УДК 533.924

ПРОДУКТЫ ЭРОЗИИ ОБРАЩЁННЫХ К ПЛАЗМЕ МАТЕРИАЛОВ, ОБРАЗУЮЩИЕСЯ ПРИ ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ ИТЭР ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССАХ, И ЗАХВАТ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В НИХ

А.Б. Путрик¹, Н.С. Климов¹, Ю.М. Гаспарян², В.С. Ефимов², В.А. Барсук¹, В.Л. Подковыров¹,
А.М. Житлухин¹, А.Д. Ярошевская¹, Д.В. Коваленко¹

¹Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Троицк, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт», Москва, Россия

Эрозия обращенных к плазме материалов во время импульсных переходных процессов является одной из проблем реактора-токамака ИТЭР. Существующих экспериментальных данных недостаточно для того, чтобы предсказать свойства продуктов эрозии, значительная часть которых будет образовываться во время импульсных переходных процессов (ЭЛМ-события и срывы). В работе представлены результаты экспериментального исследования продуктов эрозии графита и вольфрама, осажженных в условиях импульсных плазменных процессов на КСПУ-Т: тепловая нагрузка на мишень 2,6 МДж/м², длительность воздействия плазмы 0,5 мс. Разработанная диагностика для измерения скорости осаждения позволила определить, что осаждение эродированного материала происходит во время разряда, диапазон изменения скорости осаждения продуктов лежит в интервале (0,1—100)10¹⁹ ат./с·см², что существенно выше скорости осаждения при стационарных процессах. Обнаружено, что относительные атомные концентрации дейтерия D/C и D/(W + C) в продуктах эрозии, осажженных в условиях импульсных процессов на КСПУ-Т, находятся на том же уровне, что и в случае стационарных процессов. Установлено, что при облучении продуктов эрозии излучением, параметры которого характерны для ослабленного срыва ИТЭР (длительность 0,5—1 мс, интегральная плотность энергии излучения $Q = 0,1—0,5$ МДж/м²), происходит существенное уменьшение концентрации захваченного в них дейтерия.

Ключевые слова: ИТЭР, продукты эрозии, захват изотопов водорода, скорость осаждения, воздействие излучения.

EROSION PRODUCTS OF PLASMA FACING MATERIALS FORMED UNDER ITER-LIKE TRANSIENT LOADS AND DEUTERIUM RETENTION IN THEM

A.B. Putrik¹, N.S. Klimov¹, Yu.M. Gasparyan², V.S. Efimov², V.A. Barsuk¹,
V.L. Podkovyrov¹, A.M. Zhitlukhin¹, A.D. Yarochevskaya¹, D.V. Kovalenko¹

¹ State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, Troitsk, Moscow, Russia

² National Research Nuclear University «Moscow Engineering Physics Institute», Moscow, Russia

Erosion of the plasma facing materials in particular evaporation of the materials, in a fusion reactor under intense transient events is one of the ITER problems. The current experimental data are insufficient to predict the properties of the erosion products, significant part of which will be formed during transient events (Edge-Localized-Modes (ELMs) and disruptions). The paper concerns the experimental investigation of the graphite and tungsten erosion products deposited under pulse plasma load at the QSPA-T: heat load on the target was 2.6 MJ/m² with 0.5 ms pulse duration. Designed diagnostics for measuring the deposition rate allowed to determine that the deposition of eroded material occurs during discharge, and the deposition rate is in the range (0.1—100)10¹⁹ at./s·cm², which is much higher than that for stationary processes. It was found that the relative atomic concentration D/C and D/(W + C) in the erosion products deposited during pulse process are on the same level as for the stationary process. An exposure of erosion products to photonic energy densities relevant to those expected at mitigated disruptions on in ITER (pulse of 0.5—1 ms duration, integral energy density of radiation 0.1—0.5 MJ/m²) significantly decreases the concentration of trapped deuterium.

Key words: ITER, erosion products, hydrogen isotopes retention, the deposition rate, radiation.

ВВЕДЕНИЕ

Эрозия обращенных к плазме материалов во время импульсных переходных процессов является одной из проблем реактора-токамака ИТЭР. Существующих экспериментальных данных недостаточно для того, чтобы предсказать свойства продуктов эрозии, значительная часть которых будет образовываться во время импульсных переходных процессов (ЭЛМ-события и срывы). Эродировавший материал может осаждаться совместно с тритием как при стационарном процессе, так и при высоких скоростях осаждения во время переходных процессов. Предполагается, что осажженные таким образом пленки будут содержать значительное количество захваченного трития и являться основным источником его накопления в вакуумной камере ИТЭР [1, 2]. Большая часть существующих экспериментальных данных о свойствах продуктов эрозии относится к случаю стационарных процессов, при которых скорость осаждения мала (менее 10¹⁸ ат./с·см²) [3—5].

В настоящей работе представлены результаты исследования продуктов эрозии, образующихся при экспериментальном моделировании характерных для ИТЭР импульсных переходных процессов на плазменном ускорителе КСПУ-Т, во время которых скорость осаждения может существенно превышать указанное значение. Данный ускоритель обеспечивает плазменно-тепловые нагрузки, близкие к ожидаемым в ИТЭР во время импульсных переходных процессов, и используется как для исследования эрозии материалов [6], так и для проведения ресурсных испытаний обращённых к плазме компонентов дивертора ИТЭР [7]. Продукты эрозии, образующиеся при импульсном плазменном облучении материалов на КСПУ-Т, условно можно разделить на два класса: продукты макроскопической (частицы и капли микронных и субмикронных размеров) и микроскопической (плёнки, образующиеся при осаждении испаренного материала) эрозии. Данная работа посвящена исследованию продуктов микроскопической эрозии, осаждаемых во время импульсных переходных процессов при облучении мишеней из графита и вольфрама дейтериевым потоком плазмы КСПУ-Т. 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 [8] значительное содержание примеси углерода в C—W—D-плёнках наблюдалось, 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.

Поскольку предполагается, что скорость осаждения продуктов эрозии во время импульсных процессов как минимум на порядок выше, чем для стационарного процесса, для её измерения в КСПУ-Т была разработана специальная диагностика с временным разрешением 0,025 мс (при длительности импульса 0,5 мс). С помощью данной диагностики можно не только определить моменты начала и окончания осаждения, но и изменение скорости осаждения и свойств продуктов эрозии во времени.

При исследовании влияния условий осаждения на захват дейтерия продуктами эрозии было установлено, что параметры осаждения, такие, как скорость осаждения и температура поверхности, влияют на концентрацию дейтерия в осаждаемых плёнках, как и в случае стационарного процесса.

