

ОТЗЫВ **официального оппонента**

на диссертацию Капустина Юрия Владимировича
«Разработка системы очистки первого зеркала в оптических
диагностиках ИТЭР на основе разряда в полом катоде»,
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.08 – Физика плазмы

На термоядерном реакторе ИТЭР планируется комплекс оптических систем диагностики плазмы, оптические элементы которых будут подвергаться радиационному воздействию, распылению и загрязнению распылёнными материалами первой стенки, диверторных пластин и других элементов. Наиболее уязвимым является обращенное к плазме реактора первое зеркало. Оно должно иметь высокий коэффициент отражения, высокую теплопроводность, быть устойчивым к трансмутациям. В настоящее время в качестве кандидатного материала первого зеркала для ряда оптических диагностик выбран молибден. Экспериментальные исследования на токамаках показали, что наибольшее изменение отражательной способности металлических зеркал вызывают осаждаемые на них плёнки различного состава. Производить замену зеркал практически невозможно. Поэтому существует необходимость в разработке эффективных методов удаления плёнок между рабочими циклами без разгерметизации камеры. Диссертационная работа Капустина Юрия Владимировича находится в русле этих актуальных проблем и посвящена разработке системы очистки первого зеркала в оптических диагностиках ИТЭР на основе разряда постоянного и импульсного тока.

По структуре, содержанию и изложению материала диссертация Ю.В. Капустина является законченным научным трудом, состоящим из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Первая глава содержит обзор литературных данных по тематике диссертационной работы. Проанализированы экспериментальные и теоретические работы по деградации зеркал в термоядерных установках. Показано, что загрязнение зеркал является наиболее важным фактором

снижения оптического качества. Проведено сравнение различных методов, применяемых в настоящее время в лабораторной практике и промышленности для очистки поверхности деталей. Обоснован вывод о перспективности использования для этой цели разрядов постоянного тока.

Во второй главе приводится описание метода формирования имитационных загрязнений, а также возможных способов проведения измерения равномерности очистки. Предложена оригинальная методика контроля равномерности ионного травления поверхности путём измерения интенсивности характеристических линий материала-загрязнения рентген-флуоресцентным методом анализа. Приводятся результаты экспериментального исследования очистки зеркал в разрядной ячейке с полым катодом и ячейке Пеннинга. На основе проведённых экспериментов, предложена конструкция комбинированной разрядной ячейки, которая может обеспечить возможность очистки зеркал как при наличии, так и в отсутствие магнитного поля тороидальных обмоток ИТЭР.

В третьей главе рассматриваются особенности применения газового разряда постоянного тока для очистки зеркал. Экспериментально продемонстрированы методы подавления дуговых привязок, возникающих при распылении диэлектрических слоёв. Предложены и продемонстрированы независимые методики контроля процесса очистки, основанные на физических явлениях взаимодействия плазмы с поверхностью твёрдого тела.

В четвёртой главе представлены результаты экспериментального и математического моделирования равномерности очистки и изменения оптических свойств молибденовых зеркал под воздействием облучения ионами гелия. Рассмотрена возможность влияния накопления гелия в приповерхностном слое зеркала на коэффициенты отражения.

В пятой главе на основании полученных экспериментальных результатов сформулированы требования и рекомендации по включению элементов системы очистки в конструкцию узла входного зеркала диагностики «Спектроскопия водородных линий» и также требования к режиму очистки.

Новыми и наиболее научно значимыми результатами диссертации являются экспериментально установленные закономерности очистки зеркал от

плёнок металлических и диэлектрических загрязнений и восстановления исходного оптического качества зеркал с помощью плазмы разряда постоянного и импульсного тока, спектральной зависимости коэффициентов зеркального отражения и диффузного рассеяния молибденового зеркала при высокодозовом распылении поверхности ионами He и Ag, а также эволюции вольт-амперной характеристики чистящего разряда, позволяющей контролировать наличие загрязнения.

