

На правах рукописи



ПУТРИК АНТОН БОРИСОВИЧ

ПРОДУКТЫ ЭРОЗИИ МАТЕРИАЛОВ, ОБРАЗУЮЩИЕСЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
ИНТЕНСИВНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ, И ЗАХВАТ ИЗОТОПОВ
ВОДОРОДА В НИХ

Специальность 01.04.08 — «Физика плазмы»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Троицк, Москва 2014

Работа выполнена в ФГУП «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований».

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, первый заместитель директора Отделения магнитных и оптических исследований ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» Житлухин Анатолий Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории поверхностных явлений при низкоэнергетических воздействиях Института физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН
Шарапов Валерий Михайлович

кандидат физико-математических наук, инженер-исследователь лаборатории радиационных исследований материалов отдела физики ядра отделения ядерной физики и пучковых технологий института общей и ядерной физики центра фундаментальных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
Нагель Михаил Юрьевич

Ведущая организация: ОАО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. А. А. Бочвара».

Защита состоится 22 апреля 2015 г. в 16 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 при Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, тел. 8(495)788-56-99 доб. 95-26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» и на сайте: <http://ods.mephi.ru>.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью организации.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 212.130.05, доктор физ.-мат. наук



Р. С. Стариков

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

На сегодняшний день в качестве обращенных к плазме материалов (ОПМ) для токамака ИТЭР выбраны вольфрам (для защиты дивертора) и бериллий (для защиты первой стенки токамака) [1]. Решение об использовании материала на основе углерода (углеродно-волокнутого композита) в качестве ОПМ для защиты дивертора будет принято на основании результатов работы ИТЭР с полностью вольфрамовым дивертором. Тем не менее, графит успешно используется во многих термоядерных установках и имеет определенные преимущества в сравнении с другими ОПМ [2], и поэтому представляет интерес для дальнейшего использования, в том числе и в ИТЭР.

Эрозия ОПМ и осаждение продуктов эрозии в виде пленок является одной из проблем реактора-токамака ИТЭР, в том числе и потому, что продукты эрозии будут содержать значительное количество захваченного трития и являться основным источником его накопления в вакуумной камере ИТЭР [3, 4]. Данные о свойствах осажденных пленок, в том числе и о захвате изотопов водорода в них, накоплены в основном в экспериментах с длительными разрядами (порядка секунд и более), при которых скорость осаждения мала (менее 10^{18} атом·см⁻²·с⁻¹), например, [5-7]. Однако, большой интерес представляют переходные процессы (ЭЛМ-события и срывы), у которых длительность лежит в миллисекундном диапазоне, а скорость осаждения и условия осаждения продуктов эрозии, например, локальная тепловая нагрузка, динамика температуры поверхности, будут сильно отличаться от стационарных. Поэтому актуальным является исследование осаждающихся пленок при взаимодействии плазмы с ОПМ в условиях, характерных для переходных процессов.

С другой стороны, наряду с локальным плазменно-тепловым воздействием на материалы при ЭЛМ-событиях и срывах, воздействию излучения во время ослабленных срывов ИТЭР [8] будет подвергаться вся внутренняя поверхность камеры токамака, в том числе и осажденные продукты эрозии материалов. В связи с этим, актуальным является изучение изменения свойств продуктов эрозии, в том числе и концентрации захваченных изотопов водорода в них, в результате воздействия излучения с параметрами, характерными для ослабленных срывов.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования в данной работе являются осажденные пленки, которые образовались в результате взаимодействия импульсных потоков плазмы и твердотельной мишени. Исследовались пленки, полученные при облучении графита (МПГ-6) и вольфрама (В-МП) на плазменном ускорителе КСПУ-Т потоками плазмы с тепловой нагрузкой 2,6 МДж/м² (на оси потока плазмы) и длительностью 0,5 мс.

Предметом исследования являются характеристики осажденных пленок, в частности концентрация изотопов водорода в них, в зависимости от скорости осаждения и условий в месте осаждения, а также изменение этих характеристик в результате воздействия на пленки излучения, генерируемого при взаимодействии плазмы и твердотельной мишени.

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование свойств осажденных пленок образующихся в результате взаимодействия импульсных потоков плазмы (параметры которых характерны для переходных плазменных процессов токамака-реактора [9]) и твердотельной мишени.

Для достижения данной цели решены следующие задачи:

1. Проведен численный расчет динамики испарения материалов тепловым импульсом, на основании которого, выбраны параметры плазменного потока (тепловая нагрузка и длительность воздействия), обеспечивающие интенсивное испарение графита и вольфрама.
2. Экспериментально определена скорость осаждения испаренного материала, локальная тепловая нагрузка, рассчитана динамика температуры поверхности в местах осаждения пленок при взаимодействии плазменного потока с мишенью.
3. Определены характеристики осажденных пленок (в том числе концентрация захваченного водорода в них) в зависимости от температуры поверхности и скорости осаждения материала.
4. Исследовано изменение характеристик осажденных пленок (в том числе концентрации захваченного водорода в них) в зависимости от условий их облучения после осаждения.
5. Проанализированы особенности свойств осажденных пленок по сравнению с пленками, полученными в условиях стационарного процесса.

Вносимые на защиту положения

1. Метод и устройство для измерения скорости осаждения продуктов эрозии в условиях импульсных процессов длительностью менее 1 мс с временным разрешением 0,02 мс.
2. Результаты измерения скорости осаждения продуктов эрозии графита и вольфрама в экспериментах по моделированию ЭЛМ-событий и срывов, ожидаемых в ИТЭР, которые составляют $(10 - 70) \times 10^{19}$ атом·см⁻²·с⁻¹ для графита и $(0,1 - 8) \times 10^{19}$ атом·см⁻²·с⁻¹ для вольфрама, что как минимум на три порядка превышает соответствующее значение во время стационарных процессов в токамаке.
3. Экспериментальные данные о концентрации изотопов водорода в C—D- и C—W—D-плёнках, полученных в результате осаждения продуктов эрозии, образующихся при взаимодействии дейтериевого потока плазмы (плазменная тепловая нагрузка на оси потока плазмы 2,6 МДж/м² при длительности импульса 0,5 мс) и твердотельной мишени.

4. Экспериментальные данные об изменении концентрации изотопов водорода в C—D и C—W—D плёнках после их облучения импульсами излучения с плотностью энергии $0,05 - 0,5 \text{ МДж/м}^2$ и длительностью $0,5 \text{ мс}$, характерными для ослабленного срыва ИТЭР.

Научная новизна работы

Впервые исследована динамика осаждения пленок с высоким разрешением $0,02 - 0,07 \text{ мс}$ при эрозии твердотельных мишеней короткими импульсам энергоемких потоков плазмы (плазменная тепловая нагрузка на оси потока плазмы $2,6 \text{ МДж/м}^2$ при длительности импульса $0,5 \text{ мс}$).

Впервые подробно исследованы свойства пленок, полученные при осаждении продуктов эрозии твердотельных мишеней потоком дейтериевой плазмы с высокой энергоемкостью.

Впервые измерено содержание дейтерия в пленках, осажденных при распылении мишеней высокоэнергетичными потоками плазмы.

Впервые исследовалось воздействие на осажденные пленки излучения, генерируемого при торможении водородного потока плазмы на твердотельной мишени (плотностью энергии излучения $0,05 - 0,5 \text{ МДж/м}^2$, длительность $0,5 \text{ мс}$).

Теоретическая значимость и практическая ценность работы

Результаты работы важны при анализе скорости эрозии обращенных к плазме материалов, свойств продуктов эрозии и внутриреакторного накопления трития в результате кратковременных переходных событий в ИТЭР и других реакторах синтеза.

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при оценке срока безопасной эксплуатации физической установки, в течение которого содержание трития не будет превышать определенного предела.

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для верификации расчетно-теоретических моделей захвата изотопов водорода продуктами эрозии материалов.

Апробация работы и публикации

Результаты работы были представлены на следующих конференциях: 16-я, 17-я конференции "Взаимодействие плазмы с поверхностью" в рамках научной сессии НИЯУ МИФИ (2013, 2014 гг.), 40-я Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС (2013 г.), 16-я Международная конференция по материалам для термоядерного реактора (16th International Conference on Fusion Reactor Materials, 2013 г.), 56-я Научная конференция МФТИ-56 (2013 г.), 21-я Конференции по взаимодействию плазмы с поверхностью в термоядерных установках (Plasma-Surface Interaction in Controlled Fusion Devices, 2014 г.), Международная школа «Физика взаимодействия

плазмы с поверхностью» (International Summer School on the Physics of Plasma Surface Interactions, 2014 г.). Всего по результатам исследований опубликовано семь работ, перечисленных в списке публикаций.

Личный вклад автора

Представленные в диссертационной работе экспериментальные результаты получены непосредственно автором: им были изготовлены диагностики, проведены эксперименты, обработаны и проанализированы полученные данные, выполнен ряд расчетов, сделаны выводы.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников. Работа содержит 147 страниц текста, 69 рисунков, 9 таблиц и ссылки на 93 источника.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обозначены актуальность темы, цель и задачи исследования, сформулированы объект и предмет исследования, рассмотрены научная новизна, теоретическая значимость, практическая ценность и личный вклад автора. Представляются положения, выносимые на защиту, приводится информация об апробации работы, публикациях и о структуре диссертационной работы.

