

УДК 533.916

## Взаимодействие плазмы с защитным бороуглеродным покрытием вакуумной камеры стелларатора Л-2М

А. И. Мещеряков, В. М. Шарапов, И. А. Гришина, А. А. Летунов,  
В. П. Логвиненко, Р. Х. Залавутдинов

*В статье исследуются свойства бороуглеродных (В/С) покрытий, наносимых различными способами на внутреннюю стенку вакуумной камеры стелларатора Л-2М. Ресурсные испытания показали, что В/С-покрытия, полученные с использованием тлеющего разряда, сохраняет свои защитные свойства при работе в режиме омического нагрева в полтора раза дольше, чем в режиме ЭЦР-нагрева плазмы. Рассматриваются вопросы нанесения, разрушения и долговечности В/С-покрытий, создаваемых в рабочих импульсах установки в режиме омического нагрева плазмы, а также изменения их состава и структуры в процессе работы стелларатора. Особое внимание было уделено роли сепаратрисы в нанесении и разрушении В/С-пленки. Проведены первые эксперименты по нанесению бороуглеродного покрытия в рабочих импульсах стелларатора Л-2М в режиме с ЭЦР-нагревом плазмы.*

PACS: 52.25.Vy, 52.50.Nr, 52.50.Sw, 52.55.Nc

*Ключевые слова:* стелларатор, защитное бороуглеродное покрытие стенок камеры, X-точка сепаратрисы, нагрев плазмы.

### Введение

Для улучшения параметров плазмы в термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы часто проводится процедура плазмохимического осаждения защитных бороуглеродных плёнок на внутреннюю поверхность разрядной камеры (т. н. боронизация) [1].

Эта процедура применяется и на стеллараторе Л-2М с использованием тлеющего разряда в парах смеси карборана  $C_2B_{10}H_{12}$  и гелия [2]. В результате проведения боронизации в тлеющем разряде из плазмы исчезли примеси с большим атомным номером, уменьшились интенсивности свечения

линий легких примесей и суммарные радиационные потери из плазмы. Так, интенсивность свечения линий кислорода уменьшилась в 4—5 раз, а линий углерода в 3—4 раза. Улучшились и общие характеристики разряда: напряжение на обходе уменьшилось в два раза (при одинаковом токе омического нагрева), излучение из плазмы, измеряемое болометром, уменьшилось в три раза [2], а эффективный заряд плазмы уменьшился с 4—6 до 1,5—2 [3].

Помимо стандартной процедуры боронизации в тлеющем разряде, осаждение бороуглеродных плёнок стали проводить во время рабочих импульсов в омическом режиме нагрева плазмы также в смеси карборана и гелия (импульсная боронизация) [4]. Предполагалось, что импульсная боронизация сократит время боронизации, а наносимое таким способом защитное покрытие будет более прочным, чем покрытие, наносимое в тлеющем разряде, поскольку температура ионов в плазме в режиме омического разряда выше, чем температура ионов в тлеющем разряде.

На стеллараторе Л-2М импульсная боронизация проводилась в предварительно подготовленной камере стелларатора. Для подготовки камеры проводилась обычная боронизация в тлеющем разряде. Только в этих условиях удавалось получить импульс омического разряда длительностью

---

Мещеряков Алексей Иванович, заведующий лабораторией<sup>1</sup>.  
Шарапов Валерий Михайлович, ведущий научный сотрудник<sup>2</sup>.  
Гришина Ирина Анатольевна, старший научный сотрудник<sup>1</sup>.  
Летунов Александр Алексеевич, старший научный сотрудник<sup>1</sup>.  
Логвиненко Владимир Павлович, научный сотрудник<sup>1</sup>.  
Залавутдинов Ринад Харисович, зав. лабораторией<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.  
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова 38.

Тел. +7 (499) 135-80-19. E-mail: meshch@fpl.gpi.ru

<sup>2</sup>Институт физической химии и электрохимии  
им. А. Н. Фрумкина РАН.

Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 14.

Статья поступила в редакцию 24 марта 2016 г.

40—50 мс с постоянной или несколько спадающей во времени плотностью плазмы. Напуск карборана с помощью импульсного клапана осуществлялся в течение всего импульса омического разряда. Общее время нанесения пленки составляло 2,0—2,5 с (~50 рабочих импульсов установки). В работе [5] приведены результаты сравнения двух типов бороуглеродного покрытия, полученных при импульсной боронизации в омическом разряде и при боронизации в тлеющем разряде. Сравнение проводилось по результатам ресурсных испытаний при работе в режиме омического нагрева. Было установлено, что пленка, наносимая в процессе импульсной боронизации, является более долговечной по сравнению с пленкой, наносимой при боронизации в тлеющем разряде.

В данной работе продолжены исследования свойств бороуглеродных покрытий, наносимых различными способами. Раздел 1 содержит результаты ресурсных испытаний бороуглеродного покрытия, наносимого на стенки вакуумной камеры стелларатора в тлеющем разряде, в двух режимах работы установки: в режиме омического нагрева и в режиме ЭЦР-нагрева плазмы. В разделе 2 исследуются процессы нанесения и разрушения бороуглеродного покрытия в окрестности X-точек сепаратрисы магнитной конфигурации стелларатора Л-2М и вдали от них. В разделе 3 приведены первые результаты по нанесению бороуглеродного покрытия в рабочих импульсах стелларатора Л-2М в режиме с ЭЦР-нагревом плазмы.