Практическая значимость работы определяется тем, в ней продемонстрирована возможность очистки в плазме разряда постоянного тока металлических зеркал от загрязнений в реакторе ИТЭР, разработаны инженерные основы для создания плазменной системы очистки зеркал в оптических диагностиках ИТЭР и система очистки первого и второго зеркал для каналов диагностики «Спектроскопия водородных линий».

Достоверность результатов обеспечивается использованием независимых методик контроля, воспроизводимостью результатов. Полученные при численном моделировании оценки параметров плазмы чистящего разряда и равномерности очистки согласуются с экспериментальными данными. Выводы и рекомендации обоснованы большим объёмом данных, полученных как самим автором, так из литературных источников.

Вместе с тем, по работе имеется ряд замечаний и вопросов.

1. В методической части отсутствует описание оборудования и методики спектрофотометрии зеркального и диффузного рассеяния. Неясна также методика оценки флюенса ионного облучения.
2. Замена бериллия алюминием в имитационных исследованиях безусловна оправдана. Вместе с тем, представляется важным обсуждение потенциальных проблем с загрязнениями зеркал бериллием. В частности, например, метод РФА уже не может быть использован.
3. Неясно, как определяли именно аномальный режим тлеющего разряда, а не нормальный. Только при аномальном разряде в эмиссии участвует вся поверхность катода.

4. РЭМ на рис. 4.11, 4.12 представлены с недостаточным увеличением для анализа рельефа, вызывающего диффузное рассеяние света, т.е. рельефа с размерами порядка десятков нм.
5. В разделе 2.3 отсутствуют данные по основным размерам разрядной ячейки, аспектному отношению и, соответственно, выполнению условий разряда с полым катодом.
6. Гелий и дейтерий являются хорошими кандидатами на роль рабочего газа при проведении очистки зеркал в плазме газового разряда. Из-за большой разницы в коэффициентах распыления молибдена (материала основы зеркала) и бериллия (материала загрязнения) можно ожидать высокой селективности очистки. Однако в работе показано, что облучение зеркала ионами He с энергией несколько сот электрон-вольт приводит к медленному росту диффузного рассеяния зеркал. Позволяют ли полученные результаты провести оценку количества циклов очистки, которое может выдержать зеркало при сохранении диффузного рассеяния в допустимых пределах?
7. Замечания по оформлению. Использование аббревиатур, особенно в названии рубрик, затрудняет чтение. На рис. 2 не отмечены позиции а и б, на рисунке 2.1 отсутствуют позиции, приведенные в подписи к рисунку, на рис. 2.11 желательна оцифровка элементов конструкции. В подписи к рис. 4.12 отсутствуют условия распыления. В литературных ссылках 67, 115 и 137 не указаны номера страниц.

Однако, отмеченные недостатки не снижают ценности диссертации. Она представляет собой законченное исследование, достоверность, научная новизна и значимость результатов которого не вызывает сомнения. Основные положения работы достаточно полно подтверждены экспериментальным материалом, опубликованы в трех печатных работах в реферируемых журналах из Перечня ВАК, широко апробированы на международных и всероссийских конференциях.

Автором продемонстрирована высокая квалификация при проведении экспериментов, при обработке и интерпретации экспериментальных данных и при представлении результатов. Основные результаты диссертации достаточно полно изложены в автореферате.

Таким образом, диссертационная работа соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней Постановления №842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Автор диссертации, Капустин Юрий Владимирович, за разработку системы очистки первого зеркала в оптических диагностиках ИТЭР на основе разряда в полом катоде заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
профессор, профессор кафедры
"Технологии производства приборов и
информационных систем управления
летательных аппаратов" Московского
авиационного института
(национального исследовательского
университета)

1 февраля 2017г.


(подпись)

Борисов Анатолий Михайлович

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе,
д. 4, А-80, ГСП-3
e-mail: anatoly_borisov@mail.ru

Подпись А.М.Борисова заверяю

И.о. начальника отдела УДС

1 февраля 2017 г


(подпись)  Аникина