Первая глава представляет собой обзор литературы, включающий в себя три раздела и заключение. В первом разделе описаны условия работы защитных материалов первой стенки и дивертора токамака ИТЭР. Во втором разделе представлены характеристики продуктов эрозии ОГМ (в частности, захват изотопов водорода в них), полученные при экспериментальном моделировании условий стационарного процесса. В третьем разделе рассмотрена проблема удаления изотопов водорода из продуктов эрозии ОГМ.

Согласно анализу, для моделирования условий импульсных переходных процессов, как это следует из данных работы [10], наиболее подходит квазистационарный сильноточный плазменный ускоритель. При импульсном плазменном облучении материалов на подобных ускорителях будут образовываться продукты эрозии, которые при осаждении будут захватывать изотопы водорода. Данный процесс будет одним из определяющих общее количество захваченных изотопов водорода во время работы токамака. Однако подавляющая часть существующих экспериментальных данных о свойствах продуктов эрозии, в том числе и о концентрации изотопов водорода в них, была получена для случая стационарных процессов, при которых скорость осаждения мала (менее 10^{18} атом·см⁻²·с⁻¹), например [5-7]. Поэтому актуальным является исследование свойств (в том числе и концентрации изотопов водорода в них) продуктов эрозии, образующихся в условиях импульсных переходных процессов, и разработка эффективных методов детритизации, поскольку максимальное содержание трития внутри вакуумной камеры ИТЭР ограничено 700 г.

Во второй главе представлены выбранная геометрия и условия экспериментов для моделирования импульсных плазменно-тепловых нагрузок на ОПМ, в которой поток дейтериевой плазмы (сформированный квазистационарным сильноточным плазменным ускорителем КСПУ-Т) падает на поверхность мишени, ориентированной нормально по отношению к потоку плазмы (рисунок 1 а). В экспериментах использовались два типа мишеней. Графитовая мишень представляет собой сплошную пластину (размеры 120x120x5 мм), вырезанную из листа графита МПГ-6. Вольфрамовая мишень собрана из 50 полос вольфрама марки В-МП размером 100x15x2 мм, к потоку плазмы обращены торцы полос. Плотность приходящей на поверхность мишени энергии и длительность плазменного воздействия являются одними из основных параметров, определяющих количество испаренного материала. Измерение локальной тепловой нагрузки проводилось с использованием многоканального термопарного калориметра (изготовленного из ниобия) с пространственным разрешением. Согласно результатам измерений при нормально расположенной мишени по отношению к потоку плазмы, распределение тепловой нагрузки на поверхности мишени имеет осевую симметрию и достаточно точно аппроксимируется распределением Гаусса, ширина профиля на полувысоте равна 6 см (рисунок 1 б). Тепловая нагрузка на оси потока практически линейно возрастает от 1,2 до 2,6 МДж/м² при увеличении напряжения зарядки конденсаторной батареи от 2,3 до 3,6 кВ. Характерная длительность плазменного воздействия: 0,5 мс (длительность импульса на полувысоте). Таким образом, параметры тепловой нагрузки близки к требуемым для имитации ЭЛМ-событий, ожидаемых в ИТЭР [9], но направленная энергия ионов ($E_i = 0,05 - 0,5$ кэВ) имеет меньшее значение (менее 1 кэВ), а плотность ($n = 10^{22} - 10^{23}$ м⁻³) и давление плазмы при торможении на мишени ($p = (1 - 10) \cdot 10^5$ Па), имеют более высокие значения в сравнении с ожидаемыми во время импульсных переходных процессов ИТЭР.

Выбранная схема питания ускорителя КСПУ-Т обеспечивает трапецеидальную форму импульса, отличительной особенностью которой является наличие короткого переднего фронта (< 50 мкс, что составляет не более 10% от длительности импульса на полувысоте) и области плато (≈ 500 мкс, совпадает характерной длительностью импульса давления), в которой параметры разряда слабо меняются во времени. Данная форма импульса, близкая к прямоугольной, отличается от характерной для импульсных переходных процессов токамака. Для того чтобы оценить возможность переноса результатов эксперимента на условия ИТЭР, был проведен расчет динамики испарения материала мишени при различных формах теплового импульса.

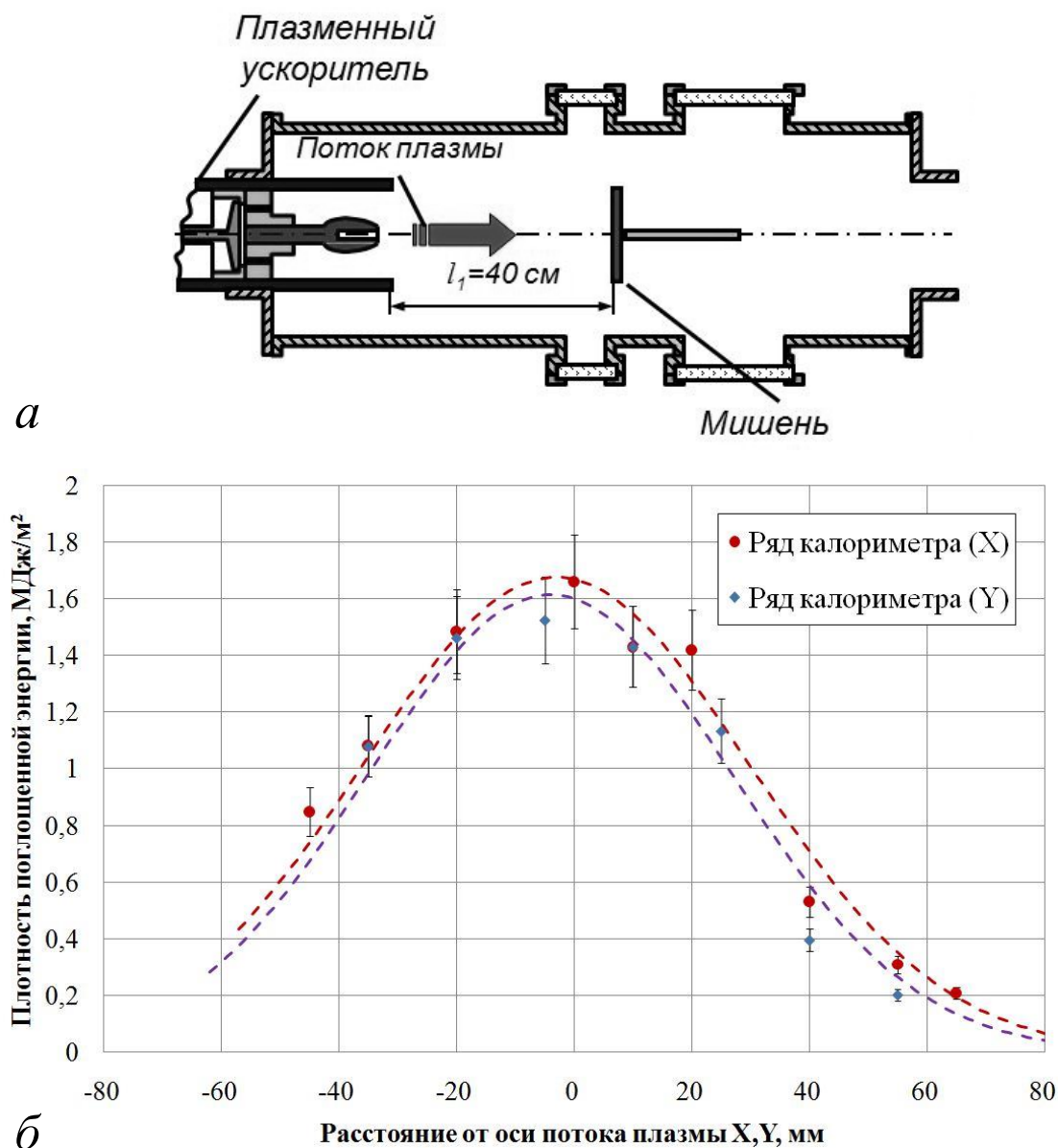


Рисунок 1 – Схема эксперимента (а) и типичные профили тепловой нагрузки на поверхности мишени (напряжение зарядки конденсаторной батареи 2,6 кВ) (б)

В результате расчетов определена плотность энергии, при которой динамика испарения и количество испаренного вещества в экспериментах на КСПУ-Т будут соответствовать ожидаемым в ИТЭР во время импульсных переходных процессов. Продукты эрозии, образующиеся в результате взаимодействия плазменного потока и твердотельной мишени, могут захватывать изотопы водорода в процессе осаждения. Определение скорости осаждения и условий осаждения продуктов эрозии, а также их влияние на концентрацию захваченного дейтерия, представлено в третьей и четвертой главе соответственно.

