

УДК 539.213.26:543.51:535.376:533.924:543.423.8

## НАНОСТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СЛОИСТЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ХЛОПЬЕВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ В ТОКАМАКЕ Т-10

*В.Г. Станкевич, Н.Ю. Свечников, Я.В. Зубавичус, А.А. Велигжанин, В.А. Соменков, Л.П. Суханов, К.А. Меньшиков, А.М. Лебедев, Б.Н. Колбасов, К.Ю. Вуколов, Л.Н. Химченко (НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия), Д. Раджаратнам (Научный центр CERAR, Университет Южной Австралии, Австралия)*

Образующиеся в токамаке Т-10 углеводородные плёнки и хлопья с большим атомным отношением дейтерия к углероду являются аморфными. В них находятся кластеры (скопления наноструктур) и нанопоры размером около 1 нм. Межплоскостные расстояния между структурами, рассеивающими рентгеновские лучи, составляют 0,7, 0,24 и 0,12 нм, причём на нейтронограммах видны только две последние структуры. На пристеночной стороне плёнок преобладают графитоподобные  $sp^2$ -углеродные структуры. На стороне плёнок, обращённой к плазме, больше алмазоподобных  $sp^3$ -углеродных структур. Спектры отражённого инфракрасного излучения меняются в зависимости от количества дейтерия в плёнках, что, возможно, позволит применять их для контроля накопления изотопов водорода в плёнках и толщины образующихся плёнок.

**Ключевые слова:** аморфные углеводородные плёнки, взаимодействие плазмы с веществом, масс-спектрометрия, токамак, инфракрасная спектрометрия.

NANO-SCALE STRUCTURAL FEATURES OF STRATIFIED HYDROCARBON FILMS FORMED AT INTERACTION OF PLASMA WITH SURFACE IN T-10 TOKAMAK. V.G. STANKEVICH, N.Yu. SVECHNIKOV, Ya.V. ZUBAVICHUS, A.A. VELIGZHANIN, V.A. SOMENKOV, L.P. SUKHANOV, K.A. MENSNIKOV, A.M. LEBEDEV, B.N. KOLBASOV, K.Yu. VUKOLOV, L.N. KHIMCHENKO, D. RAJARATHNAM. Hydrocarbon films and flakes with high atomic deuterium to carbon ratio formed in T-10 tokamak are amorphous. They contain clusters and nanopores that have typical sizes about 1 nm. Interplane distances between X-ray scattering structures are of 0.7, 0.24 and 0.12 nm. However neutron diffraction pattern reveals only two last distances. Graphite-like  $sp^2$ -carbon structures were found mainly on the wall side of flakes, and diamond-like  $sp^3$ -carbon states prevail on the plasma side. Infrared reflectance spectra are changed depending on the amount of deuterium in the films. May be this dependence can be used for monitoring of the hydrogen isotopes accumulation in the films and of the growing films thickness.

**Key words:** amorphous hydrocarbon films, plasma-surface interaction, mass spectrometry, tokamak, infrared spectrometry.

### ВВЕДЕНИЕ

При прорыве воды и воздуха в вакуумный корпус (ВК) сооружаемого Международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР) возможен взрыв гремучей смеси и накопившейся за время работы реактора пыли, насыщенной тритием и дейтерием. Для предотвращения такого взрыва и недопустимого выброса радиоактивности установлены пределы по накоплению продуктов эрозии (700 кг) и трития (880 г) в ВК этого реактора, а также по допустимому образованию водорода при аварии (2,5 кг), с учётом того, что до 1,5 кг водорода в ВК уже имеется при нормальной работе [1].

Чтобы разработать меры, обеспечивающие соблюдение указанных пределов, необходимо знать свойства продуктов эрозии, образующихся в токамаках, в частности, содержание в них изотопов водорода и их структуру, а также разработать надёжный мониторинг количества продуктов эрозии (пыли) и трития (Т) в ВК и средства удаления пыли и трития из ВК.

### ОБРАЗЦЫ

Находящийся в НИЦ «Курчатовский институт» токамак Т-10 имеет большой радиус 1,5 м, малый радиус разрядной камеры 39 см, индукцию магнитного поля на оси плазменного шнура 2,8 Тл и длительность разряда около 1 с. В токамаке имеются подвижный лимитер и кольцевая диафрагма из мелкозернистого графита МПГ-8 [2, 3].

Во время экспериментальной кампании разрядная камера каждую ночь кондиционировалась. Для этого она нагревалась до 470 К в атмосфере обычного водорода, в ней производились индукционные разряды на  $H_2$  и дейтерий (99%  $D_2$  + 1%  $H_2$ ) и тлеющие разряды на He [3]. В среднем экспериментальные разряды в дейтериевой плазме занимали около получаса в год. Кондиционирование в водородной атмосфере длилось около 1000 ч/год, индуктивные разряды в дейтериевой атмосфере занимали около 300 ч/год.

В ходе экспериментов в разрядной камере токамака образовывались углеродно-дейтериевые  $CD_x$ -плёнки двух видов — слоистые вдали от лимитера и диафрагмы и глобулярные вблизи лимитера. Существует также спектр плёнок, имеющих промежуточную структуру. Эти плёнки могут отделяться от поверхности, превращаясь в хлопья. Под действием плазмы они разрушаются и уже в виде пыли скапливаются внизу ВК.

Слоистые плёнки имели цвет от тёмно-коричневого до золотистого и жёлтого. Цвет обычно отражает атомное отношение D/C в плёнках. Типичная толщина плёнок 20—30 мкм. Однако встречались и более толстые плёнки (рис. 1, *а*). Типичная площадь хлопьев 0,5 см<sup>2</sup>. В настоящей работе в основном исследовались золотистые плёнки (см. рис. 1). Температура их образования была близка к 300 К.

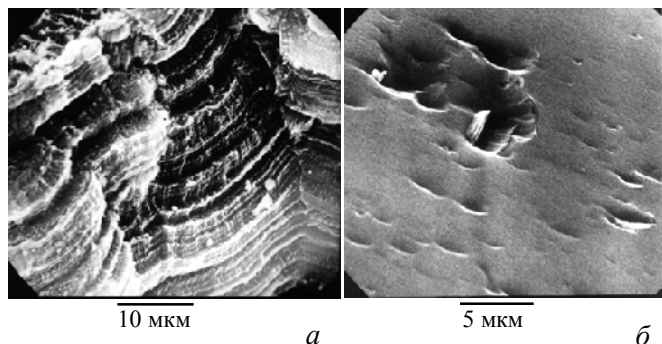


Рис. 1. Микроструктура слоистых углеродных плёнок, осаждённых на внутренней поверхности вакуумной камеры токамака Т-10: *а* — многослойная плёнка, осаждённая вблизи лимитера, вид сбоку при увеличении  $\times 2000$ ; *б* — вид поверхности со стороны стенки камеры под углом  $20^\circ$  при увеличении  $\times 3000$  [4]