### 1. Ресурсные испытания бороуглеродного покрытия, наносимого в тлеющем разряде

Целью ресурсных испытаний было установить продолжительность воздействия плазмы на бороуглеродную плёнку, наносимую при боронизации в тлеющем разряде, в течение которого пленка выполняет свою защитную функцию. Ресурсные испытания проводились в двух режимах работы стелларатора: в режиме омического нагрева, когда плазма нагревается только за счет индукционного тока, протекающего по плазме (мощность омического нагрева составляет величину  $P_{\text{OH}} = 40\text{—}60$  кВт), и при нагреве плазмы с помощью электронного циклотронного резонансного излучения (ЭЦР-нагрев) мощностью 200—400 кВт. В омическом режиме, в котором проводились ресурсные испытания, центральная температура и средняя плотность плазмы составляли  $T_e(0) = 280\text{—}320$  эВ и  $n_e = (1,0\text{—}1,3) \times 10^{19}$  м<sup>-3</sup>, тогда как при электронном циклотронном нагреве  $T_e(0) = 700\text{—}800$  эВ,  $n_e = (1,5\text{—}2,5) \times 10^{19}$  м<sup>-3</sup>. Перед ресурсными испытаниями была проведена стандартная боронизация камеры с использованием тлею-

щего разряда в газовой смеси паров карборана и гелия в течение 30—40 минут [2]. Исходное состояние стенки камеры и бороуглеродного покрытия в обоих экспериментах были примерно одинаковыми (поскольку одинаковыми были условия боронизации — состав газа, давление и время боронизации).

Контроль состояния покрытия осуществлялся по интенсивности свечения линии углерода СIII ( $\lambda_{\text{СIII}} = 4647$  Å) и по уровню общих радиационных потерь, измеряемых болометром, на стационарной стадии разряда. Поскольку в экспериментах не удавалось поддерживать в точности один и тот же уровень концентрации электронов, а зависимость интенсивности свечения линий примесей и, соответственно, мощность радиационных потерь зависят от плотности линейно, то обе эти характеристики были приведены к средней плотности плазмы  $n_e = 1 \times 10^{19}$  м<sup>-3</sup>. Результаты ресурсных испытаний для режима работы с омическим нагревом представлены на рис. 1, а для режима с ЭЦР-нагревом — на рис. 2. По оси абсцисс отложено суммарное время воздействия плазмы на защитное покрытие, которое вычислялось умножением длительности существования плазмы (длительность существования плазмы ~50 мс в режимах с омическим нагревом и ~10 мс в режимах с ЭЦР-нагревом) на число импульсов, прошедших после проведения процедуры боронизации. Типичные уровни интенсивности свечения углерода и мощности радиационных потерь, характерные для неборонизованной камеры, на рисунках показаны сплошными линиями. На рисунках прослеживается постепенная деградация бороуглеродного покрытия, и контролируемые параметры возвращаются к значениям, характерным для плазмы до нанесения защитной пленки на стенки камеры.

Из рис. 1 видно, что заметное ухудшение защитных свойств бороуглеродной пленки при ресурсных испытаниях в режиме омического нагрева начинается после примерно 4 секунд суммарного времени воздействия плазмы на стенку. Затем концентрация углерода и радиационные потери начинают возрастать и достигают уровня, характерного для неборонизованной камеры, примерно через 7,5 с.

По данным рис. 2, при ресурсных испытаниях в режиме ЭЦР-нагрева ухудшение защитных свойств пленки начинается после примерно 2 с суммарного времени воздействия плазмы на стенку. Затем концентрация углерода и радиационные потери начинают возрастать и достигают уровня, характерного для неборонизованной камеры, примерно через 3—3,5 с.