В третьей главе рассмотрены условия осаждения продуктов эрозии при экспериментальном моделировании импульсных плазменно-тепловых нагрузок на КСПУ-Т. Измерены распределение массы осажденных продуктов эрозии, локальная тепловая нагрузка в местах их осаждения. На

основании измерений и расчетов даны рекомендации о выборе материала коллектора, предложены места расположения коллекторов для сбора и последующего облучения излучением продуктов эрозии. С помощью специально разработанной диагностики определена скорость осаждения продуктов эрозии. Проведено сопоставление между экспериментально полученной динамикой осаждения и расчетной динамикой испарения материалов.

Для имитации ЭЛМ-событий, ожидаемых в ИТЭР, в соответствии с выполненными расчетами, были выбраны следующие параметры импульса КСПУ-Т: плазменная тепловая нагрузка на оси потока плазмы $2,6 \text{ МДж/м}^2$, спадающая вдвое на расстоянии $\sigma_{\perp} = 3 \pm 0,5 \text{ см}$ от оси потока плазмы, длительность импульса $0,5 \text{ мс}$. При данных параметрах импульса будет происходить интенсивное испарение, как графита, так и вольфрама, и, следовательно, интенсивное осаждение эродированного материала. Описанные экспериментальные условия были идентичными для всех проводимых экспериментов по осаждению продуктов эрозии в настоящей работе.

Продукты эрозии, образующиеся в результате взаимодействия дейтериевого потока плазмы и мишени, осаждались на всю внутреннюю поверхность вакуумной камеры ускорителя. Для измерения скорости их осаждения была разработана и изготовлена диагностика, модуль которой был закреплен на расстоянии $l_3 = 35 \text{ см}$ от центра мишени, нормально по отношению к падающему потоку плазмы (рисунок 2 а). Принцип измерения скорости осаждения состоит в следующем (рисунок 2 б): поток продуктов эрозии осаждается через узкую щель (ширина 1 мм) в неподвижной маске на вращающийся диск, отстоящий от неё на 1 мм . Для того чтобы каждой точке на вращающемся диске мог быть сопоставлен определённый момент времени от начала разряда, необходима синхронизация. Для её осуществления используются свето- и фотодиоды: запуск КСПУ-Т происходит в тот момент, когда отверстие на вращающемся диске совмещается с отверстием в неподвижной маске. На рисунке 3 изображены типичные фото образцов, полученных в результате применения разработанной методики. На каждом из образцов можно видеть два следа: узкий и протяженный, полученные после 20 импульсов. Узкий след был получен при фиксированном положении диска. Протяженный след был получен при вращении диска (для графитовой мишени время одного оборота – $6,7 \text{ мс}$; для вольфрамовой мишени – 8 мс). Поскольку между запуском КСПУ-Т и вращающимся диском существует синхронизация, то может быть введен временной масштаб для обоих дисков: $1^{\circ} = 18,5 \text{ мкс}$ и $1^{\circ} = 22,2 \text{ мкс}$ для графитового и вольфрамового экспериментов соответственно. После введения временного масштаба можно определить временное разрешение разработанной диагностики. Временное разрешение определяется как произведение временного масштаба и углового размера узкого следа. В нашем случае временные разрешения равны 60 мкс и 70 мкс для графитового и

вольфрамового экспериментов соответственно. Полученные значения более чем на порядок меньше полного времени осаждения длительностью примерно 1 мс. Максимальное временное разрешение разработанной диагностики составляет 20 мкс при ширине щели 0,3 мм и времени оборота 5 мс.

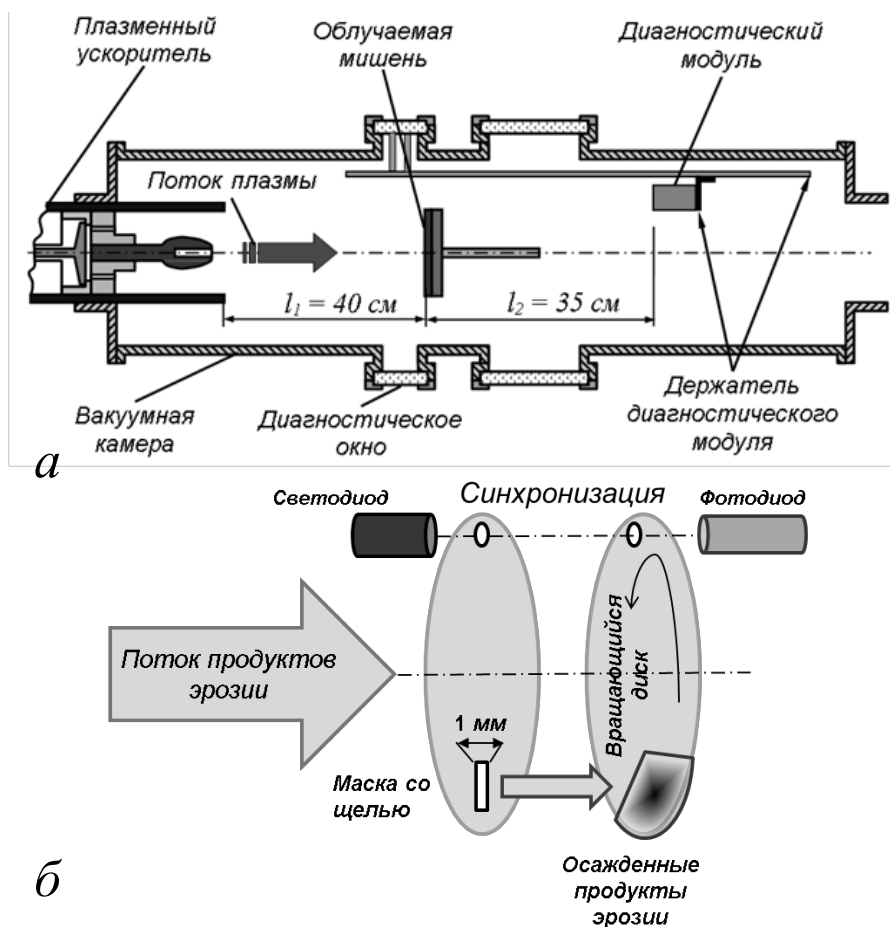


Рисунок 2 — Схема размещения диагностического модуля для измерения скорости осаждения (а) и принцип измерения скорости осаждения (б)

Как в эксперименте с графитовой мишенью, так и в эксперименте с вольфрамовой мишенью (рисунок 3 а, б), наблюдается задержка между началом разряда и началом осаждения: в это время происходит разогрев мишени до температуры, при которой начинается интенсивное испарение материалов. Далее скорость осаждения продуктов эрозии нарастает до определенного максимального значения, затем снижается и, в итоге, осаждение прекращается до окончания разряда. Экспериментально определенная средняя скорость осаждения продуктов эрозии в КСПУ-Т лежит в диапазоне $(10 - 70) \cdot 10^{19} \text{ атом} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ для графита и $(0,1 - 8) \cdot 10^{19} \text{ атом} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ для вольфрама, что значительно выше соответствующих скоростей осаждения при стационарных процессах [5-7].

Для того чтобы определить, как меняются во времени относительные содержания углерода и вольфрама в плазменном потоке, были измерены относительные концентрации углерода и вольфрама (при помощи энергодисперсионного рентгеновского анализа) в полученных образцах, изображенных на рисунке 3. Временные зависимости мощности разряда, скорости осаждения, расчетной скорости

испарения для графита и вольфрама представлены на рисунках 4 а и 4 б соответственно. Скорость осаждения и испарения нормирована на максимальное значение.

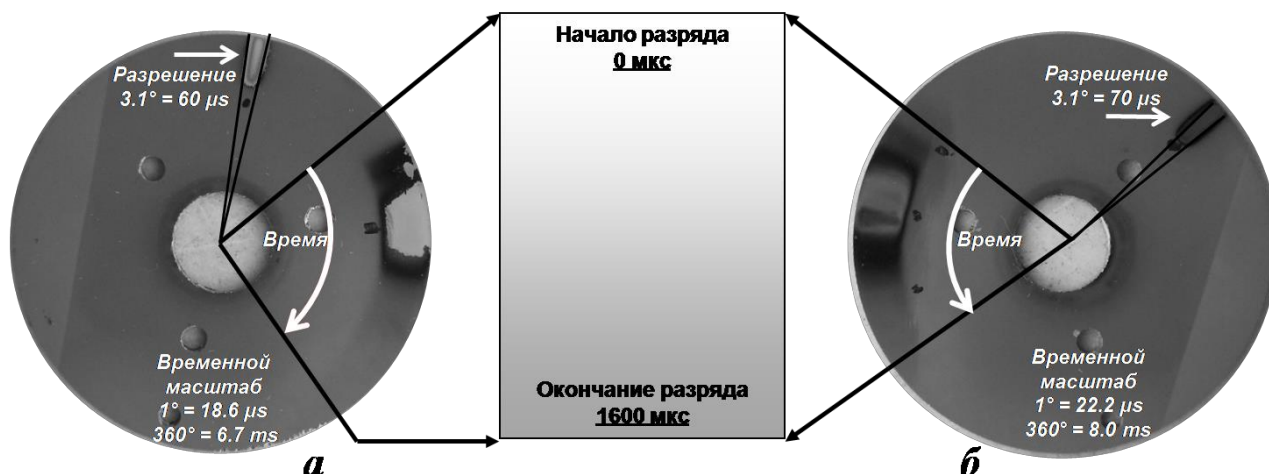


Рисунок 3 – Образцы, полученные в экспериментах по измерению скорости осаждения продуктов эрозии графита (а) и вольфрама (б)

Существует определенная корреляция (для графита выражена более явно, чем для вольфрама) между рассчитанной динамикой испарения (пунктирные линии на графиках – рисунок 4) и экспериментально полученной динамикой осаждения. Расхождение может быть связано с тем, что при расчете скорости испарения не учитывались, что теплофизические свойства материалов (теплопроводность, теплоемкость, плотность) могут существенно изменяться в результате многократного плазменного облучения из-за модификации поверхностного слоя. Для того чтобы оценить возможное изменение теплопроводности материалов (может иметь место при импульсном плазменном облучении материалов), был проведен расчет скорости испарения (серые сплошные линии на графиках рисунка 4) с заниженными значениями теплопроводности.