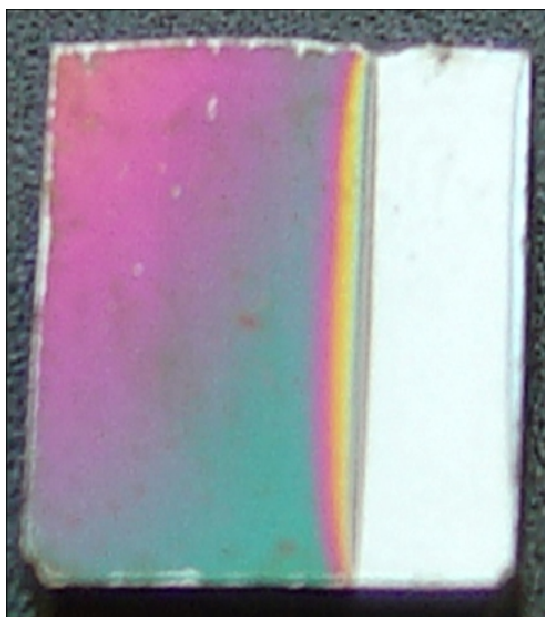


Рис. 2. Зеркало из нержавеющей стали размером  $1 \times 1$  см с плёнкой толщиной до 300 нм; атомное отношение D/C  $\approx 0,2$ . Разные цвета соответствуют разной толщине плёнки. Белое поле — контрольный участок, закрытый экраном в течение всей кампании

Кроме того, в токамаке в контролируемых условиях изучалась работоспособность зеркал из нержавеющей стали для оптической диагностики плазмы. Во время кондиционирования разрядной камеры зеркала экранировались. При экспериментальных разрядах на зеркалах осаждались углеродно-дейтериевые плёнки (рис. 2).

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования углеводородных плёнок и хлопьев нами применялись вторичная ионная масс-спектрометрия [2, 4], метод ядер отдачи [2], метод обратного резерфордского рассеяния [2], оптическая спектроскопия с использованием синхротронного излучения (СИ) (5—9), термодесорбционная масс-спектрометрия (ТДС) [3, 10], инфракрасная (ИК) спектроскопия отражения на основе преобразования Фурье, спектроскопия комбинационного рассеяния (рамановская спектроскопия) [3, 6—8, 10—15], рентгеноструктурный анализ [10, 14], рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) с использованием СИ [13, 14], спектроскопия на основе электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) [7, 8, 11, 13, 14], анализ вольт-амперных характеристик [13, 14], термогравиметрический анализ [6, 7], спектроскопия протяжённой тонкой структуры края рентгеновского поглощения (EXAFS — extended X-ray absorption fine structure) [8, 9, 16], спектроскопия околопороговой тонкой структуры рентгеновского поглощения (NEXAFS — near edge X-ray absorption fine structure), метод малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) с использованием СИ [14], фотолюминесцентная спектроскопия и дифракция нейтронов [17].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Химический состав хлопьев.** Слоистые углеродные плёнки способны накапливать изотопы водорода, в частности, используемые в термоядерной реакции дейтерий и тритий, что может осложнить осуществление проекта реактора ИТЭР.

Концентрации и профили распределения дейтерия по толщине слоистых  $CD_x$ -плёнок были определены комбинациями методов вторичной ионной масс-спектрометрии и регистрации газовых молекул, а

также методов ядер отдачи и обратного резерфордского рассеяния с обеих сторон плёнок [2, 4]. В тёмно-коричневых плёнках  $D/C = 0,4 \pm 0,2$  и  $H/C = 0,6 \pm 0,2$ , в золотистых  $D/C = 0,8 \pm 0,2$  и  $H/C \sim 0,1$ , в жёлтых  $D/C > 1$ . Такая концентрация дейтерия наблюдается по всей толщине плёнки (при расстоянии более 400 нм от поверхности) [4, 18].

**Малоугловое рентгеновское рассеяние с использованием СИ.** В основе метода МУРР лежит рассеяние рентгеновских фотонов на оптических неоднородностях образца (атомных скоплениях, пустотах) размером порядка 1—100 нм.

Анализируя кривую спада интенсивности рассеянного излучения для объектов с неупорядоченной структурой, можно получить информацию о среднем размере частиц или областей неоднородности, а также оценить распределение этих частиц по размерам и форме.

Соответствующая опытная кривая для золотистой плёнки из токамака Т-10 была получена в четырёх сериях измерений, проведённых в НТК «Курчатовский центр синхротронного излучения и нанотехнологий» (НТК КЦСИиНТ) на синхротронном источнике «Сибирь-2» на станции «Структурное материаловедение» на одном образце при разной энергии пучка СИ ( $h\omega$ ) и разных расстояниях между образцом и детектором ( $l$ ). Вклад рассеяния на воздухе вычитался. Характеристики экспериментов приведены в таблице.

**Характеристики серий исследований МУРР золотистой плёнки из токамака Т-10**

Номер серии измерений	Среда	$h\omega$ , кэВ	$l$ , м
1	Вакуум	9	1
2	Вакуум	12	0,5
3	Вакуум	24	1
4	Воздух	26,7	0,23

«Стандартная» зависимость интенсивности МУРР  $I$  от модуля вектора рассеяния  $q = 4\pi\sin\theta/\lambda$  в широком интервале изменения  $q$  схематически показана на рис. 3. Здесь  $\theta$  — угол падения,  $\lambda$  — длина волны.

Полученные в ходе четырёх серий измерений исходные кривые были совмещены с последующим сглаживанием результирующей кривой.

В диапазоне импульсов  $q = 0,04—3 \text{ нм}^{-1}$  для получения этой результирующей кривой использовались две первые исходные экспериментальные кривые. Соответствующая результирующая кривая представлена на рис. 4. На основной её части, в интервале размеров рассеивателей  $1/q = 1,5—17 \text{ нм}$ , нет заметных особенностей структуры. В рассматриваемом диапазоне  $q$  нигде не выполняется закон Порода  $I(q) \sim q^{-4}$ , определяющий асимптотическое поведение рассеяния от гладкой поверхности частиц с линейным размером  $R_g$  при  $q \gg R_g^{-1}$ . Характер  $I(q)$  свидетельствует о том, что плёнка содержит рассеивающие частицы (в виде материала или нанопор) разных размеров, от мелких, дающих вклад в рассеяние при больших  $q$ , до крупных, определяющих рассеяние при малых  $q$ . Действительно, наклон кривой  $I(q)$  при её представлении в двойном логарифмическом масштабе  $\Delta(\ln I)/\Delta(\ln q) = -2,89$  на значительной части кривой, или фрактальная размерность  $D$  (см. рис. 3), указывает на негладкие границы рассеивающих областей и соответствует фрактальной размерности границ агрегата. Для рассеивающих твёрдых шаров имеет место закон Порода с наклоном  $\Delta(\ln I)/\Delta(\ln q) = -4$ , для рассеивателей в виде дисков наклон должен быть



Рис. 3. Типичный вид кривой интенсивности  $I$  малоуглового рентгеновского рассеяния в широкой области переданных импульсов  $q \sim 10^{-3}—100 \text{ нм}^{-1}$ :  $R_1$  — радиус агрегатов;  $R_2$  — радиус частиц, составляющих фрактальный агрегат;  $R_g$  — радиус инерции агрегата;  $D$  — фрактальная размерность [19]