Наряду с локальным плазменно-тепловым воздействием на материалы при ЭЛМ-событиях и срывах воздействию излучения во время ослабленных срывов ИТЭР будет подвергаться вся внутренняя поверхность камеры токамака, в том числе и продукты эрозии материалов. Поэтому в настоящей работе также исследовались изменения свойств осаждаемых C—D- и C—W—D-плёнок после их многократного облучения излучением. Генерация излучения осуществлялась при торможении водородного потока плазмы КСПУ-Т на твёрдотельной мишени. Параметры излучения, такие, как длительность воздействия и интегральная плотность энергии излучения, соответствуют ожидаемым во время ослабленных срывов ИТЭР [9].

Концентрация вольфрама и углерода в C—W—D- и C—D-плёнках определялась энергодисперсионным рентгеновским анализом и методом резерфордского обратного рассеяния, а концентрация дейтерия — термодесорбционной спектроскопией и методом ядер отдачи.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ЭРОЗИИ, ОСАЖДЁННЫХ В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Рис. 1. Схема эксперимента для накопления продуктов эрозии на коллекторы и измерения скорости осаждения ($\beta = 90^\circ$). Исследовались зависимости концентрации захваченного дейтерия в продуктах эрозии от скорости осаждения $\beta = 0^\circ, 20^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ ($T = 300$ К фиксирована) и от температуры поверхности коллектора $T = 300, 450, 600, 750$ К ($\beta = 90^\circ$ фиксирован)

Схема и условия эксперимента. В процессе взаимодействия потока плазмы и нормально ориентированной по отношению к нему мишени происходило осаждение продуктов эрозии, сопровождающееся захватом в них дейтерия, на поверхность экспериментальной камеры и установленных коллекторов внутри камеры, изготовленных из полированного кремния и нержавеющей стали (рис. 1). В экспериментах использовались мишени, изготовленные из вольфрама В-МП (размер $100 \times 120 \times 10$ мм) и графита МПГ-6 (размер $120 \times 120 \times 5$ мм). Для имитации ЭЛМ-событий, ожидаемых в ИТЭР [10], были выбраны следующие параметры импульса

КСПУ-Т: плазменная тепловая нагрузка в центре мишени $2,6 \text{ МДж/м}^2$, длительность импульса $0,5 \text{ мс}$. При данных параметрах импульса согласно проведенным расчётам в настоящей работе будет происходить интенсивное испарение как графита, так и вольфрама и, следовательно, интенсивное осаждение эродированного материала.

Тепловая нагрузка определялась аналогично [11] с помощью многоканального термопарного калориметра. Более подробно параметры плазменного потока описаны ранее [11]. Вакуум в экспериментальной камере поддерживался на уровне не хуже $5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$. Описанные экспериментальные условия были идентичными для всех проводимых экспериментов по осаждению продуктов эрозии в настоящей работе.

Продукты эрозии осаждались на коллекторы, закреплённые на специальном держателе, оснащённом нагревателем. Конструкция держателя позволяла задавать угол β (см. рис. 1) между поверхностью коллектора и направлением потока плазмы в диапазоне $0\text{—}90^\circ$. 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 D/C или D/W в потоке плазмы в отличие от выполненных ранее работ по имитации стационарных процессов ИТЭР, например [3, 4]. Модуль разработанной диагностики для измерения скорости осаждения был закреплён в том же месте, что и коллекторы, в этом случае $\beta = 90^\circ$ (см. рис. 1). Для других значений угла β средняя скорость осаждения определялась исходя из интегрального изменения массы коллектора после осаждения на него продуктов эрозии и измеренного с помощью разработанной диагностики времени осаждения.

Исследование влияния скорости осаждения на захват изотопов водорода осуществлялось при одном значении температуры коллектора T , равном 300 К . При исследовании влияния температуры поверхности на захват изотопов водорода были фиксированы угол $\beta = 90^\circ$ и скорость осаждения. Температура T определялась по показаниям хромель-алюмелевой термопары и варьировалась в диапазоне $300\text{—}750 \text{ К}$. Во время каждого пуска КСПУ-Т температура коллектора повышалась примерно на 25 К из-за тепловой нагрузки на поверхность коллектора ($1\text{—}2 \text{ Дж/см}^2$), поэтому пуски производились с интервалом 10 мин . За это время температура возвращалась к стационарному уровню.

Результаты экспериментов. Измерение скорости осаждения на плазменном ускорителе КСПУ-Т. Принцип измерения скорости осаждения состоит в следующем (рис. 2): поток продуктов эрозии осаждается через узкую щель 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 только тогда, когда отверстие на вращающемся диске совмещается с отверстием в неподвижной маске.

При использовании синхронизации осаждение продуктов эрозии в каждом импульсе будет происходить в одном и том же месте диска. Значит, при увеличении числа импульсов толщина осаждаемой на диск плёнки будет расти линейно, что позволит получать плёнки с толщиной, необходимой для обеспечения достаточной точности измерения скорости осаждения.

На рис. 3 изображены типичные фотографии образцов, полученных в результате применения разработанной методики. На каждом из образцов можно видеть два следа: узкий и протяжённый, полученные после 20 импульсов. Узкий след был

Рис. 2. Принцип измерения скорости осаждения

Рис. 3. Образцы, полученные в экспериментах по измерению скорости осаждения продуктов эрозии графита (а) и вольфрама (б), и СЭМ — снимки их поверхностей (в) и (г) соответственно

получен при фиксированном положении диска. Протяжённый след был получен при вращении диска (для графитовой мишени время одного оборота 6, 7 мс, для вольфрамовой мишени — 8 мс).

Поскольку между запуском КСПУ-Т и вращающимся диском существует синхронизация, то может быть введён временной масштаб для обоих дисков: $1^\circ = 18,5$ и $1^\circ = 22,2$ мкс для графитового и вольфрамового экспериментов соответственно (вычисляются путём деления времени одного оборота на 360°). После введения временного масштаба можно определить временное разрешение разработанной диагностики. Временное разрешение определяется как произведение временного масштаба и углового размера узкого следа. Разрешение зависит от двух параметров: ширина щели (см. рис. 2) и скорости вращения диска. Таким образом, чем уже ширина щели, тем меньше будет угловой размер узкого следа, следовательно, тем лучше будет разрешение. Подобная ситуация наблюдается и со скоростью вращения диска: чем выше скорость вращения, тем меньше временной масштаб, следовательно, тем лучше будет разрешение. Наилучшее разрешение, которое может быть достигнуто при использовании данной диагностики, составляет 25 мкс (время одного оборота 5 мс, ширина щели 0,3 мм). В нашем случае временные разрешения равны 60 и 70 мкс для графитового и вольфрамового экспериментов соответственно. Полученные значения более чем на порядок меньше полного времени осаждения длительностью примерно 1 мс.