Наилучшее соответствие динамики испарения и осаждения для графита достигается, согласно расчетам, при уменьшении теплопроводности до 0,3 от значения для необлученного материала. Для более точного соответствия экспериментальных и расчетных данных необходимо учитывать процессы хрупкого разрушения графита, которые могут иметь место во время плазменного облучения. Такие процессы сопровождаются образованием частиц микронных и субмикронных размеров, интенсивно испаряющихся вблизи мишени [11]. Кроме того, на поверхности материала могут локально присутствовать участки, имеющие более низкую теплопроводность, из-за которых может продолжаться интенсивное испарение более длительное время в сравнении с расчетным (даже после 0,6 мс от начала плазменного воздействия, что наблюдается на рисунке 4 а).

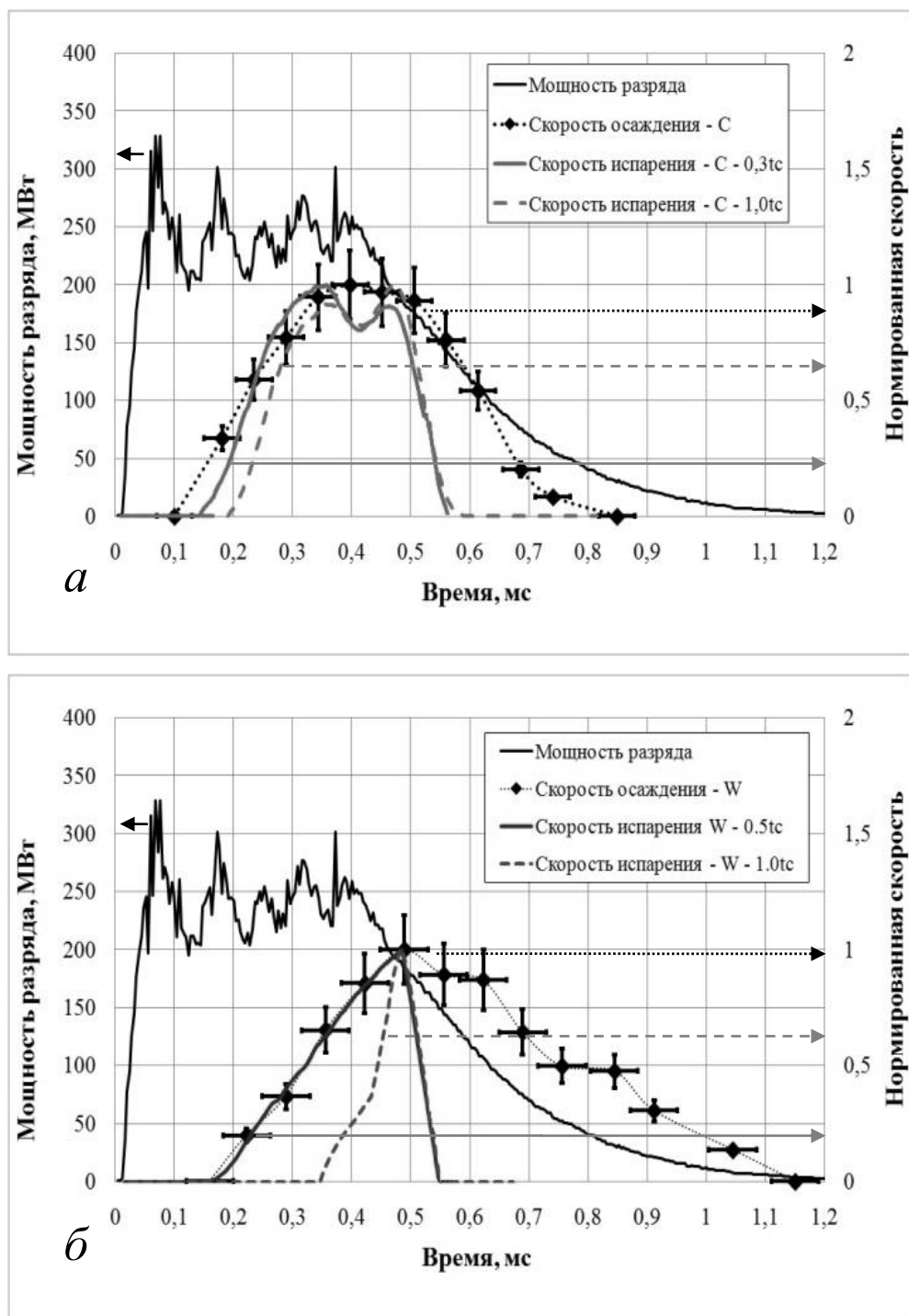


Рисунок 4 – Временные зависимости мощности разряда, скорости осаждения, скорости испарения для графита (а) и вольфрама (б)

Несмотря на то, что при дополнительном расчете значение теплопроводности графита было уменьшено более чем в 3 раза, изменения зависимости скорости испарения графита от времени оказались незначительными. Данный факт связан с тем, что расчет проводился таким образом, чтобы обеспечить соответствие между измеренным и расчетным профилем поверхности после многократного плазменного облучения.

В случае же вольфрама (рисунок 4 б) дополнительный расчет проводился без сопоставления измеренного и расчетного профилей поверхности, поскольку для вольфрама эрозия, обусловленная испарением, на порядок меньше, чем вызванная перемещением материала по поверхности и выбросом капель, и не может быть определена из измерений профиля [12]. В расчетах использовалось значение теплопроводности вольфрама, уменьшенное в 2 раза по сравнению с исходным. При этом наблюдается совпадение только переднего фронта скорости осаждения и испарения, задний фронт осаждения сильно не совпадает с расчетным фронтом испарения. По-видимому, несовпадение задних фронтов вызвано тем, что для вольфрама характерно интенсивное течение расплавленного слоя, при котором может происходить его отрыв от поверхности и образование капель. Вследствие чего, теряется тепловой контакт между поверхностью материала и расплавленным слоем, что приводит к увеличению времени испарения и, следовательно, и времени осаждения материала. Как было показано в [12], выброс капель с поверхности вольфрамовой мишени наблюдается как во время разряда, так и в течение 1,5 мс после его окончания. Следовательно, и осаждение испаренного материала может происходить в течение более длительного промежутка времени, по сравнению с расчетным.

Исходя из сопоставления экспериментально определенной динамики осаждения и проведенных расчетов динамики испарения для графита и вольфрама со скорректированными значениями теплопроводности, были определены значения тепловых нагрузок, при которых начинается интенсивное испарение материалов: 0,7 МДж/м² для графита и 1,6 МДж/м² для вольфрама (длительность импульса 0,5 мс). Хотя без учета деградации теплопроводности, по расчетным данным, испарение должно было бы наблюдаться при тепловой нагрузке более 1,1 МДж/м² для графита и более 1,9 МДж/м² для вольфрама (длительность импульса 0,5 мс), что соответствует значению фактора $W \cdot \sqrt{t}$ 49,2 МВтс^{0,5}/м² для графита и 85 МВтс^{0,5}/м² для вольфрама.

Необходимо отметить, что экспериментально определенные в настоящей работе значения тепловых нагрузок, при которых начинается интенсивное испарение осаждения графита и вольфрама, согласуются с соответствующими значениями для случая еще более коротких плазменных импульсов (таблица 1).

Таблица 1 – Тепловые нагрузки, обеспечивающие интенсивное испарение материалов

	Тепловая нагрузка Q , МДж/м ²	Длительность импульса t , мс	Тепловой поток W , ГВт/м ²	Фактор $W \cdot \sqrt{t}$, МВтс ^{0,5} /м ²
Графит (МК-200)	0,2	0,05	4	28,3
Графит (КСПУ-Т)	0,7	0,5	1,4	31,3
Вольфрам (МК-200)	0,5	0,05	10	70,7
Вольфрам (КСПУ-Т)	1,6	0,5	3,2	71,6

Таким образом, определенные в настоящей работе для обоих материалов пороговые значения фактора $W\sqrt{t}$ (таблица 1), при которых начинается интенсивное испарение материалов, практически совпадают с полученными ранее в работах на импульсном ускорителе при существенно меньшей длительности импульса [13,14], и также оказываются ниже расчетных. В работе [13] данный факт объясняется аналогично — деградацией теплопроводности поверхностного слоя материалов в результате многократного плазменного облучения.