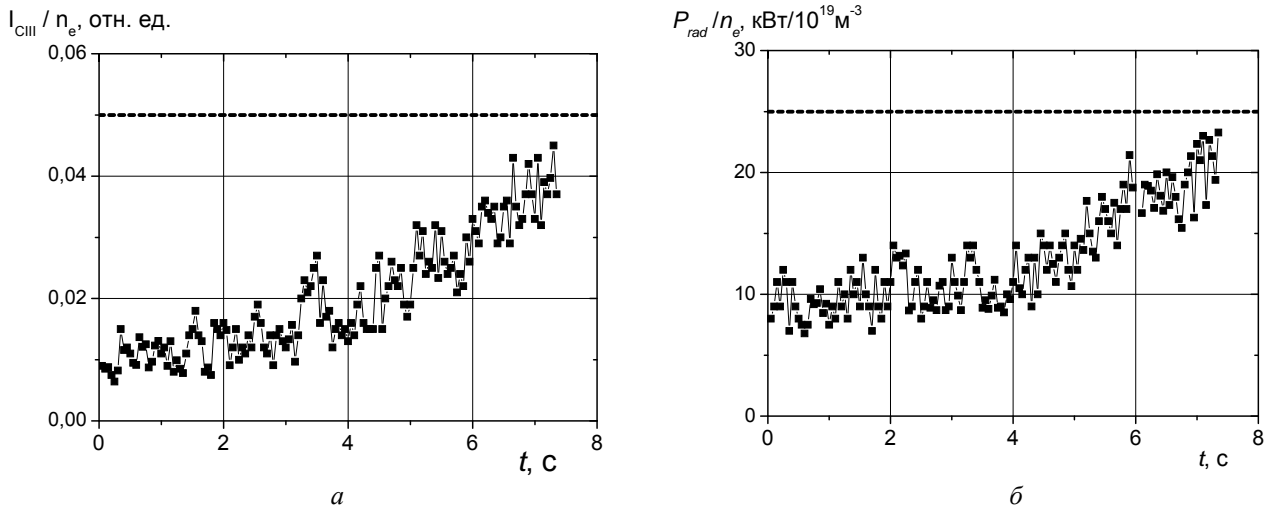


Рис. 1. Интенсивность свечения линии углерода CIII (а) и радиационные потери (б) в зависимости от суммарного времени воздействия плазмы на стенку при работе в режиме омического нагрева.

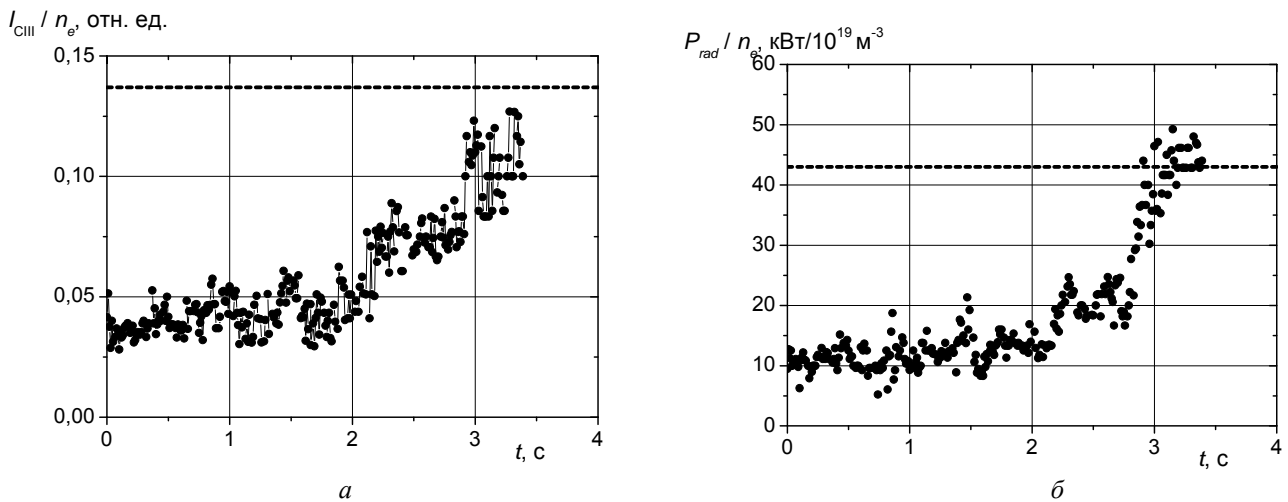


Рис. 2. Интенсивность свечения линии углерода CIII (а) и радиационные потери (б) в зависимости от суммарного времени воздействия плазмы на стенку при работе в режиме ЭЦР-нагрева.

Вероятными механизмами разрушения пленки являются ионное распыление покрытия и химический механизм, подробно рассмотренный в [6, 7]. Результаты измерений показали, что бороуглеродная пленка сохраняет свои защитные свойства при работе в режиме омического нагрева в полтора раза дольше, чем в режиме ЭЦР-нагрева плазмы. Это можно объяснить более сильным воздействием плазмы на стенку в режимах с ЭЦР-нагревом. Режимы с ЭЦР-нагревом плазмы, в которых проводились ресурсные испытания, характеризуются более высокими электронными и ионными температурами и плотностями плазмы по сравнению с режимами с омическим нагревом. В этих условиях поток ионов на стенку возрастает, что приводит к ускорению разрушения покрытия за счет обоих механизмов.

## 2. Влияние X-точки сепаратрисы магнитной конфигурации стелларатора Л-2М на процессы нанесения и разрушения бороуглеродного покрытия в рабочих импульсах с омическим нагревом плазмы

Взаимодействие плазмы со стенкой неоднородно по внутренней поверхности вакуумной камеры. Из-за особенностей магнитной конфигурации стелларатора Л-2М на внутренней поверхности камеры имеется особая зона, где происходит более интенсивное взаимодействие плазмы со стенкой. В любом поперечном сечении магнитных поверхностей стелларатора Л-2М имеются две особые точки, называемые X-точками [5]. Потoki заряженных частиц на стенку вблизи X-точек сепаратрисы в 5—10 раз более интенсивные, чем в остальных областях поверхности плазменного

шнура. При движении по обходу тора положение X-точек смещается, и за длительный период работы установки плазма оставляет характерный след на внутренней поверхности камеры (см. рис. 3). Каждая из X-точек оставляет на поверхности камеры свой след. В данной работе исследовалось влияние одной из X-точек на процессы нанесения и разрушения В/С-покрытий. Будем сокращенно называть зону более интенсивного взаимодействия плазмы со стенкой зоной X-точки сепаратрисы. Исследование взаимодействия плазмы с защитным бороуглеродным покрытием в зоне X-точек сепаратрисы представляет особый интерес.