Морфология поверхности осаждённых на вращающиеся диски графитовых и вольфрамовых плёнок изучалась при помощи СЭМ. На рис. 3, *в* изображён типичный участок поверхности осаждённой C—D-плёнки с узором в виде зигзагообразных линий. Поверхность W-плёнки (см. рис. 3, *г*) покрыта множеством мелких металлических капель (характерный размер 0,1 мкм), вероятно, что данные капли представляют собой конденсат паров металла, осаждённого на диск.

Как в эксперименте с графитовой мишенью, так и в эксперименте с вольфрамовой мишенью (см. рис. 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 определённого максимального значения, затем снижается и, в итоге, осаждение прекращается до окончания разряда.

Относительная концентрация углерода и вольфрама в полученных образцах измерялась с помощью энергодисперсионного рентгеновского анализа. Таким образом, можно определить, как меняется во времени относительное содержание углерода и вольфрама.

Временные зависимости мощности разряда, экспериментально определённой скорости осаждения, расчётной скорости испарения для графита и вольфрама представлены на рис. 4, *а, б* соответственно.

Скорость осаждения и испарения нормирована на максимальное значение. Для вычисления скорости испарения использовалась программа расчёта, численно решающая нелинейное уравнение теплопроводности с учётом фазовых переходов (плавление и испарение), температурных зависимостей теплофизических свойств материалов и зависимости теплового потока на поверхность мишени от времени. Кроме скорости испарения, данная программа позволяет вычислить изменение профиля поверхности при заданном распределении тепловой нагрузки на поверхности материала и, наоборот, восстановить распределение тепловой нагрузки на поверхности для измеренного профиля поверхности.

Рис. 4. Временные зависимости мощности разряда (—), скорости осаждения (•), скорости испарения для графита (*а*) и вольфрама (*б*): — — — расчёт скорости испарения для значения теплопроводности идеального материала; — — — уменьшенное значение теплопроводности в 3 и 2 раза для графита и вольфрама соответственно

Поскольку истинная зависимость приходящей тепловой нагрузки на поверхность мишени от времени не измерялась, то расчёт был выполнен для трёх форм импульса теплового потока, повторяющих форму мощности разряда, форму импульса давления (приведена в [11]) и прямоугольную форму. При этом следует заметить, что формы мощности разряда и импульса давления достаточно хорошо аппроксимируются прямоугольной формой импульса (рис. 5).

Наилучшая сходимость между экспериментально измеренной динамикой осаждения и расчётной динамикой испарения достигалась при использовании в качестве формы импульса мощности тепловой нагрузки, повторяющей форму импульса давления для графита и прямоугольника в случае вольфрама. Как можно заметить, существует определённая корреляция (для графита выражена более явно, чем для вольфрама) между рассчитанной динамикой испарения (пунктирные линии на графиках рис. 4) и экспериментально полученной динамикой осаждения. Расхождение может быть связано с тем, что при расчёте скорости испарения не учитывалось, что теплофизические свойства материалов (теплопроводность, теплоёмкость, 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 проведён расчёт скорости испарения (бордовые линии на графиках рис. 4) с заниженным значением теплопроводности.

Наилучшее соответствие динамики испарения и осаждения для графита достигается согласно расчётам при уменьшении теплопроводности до 0,3 от значения для необлучённого материала. Для более точного соответствия экспериментальных и расчётных 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 [12]. 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 расчётным (даже после 0,6 мс от начала плазменного воздействия, что наблюдается на рис. 4, а).

Несмотря на то, что при дополнительном расчёте 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 расчёт проводился таким образом, чтобы обеспечить соответствие между измеренным и расчётным профилем поверхности после многократного плазменного облучения. Профиль поверхности в настоящих экспериментах измерялся с применением механического профилометра. Измеренный исходный профиль поверхности и профиль кратера эрозии после многократного плазменного облучения, а также расчётные профили поверхности при различных распределе-

Рис. 5. Зависимость мощности разряда (—) от времени, форма импульса давления C (—) и прямоугольный импульс W (—) мощности тепловой нагрузки на поверхность мишени

Рис. 6. Измеренные исходный (■), после многократного плазменного облучения (—) и расчётные профили кратера при соответствующих распределениях тепловой нагрузки: полученные с Nb-калориметра (—), расчётные для исходного (—) и уменьшенное в 3 раза значения теплопроводности (а); измеренный профиль тепловой нагрузки на Nb-калориметре (—), расчётные профили нагрузки для исходного (—) и уменьшенного в 3 раза значений теплопроводности на поверхности графита (б)

ниях тепловой нагрузки на поверхности графита представлены на рис. 6. Методика измерения распределённой по поверхности материала тепловой нагрузки многоканальным термодатным калориметром была описана ранее, например, в работе [11].

Как следует из данных рис. 6, измеренный профиль кратера эрозии (зелёная линия на рис. 6, а) сильно не совпадает с расчётным (голубая линия на рис. 6, а) в случае использования распределения тепловой нагрузки, полученного с ниобиевого калориметра (голубая линия на рис. 6, б). Совпадение между измеренным и расчётным профилями поверхности (см. рис. 6, а) может быть получено только в том случае, если использовать в расчётах другие распределения тепловой нагрузки, представленные на рис. 6, б: фиолетовая и красная линии для исходного и уменьшенного в 3 раза значений теплопроводности графита соответственно. Данный факт означает, что при прочих равных условиях распределение тепловой нагрузки на поверхности зависит от материала облучаемой мишени. Этот эффект может быть объяснён влиянием испаренного вещества на распределение тепловой нагрузки по поверхности, что, по сути, представляет собой слабый случай эффекта экранировки, исследованного в работе [12] на импульсных плазменных ускорителях. В условиях плазменного облучения на КСПУ-Т эффект экранировки выражен не так явно: эрозия графита уменьшается примерно в 2 раза в сравнении с расчётным значением.

В случае вольфрама дополнительный расчёт проводился без сопоставления измеренного и расчётного 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 [11].

В расчётах 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 расчётным фронтом испарения. Повидимому, несовпадение задних фронтов вызвано тем, что для вольфрама характерно интенсивное течение расплавленного слоя, при котором могут происходить его отрыв от поверхности и образование капель. Вследствие чего теряется тепловой контакт между поверхностью материала и расплавленным слоем, а это приводит к увеличению испарения материала и, следовательно, его осаждению. Как было показано в [11], 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 расчётным.

Исходя из сопоставления экспериментально определённой динамики осаждения и проведённых расчётов 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 учёта деградации теплопроводности, по расчётным данным, испарение должно было бы происходить при тепловой нагрузке более 1,1 МДж/м² для графита и более 1,9 МДж/м² для вольфрама (длительность импульса 0,5 мс).