В четвертой главе представлены характеристики осажденных пленок (структура поверхности, масса, толщина, плотность, элементный состав), рассмотрены эксперименты по изучению влияния скорости осаждения и температуры коллектора на концентрацию захваченных изотопов водорода в осажденных пленках. В результате проведенных экспериментов было установлено, что указанные параметры влияют на концентрацию захваченного дейтерия в осажденных пленках аналогично тому, как наблюдалось ранее в случае стационарного процесса. Проведено сопоставление полученных экспериментальных данных с эмпирическими выражениями, описывающими влияние указанных параметров на концентрацию захваченного дейтерия в осажденных пленках при существенно более низких скоростях осаждения.

В процессе взаимодействия дейтериевого потока плазмы (плазменная тепловая нагрузка на оси потока плазмы $2,6 \text{ МДж/м}^2$, спадающая вдвое на расстоянии $\sigma_{\perp} = 3 \pm 0,5 \text{ см}$ от оси потока плазмы, длительность импульса $0,5 \text{ мс}$). и нормально ориентированной по отношению к нему мишени происходило осаждение продуктов эрозии на поверхность экспериментальной камеры и коллекторов (изготовленных из полированного кремния и нержавеющей стали), установленных внутри камеры (рисунок 5). Во время осаждения продукты эрозии графитовой и вольфрамовой мишеней захватывают дейтерий, образуя в условиях КСПУ-Т, соответственно, углеводородные C—D- и вольфрамовые с примесью углерода C—W—D-плёнки. Аналогично ASDEX [15], наблюдалось значительное содержание примеси углерода в C—W—D-плёнках ($C/(C+W+D) = 0,1 - 0,25$), несмотря на то, что при облучении дейтериевой плазмой вольфрамовой мишени в вакуумной камере ускорителя отсутствовали материалы на основе углерода. Однако абсолютное содержание углерода в C—W—D-плёнках существенно ниже по сравнению с C—D-плёнками, полученными в экспериментах с графитовой мишенью.

Расположение коллекторов выбрано на основании проведенных экспериментов по изучению условий осаждения. Как было установлено в эксперименте, скорость осаждения зависит от угла β : чем больше β , тем больше скорость осаждения. Поэтому представляется возможным изменять скорость осаждения без изменения отношения относительных атомных концентраций D/C или D/W в потоке

плазмы, в отличие от выполненных ранее работ по имитации стационарных процессов ИТЭР, например [5,6].

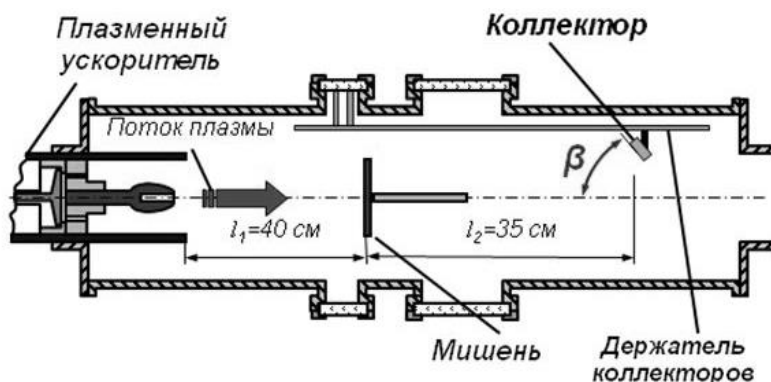


Рисунок 5 – Схема эксперимента для осаждения продуктов эрозии на коллекторы. Исследовались зависимости концентрации захваченного дейтерия в продуктах эрозии от скорости осаждения $\beta = 0^\circ$, 20° , 45° , 90° ($T = 300$ К фиксирована) и от температуры поверхности коллектора

$$T = 300, 450, 600, 750 \text{ К } (\beta = 90^\circ - \text{фиксирован})$$

Исследование влияния скорости осаждения на концентрацию изотопов водорода осуществлялось при одном значении температуры коллектора T , равном 300 К. При исследовании влияния температуры поверхности на концентрацию изотопов водорода был фиксирован угол $\beta = 90^\circ$ и, соответственно, скорость осаждения. Температура T определялась по показаниям хромель-алюмелевой термопары и варьировалась в диапазоне 300 – 750 К.

В результате проведенных экспериментов установлено, что количество захваченного дейтерия за импульс КСПУ-Т более чем на порядок меньше в С—W—D-плёнках, чем в С—D-плёнках (температура поверхности $T = 300$ К): $5.4 \cdot 10^{14}$ атом D/см² и $9 \cdot 10^{15}$ атом D/см² соответственно. Данный факт объясняется тем, что количество осажденного материала (число атомов) в экспериментах с графитовой мишенью как минимум на порядок выше, чем для экспериментов с вольфрамовой мишенью, а относительная концентрация дейтерия в осажденных пленках примерно одинакова ($D/C \approx D/(W+C) \approx 0,1 - 0,3$ при температуре поверхности 300 К). Относительные концентрации изотопов водорода такого же уровня наблюдались в экспериментах на установках SCFD и ToreSupra (для С—D- и С—H- пленок [7]), а также в магнетронных экспериментах (для W [5,6] и смешанных С—W—D-плёнок [16]).

При увеличении же температуры поверхности (от 300 до 750 К), концентрация дейтерия практически не изменяется в С—D-пленках (скорость осаждения $70 \cdot 10^{19}$ атом·см⁻²·с⁻¹), в то время как для С—W—D-плёнок (скорость осаждения $1,4 \cdot 10^{19}$ атом·см⁻²·с⁻¹) при высоких температурах поверхности (до 750 К) практически не наблюдается захвата дейтерия (рисунок 6). Причем пленки,

осажденные во время имитации импульсных переходных процессов на КСПУ-Т и в условиях стационарного процесса, имеют схожие зависимости концентрации дейтерия от температуры.

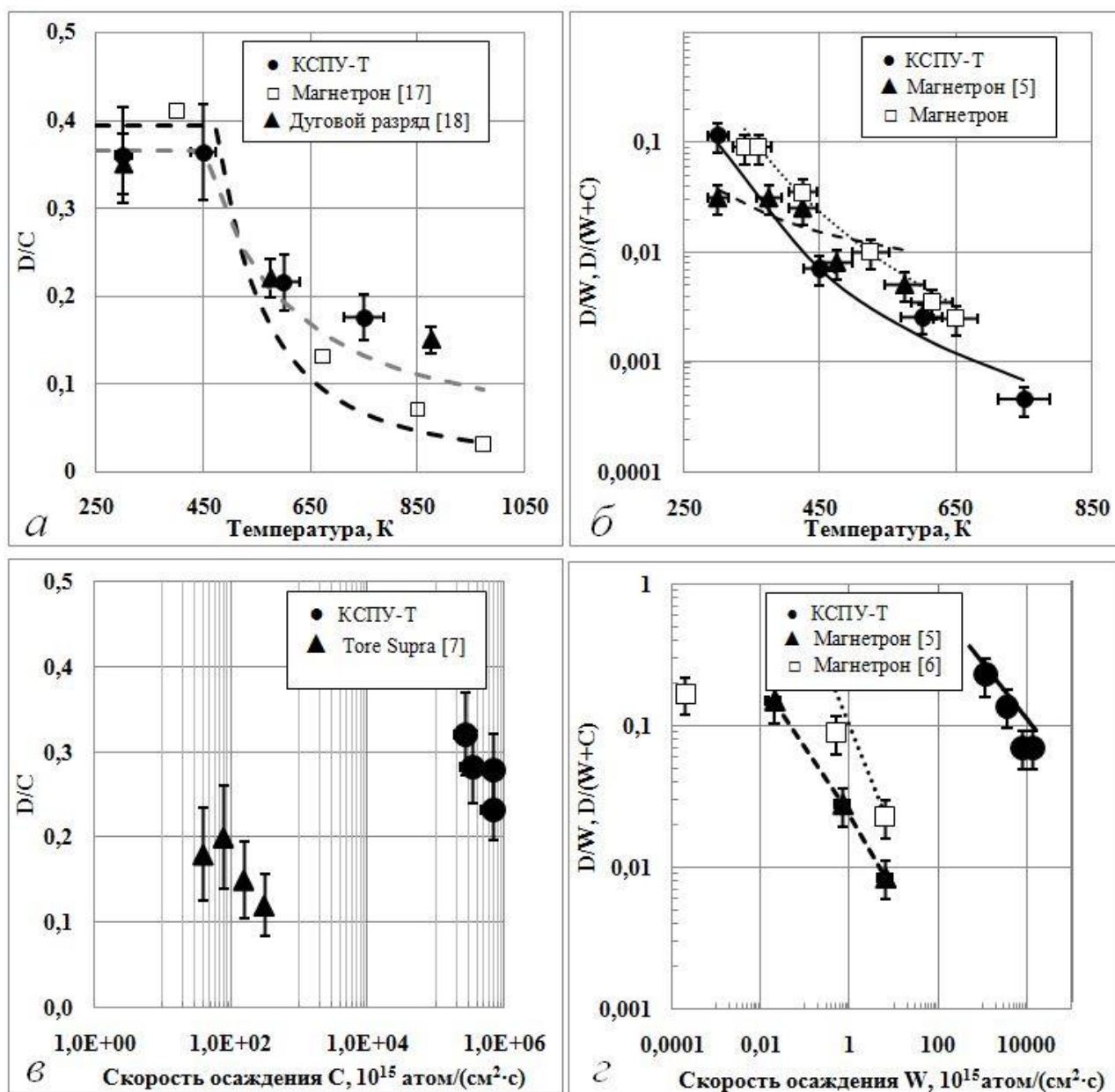


Рисунок 6—Зависимости относительных атомных концентраций D/C (а и в) и $D/(W+C)$ (б и г) от температуры подложки и скорости осаждения соответственно. Для сравнения приведены данные из работ [5-7,17,18]