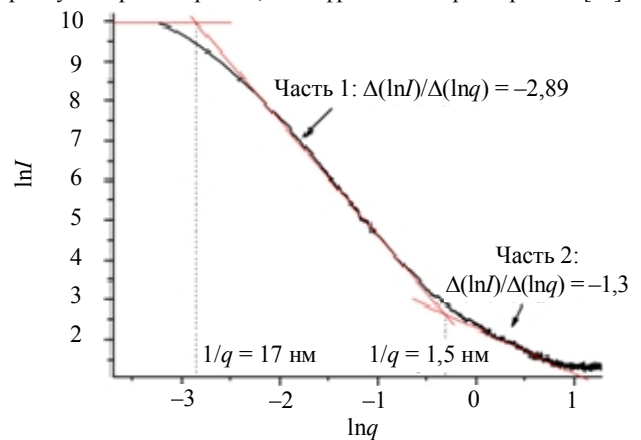


Рис. 4. Спектр МУРР золотистой плёнки в диапазоне модулей вектора рассеяния  $q = 0,04—3 \text{ нм}^{-1}$ . Показаны наклоны на двух частях результирующей кривой рассеяния и интервал характерных размеров рассеивателей

равен  $-2$ . Наклон  $\Delta(\ln I)/\Delta(\ln q) = -1$  соответствует длинному стержню. Следовательно, представление данной кривой рассеяния в виде «стандартного» распределения по размерам твёрдых шаров с радиусом  $R_g$ , согласно представлению Гинье  $I(q) = I_0 \exp[-q^2 R_g^2/3]$ , выглядит достаточно условно ввиду полученной величины наклона  $-2,89$ . Здесь  $I_0$  — амплитуда рассеяния при  $q_0 = 0,04 \text{ нм}^{-1}$ .

Одна из возможных моделей интерпретации спектров МУРР подразумевает, что рассеивающая система есть фрактальный агрегат, составленный из мелких элементарных рассеивателей. В «стандартной» ситуации, как показано на рис. 3, кривая должна выходить слева на горизонталь (предел Гинье для агрегата), а справа — на наклон  $-4$ , т.е. предел Порода для элементарного сферического рассеивателя. У нас чёткого предела Гинье слева не видно (максимальный радиус Гинье  $R_g = 25,5 \text{ нм}$ , т.е.  $1/q \approx 17 \text{ нм}$ ), а  $\Delta(\ln I)/\Delta(\ln q)$  справа, там, где должна быть область Порода, равен  $-1,3$ , что близко к величине  $-1$  (при  $R_g = 0,88 \text{ нм}$ , т.е.  $1/q \approx 1,5 \text{ нм}$ ). Отсюда можно допустить, что среди рассеивающих центров имеется элементарный рассеиватель в виде длинного цилиндра, однако его вклад в полную амплитуду рассеяния невелик, как видно на рис. 4. Здесь важно отметить, что в ряде статей по МУРР углеродных материалов, как, например, в работах [20, 21], под рассеивателями подразумеваются не только углеродные кластеры, но и нанопоры.

**Сравнение результатов экспериментов по рентгеновской и нейтронной дифракции плёнок.** На рис. 5 представлена экспериментальная кривая МУРР в области дифракционных рефлексов при  $q = 3—103 \text{ нм}^{-1}$ , т.е. для более мелких размеров рассеивателей по сравнению с представленными на рис. 4. Она получена в результате совмещения третьей и четвертой исходных кривых (см. таблицу).

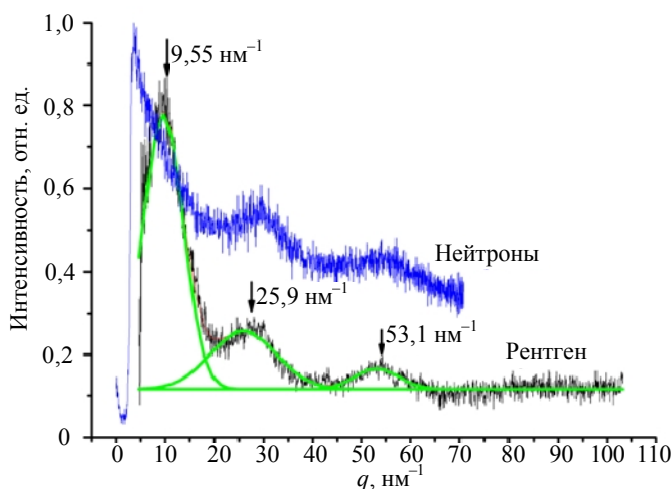


Рис. 5. Экспериментальная кривая рентгеновского рассеяния в области дифракционных рефлексов (продолжение кривой, приведённой на рис. 4). Показана аппроксимация кривой тремя гауссианами с позициями пиков  $9,55$ ,  $25,9$  и  $53,1 \text{ нм}^{-1}$ . Для сравнения показана кривая нейтронной дифракции на той же плёнке, где отсутствует пик  $9,55 \text{ нм}^{-1}$

при исследовании спектров комбинационного рассеяния, как и молекулярный протий).

Низкий C—D-контраст обусловлен близостью сечений когерентного рассеяния нейтронов для атомарного дейтерия и углерода, которые равны соответственно  $\sigma(D) = 5,59$  барн,  $\sigma(C) = 5,51$  барн ( $1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2$ ) [22]. Для трития  $\sigma(T) = 2,89$  барн, т.е. его присутствие в структурах рассеяния можно будет зафиксировать на нейтронограммах и на рентгенограммах. Когерентное сечение рассеяния для атомарного водорода заметно меньше, составляя величину  $\sigma(H) = 1,8$  барн. Отсюда можно предположить, что первый пик на  $9,55 \text{ нм}^{-1}$  обусловлен нанопорами с дейтерием, а второй и третий пики, присутствующие на нейтронной кривой, при наличии пор могли быть связаны с атомарным водородом. Наличие большого фона некогерентного рассеяния на месте первого рентгеновского пика в нейтронной дифракции также свидетельствует в пользу предположения о слабом контрасте C—D для когерентного рассеяния нейтронов.

При рассмотрении дифракции рентгеновских лучей нет нужды вводить по отдельности когерентную и некогерентную составляющие рассеяния. В этом случае обычно используется так называемый атомный форм-фактор, который при нулевом угле падения равен  $0,28 \cdot 10^{-16} \text{ см}$  для H,  $H_2$  и D и  $1,69 \cdot 10^{-16} \text{ см}$  — для  $C^{12}$ , а проблема слабого контраста для элементов C—H(D) отсутствует.

Там же для сравнения показана нейтронная дифрактограмма, полученная в интервале  $q = 3—70 \text{ нм}^{-1}$  для той же плёнки. Она снималась на дифрактометре ДИСК на нейтронном пучке реактора ИР-8 (Институт реакторных материалов и технологий НИЦ «Курчатовский институт»). Нейтронная кривая даёт только два пика:  $25,9$  и  $53,1 \text{ нм}^{-1}$ .

При исследовании различных углеродных материалов весьма распространена точка зрения о том, что типичным рассеивающим элементом являются нанопоры в структуре материала. Мы полагаем, что причина отсутствия первого пика на нейтронной кривой дифракции обусловлена низким контрастом для нейтронов  $CD_x$ -плёнок, т.е. заполненных дейтерием нанопор (имеется в виду атомарный дейтерий, химически связанный, поскольку молекулярный дейтерий не был обнаружен нами в составе плёнок из токамака

Напомним, что в общем случае интенсивность нейтронной волны, рассеянной малым объёмом вещества, можно представить в виде двух слагаемых, первое из которых пропорционально числу рассеивающих центров  $N$  (некогерентная составляющая), второе —  $N^2$  (когерентная составляющая). Когерентная составляющая проявляется в виде пиков на нейтронограмме. Она является структурно-чувствительной и позволяет получать информацию о структуре вещества и коллективных динамических свойствах. Некогерентная составляющая определяет фон. Она не чувствительна к структуре вещества, отражает взаимодействие нейтрона с отдельными рассеивающими центрами (дефектами, примесями) и даёт информацию только о динамических свойствах отдельных рассеивателей (атомных ядер, магнитных моментов, молекул).