Необходимо отметить, что экспериментально определённые в настоящей работе значения тепловых нагрузок, при которых начинается интенсивное испарение графита и вольфрама, согласуются с соответствующими значениями для случая коротких плазменных импульсов (см. таблицу). Так, в работах [13 и 14] были экспериментально определены тепловые нагрузки, при которых начинается интенсивное испарение графита — 0,2 МДж/м² и вольфрама — 0,5 МДж/м² (длительность импульса 0,05 мс). При пересчёте на большую длительность импульса, характерную для КСПУ-Т, интенсивное испарение должно начинаться при 0,6 МДж/м² для графита и при 1,6 МДж/м² для вольфрама (длительность импульса 0,5 мс).

Тепловые нагрузки, обеспечивающие интенсивное испарение материалов

Материал	Тепловая нагрузка Q , МДж/м ²	Длительность импульса t , мс	Тепловой поток W , ГВт/м ²	Фактор $W\sqrt{t}$ МВт·с ^{0,5} /м ²
Графит	0,2	0,05	4	28,3
	0,7	0,5	1,4	31,3
Вольфрам	0,5	0,05	10	70,7
	1,6	0,5	3,2	71,6

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

Влияние условий осаждения на захват дейтерия. Экспериментально определённая средняя скорость осаждения продуктов эрозии в КСПУ-Т лежит в диапазоне $(1-7)10^{20}$ ат./($\text{с}\cdot\text{см}^2$) для графита и $(0,1-8)10^{19}$ ат./($\text{с}\cdot\text{см}^2$) для вольфрама, что значительно выше соответствующих скоростей осаждения при стационарных процессах. Можно предположить, что подобные высокие скорости осаждения могут иметь место в ИТЭР во время ЭЛМ-событий и срывов, поскольку их параметры (длительность и тепловая нагрузка) схожи с параметрами плазменного потока КСПУ-Т. Именно поэтому свойства полученных плёнок, подробно рассмотренных далее, могут быть близки к тем, которые будут осаждаться в ИТЭР во время импульсных переходных процессов.

Концентрация дейтерия в осаждённых плёнках определялась при помощи ТДС-анализа на специализированном стенде, подробно описанном в работе [15]. В настоящей работе представлены данные по захвату дейтерия в С—D- и С—W—D-плёнках, полученные при имитации импульсных переходных процессов (ЭЛМ-события и срывы) на плазменном ускорителе КСПУ-Т.

Обнаружено, что при температуре коллектора 300 К количество захваченного дейтерия за импульс КСПУ-Т более чем на порядок меньше в С—W—D-плёнках, чем в С—D-плёнках ($5,4\cdot 10^{14}$ ат./ см^2 и $9\cdot 10^{15}$ ат./ см^2 соответственно), при этом атомарные отношения концентраций D/C и D/(W + C) примерно одинаковы ($D/(W + C) = 0,1-0,3$; $D/C = 0,22-0,35$). Данный факт объясняется тем, что количество осаждённого материала (число атомов) в экспериментах с графитовой мишенью как минимум на порядок выше, чем для экспериментов с вольфрамовой мишенью. Относительные концентрации изотопов водорода такого же уровня наблюдались в экспериментах на установках SCFD и Tore Supra (для С—D- и С—H-плёнок [5]), а также в магнетронных экспериментах (для W [3, 4] и смешанных С—W—D-плёнок [16, 17]).

В настоящей работе исследовалась зависимость захвата дейтерия от скорости осаждения и температуры поверхности коллектора для С—D-плёнок. Сопоставление экспериментальных данных, полученных в настоящей работе, с данными из работы [5] представлено на рис. 7. Примечательно, что скорость осаждения на КСПУ-Т примерно на четыре порядка выше, чем в токамаке Tore Supra [5].

Рис. 7. Зависимость соотношения D/C от скорости осаждения: ● — КСПУ-Т, Δ — Tore Supra [5] (а); температуры поверхности: ● — КСПУ-Т ($D/C \sim \exp(1150/T)$), □ — магнетрон [18] ($D/C \sim \exp(2268/T)$), Δ — дуговой разряд [19] (б). Данные из работ [5], [18] и [19] приведены для сравнения

Максимальная относительная атомная концентрация дейтерия в плёнках, полученных на установке КСПУ-Т, составляет $D/C = 0,35$, при увеличении скорости осаждения продуктов эрозии от $20\cdot 10^{19}$ до $70\cdot 10^{19}$ ат./($\text{с}\cdot\text{см}^2$) она незначительно уменьшается до $D/C = 0,22$ ($T = 300$ К). Таким образом, концентрация дейтерия в С—D-плёнках в широком диапазоне скоростей осаждения лежит в диапазоне $D/C = 0,1-0,35$ (см. рис. 7, а) и практически не зависит от скорости осаждения. Данный факт полностью согласуется с результатами, представленными в работе [18].

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. Причём общее количество захваченного дейтерия во время таких процессов может быть сравнимым или даже больше, чем в стационарном случае, так как относительная концентрация D/C примерно одинакова для обоих случаев, а количество осаждённого материала значительно больше в случае импульсных переходных процессов. Температура поверхности незначительно влияет на концентрацию дейтерия в C—D-плёнках (см. рис. 7, б), причём плёнки, осаждённые во время имитации импульсных переходных процессов на КСПУ-Т и в условиях стационарного процесса при дуговом разряде [19], имеют очень схожие зависимости концентрации дейтерия от температуры. В обоих случаях при увеличении температуры поверхности до 750 К концентрация дейтерия уменьшается не более чем в 2,5 раза в сравнении с концентрацией при температуре поверхности 300 К. В то время, как для плёнок, полученных на магнетроне [18], концентрация дейтерия уменьшается примерно в 10 раз при увеличении температуры поверхности до 973 К.

Для описания влияния условий осаждения на захват дейтерия в C—D-плёнках были предложены эмпирические соотношения [18]

$$\frac{D}{C} = 0,2 \cdot 10^{-2} r_d^0 E_n^{-0,43} \exp\left(\frac{2268}{473}\right), 293 \text{ К} \leq T \leq 473 \text{ К}; \quad (1)$$

$$\frac{D}{C} = 0,2 \cdot 10^{-2} r_d^0 E_n^{-0,43} \exp\left(\frac{2268}{T}\right), 473 \text{ К} \leq T \leq 973 \text{ К}, \quad (2)$$

где r_d — скорость осаждения углерода (в единицах $10^{15} \text{ ат} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$); E_n — средняя энергия приходящего на поверхность дейтерия, эВ, при этом $15 \text{ эВ} \leq E_n \leq 100 \text{ эВ}$; T — температура поверхности, К.

E_n определяется следующим образом [20]:

$$E_n = E_0 \frac{R_E(E_0)}{R_N(E_0)}, \quad (3)$$

где E_0 — энергия частиц, бомбардирующих вольфрамовую мишень; R_N — доля обратно рассеянных частиц; R_E — коэффициент энергетических потерь.