При увеличении скорости осаждения продуктов эрозии графита от $20 \cdot 10^{19}$ до $70 \cdot 10^{19} \text{ atom} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) относительная атомная концентрация дейтерия в C—D-пленках, полученных на установке КСПУ-Т, незначительно уменьшается от $D/C = 0.35$, до $D/C = 0.22$ (температура поверхности $T = 300 \text{ K}$). Таким образом, концентрация дейтерия в C—D-пленках в широком диапазоне скоростей осаждения лежит в диапазоне $D/C = 0.1 - 0.35$ и практически не зависит от скорости осаждения — данный факт полностью согласуется с результатами, представленными в работе [17] (рисунок 6). При увеличении скорости

осаждения продуктов эрозии вольфрама от $0,1 \cdot 10^{19}$ до $1,4 \cdot 10^{19}$ атом·см⁻²·с⁻¹) концентрация дейтерия в С—W—D-плёнках уменьшается от $D/(W+C) = 0,23$ до $D/(W+C) = 0,1$ ($T = 300$ K), при этом концентрация дейтерия в случае КСПУ-Т обратно пропорциональна скорости осаждения, точно также как и в работах [5,6] (рисунок 6). Примечательно, что скорость осаждения на КСПУ-Т как минимум на три порядка выше, чем для соответствующих случаев стационарных процессов.

В результате анализа полученных экспериментальных данных, были установлены следующие эмпирические соотношения (по аналогии с предложенными в работах [5,17] при моделировании стационарных процессов) для описания влияния условий осаждения на захват дейтерия в С—D-плёнках (1), (2) и в С—W—D-плёнках (3), полученных при моделировании импульсных переходных процессов на КСПУ-Т:

$$\frac{D}{C} = 0.245 \cdot r_d^0 \cdot E_n^{-0.43} \cdot \exp\left(\frac{1150}{450}\right), 293 \text{ K} \leq T \leq 450 \text{ K}, \quad (1)$$

$$\frac{D}{C} = 0.245 \cdot r_d^0 \cdot E_n^{-0.43} \cdot \exp\left(\frac{1150}{T}\right), 450 \text{ K} \leq T \leq 973 \text{ K}, \quad (2)$$

$$\frac{D}{W+C} = 5.7 \cdot 10^{-8} \cdot r_d^{-0.4} \cdot E_n^{1.63} \cdot \exp\left(\frac{809}{T^{0.8}}\right), \quad (3)$$

где r_d – скорость осаждения вольфрама или углерода (в единицах 10^{15} атом·см⁻²·с⁻¹), T – температура поверхности (K), E_n – средняя энергия приходящего на поверхность дейтерия, $E_n = (150 \pm 50)$ эВ, что составляет 10 – 25 % от направленной энергии ионов в свободном плазменном потоке до его взаимодействия с мишенью [19]. В процессе взаимодействия плазменного потока с мишенью направленная энергия ионов существенно уменьшается за счет неупругих процессов (нагрев плазмы, потери на излучение) до указанного уровня согласно результатам измерений и численных расчетов [20].

Исходя из полученных экспериментальных результатов и данных работ [5-7,17,18], можно предположить, что при осаждении продуктов эрозии графита на внутреннюю поверхность стенки токамака, имеющую температуру в диапазоне 550 – 750 K, в них будет происходить захват изотопов водорода (относительная атомная концентрация будет находиться в диапазоне $D/C = 0,1 - 0,2$) как при стационарных, так и при импульсных процессах. В то время как, при осаждении продуктов эрозии вольфрама на внутреннюю поверхность стенки токамака, имеющую температуру в указанном диапазоне, в них практически не будет происходить захват изотопов водорода (относительные атомные концентрации $D/W \approx D/(W+C) < 0,01$) как при стационарных, так и при импульсных процессах.

Поскольку измеренные скорости осаждения намного выше, чем при стационарных процессах,

значительная часть продуктов эрозии будет формироваться именно во время переходных процессов. Следовательно, количество захваченного дейтерия во время таких процессов может быть сравнимым или даже больше, чем в стационарном случае, т.к. относительные концентрации D/C и $D/(W+C)$ примерно одинаковы для обоих случаев, но количество осажденного материала значительно больше в случае переходных процессов. Это означает, что при оценке общего количества захваченного дейтерия в продуктах эрозии, образующихся в токамаках, необходимо учитывать, что захват может происходить и во время импульсных переходных процессов.

В пятой главе рассмотрено влияние излучения, параметры которого характерны для ослабленных срывов ИТЭР, на свойства осажденных в условиях импульсных переходных процессов $C-D$ - и $C-W-D$ -пленок. Представлена геометрия эксперимента, выбранная на основе проведенных экспериментов по изучению условий осаждения, и описаны параметры излучения, генерируемого при торможении водородного потока плазмы КСПУ-Т на твердотельной мишени. Определены зависимости изменения относительной атомной концентрации дейтерия в $C-D$ - и $C-W-D$ -пленках от плотности энергии излучения и количества импульсов излучения при фиксированной плотности энергии. Проведено сопоставление полученных экспериментальных данных с результатами расчетов.

Облучение осажденных пленок излучением проводилось в соответствии с геометрией эксперимента, представленной на рисунке 7. Пленки многократно облучались излучением, параметры которого характерны для ослабленных срывов, ожидаемых в ИТЭР [8]: длительность 0,5 мс, интегральная плотность энергии излучения $Q = 0,05 - 0,5 \text{ МДж/м}^2$. В работе [21] было показано, что такое излучение может быть использовано для моделирования условий ослабленных срывов, ожидаемых в ИТЭР.

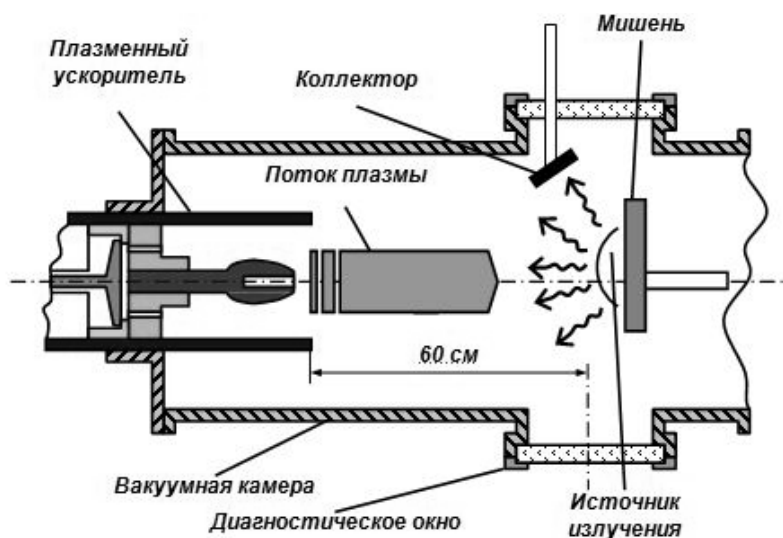
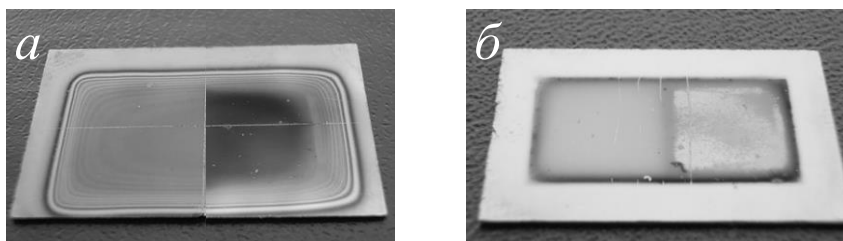


Рисунок 7 – Схема эксперимента по облучению излучением продуктов эрозии, осажденных на поверхность коллекторов

Для многократного облучения излучением использовалось два набора коллекторов с осажденными С—D- и С—W—D-пленками. Данные пленки были получены после 25-35 плазменных воздействий КСПУ-Т длительностью 0,5 мс с тепловой нагрузкой $2,6 \text{ МДж/м}^2$ (в центре мишени) по графитовой и вольфрамовой мишеням соответственно (температура коллектора находилась на уровне 300 К). При этом толщины осажденных С—D- и С—W—D-пленок лежали в диапазоне 0,75 – 1 мкм и 0,15 – 0,25 мкм соответственно. Таким образом, исследовалось изменение свойств С—D- и С—W—D-пленок, образовавшихся за одинаковое количество импульсов КСПУ-Т, под действием излучения.