Как отмечено в работе [21], одна из проблем нейтронной дифракции для углеводородных систем состоит в наличии большого фона некогерентного рассеяния от атомарного водорода (80 барн), который присутствует в исследуемых плёнках в хемосорбированном состоянии при атомарном соотношении  $H/C \approx 0,1-0,2$ , следовательно, при весовом соотношении не более 1—2%, что даёт вклад  $\leq 0,8-1,6$  барн некогерентного фона, т.е. приближается к величине когерентного сечения рассеяния 1,8 барн для H. Это обстоятельство также осложняет регистрацию углеводородных структур, как видно на рис. 5 по крутому подъёму интенсивности нейтронной дифракции при  $q < 15 \text{ nm}^{-1}$ , т.е. в области первого рентгеновского пика, которого нет на нейтронной кривой.

Ввиду близости первого рентгеновского пика  $q_1 = 9,55 \text{ nm}^{-1}$  к области с наклоном  $-1,3$  на рис. 4 этот пик может относиться к «корреляционной длине» — вероятному расстоянию между цилиндрическими нанопорами, которая определяется по соотношению  $d_1 = 2\pi/q_1 = 2\pi/9,55 \text{ nm}^{-1} = 0,66 \text{ nm}$ . Соответственно другие корреляционные длины для второго и третьего пиков составят  $d_2 = 0,24 \text{ nm}$  и  $d_3 = 0,12 \text{ nm}$ .

Размер рассеивающих центров (нанопор)  $L$  оценивался по формуле Шеррера:  $L = 1,84 \cdot 2\pi/w$ , где  $w$  — ширина дифракционных пиков на половине высоты. Для пиков  $9,55, 25,9$  и  $53,1 \text{ nm}^{-1}$  величины  $w = 0,09, 0,154$  и  $1,12 \text{ nm}$  соответственно, а размеры рассеивающих центров  $L = 1,28$  (с дейтерием),  $0,75$  и  $1,12 \text{ nm}$ . Поскольку интенсивность нейтронного пика  $53,1 \text{ nm}^{-1}$  на 30% меньше интенсивности пика  $25,9 \text{ nm}^{-1}$ , можно было бы допустить в структуре с пиком  $53,1 \text{ nm}^{-1}$ , если это нанопоры размером  $1,12 \text{ nm}$ , присутствие изотопов H и D. Однако это не может быть молекула HD, поскольку наши исследования спектров комбинационного рассеяния слоистых плёнок показали, что в них нет молекул  $D_2, H_2$  и HD в физически сорбированном состоянии.

**Рентгенофлуоресцентный анализ примесей.** Анализ примесей в золотистых слоистых плёнках проводили методом рентгеновской флуоресценции с использованием синхротронного излучения в Институте ядерной физики им Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН. Применявшееся оборудование позволяло проводить многоэлементный анализ концентрации содержащихся в плёнке микровключений с атомными номерами элементов  $Z > 10$  с точностью до  $0,03 \text{ млн}^{-1}$ . При энергии возбуждения  $21,3 \text{ кэВ}$  были получены спектры рентгенофлуоресценции, представленные на рис. 6, начиная от пика Ag, который соответствует спектральной линии  $K_\alpha$  с энергией  $2,96 \text{ кэВ}$  до Mo ( $17,48 \text{ кэВ}$ ).

В гомогенных золотистых плёнках обнаружены примеси металлов (в основном переходных) Fe, Mo, Cr, Ni, Nb и других. Это продукты эрозии поверхности вакуумной камеры (аустенитная сталь). Их суммарная концентрация составляет 1,5%. Почти половина этих примесей — железо. Эксперименты по рентгеновской спектроскопии поглощения EXAFS для  $K$ -края железа показали, что примеси Fe образуют в плёнках карбидоподобную структуру нанокластеров с расстоянием между атомами Fe и C, равным  $0,211 \text{ nm}$ , и координационным числом 6,2 [9]. Возможно, карбидоподобную структуру могут образовывать и другие атомы переходных металлов примесей (Mo, Cr, Ni, Ti), концентрация которых в несколько раз меньше, что не позволяет провести с ними аналогичные эксперименты.

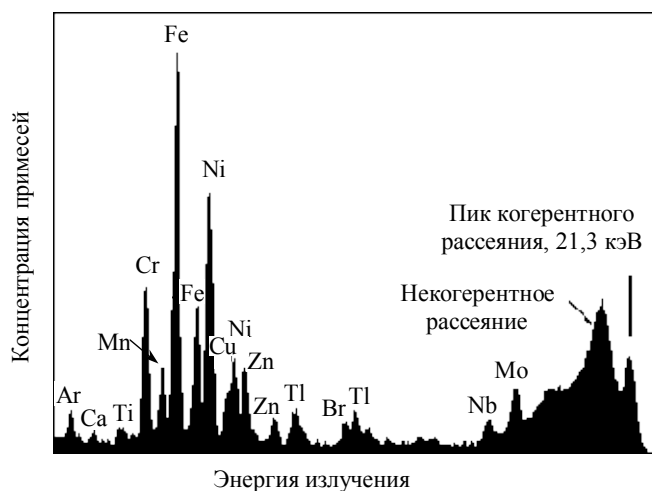


Рис. 6. Спектры рентгенофлуоресценции примесей в слоистых плёнках в диапазоне энергии от  $2,96 \text{ кэВ}$  ( $K_\alpha$ -линия Ag) до  $21,3 \text{ кэВ}$  (пик когерентного рассеяния падающего излучения)

**Адсорбционные и основные колебательные состояния.** В результате анализа спектров термодесорбции  $D_2$  и  $H_2$  с масс-спектрометрической регистрацией, выполненных на сверхвысоковакуумной установке в НТК КЦСИиНТ и представленных на рис. 7, а также модельных представлений, было установлено, что изотопы водорода в эрозионных углеродно-дейтериевых плёнках находятся в двух основных адсорбционных состояниях: слабосвязанном состоянии, наблюдаемом при температуре десорбции  $T = 500\text{—}800$  К, с энергией активации десорбции  $E_a \approx 0,65$  эВ/Н и хемосорбированном (сильносвязанном) состоянии при  $T = 900\text{—}1000$  К с  $E_a \approx 1,25$  эВ/Н. Эти два состояния заметны по разным формам и ширине упомянутых областей спектра термодесорбции, как видно, например, для случая  $D_2$  на рис. 7.

