явления пока не ясен.

Наличие эндоскопа дало возможность установить причину интересной нештатной ситуации: регулировка радиального положения подвижного лимитера привела к невозможности получения рабочего разряда. Оказалось, что во время регулировки произошла поломка элемента конструкции лимитера, в результате чего последний принял вертикальное положение (рис. 14).

После года работы молибденовое входное зеркало было демонтировано и измерена зависимость его коэффициента отражения от длины волны. Проведенные измерения показали, что деградация коэффициента отражения отсутствует.

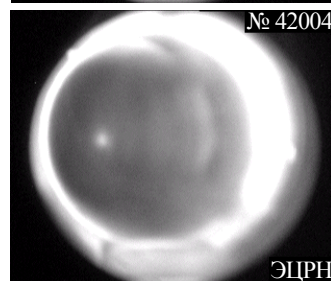
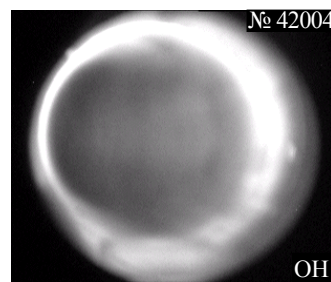
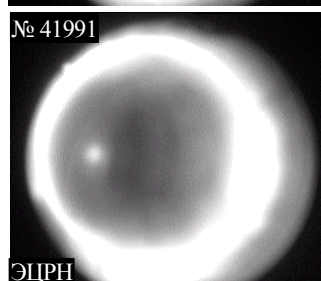
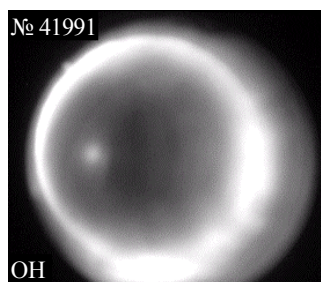


Рис. 9. Распределение яркости линии H_{β}

Рис. 10. Распределение яркости молекулярных линий водорода

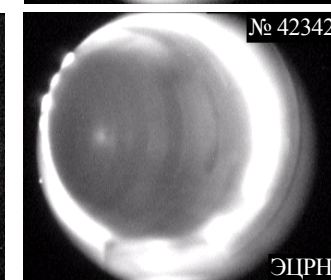
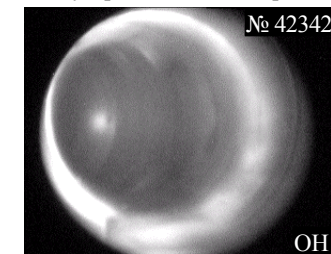
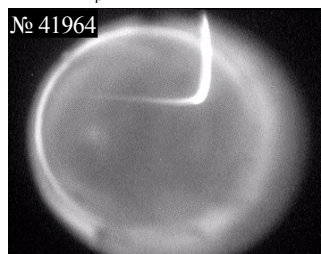


Рис. 11. Траектории макрочастиц

Рис. 12. Распределение интенсивности ИК-излучения по поверхности лимитеров

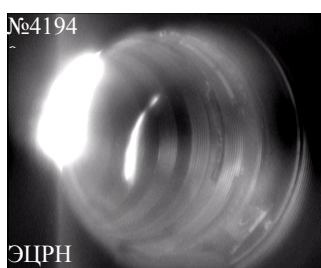


Рис. 13. Аномальный нагрев диафрагмы

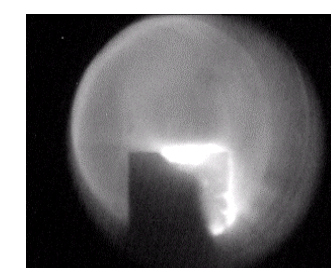


Рис. 14. Положение лимитера после поломки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали предварительные эксперименты, при помощи эндоскопа возможно решение целого ряда задач, например, визуальный контроль состояния лимитеров и прилегающих участков лайнера, мониторинг взаимодействия плазмы с лимитерами, измерение распределения температуры по поверхности лимитеров, измерение величины потока и профиля концентрации нейтралов водорода, поступающих в плазменный шнур с лимитеров, и ряд других.

Для дальнейшей работы эндоскоп планируется оснастить детектором на базе охлаждаемой светочувствительной ПЗС-матрицы, сочлененной с электронно-оптическим преобразователем. Это позволит значительно повысить пространственное разрешение и чувствительность системы, а также увеличить в ряде экспериментов частоту кадровой развертки.

Работа выполнена в рамках контрактов с Управлением по атомной науке и технике Федерального агентства по атомной энергии.



Александр Александрович Медведев, ведущий н.с., кандидат ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности



Евгений Васильевич Александров, начальник КБ



Дмитрий Константинович Вуколов, инженер II категории



Константин Юрьевич Вуколов, начальник лаборатории, кандидат ф.-м.н.



Алексей Владимирович Горшков, старший н.с., ветеран атомной энергетики и промышленности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Medvedev A.A., Alexandrov E.V., Gorshkov A.V., Vukolov K.Yu.** Conception of the ITER H Alpha Spectroscopy Diagnostic System. Rep. IAE-6332/7. Russian Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, 2004.
2. **Sugie T., Costley A., Malaquias A., Medvedev A., Walker C.** Spectroscopic measurements system for ITER divertor plasma: divertor impurity monitor. — In: Proc. 30th EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys. St.-Petersburg, 7—11 July 2003, ECA, vol. 27A, P-4.63.
3. **Medvedev A.A., Pigarov A.Yu.** Study of the Plasma Neutral Component in T-10. Report IAE-6187/7. Russian Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, 2000.

Статья поступила в редакцию 1 августа 2007 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2007, вып. 4, с. 50—56.

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ИАЭ им. И.В. КУРЧАТОВА В 1965—1968 гг.

Обзор¹

М.К. Романовский

Разные колебания (продолжение)

В работе А.А. Веденова и др. [1] предложен оригинальный метод рассмотрения колебаний и неустойчивости слаботурбулентной плазмы. Он весьма прост для понимания и применим, когда колебания сильно различаются по величине: ВЧ-колебания представляются как квазичастицы, влияющие на движение частиц плазмы в низкочастотных колебаниях. Это позволяет просто и физически ясно описать взаимодействие ВЧ- и НЧ-колебаний, рассеяние волн частицами плазмы, взаимодействие с участием четырех квазичастиц.

¹ Продолжение. Начало обзора в ВАНТе. Сер. Термоядерный синтез, 2002—2006 гг., 2007 г., вып. 1—3.