УДК 621.039.6

МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ ЭНДОСКОПИЧЕСКАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ТОКАМАКА Т-10. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В.А. Вершков, Д.К. Вуколов, Э.О. Кулешин, А.А. Медведев

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В работе приведено описание модернизированной эндоскопической оптической системы, установленной на токамаке Т-10, а также первые экспериментальные результаты, полученные после модернизации диагностики. Основной целью описываемой системы является обеспечение возможности тангенциального наблюдения сечения, в котором расположены графитовые лимитеры установки и клапан системы газонапуска. Данная диагностика позволяет исследовать баланс частиц в плазме, что является важной темой в физике токамаков.

Ключевые слова: физика плазмы, токамак, эндоскопическая оптическая система, высокоскоростная видеокамера.

UPGRADE OF THE ENDOSCOPIC OPTICAL SYSTEM INSTALLED ON THE T-10 TOKAMAK. THE FIRST EXPERIMENTAL RESULTS

V.A. Vershkov, D.K. Vukolov, E.O. Kuleshin, A.A. Medvedev

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

This paper describes upgrade of the endoscopic optical system installed on the T-10 tokamak and the first experimental results obtained after this modernization. The main objective of the described system is to enable the tangential observation of the vacuum vessel cross-section where the graphite limiters and gas valve are situated. This endoscopic optical system makes possible an investigating of the particles balance in plasma, that is an important topic in the physics of tokamaks.

Key words: plasma physics, tokamak, endoscopic optical system, high-speed video camera.

ВВЕДЕНИЕ

Эндоскопические оптические системы применяются на многих современных токамаках. На токамаке Т-10 установлена эндоскопическая оптическая система, являющаяся уменьшенным прототипом оптической системы ИТЭР [1]. После нескольких лет удачной работы диагностики в условиях действующей термоядер-

ной установки было принято решение о модернизации эндоскопа с целью обеспечения возможности использования двух детекторов для наблюдения лимитерной области установки в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Использование высокоскоростной видеокамеры для видимой области спектра позволит исследовать материальный и энергетический баланс плазмы, в то время как ИК-камера в ближнем ИК-диапазоне позволит проводить термографические измерения.

ОПИСАНИЕ ДИАГНОСТИКИ

В камере установки Т-10 в настоящее время размещены два лимитера, изготовленные из графита (рис. 1): подвижный и апертурный, имеющий форму кольца с внутренним диаметром около 34 см (диафрагма). Исследования плазмы лимитерной области Т-10 крайне важны, так как именно здесь процессы рециклинга наиболее интенсивны [2].

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

Расположение описываемой системы (рис. 2) обеспечивает возможность тангенциального наблюдения сечений, в которых расположены графитовые лимитеры установки и клапан системы газонапуска (рис. 3).

Рис. 2. Схема расположения эндоскопа. Геометрия наблюдения: 1 — вакуумная часть; 2 — атмосферная часть; 3 — вакуумная камера; 4 — патрубок; 5 — диафрагма; 6 — подвижный лимитер; 7 — клапан

Рис. 3. Поле зрения эндоскопа без плазмы (а) и во время рабочего разряда (б): 1 — подвижный лимитер; 2 — диафрагма; 3 — замок диафрагмы; 4 — клапан; 5 — лампа подсветки

В результате модернизации обеспечена возможность одновременного использования двух детекторов для наблюдения лимитерной области установки в видимой и ближней инфракрасной областях спектра (рис. 4). Световой пучок делится на спектроделителе, отражающем видимый свет и пропускающем ИК-диапазон. Для работы в видимой области спектра используется высокоскоростная видеокамера с временным разрешением от 250 мкс до 100 мс. Для работы в ИК-области спектра будет использоваться видеокамера ближнего ИК-диапазона с временным разрешением 30 мс.