Как уже было отмечено ранее, относительная атомная концентрация дейтерия не зависит от скорости осаждения, а температура поверхности влияет на концентрацию дейтерия только после достижения значения 473 К.

В результате анализа экспериментальных данных, полученных на КСПУ-Т, были установлены следующие соотношения:

$$\frac{D}{C} = 0,245 r_d^0 E_n^{-0,43} \exp\left(\frac{1150}{450}\right), 293 \text{ К} \leq T \leq 450 \text{ К}; \quad (4)$$

$$\frac{D}{C} = 0,245 r_d^0 E_n^{-0,43} \exp\left(\frac{1150}{T}\right), 450 \text{ К} \leq T \leq 973 \text{ К}, \quad (5)$$

где средняя энергия приходящего на поверхность дейтерия $E_n = 150 \pm 50 \text{ эВ}$, что составляет 10—25% от направленной энергии ионов в свободном плазменном потоке до его взаимодействия с мишенью [21]. В процессе взаимодействия плазменного потока с мишенью направленная энергия ионов существенно уменьшается за счёт неупругих процессов (нагрев плазмы, потери на излучение) до указанного уровня согласно результатам измерений и численных расчётов [22].

Таким образом, для C—D-плёнок (см. рис. 7, б), осаждённых при имитации импульсных переходных процессов на КСПУ-Т, влияние температуры поверхности на концентрацию дейтерия начинается после достижения несколько меньшего значения 450 К и менее выражено в сравнении с C—D-плёнками, полученными при магнетронном распылении в работе [18].

Исходя из полученных экспериментальных результатов и данных работ [18, 19], можно предположить, что при осаждении продуктов эрозии графита на внутреннюю поверхность стенки токамака,

имеющую температуру в диапазоне 550—750 К, 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.

Рис. 8. Зависимость соотношений D/W и $D/(W+C)$ от скорости осаждения: ● — КСПУ-Т ($D/(W+C) \sim r_d^{0,4}$), Δ — магнетрон [3] ($D/W \sim r_d^{0,4}$), $\square$ — магнетрон [4] ($D/W \sim r_d^{0,8}$) (а); температуры поверхности: ● — КСПУ-Т ($D/(W+C) \sim \exp(809/T^{0,8})$), Δ — магнетрон [3] ($D/W \sim \exp(779/T)$), $\square$ — магнетрон [4] ($D/W \sim \exp(245/T^{0,5})$) (б). Данные из работ [3] и [4] приведены для сравнения

В случае С—W—D-плёнок скорость осаждения продуктов эрозии в КСПУ-Т более чем на три порядка выше, чем для стационарного процесса (рис. 8, а).

Максимальная концентрация дейтерия составляет $D/(W+C) = 0,23$, при увеличении скорости осаждения продуктов эрозии от $0,1 \cdot 10^{19}$ до $1,4 \cdot 10^{19}$ ат./с·см 2 она уменьшается до $D/(W+C) = 0,1$ (температура поверхности $T = 300$ К).

Аналогично случаю С—D-плёнок это означает, что при оценке общего количества захваченного дейтерия в продуктах эрозии, образующихся в токамаках (в том числе и в токамаке ИТЭР), необходимо учитывать, что захват может происходить и во время импульсных переходных процессов.

Для описания влияния условий осаждения на захват дейтерия в вольфрамовых плёнках было предложено эмпирическое соотношение [3]

$$\frac{D}{W} = 5,7 \cdot 10^{-8} r_d^{-0,4 \pm 0,1} E_n^{1,88 \pm 0,4} \exp\left(\frac{779 \pm 220}{T}\right), \quad (6)$$

где r_d — скорость осаждения вольфрама, в единицах 10^{15} ат. $\cdot$ см $^{-2}$ ·с $^{-1}$; E_n — средняя энергия приходящего на поверхность дейтерия, эВ; T — температура поверхности, К, при этом $293 \text{ К} \leq T \leq 600 \text{ К}$, $60 \text{ эВ} \leq E_n \leq 280 \text{ эВ}$.

В результате анализа экспериментальных данных, полученных на КСПУ-Т, было установлено следующее соотношение:

$$\frac{D}{W+C} = 5,7 \cdot 10^{-8} r_d^{-0,4} E_n^{1,63} \exp\left(\frac{809}{T^{0,8}}\right), \quad (7)$$

где 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.

При этом концентрация дейтерия в случае КСПУ-Т пропорциональна $r_d^{-0,4}$, точно так же, как и в работе [3]. Однако зависимость концентрации дейтерия от температуры (см. рис. 8, б) пропорциональна $\exp(809/T^{0,8})$. Авторы работы [4] предположили, что присутствие примесей, в частности, углерода в осаждённых W-плёнках может существенно влиять на высвобождение дейтерия.

По данным анализа методом резерфордского обратного рассеяния (использовался пучок ионов He^+ энергией 1,9 МэВ, угол рассеяния 160°) относительная атомная концентрация углерода C/W в осаждённых С—W—D-плёнках варьируется от 0,4 до 0,6. Несмотря на достаточно высокую концентрацию углерода, зависимость концентрации дейтерия от температуры для С—W—D-плёнок КСПУ-Т незначительно отличается от аналогичной зависимости для W-плёнок с существенно более низким содержанием углерода [3, 4].

Следовательно, можно ожидать, что при осаждении продуктов эрозии вольфрама на внутреннюю поверхность стенки токамака, имеющую температуру в диапазоне 550—750 К, в них практически не будет происходить захват изотопов водорода (относительная атомная концентрация $D/W \approx D/(W + C) < 0,01$) как при стационарных, так и при импульсных процессах. В то время, как для C—D-плёнок (см. рис. 7, б) в указанном диапазоне температуры относительная атомная концентрация дейтерия будет существенно выше: $D/C = 0,1—0,2$.

На рис. 9 представлены ТДС-спектры C—D- и C—W—D-плёнок, осаждённых при различной температуре поверхности, но при прочих равных условиях (тепловая нагрузка на мишень, длительность импульса, расстояние между мишенью и коллектором).

Рис. 9. ТДС-спектры C—D-плёнок: $T = 300$ (◇), 450 (○), 600 (▲), 750 К (×) (а); C—W—D-плёнок: $T = 300$ (◇), 450 (×) (○), 600 (×) (▲), 750 (×) К (×) (б), осаждённых при различной температуре поверхности коллекторов. Скорость нагрева 2 К/с

Для C—D-плёнок (см. рис. 9, а) большая часть захваченного дейтерия сосредоточена в высокотемпературной части спектра и максимум выделения приходится на 800—850 К. При этом, во-первых, как уже было отмечено ранее, концентрация дейтерия меняется незначительно при изменении температуры поверхности в широких пределах (от 300 до 750 К), во-вторых, форма спектра также остаётся неизменной. Полученные ТДС-спектры C—D-плёнок схожи с полученными ранее на КСПУ-Т и на других установках [5].