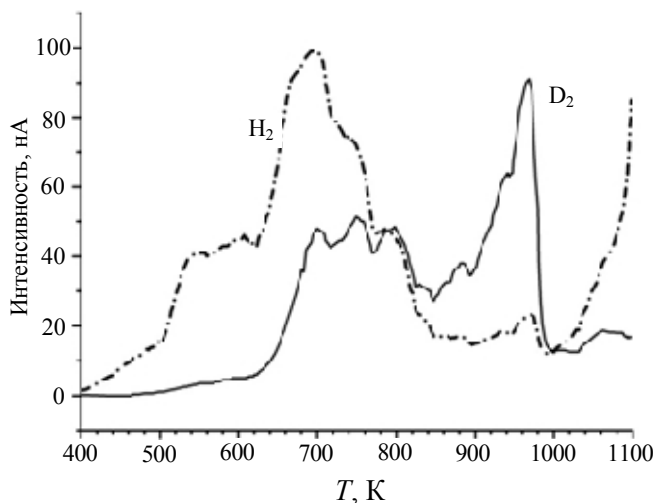


Рис. 7. Термодесорбционные спектры для  $D_2$  и  $H_2$  при скорости нагрева золотистых плёнок 10 К/мин

При  $D/C \approx 0,2$  дейтерий наблюдается только в деформационных модах  $sp^3$  C— $D_2$  при волновых числах 633 и 1090  $\text{см}^{-1}$ . С ростом концентрации дейтерия (при  $D/C = 0,35\text{—}0,6$ ) он наблюдается также и в растягивающих модах  $sp^3$  C— $D_{2,3}$  в области 2200—2100  $\text{см}^{-1}$  [12]. Таким образом, эти моды являются индикатором количества накопленного в плёнках дейтерия. По изменению их интенсивности можно контролировать *in situ* как процесс накопления изотопов водорода (дейтерия и трития) в эрозионных плёнках токамака, так и ход десорбции трития, связанный с разрывом  $\sigma$ -связей C—D при детритизации ВК.

Предложено два механизма термодесорбции изотопов водорода [3]. Один из них — прыжковая диффузия атомов H(D) между слабосвязанными состояниями. Величина прыжка составляет  $\sim 3,4$  нм, что коррелирует с одним из приведённых характерных размеров кластеров ( $\sim 4$  нм) — расстоянием между  $sp^2$ -нанокластерами с неспаренным спином, на которых и происходит атомарная рекомбинация с последующей десорбцией  $H_2$  и  $D_2$ . Для сильносвязанных состояний предложен резонансный механизм термодесорбции, при котором возбуждаются две соседние растягивающие колебательные моды C—D или C—H (с характерной длиной связей 0,14—0,15 нм), затем соответствующие химические связи разрываются с образованием молекул  $D_2$  ( $H_2$ ) и их десорбцией.

**Структура хлопьев.** Структура слоистых плёнок  $CD_x$  — аморфная, она существенно отличается от структуры графита и содержит дефекты в виде оборванных связей, скоплений наноструктур и нанопор, в том числе цилиндрической формы, заполненных дейтерием. Характерный размер нанокластеров и нанопор около 1 нм. Структура плёнок искажена присутствием разорванных связей и нанопор, в которых может находиться дейтерий (и, возможно, протий). Последнее подтверждается дифракционным пиком на 9,55  $\text{нм}^{-1}$ , который остаётся «невидимым» для нейтронов ввиду слабого контраста C—D, т.е. из-за близости сечений когерентного рассеяния для D и C, а также сильного фона некогерентного рассеяния нейтронов для атомарного водорода. Остальные два графеноподобных дифракционных пика есть на нейтронных и рентгеновских спектрах, т.е. могут быть связаны со структурами типа C—C или C—H, возможно — с нанопорами. Вероятные величины межплоскостных расстояний между структурами, рассеивающими рентгеновские лучи, для трёх пиков оказались равными 0,66, 0,24 и 0,12 нм соответственно. Это схематически показано на линейке в диапазоне 0,1—10 нм и в таблице на рис. 8 с указанием методов определения размеров структурных элементов, а также с указанием известных углеродных структур типа ароматическое кольцо, нанотрубка, фуллерен  $C_{60}$ , размеры которых довольно близки к размерам некоторых из найденных рассеивающих элементов. Также отмечены размеры структурных элементов в плёнках (включая кластеры  $Csp^2$ , межатомные расстояния), проявляющих себя в других упомянутых методиках исследования (ТДС, РФА, EXAFS, ЭПР, ИК, фотолюминесценция).

На основании измерений с ЭПР 100 Гс из усреднённой величины фактора  $g = 2,00341$  для трёх поляризации внешнего поля был получен размер  $Csp^2$ -кластера с неспаренным спином около 4 нм, а из концентрации этих спинов  $\sim 10^{19}$   $\text{см}^{-3}$  — среднее расстояние между парамагнитными  $Csp^2$ -кластерами  $\sim 4$  нм. Данная концентрация парамагнитных спинов коррелирует с результатами по спектрам фотолюминесценции и

возбуждения люминесценции пленок из токамака, т.е. с полученной из данных спектров величиной диэлектрической щели  $E_g \approx 3$  эВ [3, 7], что также отмечено на рис. 8.

Опыты, проведённые с применением спектроскопии околопороговой тонкой структуры рентгеновского поглощения NEXAFS для края поглощения  $C1s$  [17], показали, что анализируемые хлопья содержат  $\sim 63\%$  состояний  $sp^3$  и  $\sim 37\%$  состояний  $sp^2$ . Сравнение результатов этих опытов с литературными данными позволяет сделать вывод о близости слоистых плёнок из токамака к широкозонным плёнкам а-C:H или к тетраэдральным плёнкам ta-C:H с высоким содержанием состояний  $sp^3$  ( $\sim 70\%$ ) и долей  $sp^2$ , равной  $\sim 30\%$ .

Связи  $sp^3$  формируют локализованные состояния  $\sigma$  и  $\sigma^*$  соответственно ниже и выше уровня Ферми, отвечающие за механические свойства плёнок. Второй тип связей  $sp^2$  — делокализованные  $\pi$ -состояния, расположенные между  $\sigma$  и  $\sigma^*$ , отвечающие за оптические и электрические свойства. В итоге кластеры  $sp^2$  как бы вставлены в диэлектрическую  $sp^3$ -матрицу. Внутри диэлектрической щели расположен континуум дефектных состояний, которые относятся к  $\pi$ - и  $\pi + \sigma$ -состояниям. При этом ароматические кольца  $sp^2$  связаны с помощью  $\pi$ -электронов в кластеры  $C_{sp^2}$ , что минимизирует полную энергию системы. При этом  $\pi$ -электроны, которые имеют энергию приблизительно на 6 эВ ниже уровня Ферми  $E_F$ , определяют электронные свойства, включая величину щели  $E_g$  и наличие дефектных состояний, являющихся также центрами адсорбции изотопов водорода и углеводородов, а  $sp^3$ -матрица определяет механические свойства. Таким образом, система имеет смешанные состояния  $sp^2 + sp^3$  широкозонного полупроводника с диэлектрической щелью  $E_g \approx 3$  эВ.

**Вольт-амперные характеристики.** С помощью ИК-спектроскопии и измерения вольт-амперных характеристик обнаружено различие между свойствами сторон плёнки. Обнаружено, что на пристеночной стороне плёнки меньше удельное электрическое сопротивление  $\rho = 10^5$ — $10^6$  Ом·см [13]. Колебательная структура пристеночной стороны имеет более слабые C—H деформационные и C=C—H олефиновые моды и составлена, в основном, из C=C—H ароматических растягивающих мод, включая бензольные кольца. Концентрация адсорбированного H(D) на пристеночной стороне меньше, что приводит к преобладанию чисто углеродного каркаса. Меньше также концентрация гидроокислов и C=O-групп по сравнению с плазменной стороной. Нарушению структуры углеродного каркаса могут способствовать примеси металлов, концентрация которых выше на пристеночной стороне. На плазменной стороне преобладают  $sp^3$ -структуры. Там  $\rho \approx 10^9$  Ом·см.