Рис. 4. Оптическая схема эндоскопа после модернизации: 1 — объект; 2 — зрачок; 3 — зеркало; 4 — входной объектив; 5 — окно; 6 — оптический фильтр; 7 — выходной объектив; 8 — спектроделитель; 9 — ИК-камера; 10 — высокоскоростная камера

ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Благодаря удачному выбору места размещения диагностики свечение в области клапана легко отделимо от свечения в области лимитеров (рис. 5). Это позволило провести калибровку диагностики с целью определения абсолютных притоков нейтронов дейтерия в плазменный шнур.

Значение притока дейтерия из клапана определялось из разности полного числа частиц, определённого по данным интерферометра, до и после отключения клапана системы газонапуска (рис. 6). Первый участок кривой соответствует росту плотности при открытом клапане. Второй участок кривой при закрытом клапане, когда плазменный шнур ещё с охлажденной периферией слабо взаимодействует с лимитерами. А на третьем участке кривой

Рис. 5. Свечение плазмы на линии D_α при открытом клапане

сильное взаимодействие плазмы с лимитерами. Был определён максимальный приток по приросту полного числа частиц при полном открытии клапана, составивший $4 \cdot 10^{20}$ частиц/с (рис. 7). Полученные значения притока дейтерия сопоставлялись с интегральной яркостью свечения линии D_α в области клапана системы газонапуска. При этом делалось простейшее предположение, что процессы ионизации дейтерия на диафрагме и от клапана одинаковы. Поскольку можно предположить, что эффективность усвоения в плазме потока от диафрагмы выше, то определённые таким образом полные притоки дают их нижнюю границу. Более детальный учёт процессов усвоения потоков от клапана и диафрагмы будет сделан в дальнейшем. В результате была откалибрована диагностика. Для определения притоков дейтерия с лимитеров был введён поправочный коэффициент $k = 4$, учитывающий тот факт, что клапан газонапуска находится вдвое дальше лимитеров.

Рис. 6. Полное число частиц до и после отключения клапана

Рис. 7. Полное число частиц при полном открытии клапана

Анализ яркости свечения плазмы в лимитерной области установки на линии D_α показал, что основным источником притока дейтерия в плазменный шнур являются лимитеры. Причём на подвижный лимитер приходится около 20%, а на диафрагму около 80% от общего притока дейтерия с лимитеров.

В программе литиезации проводился анализ свечения плазмы в лимитерной области на линии D_α . Литиезация проводилась путём однократного испарения образца лития в начале рабочего дня в сечении лимитеров. Для каждого импульса оценивались величина рециклинга и абсолютные притоки нейтралов дейтерия в плазму с лимитеров и из клапана системы газонапуска. Например, для импульса № 61 391 (второй импульс после литиезации) усвоенная в плазме часть притока из клапана составляла $3,7 \cdot 10^{20}$ частиц/с. С 450 по 750 мс интегральное значение яркости свечения лимитера превышало интегральное значение яркости свечения клапана в 6 раз (рис. 8).

Рис. 8. Яркость свечения плазмы на линии D_α в области клапана (—) и лимитеров (—) для импульса № 61 391

Следовательно, приток дейтерия с лимитера был порядка $2,2 \cdot 10^{21}$ частиц/с. Оценка величин рециклинга после каждого импульса показала, что данный метод литиезации оказывает основной эффект примерно только на пять первых импульсов (рис. 9).

Рис. 9. Значение коэффициента рециклинга для импульсов после литиезации

В этой же программе литиезации был обнаружен эффект, заключающийся в том, что при открытом клапане системы газонапуска отчётливо видна область с внутренней стороны камеры (со стороны сильного поля) с сильным притоком дейтерия, в то время как с внешней стороны приток минимален. При закрытии клапана газонапуска приток дейтерия становится равномерно распределённым по всему лимитеру (рис. 10). Возможно, данный эффект связан со смещением плазменного шнура внутрь по большому радиусу во время работы системы газонапуска.