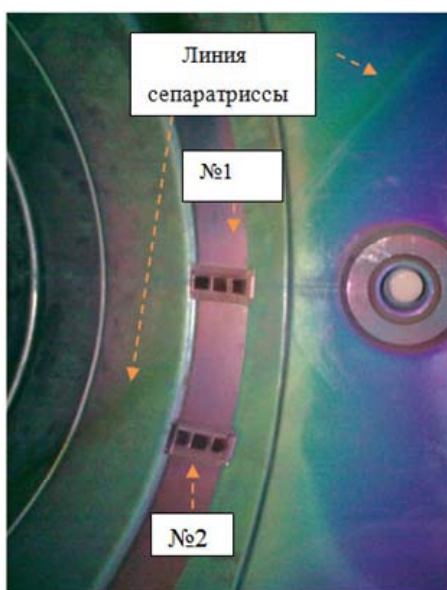


Рис. 3. Размещение кассет № 1 и № 2 в камере стелларатора.

Было выполнено две серии экспериментов. В одной из них исследовалось влияние особых точек сепаратрисы на процесс нанесения бороуглеродных плёнок при боронизации в рабочих разрядах омического нагрева (импульсная боронизация), а в другой изучалась стойкость плёнок, нанесенных с помощью боронизации в тлеющем разряде, к воздействию плазмы в зоне X-точки сепаратрисы и вдали от неё.

### 2.1. Влияние X-точек сепаратрисы на процесс нанесения пленки при импульсной боронизации

В первой серии экспериментов для исследования параметров бороуглеродных плёнок использовались кремниевые пластины-свидетели, которые закреплялись с помощью специальных кассет внутри камеры стелларатора как в зоне X-точки сепаратрисы, так и вдали от неё (рис. 3 и 4). На рис. 3 показано расположение двух кассет с кремниевыми пластинами (№ 1 и № 2) по отношению к следу, оставленному плазмой на внутренней

поверхности вакуумной камеры в зоне X-точки сепаратрисы. Рис. 4 показывает одну из кассет более крупно.

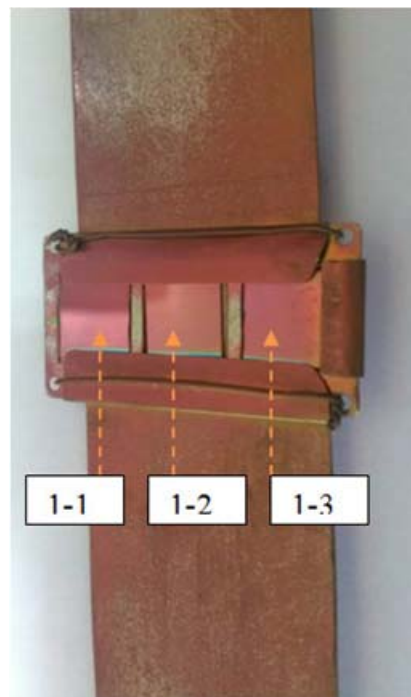


Рис. 4. Расположение элементов кассеты № 1.

Анализируемое покрытие образовалось в результате нескольких последовательных процессов. После выполнения стандартной процедуры боронизации камеры в тлеющем разряде была проведена также импульсная боронизация во время рабочих импульсов в омическом режиме. Таким образом, плёнки анализировались после проведения обоих видов боронизации. Ожидалось, что структура, толщина и состав покрытия, образовавшегося после проведения импульсной боронизации, будут отличаться для кассет, расположенных в зоне X-точки сепаратрисы и вдали от нее. Подчеркнем, что нанесенное покрытие в этой серии экспериментов не подвергалось воздействию плазмы. Сразу после нанесения образцы были извлечены из камеры и исследованы методом электронно-зондового микроанализа. Измерялась толщина образовавшихся покрытий и их элементный состав. Были исследованы два образца, один из которых (образец 1-2, средний образец из кассеты № 1) находился в зоне X-точки сепаратрисы, а второй (образец 2-2, средний из кассеты № 2) — вдали от нее. Каждый образец анализировался в точках, отстоящих от левого края на 2 мм ( $\tau_2$ ), на 5 мм ( $\tau_5$ ) и на 8 мм ( $\tau_8$ ) при общей ширине образца 10 мм. Усредненные по трем точкам для каждого образца данные представлены в табл. 1. Толщины плёнок рассчитаны в предположении, что плотность плёнки равна  $1,5 \text{ г/см}^3$  [8].