Типичные фотографии облученных С—D- и С—W—D-пленок представлены на рисунке 8. Из представленных фотографий видно, что в результате облучения продуктов эрозии излучением наблюдается изменение оптических характеристик, проявляющиеся в изменение ее цвета и отражательной способности. Для изучения зависимости концентрации дейтерия в продуктах эрозии от параметров излучения было проведено две серии экспериментов: в ходе первой серии варьировалась плотность энергии излучения, приходящего на поверхность пленки при фиксированном количестве импульсов излучения, в ходе второй серии изменялось количество импульсов излучения при фиксированной плотности энергии излучения.



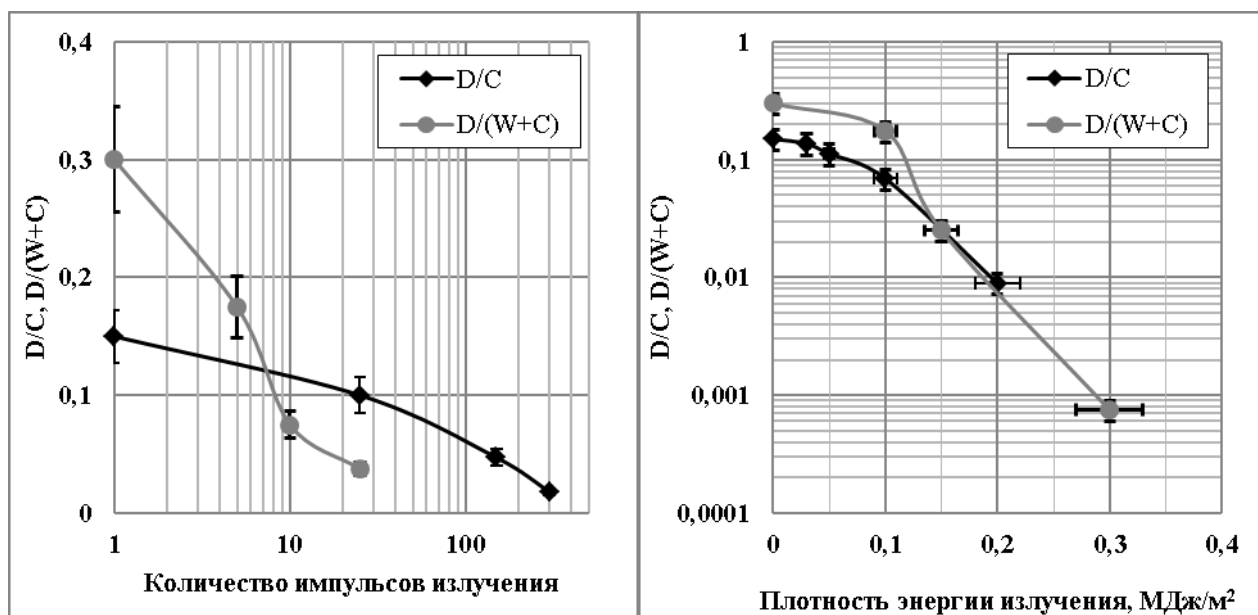
a — коллектор с облученной С—D-пленкой, $q_{lv}=0,05 \text{ МДж/м}^2$;

б — коллектор с облученной С—W—D-пленкой, $q_{lv}=0,1 \text{ МДж/м}^2$

Рисунок 8 – Типичные фотографии коллекторов до (левая половина коллектора) и после (правая половина коллектора) облучения излучением

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что концентрация дейтерия уменьшается после воздействия излучения, как в С—D-, так и в С—W—D-пленках. Однако, в случае С—D-пленок, уменьшение концентрации дейтерия при многократном воздействии излучения происходит гораздо медленнее, чем для С—W—D-пленок. Так, например, исходя из представленных на рисунке 9 *a* зависимостей, видно, что для уменьшения относительной концентрации дейтерия в 3-5 раз до уровня $D/C \approx D/(W+C) \approx 0,05$ требуется 150 и 15 импульсов излучения с плотностью энергии $0,05 \text{ МДж/м}^2$ и $0,1 \text{ МДж/м}^2$ для С—D- и С—W—D-пленок соответственно. Аналогично, при изменении плотности энергии излучения (рисунок 9 *б*), для уменьшения относительных концентраций дейтерия примерно в

одинаковое количество раз, необходимо 25 и 5 импульсов излучения для C—D- и C—W—D-пленок соответственно при фиксированных плотностях излучения.



а — плотность энергии излучения 0,05 и 0,1 МДж/м² для C—D и C—W—D-пленок соответственно,

б — количество импульсов излучения 25 и 5 для C—D- и C—W—D-пленок соответственно

Рисунок 9 — Концентрация дейтерия в C—D- и C—W—D-пленках в зависимости от количества импульсов излучения (а) и плотности энергии излучения (б)

На основании выполненных расчетов кинетики выхода захваченного дейтерия при воздействии теплового импульса (параметры которого соответствуют условиям эксперимента), сделан вывод о том, что уменьшение концентрации дейтерия в C—D- и C—W—D-пленках после облучения их излучением не может происходить вследствие импульсного теплового воздействия. Наиболее вероятной причиной уменьшения концентрации дейтерия является диапазон длин волн воздействующего излучения. Поскольку в аналогичных экспериментах по облучению продуктов эрозии лазерным излучением (длина волны 694,3 нм), выполненных в работе [22], концентрация дейтерия в них уменьшилась примерно в три раза. В то время как, в случае КСПУ-Т значительная часть энергии излучения приходится на ультрафиолетовую область спектра, и при этом концентрация дейтерия в продуктах эрозии уменьшается как минимум на порядок.

В заключении диссертации произведен анализ полученных данных, представлены основные выводы и результаты работы.

III. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Выполнено экспериментальное исследование характеристик пленок, образующихся при эрозии мишеней из графита и вольфрама под действием интенсивных импульсных потоков плазмы (плазменно-тепловая нагрузка на оси потока 2,6 МДж/м², длительность 0,5 мс.) на плазменном

ускорителе КСПУ-Т, а также исследование воздействия на эти пленки излучения, образующегося при торможении интенсивных импульсных потоков плазмы на мишени из графита. На основании анализа полученных экспериментальных данных сформулированы выводы и основные результаты работы:

1. Фактор $W\sqrt{t}$, при котором начинается интенсивное испарение графита составляет $31,3 \text{ МВт}\cdot\text{с}^{0,5}/\text{м}^2$, вольфрама — $71,6 \text{ МВт}\cdot\text{с}^{0,5}/\text{м}^2$, что приблизительно совпадает со значениями, полученными на импульсном плазменном ускорителе при существенно меньшей длительности импульса, которые также оказываются ниже расчетных.

2. Количество захваченного дейтерия за импульс КСПУ-Т более чем на порядок меньше в С—W—D-пленках, чем в С—D-пленках (температура поверхности $T = 300 \text{ К}$): $5,4 \times 10^{14}$ атом D/см² и 9×10^{15} атом D/см² соответственно.

3. Концентрация дейтерия в С—D-пленках в диапазоне высоких скоростей осаждения ($(10 - 70) \times 10^{19}$ атом·см⁻²·с⁻¹) лежит в интервале $D/C = 0,1 - 0,35$ и практически не зависит от скорости осаждения, что согласуются с результатами, полученными при скоростях осаждения менее 10^{18} атом·см⁻²·с⁻¹.

4. При увеличении скорости осаждения продуктов эрозии вольфрама от $0,1 \times 10^{19}$ до $1,4 \times 10^{19}$ атом·см⁻²·с⁻¹ концентрация дейтерия в С—W—D-пленках уменьшается от $D/(W+C) = 0,23$ до $D/(W+C) = 0,1$ (температура поверхности $T = 300 \text{ К}$), при этом концентрация дейтерия в случае КСПУ-Т пропорциональна $r_d^{0,4}$, как и при скоростях осаждения менее 10^{18} атом·см⁻²·с⁻¹.

5. При увеличении температуры поверхности коллектора (от 300 до 750 К), концентрация дейтерия практически не изменяется в С—D-пленках, в то время как для С—W—D-пленок при высоких температурах (до 750 К) поверхности захвата дейтерия практически не происходит.

6. Количество захваченного дейтерия во время импульсных переходных процессов термоядерного реактора может быть сравнимым или даже больше, чем в стационарном случае, т.к. относительные концентрации D/C и $D/(W+C)$ примерно одинаковы для обоих случаев, но количество осажденного материала значительно больше в случае переходных процессов.

