

ВЛИЯНИЕ ПРОТОКА ГАЗА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛАЗМЕННОЙ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ВХОДНОГО ЗЕРКАЛА ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ИТЭР “АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ”

© 2022 г. А. В. Рогов^{a,b,*}, Ю. В. Капустин^{a,b}

^a Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

^b Частное учреждение “ИТЭР-Центр”
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1, стр. 3

*e-mail: alex-rogov@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.07.2021 г.

После доработки 10.08.2021 г.

Принята к публикации 20.08.2021 г.

Представлены результаты исследования влияния протока газа через область разряда и близкого к разрядной ячейке расположения стенок диагностического порта на эффективность плазменной системы очистки входного зеркала оптической диагностики “Активная спектроскопия”, разрабатываемой в России для реактора ИТЭР. Эксперименты проводились на полномасштабном функциональном макете разрядной ячейки, работающей на постоянном или однополярном импульсном токе, электрически изолированной от стенок вакуумной камеры. Материал макета входного зеркала – Мо. Рабочий газ – Аг. Использовалась вакуумная установка с динамической стабилизацией давления рабочего газа. Отсутствие протока газа через область разряда и близость стенок диагностического порта ИТЭР к разрядной ячейке моделировались размещением разрядной ячейки внутри коробчатого газодинамического обтекателя, помещенного в вакуумную камеру. Эксперименты с протоком газа при большом расстоянии от разрядной ячейки до стенок вакуумной камеры проводились без использования обтекателя. Выявлено, что отсутствие протока газа при малом удалении элементов разрядной ячейки от стенок вакуумной камеры увеличивает эффективность очистки.

DOI: 10.31857/S0032816222010098

ВВЕДЕНИЕ

В разрабатываемых для международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР системах оптической диагностики входное зеркало, принимающее излучение непосредственно из термоядерной плазмы, является наиболее уязвимым элементом. Для периодического удаления загрязнений, формирующихся на его отражающей поверхности в процессе эксплуатации, в состав диагностической системы должна входить встроенная плазменная система очистки на основе ионного распыления с использованием высокочастотного газового разряда [1, 2] или катодного распыления, работающая на постоянном или среднечастотном импульсном токе [3, 4].

Для очистки зеркал от загрязнений предусматривается специальный режим с повышением давления рабочего газа в вакуумной камере установки до 1–7 Па. В качестве рабочих газов в ИТЭР допустимо использование H_2 , D_2 , He, Ne, Ar и смеси этих газов [5]. При этом рассматриваются сценарии использования систем очистки как при

отключении тороидального магнитного поля установки, так и в его присутствии [6].

В диагностике “Активная спектроскопия” в периоды ее бездействия для предотвращения загрязнения первого зеркала предусмотрена защитная шторка, в закрытом положении исключающая прямой поток материала из рабочей камеры установки на отражающую поверхность входного зеркала. В режиме плазменной очистки зеркала шторка также будет находиться в закрытом положении. Этим обеспечивается снижение выноса продуктов эрозии в рабочую камеру установки и уменьшение загрязнения первой стенки тяжелыми примесями.

Все диагностические системы ИТЭР расположены в диагностических портах, а входные зеркала размещают в непосредственной близости от первой стенки реактора. Для обеспечения радиационной защиты сверхпроводящих магнитов объем выреза в диагностическом порту для размещения элементов узла входного зеркала должен быть минимальным. По этой причине очистка