Рис. 10. Распределение свечения плазмы на линии D_{α} в области лимитеров при открытом и закрытом клапане системы газонапуска

Анализ полученных данных из режимов с дополнительным СВЧ-нагревом показал необходимость контроля состояния лимитеров. В импульсе № 61 389 с дополнительным СВЧ-нагревом мощностью 3 МВт отчётливо виден мощный источник притока дейтерия, т.е. область сильного взаимодействия плазмы с подвижным лимитером (рис. 11).

Для программы с клапаном периодического газонапуска полученные данные показывают, что существует модуляция притока с лимитера при модуляции притока из клапана. При включении клапана приток с лимитера падает на 10—15%, при отключении возвращается на прежний уровень или не-

Рис. 11. Свечение плазмы на линии D_{α} в области лимитеров при дополнительном СВЧ-нагреве мощностью 3 МВт

много увеличивается (рис. 12). Вероятно, данный эффект связан с охлаждением периферии плазмы при открытии клапана системы газонапуска. Таким образом реальный приток дейтерия в плазму может быть сложной функцией от притока из клапана.

Рис. 12. Яркость свечения плазмы на линии D_α в режиме с клапаном периодического газонапуска: клапан (—); лимитер (—)

Проанализирована инерционность работы системы газонапуска (рис. 13). Определена величина времени задержки между открытием клапана (подачей на него напряжения) и поступлением газа в плазменный шнур, составившая 10—15 мс. Также определено время вытекания газа после отключения клапана, составившее порядка 30 мс.

Рис. 13. Яркость свечения плазмы на линии D_α в области клапана газонапуска: программа клапана (—); клапан (—)

Проводилась регистрация яркости свечения плазмы в лимитерной области установки в интегральном свете для программы срывов на Т-10. Временное разрешение диагностики для данной серии импульсов составляло от 250 мкс до 1 мс. Анализ полученных данных показал возможность использования диагностики в подобных режимах и дальнейшего увеличения её временного разрешения. Аномального нагрева лимитеров, ускоренных электронов и других опасных явлений в данной серии импульсов зарегистрировано не было.

Проводилась регистрация свечения плазмы во время срыва разряда. Получены данные о различных структурах и быстрых процессах развала плазменного шнура (рис. 14). Возможность фиксации подобных явлений позволяет использовать эндоскоп в важных для Т-10 программах со срывами.

Рис. 14. Эволюция развала плазменного шнура, № 60 825

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальной кампании проведена регистрация распределения яркости свечения плазмы на токамаке Т-10. Показана возможность использования диагностики в важных для Т-10 программах. В программе литиезации оценены коэффициенты рециклинга и абсолютные притоки атомов дейтерия в плазменный шнур, составившие порядка $(2,5—3) \cdot 10^{21}$ частиц/с. Анализ полученных данных в программе с клапаном периодического газонапуска показал существование модуляции притока дейтерия с лимитера при модуляции притока из клапана. Проанализирована инерционность работы системы газонапуска. В большинстве импульсов наблюдалась равномерность распределения взаимодействия плазмы с лимитерами по всей их площади. Однако зафиксированы случаи сильного локализованного нагрева некоторых участков конструкции лимитеров, наблюдающиеся наиболее часто в программах с дополнительным СВЧ-нагревом. Показана необходимость контроля состояния лимитеров и прилегающих областей вакуумной камеры.

Работа выполнена в рамках государственных контрактов № 16.518.11.7004 с Минобрнауки РФ и № Н.4х.45.90.12.1023 с ГК «Росатом».

REFERENCES

1. Medvedev A.A., Aleksandrov E.V., Vukolov D.K., Vukolov K.Yu., Gorshkov A.V. Endoscope for visible range spectrum measurements in tokamak T-10. Design and the first experimental results. — VANT.

Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2007, issue 4, pp. 50—56 (in Russian).

2. **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.

AUTHORS

Vershkov V.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
Vershkov_VA@nrcki.ru

Vukolov D.K. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Vukolov_DK@nrcki.ru

Kuleshin E.O. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Kuleshin_EO@nrcki.ru

A.A. Medvedev NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
Medvedev_AA@nrcki.ru

Received 12 September 2012
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2012, issue 4, pp. 80—86.