7. Под действием излучения, образующегося при торможении интенсивных потоков плазмы относительная атомная концентрация дейтерия в осажденных пленках существенно уменьшается как в С—D, так и в С—W—D-пленках уже при плотности энергии излучения $0,05 \text{ МДж/м}^2$ и $0,1 \text{ МДж/м}^2$ соответственно. Однако, в случае С—D-пленок, уменьшение концентрации дейтерия при многократном воздействии излучения происходит гораздо медленнее, чем в случае С—W—D-пленок: для уменьшения относительной концентрации дейтерия в 3-5 раз требуется 150 и 15 импульсов

излучения с плотностью энергии $0,05 \text{ МДж/м}^2$ и $0,1 \text{ МДж/м}^2$ для C—D- и C—W—D-пленок соответственно.

8. Наблюдаемое в проведенных экспериментах существенное уменьшение концентрации дейтерия в C—D- и C—W—D-пленках после облучения их излучением не может объяснено тепловым воздействием (термодесорбцией), что указывает на наличие других механизмов выхода захваченных изотопов водорода под действием излучения плазмы в видимой и близкой ультрафиолетовой области спектра.

IV. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты работы опубликованы в семи печатных работах из них четыре в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. А. Б. Путрик, Н. С. Климов, В. А. Барсук, И. И. Архипов, Л. Б. Беграмбеков, П. А. Шигин, А. М. Житлухин, В. Л. Подковыров. Продукты эрозии обращенных к плазме материалов ТЯР, образующиеся в экспериментах по имитации импульсных переходных плазменных процессов ИТЭР на плазменном ускорителе КСПУ-Т // Сборник научных трудов XVI конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». 2013. Москва, Россия. С. 24 - 27.

2. А. Б. Путрик, Н. С. Климов, В. А. Барсук, Ю. М. Гаспарян, В. С. Ефимов, В. Л. Подковыров, А. М. Житлухин, А. Д. Ярошевская, Формирование продуктов эрозии обращенных к плазме материалов при характерных для ИТЭР переходных плазменных нагрузках в экспериментах на плазменных ускорителях КСПУ // Сборник научных трудов 56-й Научной конференции МФТИ-56. 2013. Москва, Россия. С. 154 – 155.

3. V. P. Budaev, Yu. V. Martynenko, A. V. Karpov, N. E. Belova, A. M. Zhitlukhin, N. S. Klimov, V. L. Podkovyrov, V. A. Barsuk, A. B. Putrik, A. D. Yaroshevskaya, R. N. Giniyatulin, V. M. Safronov, L. N. Khimchenko. Tungsten recrystallization and cracking under ITER-relevant heat loads // ПИЦ «Курчатовский институт». Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2013. т. 36. №3. С. 53-60.

4. A. B. Putrik, N. S. Klimov, Yu. M. Gasparyan, V. A. Barsuk, V. S. Efimov, V. L. Podkovyrov, A. M. Zhitlukhin, A. D. Yaroshevskaya, D. V. Kovalenko. Plasma-Facing Material Erosion Products Formed Under ITER-Like Transient Loads at QSPA-T Plasma Gun Facility // Fusion Science and Technology. 2014. V. 66. P. 70-77.

5. A. Putrik, N. Klimov, Yu. Gasparyan, V. Efimov, V. Barsuk, V. Podkovyrov, A. Zhitlukhin, A. Yaroshevskaya, D. Kovalenko. Deuterium retention in erosion products of plasma facing materials under ITER-like transient loads // The book of abstracts of Summer School on the Physics of Plasma-Surface Interactions, July 28 – August 4, Moscow, Russia. 2014. P. 28.

6. N. S. Klimov, V. L. Podkovyrov, A. M. Zhitlukhin, A. D. Muzichenko, D. V. Kovalenko, A. B. Putrik, I. B. Kupriyanov, R. N. Giniyatulin, A. A. Gervash, V. M. Safronov. Plasma-Facing Materials Erosion Under ITER-Like Transient Loads at QSPA Plasma Gun Facility // *Fusion Science and Technology*. 2014. V. 66. P. 118-124.

7. А. Б. Путрик, Н. С. Климов, Ю. М. Гаспарян, В. С. Ефимов, В. А. Барсук, В. Л. Подковыров, А. М. Житлухин, А. Д. Ярошевская. Продукты эрозии обращенных к плазме материалов, образующиеся при характерных для ИТЭР импульсных плазменных процессах, и захват изотопов водорода в них // РИЦ «Курчатовский институт». Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2014. Т. 37. №3. С. 15-30.

V. СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hirai T., Escoubiac F. ITER tungsten divertor and status // Research Coordination Meeting “PWI with Irradiated tungsten and tungsten alloys in Fusion device”, 26–28 November, Vienna, Austria.

2. Barabash V., Akiba M., Mazul I. et al. Selection, development and characterisation of plasma facing materials for ITER // *Journal of Nuclear Materials*. 1996. V. 233–237. P. 718–723.

3. Causey R. A. Hydrogen isotope retention and recycling in fusion reactor plasma-facing components // *Journal of Nuclear Materials*. 2002. V. 300. P. 91–117.

4. Loarer T., Brosset C., Bucalossi J. et al. Gas balance and fuel retention in fusion devices // *Nuclear Fusion*. 2007. V. 47. P. 1112.

5. De Temmerman G., Doerner R. P. Deuterium retention and release in tungsten co-deposited layers // *Journal of Nuclear Materials*. 2009. V. 389. P. 479.

6. Alimov V. Kh., Roth J., Shu W. M. et al. Deuterium trapping in tungsten deposition layers formed by deuterium plasma sputtering // *Journal of Nuclear Materials*. 2010. V. 399. P. 225

7. Begrambekov L., Barsuk V., Dubrov M. et al. Deuterium trapping in carbon films formed in different deposition conditions // *Journal of Nuclear Materials*. 2013. V. 438. P. 971–974.

8. Landman I., Pitts R. A., Saibene G. et al. Modelling of first wall photonic heat loads during disruption mitigation by massive gas injection on ITER // 16th International Conference on Fusion Reactor Materials, 20 - 26 October 2013, Beijing, China.

9. Pitts R. A., Carpentier S., Escoubiac F. et al. Physics basis and design of the ITER plasma-facing components // *Journal of Nuclear Materials*. 2011. V. 415. P. 957–964

10. Климов Н.С. Макроскопическая эрозия материалов при их облучении интенсивными потоками плазмы // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Троицк. 2011 г.

11. Архипов Н. И., Сафронов В. М., Барсук В. А. и др. Эрозия углеграфитовых материалов при облучении интенсивными потоками плазмы // РНЦ «Курчатовский институт». Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2009. № 4. С. 3
12. Климов Н. С., Подковыров В. Л., Житлухин А. М. и др. Разбрызгивание вольфрама при воздействии интенсивного потока плазмы // РНЦ «Курчатовский институт». Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2009. № 2. С. 52.
13. Safronov V. M., Arkhipov N. I., Landman I. S. et al. Evaporation and vapor shielding of CFC targets exposed to plasma heat fluxes relevant to ITER ELMs // Journal of Nuclear Materials. 2009. V. 386-388. P. 744 – 746.
14. Позняк И. М., Архипов Н. И., Карелов С. В. и др. Свойства примесей вольфрама, образующихся в плазме при облучении вольфрамовых мишеней мощными плазменными потоками. // РНЦ «Курчатовский институт». Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2014. № 1, с. 70.
15. Mayer M., Rohde V. H. G., Sugiyama K. et al. Carbon balance and deuterium inventory from a carbon dominated to a full tungsten ASDEX Upgrade // Journal of Nuclear Materials. 2009. V. 390–391. P. 538 – 543.
16. Krat S., Gasparyan Yu., Efimov V. et al. Deuterium retention in mixed C–W–D films co-deposited in magnetron discharge in deuterium // Journal of Nuclear Materials. 2013. V. 438. P. 204 – 208.
17. Doerner R., Issues associated with codeposition of deuterium with ITER materials // 22nd IAEA Fusion Energy Conference. October 2008. Geneva. Switzerland.
18. Youshida H., Taniguchi M., Yokoyama K. et al. Deuterium retention in carbon dust and carbon–tungsten mixed dust prepared by deuterium arc discharge // Journal of Nuclear Materials. 2004. V. 329 – 333. P. 790 – 794.
19. Klimov N., Podkovyrov V., Zhitlukhin A. et al. Experimental study of PFCs erosion under ITER-like transient loads at plasma gun facility QSPA // Journal of Nuclear Materials. 2009. V. 390 – 391, P. 721 – 726.
20. Bazylev B., Janeschitz G., Landman I. et al. Experimental and theoretical investigation of droplet emission from tungsten melt layer // Fusion Engineering and Design. 2009. V. 84. P. 441 – 445.
21. Klimov N. S., Linke J., Pitts R. A., et al. Stainless steel performance under ITER-relevant mitigated disruption photonic heat loads // Journal of Nuclear Materials. 2013. V. 438. P. 241 – 245.
22. Rubel M., Ivanova D., Philipps V. et al. Fuel Removal from Plasma – Facing Components: Overview of Methods Tested on Materials from the TEXTOR Tokamak // 11th International Workshop, on Hydrogen Isotopes in Fusion Reactor Materials, 29-31, May 2012, Julich, Germany.