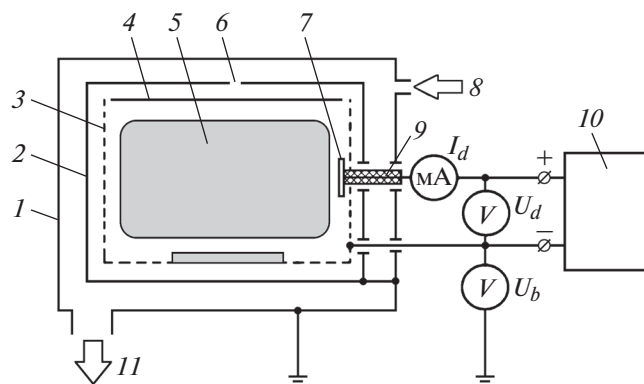


Рис. 1. Схема эксперимента по моделированию вакуумных условий в диагностическом порту ИТЭР. 1 – стенки вакуумной камеры; 2 – стенки газодинамического обтекателя; 3 – сетчатый катодный электрод; 4 – макет защитной шторки; 5 – область локализации чистящего разряда; 6 – перепускное отверстие; 7 – дисковый анод; 8 – напуск газа; 9 – изолятор; 10 – источник питания; 11 – патрубок откачной линии.

входного зеркала происходит в замкнутом объеме. Кроме распыления катодных элементов разрядной ячейки системы очистки, одним из которых является входное зеркало, также могут распыляться стенки диагностического порта, расположенные вблизи разрядной ячейки. Эффект распыления приводит к изменению состава и давления газа, а повышенное давление – к обратному рассеянию и термализации потока распыленных частиц, что может существенно повлиять на эффективность удаления загрязнений. Эти факторы необходимо учитывать при разработке плазменных систем очистки зеркал. Форма вакуумной камеры в зоне размещения разрядной ячейки должна соответствовать геометрии стенок диагностического порта в области размещения системы очистки при отсутствии протока газа.

При использовании стандартного технологического вакуумного оборудования применяется динамическая регулировка давления путем изменения потока натекающего газа при работающей системе вакуумной откачки. За счет того, что в заданном диапазоне давлений (1–7 Па) длина термализации распыленных атомов много меньше характерных размеров вакуумной камеры, значительная часть продуктов эрозии будет вместе с газом удаляться системой вакуумной откачки. Опубликованные ранее экспериментальные данные для различных вариантов плазменных систем очистки были получены именно в режиме протока газа через зону разряда без учета расположения разрядной ячейки относительно стенок вакуумной камеры [4].

В связи с вышеизложенным исследование влияния наличия протока газа через область разряда и близкого к разрядной ячейке расположе-

ния стенок диагностического порта на эффективность системы плазменной очистки зеркал оптической диагностики является весьма актуальной задачей.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБОРУДОВАНИЕ

Экспериментальные исследования проводились на полномасштабном функциональном макете разрядной ячейки системы плазменной очистки входного зеркала диагностики “Активная спектроскопия” [7], разрабатываемой в России для реактора ИТЭР. Моделирование размещения элементов системы очистки в диагностическом порту ИТЭР и вакуумных условий (отсутствие протока газа через зону газового разряда) проводилось на типовой вакуумной установке с использованием замкнутого газодинамического обтекателя коробчатой формы, изготовленного из листовой нержавеющей стали [3]. Вакуумная камера имела размеры $\text{Ø}340 \times 200$ мм; использовалась безмасляная система откачки на основе спирального и турбомолекулярного насосов. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

Использование замкнутой конфигурации полого катода обеспечивает режим газового разряда с осциллирующими электронами. Это существенно повышает степень ионизации плазмы, что приводит к снижению разрядного напряжения при том же токе разряда [8]. Плазма локализуется внутри полого катода, а его внутренние стенки, одной из которых является входное зеркало, подвергаются интенсивному распылению. Изготовление полого катода из конструкционного материала входного зеркала (Mo) обеспечивает сохранение элементного состава отражающей поверхности как в условиях преимущественного распыления, так и при наличии пересадки распыленного материала внутренней стенки полого катода. Сетчатая конструкция стенок полого катода обеспечивает свободный выход продуктов эрозии из разрядной ячейки и их осаждение на стенках диагностического порта и узла входного зеркала. Размещение разрядной ячейки и газодинамического обтекателя в вакуумной камере установки наглядно представлено в [3].