Таблица 1

**Химический состав и толщина В/С-плёнки полученной в результате боронизации в тлеющем разряде с последующей импульсной боронизацией в омическом режиме**

Местоположение образца	Бор, ат.%	Углерод, ат.%	Кислород, ат.%	Отношение В/С	Толщина, нм
в зоне X-точки сепаратрисы	73,4	21,1	5,5	3,5	870
вдали от зоны X-точки сепаратрисы	74,8	19,5	5,7	3,85	840

Видно, что в пределах ошибок измерения не удается обнаружить заметного различия в составе и толщине плёнок на образцах, извлеченных как из зоны сепаратрисы, так и вдали от неё. Поскольку анализируемая плёнка была получена в результате двух процедур боронизации, этот факт можно объяснить в предположении, что толщина (и состав) плёнки определяется, в основном, той её частью, которая была получена при боронизации в тлеющем разряде, а при этом способе нанесения пленка наносится равномерно по поверхности камеры и положение сепаратрисы в данном случае не играет роли. Отметим, что процентный состав исследованной пленки (табл. 1), соответствует образцам, полученным при нанесении пленки в тлеющем разряде на лабораторной установке ИФХЭ РАН (при одинаковых параметрах тлеющего разряда) [8].

**2.2. Исследование разрушения защитной бороуглеродной пленки при взаимодействии с плазмой**

Во второй серии экспериментов аналогичным образом было исследовано влияние увеличенного

потока частиц из зоны X-точки сепаратрисы на стойкость плёнок к воздействию плазмы во время работы стелларатора. Образцы — свидетели из нержавеющей стали в форме прямоугольников размером 1×2 см были установлены в камере стелларатора Л-2М как в зоне X-точки сепаратрисы, так и вдали от неё. После боронизации в тлеющем разряде была проведена кампания с серией рабочих импульсов (около 200) в режиме омического нагрева, после чего образцы были извлечены и проанализированы с помощью сканирующего электронного микроскопа с приставкой для элементного анализа.

Микроанализ образца, находившегося вне зоны X-точки сепаратрисы, был выполнен в разных точках поверхности и показал, что плёнка довольно однородна по составу. Образец, находившийся в зоне X-точки сепаратрисы, был проанализирован в трёх точках вдоль видимой невооружённым глазом линии сепаратрисы, проходившей по диагонали пластины. Усреднённые по разным точкам поверхности данные по содержанию бора, углерода, кислорода и толщинам плёнок обоих образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Химический состав В/С-плёнки, полученной в результате боронизации в тлеющем разряде, после 200 рабочих импульсов в водороде в режиме омического нагрева**

Местоположение образца	Бор, ат.%	Углерод, ат.%	Кислород, ат.%	Отношение В/С	Толщина, нм
вдали от зоны X-точки сепаратрисы	57,5	20,5	22	2,8	110
в зоне X-точки сепаратрисы	50	30	19	1,7	70

Видно, что после серии рабочих импульсов плёнка в зоне X-точки сепаратрисы по толщине и элементному составу отличается от пленки, находившейся вдали от этой зоны: толщина пленки стала меньше, и изменилось соотношение бора и углерода в составе пленки. Поскольку поток частиц на стенку камеры в зоне X-точки сепаратрисы значительно больше, чем на других участках, то здесь более интенсивно протекают все процессы, приводящие к разрушению бороуглеродной пленки и к изменению ее состава. Именно этим можно объяснить факт меньшей толщины плёнки в зоне X-точки сепаратрисы.

Изменение состава защитной пленки связано со способностью пленки захватывать атомы при-

месей, присутствующие в плазме во время рабочих разрядов. В работе [9] сообщалось об образовании оксида бора в бороуглеродных пленках, причём было отмечено, что это происходит только в условиях плазменного воздействия. В [10] при исследовании плёнок методом электронно-зондового микроанализа было показано, что во время плазмохимического осаждения бороуглеродных плёнок (и в лабораторных условиях, и при боронизации стенок вакуумной камеры токамаков) накапливающийся в них кислород (из остаточного вакуума) находится либо в химически связанном состоянии, образуя оксид бора, либо в порах, формирующихся в объёме плёнки как при её осаждении, так и во время облучения. Анализ эмиссион-

ной рентгеновской линии  $K_{\alpha}$  бора показал, что с увеличением содержания кислорода в плёнке происходит уширение линии и смещение её максимума в направлении линии оксида бора, что указывает на образование оксида бора  $B_2O_3$ . Оксид бора гигроскопичен, и при открывании камеры стелларатора в результате взаимодействия с молекулами воды образуется летучая метаборная кислота  $HBO_2$ , которая при дальнейшем взаимодействии с водой превращается также в летучую ортоборную кислоту  $H_3BO_3$ . В итоге содержание бора в плёнке уменьшается. В работе [7] приводятся результаты исследования остатков бороуглеродной плёнки, извлечённых из разрядной камеры стелларатора Л-2М после рабочей кампании. Рентгеноструктурный анализ показал наличие в плёнке фазы ортоборной кислоты, что подтверждает такой механизм разрушения плёнки. На наш взгляд, именно эти химические реакции ответственны за уменьшение содержания бора.