В случае C—W—D-плёнок (см. рис. 9, б) большая часть захваченного дейтерия высвобождается в температурном диапазоне 600—850 К, максимум выделения приходится на 700—800 К. Также имеются два дополнительных пика в районе 550 и 1000 К. ТДС-спектры дейтерия, захваченного в облучённый ионами или плазмой поликристаллический вольфрам, как правило, сосредоточены в низкотемпературной области [23, 24].

Однако пик в районе 700—800 К появляется при высоком уровне радиационных повреждений в вольфраме [23] или в случае напылённых вольфрамовых покрытий, которые также имеют сильно повреждённую структуру [25]. Данный пик обычно связывают с захватом дейтерия на поверхности нанопорами или вакансионными кластерами.

В работе [16] также представлены ТДС-спектры C—W—D-плёнок, полученных в стационарных условиях. При этом в сравнении с ТДС-спектрами C—W—D-плёнок, полученных при имитации импульсных переходных процессов на КСПУ-Т в настоящей работе, у данных плёнок [16] наблюдалось более интенсивное выделение дейтерия в низкотемпературной части спектра (до 500 К). Возможно, что этот факт обусловлен тем, что при напылении C—W—D-плёнок на КСПУ-Т они подвергались воздействию импульсных тепловых нагрузок $1—2$ Дж/см² во время каждого импульса. При таких нагрузках максимальное изменение температуры поверхности коллектора может составлять 150 К (в течение ~20 мс от начала импульса КСПУ-Т), поэтому осаждение продуктов эрозии происходит при более высокой температуре.

Несмотря на то, что положение основных пиков термодесорбции для C—D- и C—W—D-плёнок отличается менее чем на 100°, зависимость накопления дейтерия от температуры подложки в ходе осаждения сильно отличается. Для C—D-плёнок наблюдается лишь незначительное снижение накопления дейтерия

вплоть до температуры 750 К, слабо меняется также форма спектра. Для C—W—D-плёнок резкое снижение происходит уже при температуре 450 К. При этом полностью исчезает низкотемпературная часть спектра и заметно снижается амплитуда основного пика. Также можно отметить, что снижение накопления за счёт повышенной температуры в ходе осаждения гораздо больше, чем можно было бы ожидать при простом нагреве до той же температуры плёнки, осаждённой при комнатной температуре.

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПРОДУКТОВ ЭРОЗИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ

Схема и условия эксперимента. Полученные на КСПУ-Т C—D- и C—W—D-плёнки многократно облучались вспышками излучения, параметры которых характерны для ослабленных срывов, ожидаемых в ИТЭР: длительность 0,5—1 мс, интегральная плотность энергии излучения $Q = 0,03—0,3$ МДж/м² [9]. Схема эксперимента представлена на рис. 10. Генерация излучения осуществлялась за счёт торможения потока водородной плазмы на твёрдотельной графитовой мишени. При торможении плазменного потока на мишени до 50% его энергии преобразуется в энергию излучения (энергию фотонов), которое рассеивается в полусферу от мишени. Для определения плотности энергии излучения использовался интегральный термпарный калориметр, представляющий собой медный диск (боковая поверхность диска была закрыта от излучения) толщиной 5 мм и диаметром 20 мм, обратная сторона которого находилась в контакте с термопарой.

Рис. 10. Схема генерации излучения и измерения плотности энергии излучения, возникающего при торможении потока плазмы КСПУ на твёрдотельной мишени

В эксперименте использовались плёнки, осаждённые на поверхность коллекторов из полированного кремния и нержавеющей стали. Внешний вид коллекторов с осаждёнными продуктами эрозии до облучения излучением представлен на рис. 11.

а

б

Рис. 11. Внешний вид коллекторов с осаждёнными продуктами эрозии графита и вольфрама: а — C—D-плёнка на кремниевом коллекторе; б — C—W—D-плёнка на коллекторе из нержавеющей стали

Каждый коллектор представлял собой пластинку толщиной от 0,5 до 1 мм, площадью 15×20 мм. Коллекторы во время их облучения излучением размещались в месте положения калориметра в специальных кассетах. В эксперименте кассеты были обращены областью с осаждённой плёнкой к источнику излучения, при этом половина этой области была закрыта от воздействия излучения специальным экраном.

Это позволяло проводить впоследствии сопоставление характеристик осаждённых продуктов эрозии до и после их облучения излучением. После облучения оба участка обследовались с применением различных методов микроанализа. В результате обследования образцов после их облучения излучением было установлено, что на участках, закрытых от воздействия вспышек излучения экраном, отсутствуют какие-либо изменения толщины, состава и структуры осаждённой плёнки. На этих участках плёнка остаётся идентичной той, которая имелаась перед облучением. На участках, испытавших воздействие излучения, наблюдаются изменения толщины, состава и структуры плёнки в зависимости от параметров излучения.

Результаты экспериментов. Для многократного облучения вспышками излучения использовались два набора коллекторов с осаждёнными С—D- и С—W—D-плёнками. Данные плёнки были получены после 25—35 плазменных воздействий КСПУ-Т длительностью 0,5 мс с тепловой нагрузкой 2,6 МДж/м² (в центре мишени) по графитовой и вольфрамовой мишеням соответственно (температура коллектора находилась на уровне 300 К). При этом толщина осаждённых С—D- и С—W—D-плёнок лежала в диапазоне 0,75—1 и 0,15—0,25 мкм соответственно. Таким образом, в настоящей работе исследовалось изменение свойств С—D- и С—W—D-плёнок, образовавшихся за одинаковое количество импульсов КСПУ-Т, под действием излучения.

При облучении изменялись как значение плотности энергии излучения (за счёт изменения энергосодержания плазменного потока), так и количество импульсов излучения. Типичные фотографии облучённых С—D- и С—W—D-плёнок представлены на рис. 12.

Рис. 12. Типичные фотографии коллекторов до (левая половина коллектора) и после (правая половина коллектора) облучения излучением: *a* — коллектор с облучённой С—D-плёнкой, $q_{\text{hv}} = 0,05$ МДж/м²; *b* — коллектор с облучённой С—W—D-плёнкой, $q_{\text{hv}} = 0,1$ МДж/м²

На представленных фотографиях видно, что в результате облучения продуктов эрозии излучением наблюдается изменение оптических характеристик, проявляющееся в изменении её цвета и отражательной способности.