Габариты разрядной ячейки $240 \times 150 \times 120$ мм. Сетчатые катодные электроды выполнены из молибдена толщиной 1 мм с шестигранными ячейками с характерным размером 5 мм. Ширина перемычек 1.5 мм [3]. Диаметр изготовленного из Mo внутреннего анодного электрода 20 мм. Расстояние между сеткой и стенками обтекателя равно 20 мм, что соответствует актуальной конструкции узла входного зеркала диагностики “Активная спектроскопия”. За счет этого моделировались условия распыления стенок диагностического порта ионами и атомами перезарядки, вышедши-

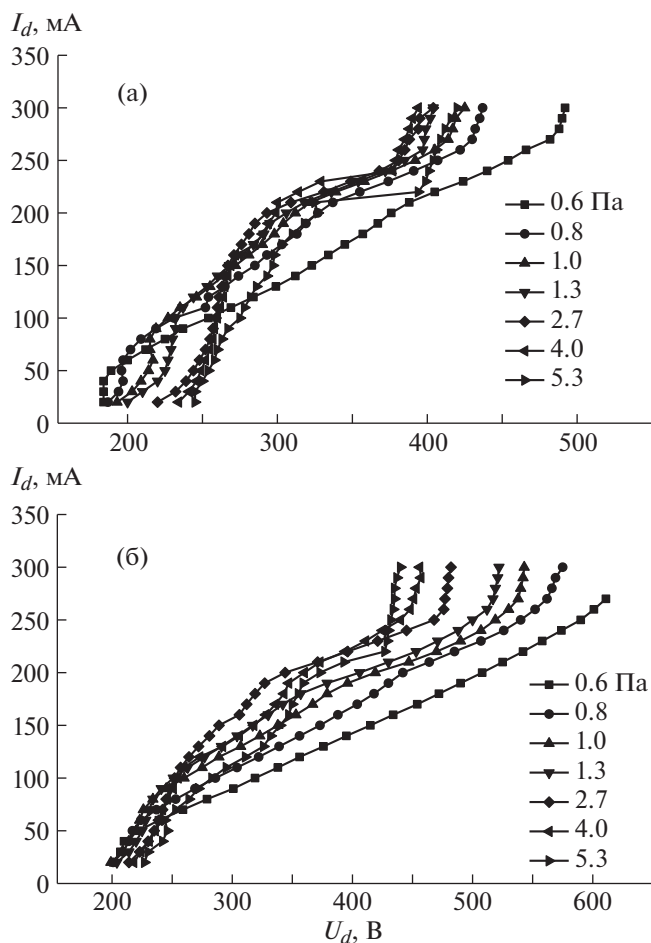


Рис. 2. Семейство вольт-амперных характеристик чистящего разряда в диапазоне давлений p_{Ag} от 0.6 до 5.3 Па при наличии (а) и без (б) газодинамического обтекателя.

ми из разрядной ячейки, а также влияние этого процесса на эффективность очистки. Предложенный подход позволил моделировать вакуумные условия в диагностическом порту ИТЭР с использованием стандартной малогабаритной вакуумной установки.

Сравнительные эксперименты при наличии газового протока и относительно большом (≈ 70 мм) удалении разрядной ячейки системы очистки от стенок вакуумной камеры проводились с той же разрядной ячейкой, но без газодинамического обтекателя. Во всех экспериментах в качестве рабочего газа использовался Ar.

Контроль распыления полноразмерного макета входного зеркала с габаритными размерами 100×100 мм проводился методом взвешивания с использованием аналитических весов CAS CAUW 220D (точность взвешивания ± 0.01 мг).

В качестве источника питания использовался аналоговый блок питания, обеспечивающий режим стабилизации выходной мощности.