Эти различия, по-видимому, обусловлены процессом формирования плёнок при разрядах в дейтериевой плазме токамака, а также, возможно, при тлеющих разрядах во время чистки камеры токамака. В начальный момент образования плёнки при совместном осаждении с углеродом эродированные атомы металла имеют высокую вероятность прилипания к металлической поверхности, так как у атомов металла выше коэффициент прилипания к металлу и менее вероятна диффузия по сравнению с более лёгкими изотопами водорода и углеводородными соединениями. В ходе роста плёнок атомы металла при осаждении на плазменную сторону плёнки имеют большую вероятность дальнейшего переосаждения [13] по сравнению с начальным периодом образования плёнок.

Кроме того, как было показано в экспериментальной работе [23], вероятность взаимодействия пучка углеводородных радикалов  $C_xH_y$  с кремниевой поверхностью стандартной измерительной замкнутой ячейки с отверстием для исследуемого пучка сильно зависит от типа гибридизации углеводородов, составляя величины около 0,8 для  $sp^1$ -, 0,35 для  $sp^2$ - и порядка  $10^{-3}$  для  $sp^3$ -состояний при комнатной температуре. Указанная вероятность складывается из вероятности прилипания и вероятности химической реакции при столкновении с поверхностью, где последняя — заметно меньшая величина. Причина это-

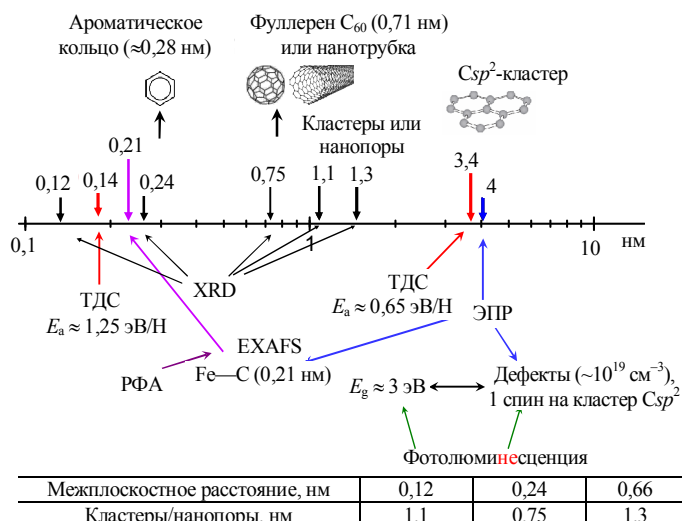


Рис. 8. Размеры структурных элементов в плёнке из токамака с указанием методов их определения

го, как мы полагаем, обусловлена наличием  $\pi$ -орбиталей у  $sp^1$ - (их две у каждого атома углерода, помимо  $\sigma$ -орбитали) и  $sp^2$ -состояний (одна  $\pi$ -орбиталь), которые, как более делокализованные, могут легко вступать в химические связи, и отсутствием  $\pi$ -орбиталей у  $sp^3$ -состояний. Это также важно при рассмотрении взаимодействия углеводородов с металлической поверхностью вакуумной камеры, где вероятность прилипания обычно бывает выше ввиду более эффективной диссипации энергии столкновения в фононы [13]. Плазменная сторона плёнки при осаждении углеводородов подвергается бомбардировке ионами и атомами дейтерия и протия из слоя пристеночной плазмы (диверторного слоя) до тех пор, пока толщина слоя не превысит длину пробега наиболее энергичных плазменных частиц. Поэтому в результате реакции присоединения  $C_xH_y + H$  у ненасыщенных углеводородов происходят обрыв двойных связей  $C=C$  с присоединением атомарного водорода (дейтерия) и превращение слоя  $C_xH_y, sp^2$  в состояние  $sp^3$ .

Таким образом, данные сведения качественно согласуются с указанными наблюдениями плазменной и приповерхностной сторон плёнки с помощью ИК-спектроскопии и измерений вольт-амперных характеристик.

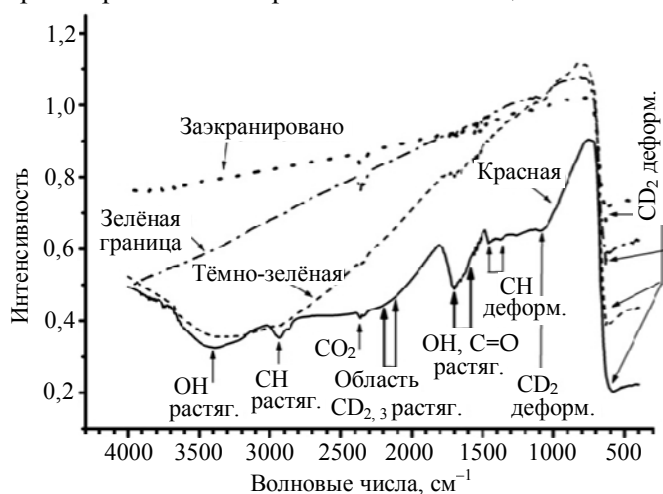


Рис. 9. ИК-спектры отражения гомогенной тонкой плёнки на стальном зеркале для разных цветных участков при наибольшей толщине плёнки (300 нм) на красном (левом) участке плёнки, представленной на рис. 2

нопоподобной)  $sp^1$ . Из литературы известно, что в дейтериде деформационная мода  $C-D_2$  находится на  $638\text{ см}^{-1}$ , а для ацетиленовых полимерных плёнок мода  $\equiv C-H\ sp^1$  расположена на  $628\text{ см}^{-1}$ . Поскольку наблюдаемая в экспериментах мода на  $632-633\text{ см}^{-1}$  сдвигается с ростом толщины плёнки на  $637\text{ см}^{-1}$  и далее приходит в насыщение с ростом толщины плёнки, то, скорее всего, она относится к  $C-D_2$ . Имеется также намёк на присутствие деформационной моды  $C-D_2$  на  $1090\text{ см}^{-1}$ , однако в области типичных растягивающих мод  $C-D_2, C-D_3$  на  $2200-2100\text{ см}^{-1}$  есть только еле заметный вогнутый участок на красной кривой. Из литературы известно, что наведённый при колебаниях группы  $C-D_2$  дипольный момент в 2 раза ниже по величине, чем для группы  $C-H_2$ , что обуславливает его более слабую интенсивность.

Отдельный интерес представляет соотношение интенсивности дейтериевых мод  $C-D$  в зависимости от относительной концентрации дейтерия  $D/C$ . Интенсивность сигнала ИК-моды  $I \approx SNL_{IR}$ , где  $N$  — объёмная концентрация элемента;  $L_{IR}$  — длина поглощения излучения и  $S$  — сечение взаимодействия ИК-излучения с данной модой, которое определяется величиной наведённого дипольного момента.