Указанный механизм предполагает, что содержание кислорода в плёнке также должно уменьшаться. Поэтому представленная в табл. 2 величина содержания кислорода — это оставшийся в результате протекания вышеописанных реакций кислород, находящийся, в основном, в порах.

Пористость бороуглеродных плёнок и её влияние на эрозионные и диффузионные процессы была исследована в [11]. Показано, что пористость растёт при увеличении дозы облучения и может достигать 40 % при больших дозах. Размер пор не превышает 50 нм. Кислород накапливается в порах, не вступая в химическое взаимодействие, и его содержание в них может изменяться в широком диапазоне в зависимости от условий осаждения (остаточный вакуум, натекание в камеру, температура подложки), достигая 20 ат.% [10], что совпадает с величинами, приведёнными в табл. 2.

В работе [10] был также выполнен анализ формы линии  $K_{\alpha}$  углерода. Показано, что плазменное облучение не влияет ни на положение максимума, ни на форму линии углерода. Этот факт указывает на то, что углерод, присутствующий в плазме в виде примеси, не участвует в химических процессах, происходящих в плёнке при плазменном воздействии, и не накапливается в ней.

Поступление углерода в плазму при работе установки определяется состоянием стенки камеры. За длительное время работы установки стенка вакуумной камеры оказывается загрязнённой углеродом. После боронизации наблюдается уменьшение интенсивности свечения линии углерода СП, (рис. 1, *a* и рис. 2, *a*). Это объясняется тем, что бороуглеродная плёнка, покрывая поверхность камеры, препятствует поступлению углерода в плазму. Но по мере деградации плёнки во время

работы стелларатора защитные свойства пленки ухудшаются, и распыляемые со стенок атомы углерода снова начинают поступать в плазму.

Из сравнения табл. 1 и 2 видно, что содержание углерода вдали от зоны X-точки сепаратрисы осталось практически неизменным по сравнению с его содержанием в исходной плёнке (20 ат.%), тогда как в зоне X-точки сепаратрисы оно больше (30 ат.%). Вероятно, это связано с тем, что деградация пленки происходит более интенсивно в зоне X-точки сепаратрисы, процессы превращения бора в летучие химические соединения также идут более интенсивно, содержание бора в пленке уменьшается, и относительная доля углерода становится больше.

При исследовании поверхности образцов, находившихся как в зоне X-точки сепаратрисы, так и вдали от нее, не было обнаружено никаких принципиальных отличий в морфологии поверхности.

### 3. Импульсная боронизация в рабочих импульсах установки с ЭЦР-нагревом плазмы

Мы уже упоминали о том, что, на основании ресурсных испытаний можно заключить, что наносимое при импульсной боронизации покрытие является более долговечным, чем покрытие, получаемое при боронизации в тлеющем разряде. По-видимому, более прочное покрытие формируется из-за того, что тепловые скорости ионов в омическом разряде выше по сравнению с тлеющим разрядом. В режимах с ЭЦР-нагревом плазмы в стеллараторе Л-2М такие параметры плазмы, как электронная и ионная температуры, а также плотность плазмы имеют еще большие значения. Соответственно, и тепловые скорости ионов еще выше, чем в омическом разряде. Поэтому можно ожидать, что если защитное бороуглеродное покрытие будет наноситься на стенки камеры в рабочих импульсах установки с ЭЦР-нагревом плазмы, то оно будет еще более стойким к воздействию плазмы.

Были проведены предварительные эксперименты по импульсной боронизации стенок камеры в рабочих разрядах с электронно-циклотронным нагревом. Эксперименты были выполнены в условиях, когда мощность нагрева составляла  $P_{\text{ECRH}} = 300$  кВт, а плотность плазмы была около  $n_e = 1,8 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Измерения показали, что при импульсной боронизации в рабочих импульсах с ЭЦР-нагревом плазмы происходит улучшение состояния стенок вакуумной камеры, и, по-видимому, на стенки камеры наносится защитное покрытие. Этот вывод можно сделать на основании рис. 5, где показана зависимость интенсивности свечения линии углерода СП, приведенная к плотности плазмы  $n_e = 1,0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  от номера рабочего импульса установки. Клапан импульсной бо-

ронизации был включен, начиная с импульса 16034. Рисунок демонстрирует уменьшение примесей углерода в плазме разряда по мере проведения импульсной боронизации за счет улучшения состояния стенки камеры.

Эксперименты показали возможность нанесения защитного покрытия на стенки камеры в рабочих импульсах установки с ЭЦР-нагревом плазмы. Это позволяет улучшать состояние стенки вакуумной камеры непосредственно во время работы установки, не прерывая работу для проведения боронизации. Исследование свойств этого покрытия — задача дальнейших исследований.