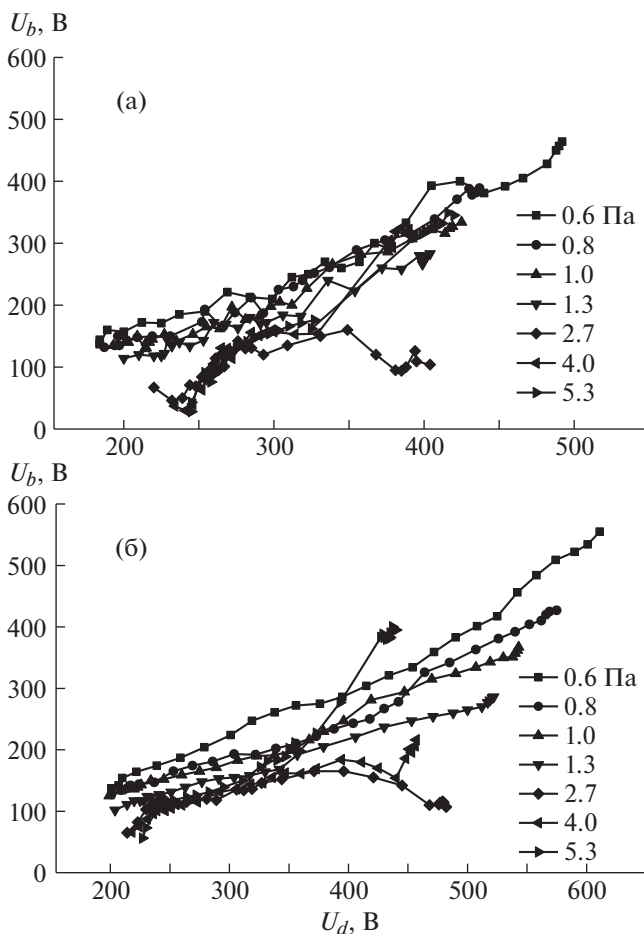


Рис. 3. Зависимость потенциала автосмещения от напряжения разряда в диапазоне давлений p_{Ag} от 0.6 до 5.3 Па при наличии (а) и без (б) газодинамического обтекателя.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измерение вольт-амперных характеристик разряда проводилось в диапазоне давлений 0.6–5.3 Па как при наличии, так и без газодинамического обтекателя. Результаты представлены на рис. 2.

При удержании плазмы в изолированной разрядной ячейке между ее сетчатым катодом и заземленными стенками вакуумной камеры формируется разность потенциалов (потенциал автосмещения) U_b , обеспечивающая торможение ионов, вышедших из зоны ионизации. Результаты измерения зависимости потенциала автосмещения от напряжения разряда представлены на рис. 3.

С учетом того, что максимальная энергия (в электронвольтах) бомбардирующих катод ионов мало отличается от напряжения разряда, максимальную энергию ионов, бомбардирующих стенки диагностического порта, можно оценить как:

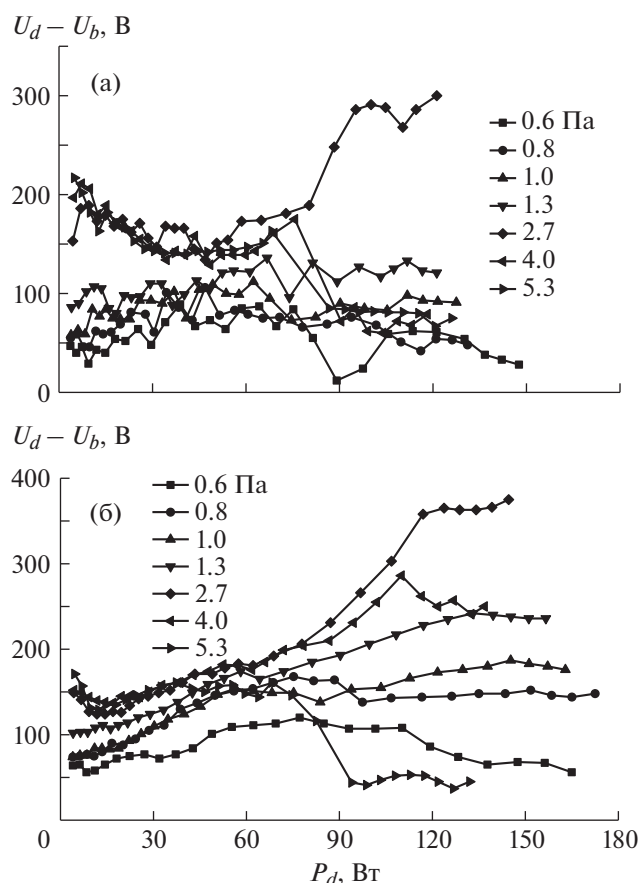


Рис. 4. Зависимость разности между напряжением разряда и потенциалом автосмещения от мощности разряда в диапазоне давлений Ar от 0.6 до 5.3 Па при наличии (а) и без (б) газодинамического обтекателя.