Рис. 13. Снимки поверхности коллекторов с С—D- и С—W—D-плёнками после воздействия 25 и 2 импульсов излучения соответственно: *a*, *b*, *v* — исходная С—D-плёнка, после облучения $q_{\text{hv}} = 5$ Дж/см², после облучения $q_{\text{hv}} = 10$ Дж/см² соответственно; *z*, *d*, *e* — исходная С—W—D-плёнка, после облучения $q_{\text{hv}} = 10$ Дж/см², после облучения $q_{\text{hv}} = 15$ Дж/см² соответственно

На рис. 13 представлены снимки поверхности исходных и облучённых излучением плёнок, полученные с применением электронного микроскопа (снимки во вторичных электронах соответствуют центральным областям необлучённых и облучённых участков). Анализ данных снимков указывает на то, что снижение коэффициента отражения облучённых С—D-плёнок, возможно, происходит вследствие развития поверхности. Также для С—D-плёнок снижение коэффициента отражения может свидетельствовать о снижении содержания в них изотопов водорода [26]. Кроме того, при облучении излучением с плотностью энергии менее 0,1 МДж/м² толщина С—D-плёнок сокращается со скоростью до 0,02 мкм за импульс, т.е. после воздействия 25 импульсов излучения относительное изменение толщины составило не более 15%. Однако после воздействия 25 импульсов с плотностью энергии излучения более 0,2 МДж/м² в результате визуального обследования облучённых образцов с использованием оптического микроскопа было установлено, что происходит практически полное удаление С—D-плёнки даже при толщине до 1 мкм.

Остаточное содержание вольфрама на поверхности коллектора уменьшается с ростом интенсивности излучения. Так, при плотности энергии $0,1 \text{ МДж/м}^2$ концентрация вольфрама на поверхности коллектора в результате облучения практически не изменяется, при $0,15 \text{ МДж/м}^2$ — составляет 50% от исходной, а после $0,3 \text{ МДж/м}^2$ снижается до 7,5%. При этом после воздействия излучения вскрывается поверхность подложки. Данный факт подтверждается концентрационными кривыми (рис. 14).

Рис. 14. Концентрационная кривая по поверхности коллектора, облучённого двумя импульсами при плотности энергии излучения $0,15 \text{ МДж/м}^2$: *а* — снимок во вторичных электронах; *б* — концентрационная кривая, полученная в результате энергодисперсионного рентгеновского анализа вдоль направления, указанного жёлтой стрелкой на *а*: W (—), Fe (—), Cr (—); *в* — фрагмент снимка, изображённого на *а*, направление зелёной стрелки совпадает с осью абсцисс графика, представленного на *б*

Таким образом, данные оптической микроскопии и рентгеноспектрального анализа свидетельствуют, что увеличение отражательной способности поверхности коллектора с осаждённой плёнкой, облучённого при тепловой нагрузке $0,3 \text{ МДж/м}^2$, связано с значительным изменением содержания продуктов эрозии вольфрама.

Не менее интересным является изменение концентрации дейтерия в C—D- и C—W—D-плёнках под действием излучения. Для изучения зависимости концентрации дейтерия в продуктах эрозии от параметров излучения были проведены две серии экспериментов.

В ходе первой серии варьировалась плотность энергии излучения, приходящего на поверхность плёнки при фиксированном количестве импульсов излучения, в ходе второй серии изменялось количество импульсов излучения при фиксированной плотности энергии излучения. Концентрация дейтерия в C—W—D- и C—D-плёнках определялась методом ядер отдачи (использовался пучок ионов He^+ энергии $1,9 \text{ МэВ}$, угол рассеяния 15°).

Полученные зависимости представлены на рис. 15, для C—D-плёнок зависимость содержания дейтерия от количества импульсов при фиксированной тепловой нагрузке $0,05 \text{ МДж/м}^2$ была представлена ранее в работе [27].

Рис. 15. Концентрация дейтерия в C—D- и C—W—D-плёнках в зависимости от количества импульсов излучения (*а*) и плотности энергии излучения (*б*): *а* — плотности энергии излучения 5 и 10 Дж/см^2 для C—D- и C—W—D-плёнок соответственно; *б* — количество импульсов излучения 25 и 5 для C—D- и C—W—D-плёнок соответственно; ♦ — D/C , ● — $D/(W+C)$

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что концентрация дейтерия уменьшается после воздействия излучения как в С—D-, так и в С—W—D-плёнках. Однако в случае С—D-плёнок уменьшение концентрации дейтерия при многократном воздействии излучения происходит гораздо медленнее, чем для С—W—D-плёнок. Так, например, исходя из представленных на рис. 15, *а* 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 МДж/м² и 0,1 МДж/м² для С—D- и С—W—D-плёнок соответственно.

Аналогично при изменении плотности энергии излучения (см. рис. 15, *б*) для уменьшения относительных концентраций дейтерия примерно в одинаковое количество раз необходимо 25 и 5 импульсов излучения для С—D- и С—W—D-плёнок соответственно при фиксированной плотности излучения. Такое различие может быть вызвано тем, что при облучении излучением С—W—D-плёнок происходит формирование многочисленных пор уже при плотности энергии излучения 0,1 МДж/м² (см. рис. 13), в то время, как у С—D-плёнок при плотности энергии излучения до 0,1 МДж/м² изменяется только поверхность без нарушения целостности плёнки (см. рис. 13).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для измерения скорости осаждения продуктов эрозии на плазменном ускорителе КСПУ-Т была разработана специальная диагностика, позволяющая определить изменение скорости осаждения и оценить динамику изменения свойств продуктов эрозии во время импульса. Максимальное временное разрешение диагностики составляет 0,025 мс.

В результате сопоставления экспериментально определённой динамики осаждения и проведённых расчётов 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). Таким образом, соответствующие факторы $W\sqrt{t}$ для графита и вольфрама, определённые в настоящей работе, практически совпадают с представленными ранее в работах [13, 14].

С использованием разработанной диагностики были также экспериментально определены скорости осаждения для графита и вольфрама: $(20\text{—}100)10^{19}$ и $(0,1\text{—}2)10^{19}$ ат./с·см² соответственно, которые гораздо выше, чем при стационарных процессах. Вероятно, что такие скорости осаждения могут наблюдаться во время импульсных переходных процессов ИТЭР. Поскольку скорость осаждения графита намного выше, чем вольфрама, толщина осажждённых С—D-плёнок оказывается значительно больше, чем С—W—D-плёнок, при одинаковом количестве плазменных воздействий по графитовой и вольфрамовой мишеням.

Обнаружено, 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): $5,4 \cdot 10^{14}$ и $9 \cdot 10^{15}$ ат./см² соответственно. При увеличении температуры поверхности концентрация дейтерия практически не изменяется в С—D-плёнках, в то время как для С—W—D-плёнок при высокой температуре поверхности (до 750 К) практически не наблюдается захвата дейтерия.