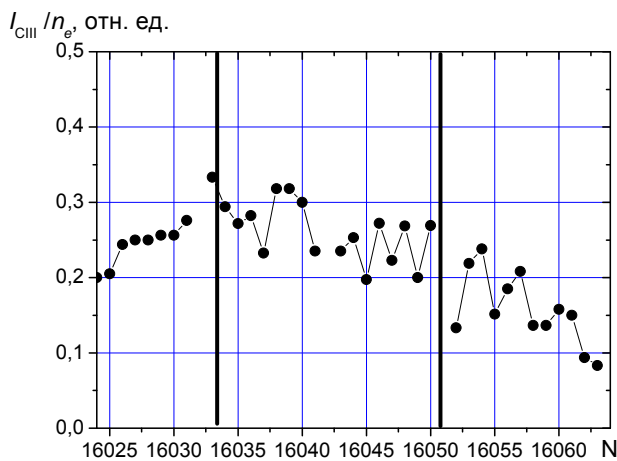


Рис. 5. Интенсивность свечения линии углерода CIII,  $\lambda = 4647 \text{ \AA}$ , приведенная к электронной плотности  $n_e = 1,0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , в зависимости от номера импульса. Вертикальными линиями отмечены разряды, в течение которых проводилась боронизация в рабочих импульсах в режиме ЭЦР-нагрева.

### Заключение

Были проведены ресурсные испытания бороуглеродных покрытий, наносимых при боронизации в тлеющем разряде, в двух режимах работы установки: в режиме омического нагрева и в режиме ЭЦР-нагрева плазмы. Испытания показали, что это покрытие сохраняет свои защитные свойства в полтора-два раза дольше при эксплуатации установки в режиме с омическим нагревом плазмы. По-видимому, это связано с менее интенсивным воздействием потоков частиц на стенку в этом режиме по сравнению с режимом ЭЦР-нагрева плазмы.

На установке Л-2М были проанализированы некоторые аспекты взаимодействия плазмы со стенкой, на которую было нанесено защитное бороуглеродное покрытие. Рассматривались изменения состава и структуры, а также вопросы долговечности нанесенного покрытия. Особое внимание было уделено роли сепаратрисы в нанесении и разрушении бороуглеродной пленки.

В пределах экспериментальных ошибок не было обнаружено отличий ни в составе, ни в

структуре поверхности плёнок, осажённых в зоне прохождения сепаратрисы и вдали от неё. Возможно, это связано с тем, что при нанесении пленки на исследованные образцы основную долю толщины образца составляет пленка, нанесенная при боронизации в тлеющем разряде, а при этом способе нанесения пленка наносится равномерно по поверхности камеры и положение сепаратрисы в данном случае не играет роли.

Иначе обстоит дело при разрушении покрытия в рабочих импульсах установки. В этом случае усиленные ионные потоки на стенку в области сепаратрисы оказывают влияние на процессы деградации покрытия. Было установлено, что при взаимодействии с плазмой происходит уменьшение толщины бороуглеродного покрытия, особенно заметное в области сепаратрисы. Это разрушение пленки происходит за счет химических реакций, инициированных захваченным из плазмы кислородом и приводящих к образованию летучих соединений, покидающих пленку. Кроме этого, происходит процесс накопления кислорода, не вступающего в химические реакции, в порах пленки, образующихся в результате воздействия плазмы на пленку. Это приводит к увеличению процентного содержания кислорода в защитной пленке. Измерения также показали, что после серии рабочих импульсов сильно уменьшается соотношение между концентрациями бора и углерода в пленке по сравнению с пленкой, не подвергавшейся воздействию плазмы.

Экспериментально показана возможность нанесения защитного покрытия на стенки камеры в рабочих импульсах установки с ЭЦР-нагревом плазмы. Это позволяет улучшать состояние стенки вакуумной камеры непосредственно во время работы установки, не прерывая работу для проведения боронизации.

Работа выполнена в рамках Программы Фундаментальных научных исследований (ФНИ) государственных академий наук на 2014–2016 гг., 01200953487.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Sharapov V. M., Mironov S. V., Grashin S. A., Lebedev S. V., Kovan I. A., Krasilnikov A. V., Krupin V. A., Levin L. S., Romanov A. N., Zakharov A. P. // J. Nucl. Mater., 1995. Vol. 220–222. P. 730.
2. Мецераков А. И., Акулина Д. К., Батанов Г. М., Бережецкий М. С., Воронов Г. С., Гладков Г. А., Гребенчиков С. Е., Гринчук В. А., Гришина И. А., Колик Л. В., Ларионова Н. Ф., Летунов А. А., Логвиненко В. П., Петров А. Е., Пиеничников А. А., Рябенко Г. А., Сарксян К. А., Скворцова Н. Н., Федянин О. И., Харчев Н. К., Хольнов Ю. В., Шаранов В. М. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 6. С. 496.

3. Мецерыков А. И., Вафин И. Ю. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 2. С. 145.
4. Buzhinskij O., Otruschenko V., Barsuk V. // J. Nucl. Mater., 2009. Vol. 390–391. P. 996.
5. Мецерыков А. И., Бережецкий М. С., Логвиненко В. П., Летунов А. А., Бужинский О. И., Волобой А. Г. // Вопросы атомной науки и техники. Серия Термоядерный синтез. 2011. Вып. 2. С. 65.
6. Sharapov V. M., Kanaev A. I., Rybakov S. Yu., Gavrilov L. E. // J. Nucl. Mater., 1995. Vol. 220–222. P. 930.