$$E_i = e(U_d - U_b), \quad (1)$$

где U_d – напряжение разряда, U_b – потенциал автосмещения. Следует учитывать, что из-за рассеяния на рабочем газе при транспортировке до стенки диагностического порта эта энергия может существенно уменьшиться. В распылении внешних стенок также могут участвовать нейтралы перезарядки, поступающие из плазмы и не подверженные действию тормозящего потенциала. Результаты измерений зависимости разности напряжения разряда и потенциала автосмещения от мощности разряда представлены на рис. 4.

По результатам взвешивания макета входного зеркала до и после распыления рассчитывалась приведенная энергетическая эффективность K_p распыления зеркала:

$$K_p = \Delta m / (P_d T_d S), \quad (2)$$

где Δm – разница масс до и после распыления, P_d – мощность разряда, T_d – время распыления, S – площадь распыляемой поверхности. Этот параметр удобен для сравнения энергетической эф-

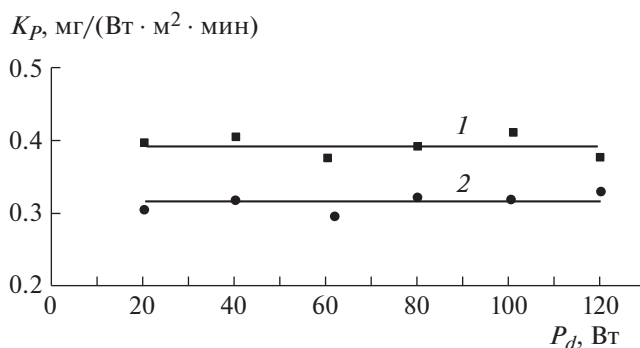


Рис. 5. Зависимость приведенной энергетической эффективности K_p распыления макета Mo-зеркала от мощности разряда при наличии (1) и без (2) газодинамического обтекателя при давлении аргона 5.3 Па.

фективности работы различных систем очистки вне зависимости от их конструктивных особенностей и размеров зеркала. Измерения проводились при давлении аргона 5.3 Па. Результаты показаны на рис. 5.

Используя K_p , можно рассчитать среднюю скорость распыления поверхности зеркала:

$$V_S = K_p P_d / \rho, \quad (3)$$

где V_S – скорость распыления, K_p – приведенная энергетическая эффективность распыления, ρ – плотность распыляемого материала.

Результаты расчета средней скорости распыления макета Mo-зеркала при наличии и без газодинамического обтекателя представлены на рис. 6.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- для рассматриваемого типа разрядных ячеек приведенный коэффициент энергетической эффективности распыления не зависит от мощности разряда, поэтому скорость очистки зеркала прямо пропорциональна мощности разряда;

- при близком расположении стенки диагностического порта к разрядной ячейке и отсутствии протока газа через зону разряда скорость очистки зеркал примерно на 20% выше, чем в режиме газового протока с большим удалением стенок вакуумной камеры от разрядной ячейки при том же давлении рабочего газа в вакуумной камере;

- в режиме с газовым протоком средняя энергия ионов, распыляющих стенки диагностического порта, выше, чем при его отсутствии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показали, что для системы очистки с электрически изолированной разрядной ячейкой в виде замкнутого сетчатого полого катода близкое ее расположение к зазем-