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, так как относительные концентрации D/C и $D/(W + C)$ примерно одинаковы для обоих случаев, но количество осаждённого материала значительно больше в случае переходных процессов.

Также в настоящей работе исследовано изменение свойств С—D- и С—W—D-плёнок, образовавшихся за одинаковое количество импульсов КСПУ-Т, под действием излучения. Полученные данные свидетельствуют о том, что концентрация дейтерия уменьшается после воздействия излучения как в С—D-, так и в С—W—D-плёнках. Однако, в случае С—D-плёнок уменьшение концентрации дейтерия при многократном воздействии излучения происходит гораздо медленнее, чем для С—W—D-плёнок. Тем не менее облучение продуктов эрозии излучением, параметры которого характерны для ослаблен-

ных срывов, ожидаемых в ИТЭР, может способствовать уменьшению концентрации захваченного в них дейтерия даже в том случае, если графит используется в качестве облицовочного материала первой стенки токамака.

Работа выполнена частично в рамках государственных контрактов № Н.4а.52.90.12.1007 от 13.03.2012 г. и № Н.4а.52.90.13.1031 от 19.02.2013 г. с Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом».

REFERENECES

1. **Causey R.A. et al.** Hydrogen isotope retention and recycling in fusion reactor plasma-facing components. — J. Nucl. Mater., 2002, vol. 300, p. 91.
2. **Loarer T. et al.** Gas balance and fuel retention in fusion devices. — Nucl. Fus., 2007, vol. 47, p. 1112.
3. **Temmerman G.De, Doerner R.P.** Deuterium retention and release in tungsten co-deposited layers. — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 389, p. 479.
4. **Alimov V.Kh. et al.** Deuterium trapping in tungsten deposition layers formed by deuterium plasma sputtering. — J. Nucl. Mater., 2010, vol. 399, p. 225.
5. **Begrambekov L. et al.** Deuterium trapping in carbon films formed in different deposition conditions. — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 438, p. 971.
6. **Klimov N. et al.** Experimental study of PFCs erosion and eroded material deposition under ITER-like transient loads at the plasma gun facility QSPA-T. — J. Nucl. Mater., 2011, vol. 415, p. S59.
7. **Riccardi B. et al.** Preliminary results of the experimental study of PFCs exposure to ELMs-like transient loads followed by high heat flux thermal fatigue. — Fusion Engineering and Design, 2011, vol. 86, p. 1665.
8. **Mayer M. et al.** Carbon balance and deuterium inventory from a carbon dominated to a full tungsten ASDEX Upgrade. — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 390—391, pp. 538—543.
9. **Klimov N. et al.** Stainless steel performance under ITER-relevant mitigated disruption photonic heat loads. — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 438, p. 241.
10. **Loarte A., Saibene G., Sartori R. et al.** Transient heat loads in current fusion experiments, extrapolation to ITER and consequences for its operation. — Physica Scripta, 2007, vol. 128, pp. 222—228.
11. **Klimov N.S., Podkovyrov V.L., Zhitlukhin A.M. et al.** Tungsten splashing under intense plasma flow. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2009, issue 2, p. 52 (in Russian).
12. **Arkhipov N.I., Safronov V.M., Barsuk V.A. et al.** Erosion of carbon based materials under action of intense plasma streams. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2009, issue 4, p. 3 (in Russian).
13. **Safronov V.M. et al.** Evaporation and vapor shielding of CFC targets exposed to plasma heat fluxes relevant to ITER ELMs. — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 386—388, p. 744.
14. **Poznyak I.M., Arkhipov N.I., Karelov S.V. et al.** Properties of tungsten impurities formed under conditions relevant to the transient plasma events in ITER. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2014, issue 1, p. 70 (in Russian).
15. **Rusinov A. et al.** A setup for thermodesorption measurements. — Instruments and Experimental Techniques, 2009, vol. 52, pp. 871—876.
16. **Krat S. et al.** Deuterium retention in mixed C—W—D-films co-deposited in magnetron discharge in deuterium. — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 438, pp. 204—208.
17. **Katayama K. et al.** Hydrogen retention in carbon—tungsten co-deposition layer formed by hydrogen RF plasma. — Thin Solid Films, 2006, vol. 506—507, pp. 188—191.
18. **Doerner R. et al.** Issues associated with codeposition of deuterium with ITER materials. — In: 22nd IAEA Fusion Energy Conf., 2008.
19. **Youshida H. et al.** Deuterium retention in carbon dust and carbon—tungsten mixed dust prepared by deuterium arc discharge. — J. Nucl. Mater., 2004, vol. 329—333, pp. 790—794.
20. **Eckstein W.** Calculated Sputtering, Reflection and Range Values. IPP-Report 9/132. Garching, Germany, 2002.

21. **Klimov N. et al.** Experimental study of PFCs erosion under ITER-like transient loads at plasma gun facility QSPA. — *J. Nucl. Mater.*, 2009, vol. 390—391, pp. 721—726.
22. **Bazylev B. et al.** Experimental and theoretical investigation of droplet emission from tungsten melt layer. — *Fusion Eng. Des.*, 2009, vol. 84, pp. 441—445.
23. **Ogorodnikova O.V. et al.** The influence of radiation damage on the plasma-induced deuterium retention in self-implanted tungsten. — *J. Nucl. Mater.*, 2011, vol. 415, pp. S661—S666.
24. **Rusinov A. et al.** Investigation of hydrogen-defect interaction in tungsten by the probe fluence method. — *J. Nucl. Mater.*, 2011, vol. 415, pp. S645—S648.
25. **Ogorodnikova O.V. et al.** Ion-induced deuterium retention in tungsten coatings on carbon substrate — *J. Nucl. Mater.*, 2011, vol. 419, pp. 194—200.
26. **Schwarz-Selinger T., von Keudell A., Jacob W.** Plasma chemical vapor deposition of hydrocarbon films: The influence of hydrocarbon source gas on the film properties — *J. Appl. Phys.*, 1999, vol. 86, p. 3988.
27. **Putrik A.B. et al.** — In coll.: Proceedings of XVI conference «Interaction of plasma with the surface». Moscow, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 1—2 February 2013 (in Russian).

AUTHORS

Putrik A.B. State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; putrik@triniti.ru

Klimov N.S. State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; klimov@triniti.ru

Gasparyan Yu.M. National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, Moscow, 115409, Moscow, Russia; yura@plasma.mephi.ru

Efimov V.S. National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, Moscow, 115409, Moscow, Russia;

Barsuk V.A. State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia;

Podkovyrov V.L. State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; podk@triniti.ru

Zhitlukhin A.M. State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; zhitlukh@triniti.ru

Yarochevskaya A.D. State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia;

Kovalenko D.V. State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; kovalenko@triniti.ru

Received 23 June 2014

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2014, vol. 37, issue 3, pp. 15—30