Известно, что дейтерий адсорбируется в приповерхностном слое толщиной  $L_D = 0,3-0,4\text{ мкм}$ . Обычно  $L_D \leq L_{IR}$  в области среднего ИК-диапазона. Тогда для мод  $CD$  получим интенсивность сигнала  $I_{CD} = SN(D/C)L_D$ . В итоге при толщине плёнки  $h$  меньше  $0,4\text{ мкм}$  получим  $I_{CD} \sim (D/C)h$ , т.е. растягивающие моды  $C-D_{2,3}$  на  $2217, 2111$  и  $2073\text{ см}^{-1}$  появляются только при величине  $(D/C)h > 0,2 \cdot 0,3 = 0,06\text{ мкм}$ . В дальнейшем эти моды углеводородных плёнок на зеркалах могут быть использованы для контроля накопления изотопов водорода. При наличии трития аналогичные растягивающие моды  $C-T_{2,3}$  будут находиться в области частот  $2680-2560\text{ см}^{-1}$ , т.е. в области, свободной от паразитных мод  $H_2O$  и  $CO_2$  (при «стандартном» снятии ИК-спектров в воздухе), а для смешанных мод  $CDT$  — в области частот  $2500-2200\text{ см}^{-1}$ .

### ИК-спектры тонкой плёнки на зеркале. На

рис. 9 показаны основные растягивающие и деформационные моды ИК-спектра тонкой плёнки из токамака на зеркале из нержавеющей стали (см. рис. 2) с отношением  $D/C \approx 0,2$ . Верхняя кривая соответствует области зеркала, которая всегда была закрыта экраном, а расположенные ниже кривые — цветным участкам зеркала с растущей толщиной плёнки до максимума  $300\text{ нм}$  (красная кривая). Эти участки открывались только при рабочих импульсах дейтериевой плазмы.

С ростом толщины плёнки уменьшается коэффициент отражения, т.е. растёт поглощение и проявляются колебательные моды. При волновых числах  $632-633\text{ см}^{-1}$  наблюдается мода, которую можно отнести либо к деформационной моде  $C-D_2$ , либо к деформационной моде  $\equiv C-H$  (ацетилен-



## ВЫВОДЫ

Углеродно-дейтериевые плёнки и хлопья, образующиеся в токамаке T-10, являются аморфными, с наличием элементов структур типа графеноподобных плоскостей, ароматических колец, линейных  $Csp^2$ -элементов, алмазоподобных  $Csp^3$ -структур и дефектов структуры в виде оборванных связей в углеродной сетке. С точки зрения рентгеновского рассеяния рассеивающая система — фрактальный агрегат, составленный из мелких элементарных рассеивателей. Наклон основной части кривой МУРР, равный 2,89 (по абсолютной величине), соответствует фрактальной размерности границ агрегата. Там присутствуют также нанокластеры и нанопоры цилиндрической формы, заполненные атомарным дейтерием, с характерными структурными размерами рассеивателей 0,7, 1,0 и 1,4 нм. В целом электронная система имеет смешанные  $sp^2 + sp^3$ -состояния широкозонного полупроводника с диэлектрической щелью около 3 эВ.

Атомное отношение D/C = 0,2—0,4 в слоистых тёмных  $CD_x$ -плёнках и 0,5—0,8 — в слоистых золотистых плёнках. Такая концентрация дейтерия наблюдается по всей толщине плёнки.

Изотопы водорода находятся в плёнках в двух основных адсорбционных состояниях: слабосвязанном состоянии, наблюдаемом при температуре десорбции  $T = 500—800$  К, с энергией активации десорбции  $E_a \approx 0,65$  эВ/Н и хемосорбированном (сильносвязанном) состоянии при  $T = 900—1000$  К с  $E_a \approx 1,25$  эВ/Н.

Им соответствуют два вероятных механизма термодесорбции: прыжковая атомарная диффузия для слабосвязанных состояний с величиной прыжка  $\sim 3,4$  нм и резонансный механизм для сильносвязанных состояний.

При величине произведения относительной концентрации дейтерия на толщину плёнки  $(D/C)h < 0,06$  мкм, что характерно для тонких плёнок на зеркалах, в ИК-спектре дейтерий наблюдается только в деформационных модах  $sp^3C—D_2$  при частотах 633 и 1090  $cm^{-1}$ . С ростом концентрации дейтерия (особенно при  $D/C \approx 0,35—0,6$ ) или толщины плёнки дейтерий наблюдается также и в растягивающих модах  $sp^3C—D_2$  в области 2100—2200  $cm^{-1}$ . Таким образом, по изменению интенсивности этих мод можно контролировать *in situ* как процесс накопления изотопов водорода, в частности трития, в плёнках, так и ход десорбции трития из них, связанный с разрывом  $\sigma$ -связей C—D(T) при детритизации. Молекулы  $D_2$  и  $H_2$  в физически сорбированном состоянии в слоистых плёнках не обнаружены.

В слоистых золотистых плёнках обнаружены микропримеси металлов Fe, Mo, Cr, Ni, Nb и других с суммарной концентрацией 1,5%. Почти половину этих примесей составляет железо, которое образует в плёнках карбидоподобную структуру нанокластеров с расстоянием между атомами Fe и C, равным 0,211 нм.

С помощью ИК-спектроскопии и измерения вольт-амперных характеристик обнаружено различие между свойствами сторон плёнки. Пристеночная сторона плёнки имеет полупроводниковую вольт-амперную характеристику с удельным электрическим сопротивлением  $\rho = 10^5—10^6$  Ом·см, что обусловлено большей концентрацией металлических примесей и преобладанием ароматической структуры  $Csp^2$ . На плазменной стороне плёнки преобладают алмазоподобные структуры  $Csp^3$  с оборванными связями при величине  $\rho \sim 10^9$  Ом·см и квазилинейной вольт-амперной характеристике.

Эти различия, как мы полагаем, обусловлены процессом формирования плёнок при разрядах в дейтериевой плазме токамака и при тлеющих разрядах во время чистки камеры токамака, а также более высокой вероятностью прилипания к поверхности вакуумной камеры металлов и углеводородов в состоянии  $sp^2$  по сравнению с состоянием  $sp^3$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Taylor N., Baker D., Ciattaglia S. et al.** Key issues in the safety and licensing of ITER. — In: IAEA, 3rd TM «First Generation of Fusion Power Plants: Design and Technology». Vienna, Austria, 13—15 July 2009; 9th TM «Fusion Power Plant Safety». Vienna, Austria, 15—17 July 2009, CD-ROM proceedings, Thursday-2009-07-16.
2. **Romanov P.V., Kolbasov B.N., Alimov V.Kh., Gureev V.M., Domantovskij A.G., Khimchenko L.N., Orlov P.N.** Microstructure and deuterium content of tokamak T-10 carbon erosion products. — J. Nucl. Mater., 2002, vol. 307—311, Part B, p. 1294.
3. **Svechnikov N.Yu., Stankevich V.G., Sukhanov L.P., Menshikov K.A., Lebedev A.M., Kolbasov B.N., Zubavichus Y.V., Rajarathnam D.** Investigations of adsorption states of protium and deuterium in redeposited carbon flakes formed in tokamak T-10. — J. Nucl. Mater., 2008, vol. 376, p. 152.
4. **Kolbasov B.N., Romanov P.V., Guseva M.I., Khripunov B.I., Stankevich V.G., Svechnikov N.Yu., Zimin A.M.** Some recent Russian studies of hydrogen isotope retention in plasma facing materials. — Plasma Devices and Operations, 2006, vol. 14, p. 303.