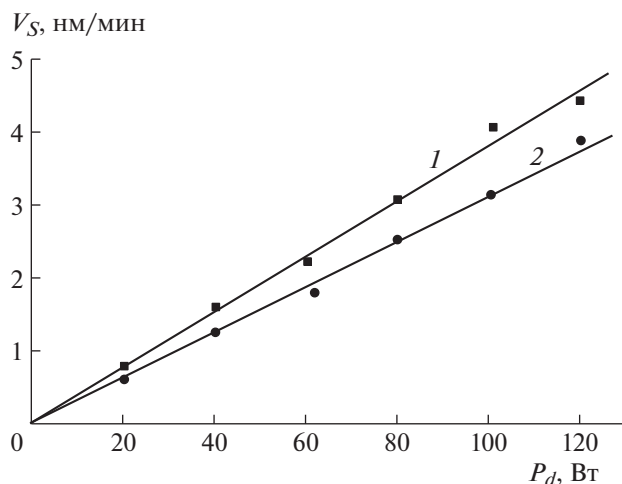


Рис. 6. Зависимость скорости V_s распыления Мо-зеркала от мощности разряда при наличии (1) и без (2) газодинамического обтекателя при давлении аргона 5.3 Па.

ленным стенкам диагностического порта в отсутствие газового протока обеспечивает увеличение скорости очистки примерно на 20% по сравнению с режимом газового протока при большом удалении от стенок вакуумной камеры при той же мощности разряда. Этот факт можно объяснить тем, что поток распыленных атомов, вышедших из разрядной ячейки, не успевает термализоваться и осаждается на стенках вакуумной камеры. В результате уменьшается обратный поток материала на очищаемую поверхность входного зеркала, и эффективность очистки увеличивается [9].

Приведенная энергетическая эффективность распыления для Мо составляет примерно $K_p \approx 0.4 \text{ мг}/(\text{Вт} \cdot \text{мин} \cdot \text{м}^2)$ и остается постоянной в

рассмотренном диапазоне мощностей разряда при фиксированном давлении рабочего газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moser L., Marot L., Steiner R., Reichle R., Leipold F., Vorpahl C., Le Guern F., Walach U., Alberti S., Furno I., Yan R., Peng J., Ben Yaala M., Meyer E. // *Physica scripta*. 2017. V. 2017. № T170. P. 014047. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/aa8f30>
2. Dmitriev A.M., Babinov N.A., Bazhenov A.N., Bukreev I.M., Kochergin M.M., Koval A.N., Kurskiev G.S., Litvinov A.E., Masyukevich S.V., Mukhin E.E., Razdobarin A.G., Samsonov D.S., Solokha V.V., Tolstyakov S.Yu., Andrew P., Leipold F., Shigin P.A., Reichle R., Bukhovets V.L., Gorodetsky A.E., Markin A.V., Zakharov A.P., Zalavutdinov R.Kh., Chernakov An.P., Chernakov Al.P., Chernakov P.V., Chernozumskaya T.V., Kobelev A.A., Smirnov A.S., Marzinovskiy I.A. // *Physica scripta*. 2017. V. 2017. № T170. P. 014072. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/aa95e5>
3. Рогов А.В., Капустин Ю.В. // ПТЭ. 2021. № 3. С. 60. <https://doi.org/10.31857/S0032816221030332>
4. Рогов А.В., Капустин Ю.В. // *Успехи прикладной физики*. 2016. Т. 4. № 3. С. 240.
5. Ben Yaala M., Moser L., Steiner R., Butoi B., Dinca P., Petersson P., Marot L., Meyer E. // *Nucl. Fusion*. 2019. V. 59 (9). P. 096027. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab2d31>
6. Moser L., Steiner R., Leipold F., Reichle R., Marot L., Meyer E. // *J. of Nucl. Mat.* 2015. V. 463. P. 940. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.11.087>
7. Ключников Л.А., Крупин В.А., Коробов К.В., Нургалеев М.Р., Немец А.Р., Днестровский А.Ю., Науменко Н.Н., Тугаринова С.Н., Серов С.В., Деньщиков Д.С. // ВАНТ. Серия: термоядерный синтез. 2016. Т. 39. № 1. С. 95.
8. *Gas Discharges: Fundamentals & Applications* / Ed. by de Amorim Filho J. Trivandrum, Kerala: Transworld research network, 2007. P. 175–190.
9. Пеннинг Ф. *Электрические разряды в газах*. М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1960. С. 69.