7. Мецерыков А. И., Шараров В. М., Логвиненко В. П., Летунов А. А. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2012. Вып. 2. С. 109.
8. Sharapov V. M., Kanaev A. I., Zakharov A. P. and Gorodetsky A. E. // J. Nucl. Mater., 1992. Vol. 191–194. P. 508.
9. Zehring R., Künzli H., Oelhafen P., Hollenstein C. // J. Nucl. Mater. 1990. Vol. 176–177. P. 370.
10. Шараров В. М., Рыбаков С. Ю., Гаврилов Л. Е., Канаев А. И. // ЖФХ. 1997. Т. 71. № 12. С. 2153.
11. Шараров В. М., Канаев А. И., Рыбаков С. Ю., Гаврилов Л. Е. // ЖФХ. 1996. Т. 70. № 1. С. 145.

## Mutual interaction between a plasma and protective boron-carbon coating of the vacuum chamber walls of the L-2M stellarator

A. I. Meshcheryakov<sup>1</sup>, V. V. Sharapov<sup>2</sup>, I. A. Grishina<sup>1</sup>, A. A. Letunov<sup>1</sup>,  
V. P. Logvinenko<sup>1</sup>, and R. Kh. Zalavutdinov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences  
38 Vavilova ul., 119991, Moscow, Russia  
E-mail: meshch@fpl.gpi.ru

<sup>2</sup> Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences  
14 Leninsky prospect, 119991, Moscow, Russia

Received March 24, 2016

*The properties of boron-carbon coatings deposited by various methods were studied. Lifetime tests of boron-carbon coating deposited by the glow discharge on the walls of the stellarator vacuum chamber showed that the boron-carbon coating retains its protective properties one and a half times longer when being tested in the ohmic heating mode than in the ECR heating mode. The processes of deposition and damage of a boron-carbon coating deposited in the working pulses in the ohmic heating mode were also studied. The changes in the composition and structure as well as durability of the deposited coating were considered. Particular attention was paid to the role of the separatrix in deposition and damage of the boron-carbon film. The first experiments on deposition of the boron-carbon film during the working plasma discharges of the L-2M stellarator were carried out in the ECR heating mode.*

PACS: 52.25.Vy, 52.50.Nr, 52.50.Sw, 52.55.Hc.

**Keywords:** stellarator, protective boron-carbon coating of the chamber walls, X-point of separatrix, plasma heating

### REFERENCES

1. V. M. Sharapov, S. V. Mirnov, S. A. Grashin, S. V. Lebedev, I. A. Kovan, A. V. Krasilnikov, V. A. Krupin, L. S. Levin, A. N. Romannikov, and A. P. Zakharov, J. Nucl. Mater. **220–222**, 730 (1995).
2. A. I. Meshcheryakov, D. K. Akulina, G. M. Batanov, M. S. Berezhetskii, G. S. Voronov, G. A. Gladkov, S. E. Grebenshchikov, V. A. Grinchuk, I. A. Grishina, L. V. Kolik, N. F. Lario-nova, A. A. Letunov, V. P. Logvinenko, A. E. Petrov, A. A. Pshenichnikov, G. A. Ryabenko, K. A. Sarksyian, N. N. Skvortsova, O. I. Fedyanin, N. K. Kharchev, Yu. V. Khol'nov, and V. M. Sharapov, Plasma Physics Reports **31**, 452 (2005).
3. A. I. Meshcheryakov and I. Yu. Vafin, Uspekhi Prikladnoi Fiziki **3**, 14 (2015).
4. O. Buzhinskij, V. Otruschenko, and V. Barsuk, J. Nucl. Mater., **390–391**, 996 (2009).
5. A. I. Meshcheryakov, M. S. Berezhetsky, V. P. Logvinenko, A. A. Letunov, O. I. Buzhinsky and A. G. Voloboi, Problems of Atomic Science and Engineering, Series Thermonuclear Fusion, Issue 2, 65 (2011).
6. V. M. Sharapov, A. I. Kanaev, S. Yu. Rybakov, and L. E. Gavrilov, J. Nucl. Mater. **220–222**, 930 (1995).
7. A. I. Meshcheryakov, V. M. Sharapov, V. P. Logvinenko, and A. A. Letunov, Problems of Atomic science and Engineering, Series Thermonuclear Fusion, Issue 2, 109 (2012).
8. V. M. Sharapov, A. I. Kanaev, A. P. Zakharov, and A. E. Gorodetsky, J. Nucl. Mater. **191–194**, 508 (1992).
9. R. Zehring, H. Künzli, P. Oelhafen, and C. Hollenstein, J. Nucl. Mater. **176–177**, 370 (1990).
10. V. M. Sharapov, A. I. Kanaev, S. Yu. Rybakov, and L. E. Gavrilov, Russian Journal of Physical Chemistry **71**, 1946 (1997).
11. V. M. Sharapov, A. I. Kanaev, S. Yu. Rybakov, and L. E. Gavrilov, Russian Journal of Physical Chemistry **70**, 136 (1996).