5. Дудин П.В., Лебедев А.М., Меньшиков К.А., Свечников Н.Ю., Станкевич В.Г. Станция D<sup>4</sup>.2 оптической ВУФ-спектроскопии для исследования твёрдых тел в диапазоне энергии возбуждения 3—200 эВ. — Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2004, т. 11, с. 26.
6. Stankevich V.G., Kolbasov B.N., Svechnikov N.Yu., Kocherginsky N.M., Rajarathnam D., Kostetski Yu. Thermal and spectroscopical characterization of tokamak T-10 smooth deuterated carbon erosion films. — In: Proc. of the Intern. Conf. on Mater. for Advanced Technologies (ICMAT-2003) and Symposium I (Advanced Polymers). Singapore, 7—12.12.2003. Publisher: Mater. Research Society Singapore, Institute of Mater. Research and Engineering, Singapore, 2004, paper I-8-13P.
7. Свечников Н.Ю., Станкевич В.Г., Лебедев А.М., Меньшиков К.А., Колбасов Б.Н., Гусева М.И., Химченко Л.Н., Ко-чергинский Н.М., Раджаратнам Д., Костецкий Ю. Исследования температурных и спектроскопических характеристик однородных углеродно-дейтериевых эрозионных плёнок из токамака Т-10. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2004, вып. 3, с. 3. Электронная версия: [http://vant.iterru.ru/vant\\_2004\\_3/1.pdf](http://vant.iterru.ru/vant_2004_3/1.pdf) и <http://elibrary.ru/download/75737740.pdf>.
8. Svechnikov N.Yu., Stankevich V.G., Lebedev A.M., Menshikov K.A., Kolbasov B.N., Kocherginsky N.M., Rajarathnam D., Kostetski Yu., Ivanov S.N., Kriventsov V.V. Spectroscopic investigations of smooth hydrocarbon deuterated erosion flakes deposited from tokamak T-10 deuterium plasma discharge. — Nucl. Instrum. and Meth. in Physics Research, A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2005, vol. 543, № 1, p. 225.
9. Svechnikov N.Yu., Stankevich V.G., Lebedev A.M., Menshikov K.A., Kolbasov B.N., Kriventsov V.V. Spectroscopy of smooth deuterated carbon films redeposited from plasma discharge in the tokamak T-10. — Crystallography Reports, 2006, vol. 51, № 1, p. S158.
10. Свечников Н.Ю., Станкевич В.Г., Суханов Л.П., Меньшиков К.А., Лебедев А.М., Колбасов Б.Н., Зубавичус Я.В., Раджаратнам Д. Адсорбционные состояния протия и дейтерия в пересажённых полимерных углеводородных плёнках из токамака Т-10. — Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2008, № 6, с. 5.
11. Svechnikov N.Yu., Stankevich V.G., Lebedev A.M., Menshikov K.A., Kolbasov B.N., Guseva M.I., Vukolov K.Yu., Rajarathnam D., Kocherginsky N.M., Kostetski Yu. Spectroscopic studies of homogeneous thin carbon erosion films on mirrors and flakes with a high deuterium content formed in tokamak T-10. — Fusion Eng. Des., 2005, vol. 75—79, part B, p. 339.
12. Svechnikov N.Yu., Stankevich V.G., Lebedev A.M., Menshikov K.A., Kolbasov B.N., Guseva M.I., Khimchenko L.N., Rajarathnam D., Kostetski Yu.Yu. Temperature and spectroscopic characteristics of homogeneous co-deposited carbon/deuterium films produced in the T-10 tokamak. — Plasma Devices and Operations, 2006, vol. 14, № 2, p. 137.
13. Свечников Н.Ю., Станкевич В.Г., Меньшиков К.А., Лебедев А.М., Колбасов Б.Н., Трунова В.А., Rajarathnam D., Kostetski Yu. Исследование микропримесей и зарядовых состояний в однородных углеводородных плёнках, пересажённых из дейтериевого плазменного разряда токамака Т-10, с помощью методов РФА, ИК-спектроскопии, ЭПР и ВАХ. — Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2008, № 12, с. 14.
14. Stankevich V.G., Svechnikov N.Yu., Zubavichus Y.V., Veligzhanin A.A., Sukhanov L.P., Menshikov K.A., Lebedev A.M., Kolbasov B.N., Vukolov K.Yu., Rajarathnam D., Khimchenko L.N. Study of hydrocarbon flakes redeposited from T-10 tokamak deuterium plasma discharges. — In: 17th Intern. Colloquium on plasma processes. Marseille, France, June 22—26, 2009. [www.vide.org/cip2009.html](http://www.vide.org/cip2009.html); abstract booklet, 2009, p. 53.
15. Kolbasov B.N., Guseva M.I., Khripunov B.I., Martynenko Yu.V., Zimin A.M., Stankevich V.G., Svechnikov N.Yu., Bartenev S.A. Fusion safety studies in Russia in 2003. — Fusion Eng. Des., 2005, vol. 75—79, p. 1121.
16. Свечников Н.Ю., Станкевич В.Г., Лебедев А.М., Меньшиков К.А., Колбасов Б.Н., Кривенцов В.В. Спектроскопия однородных углеводородных дейтерированных плёнок, пересажённых из плазменного разряда токамака Т-10. — Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2007, № 1, с. 17.
17. Stankevich V.G., Zubavichus Y.V., Veligzhanin A.A., Somenkov V.A., Svechnikov N.Yu., Menshikov K.A., Lebedev A.M., Khimchenko L.N. Complementary studies of structural characteristics and properties for smooth redeposited hydrocarbon films from T-10 tokamak with synchrotron radiation and neutrons. — In: 37th Intern. Conf. on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics. Vancouver, Canada, July 11—16, 2010. Program & Abstracts. Poster 5P135. <http://www.vuvx2010.ca/>.
18. Колбасов Б.Н., Гусева М.И., Гуреев В.М., Дanelян Л.С., Орлов П.Н., Пашков А.Ю., Химченко Л.Н., Романов П.В., Алимов В.Х., Гончаров В.Л. Исследование выделения дейтерия из углеродных плёнок, образующихся в токамаке Т-10. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2006, вып. 2, с. 50—62. Электронная версия: [http://vant.iterru.ru/vant\\_2006\\_2/5pdf](http://vant.iterru.ru/vant_2006_2/5pdf) и <http://elibrary.ru/download/79729897.pdf>.
19. Зубавичус Я.В., Словохотов Ю.Л. Рентгеновское синхротронное излучение в физико-химических исследованиях. — Успехи химии, 2001, т. 70 (5), с. 429.
20. Jacobsohn L.G., Capote G., Maia da Costa M.E.H., Franceschini D.F., Freire F.L. Jr. Nanoporosity in plasma deposited amorphous carbon films investigated by small-angle X-ray scattering. — Diamond and Related Materials, 2002, vol. 11, p. 1946.
21. Burian A., Dore J.C., Hannon A.C., Honkimaki V. Complementary studies of structural characteristics for carbon materials with X-rays and neutrons. — J. of Alloys and Compounds, 2005, vol. 401, p. 18.
22. Останевич Ю.М., Сердюк И.И. Нейтронографическое исследование структуры биологических макромолекул. — УФН, 1982, т. 137 (1), с. 85.
23. Kirschner A. Erosion and deposition mechanisms in fusion materials. — Transactions of Fusion Science and Technology, 2008, vol. 53, p. 259—277.

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2010 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2011, вып. 1, с. 3—12.