

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ  
С ПОВЕРХНОСТЯМИ**

УДК 533.9

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ ЗАЩИТНОЙ ГРАФИТОВОЙ  
ОБЛИЦОВКИ КАМЕРЫ ТОКАМАКА Т-15МД СТАЦИОНАРНЫМИ  
ПЛАЗМЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ В УСТАНОВКЕ ПЛМ  
И МОЩНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ**

© 2021 г. С. Д. Федорович<sup>а</sup>, А. В. Карпов<sup>а, б</sup>, В. П. Будаев<sup>а, б, \*</sup>, С. А. Грашин<sup>б</sup>, М. К. Губкин<sup>а</sup>,  
А. П. Слива<sup>а</sup>, Ю. В. Мартыненко<sup>б</sup>, А. Ю. Марченков<sup>а</sup>, М. В. Лукашевский<sup>а</sup>,  
З. А. Заклецкий<sup>а</sup>, Г. Б. Васильев<sup>а</sup>, К. А. Рогозин<sup>а, б</sup>, В. Чан Куанг<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

<sup>б</sup> Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

\*e-mail: budaev@mail.ru

Поступила в редакцию 07.06.2020 г.

После доработки 07.10.2020 г.

Принята к публикации 07.10.2020 г.

Проведены исследования образцов графитовой теплозащитной облицовки камеры токамака Т-15МД стационарными плазменными нагрузками в плазменной установке ПЛМ и мощными электронными пучками, моделирующими нагрузки при ЭЛМах и переходных процессах. При испытаниях плазменными нагрузками до 2 МВт/м<sup>2</sup> образцов графитовой облицовки Т-15МД температура их поверхности достигала значения более 1200°С, нагрев поверхности не приводил к растрескиванию, изменению рельефа и значительной эрозии графита. Плазменное воздействие приводило к росту слоя высокопористых углеродных структур на поверхности в зоне контакта с плазмой. Облучение графита электронными пучками нагрузкой менее 12 МВт/м<sup>2</sup> не приводило к изменениям поверхности, при нагрузке более 24 МВт/м<sup>2</sup> начинались процессы эрозии и растрескивания поверхности по межзёренным границам. При термоциклических нагрузках более 380 МВт/м<sup>2</sup> наблюдались эффекты значительной эрозии со скоростью удаления материала с поверхности графита до 175 мкм/с. Проведенные экспериментальные исследования и испытания рассматриваются как основание для использования исследованного типа графита в качестве облицовочных теплозащитных компонентов дивертора и первой стенки для эксплуатации в токамаке Т-15МД.

*Ключевые слова:* токамак, взаимодействие плазма-стенка, плазменные потоки, пучковые потоки, материалы термоядерного реактора, теплозащитная облицовка, графит

DOI: 10.31857/S0367292121030069

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Для проектирования термоядерного реактора с магнитным удержанием плазмы, включая термоядерный источник нейтронов (ТИН) и ДЕМО-реактор, требуются результаты исследования всех механизмов взаимодействия горячей плазмы с материальными элементами вакуумной камеры. Необходимо знать не только интегральные характеристики изменения материалов под воздействием горячей плазмы, но и выявить все возможные физические механизмы эрозии, разрушения и модификации первой стенки, потенциально опасные для работы термоядерного реактора. В обеспечение проектирования гибридного реактора ТИН, в токамаке Т-15МД планируются проводить исследования взаимодействия плазмы с материалами первой стенки и дивертора, в том чис-

ле с компонентами облицовки из графита в качестве теплозащитной облицовки камеры.

Процессы взаимодействия термоядерной плазмы с материальной стенкой в реакторе будут проходить в экстремальных условиях, характеризующихся не только высокими значениями температуры, потоков тепла и нейтронов. Следует ожидать сильную неравновесность в плазме токамака [1], в том числе в системе плазма–стенка, способную привести к доминирующему влиянию эффектов, которые еще не полностью проявили себя в действующих сегодня термоядерных лабораторных установках (см. [2–7]). Поэтому экспериментальные исследования в этом направлении, интерпретацию имеющихся результатов следует проводить не только в рамках широко используемых в настоящее время традиционных моделей и подходов (см. [4–7]), но и с учетом значительного

прогресса, достигнутого в последние 20 лет в физике конденсированных сред, физике твердого тела, физике неравновесных процессов.

В токамаках T-10, JT-60U, TEXTOR, JET, AUG, DIII-D, Tore Supra, стеллараторе LHD и других термоядерных установках (ТУ) [8–12] наблюдалась интенсивная эрозия поверхности контактирующих с плазмой внутрикамерных компонентов камеры из графита. При использовании вольфрамовых материалов также наблюдаются процессы интенсивной эрозии и образование трещин на поверхности внутрикамерных компонентов, см. обзор [13]. Тепловые нагрузки на лимитеры и пластины дивертора в крупномасштабном токамаке могут достигать  $\sim 2\text{--}5 \text{ МВт} \cdot \text{м}^{-2}$  и более, приводя к повышению температуры пластин (тайлов) облицовки камеры в среднем до  $\sim 1000^\circ\text{C}$  и более; в срывах и ЭЛМах импульсные кратковременные нагрузки на диверторные пластины будут достигать величины субгигаваттного масштаба – более  $0.2 \text{ ГВт} \cdot \text{м}^{-2}$  (см. [13] и ссылки там), что будет вызывать периодические повышения температуры материала до более высокой температуры. При использовании графита в качестве материала теплозащитной облицовки компонент вакуумной камеры в токамаке T-15MD [14] такие мощные нагрузки могут привести к перегреву поверхности, эрозии, растрескиванию и даже разрушению (см. [6, 7]) графитовой облицовки. Циклические мощные тепловые нагрузки при воздействии ЭЛМов могут приблизить температуру поверхности графитовых пластин к температуре сублимации. Поэтому необходимо оценить последствия возможных эффектов интенсивной эрозии поверхностных слоев графитовых материалов, используемых для облицовки компонентов камеры токамака T-15MD, с применением длительной плазменной нагрузки и мощной термоциклической тепловой нагрузки.

Определение всех характеристик стойкости графита при мощных стационарных плазменно-тепловых нагрузках важно также для принятия решений по выбору конструкции первой стенки в термоядерных установках следующего поколения, планируемых к сооружению в России (ТИН, ДЕМО).

В исследованиях стойкости графита при мощных плазменно-тепловых нагрузках необходимо рассматривать следующие вопросы взаимодействия плазма–стенка в крупном токамаке:

– длительность эксплуатации стенки (физическое/химическое распыление, эрозия, переосаждение, растрескивание материала);

– модификация структуры поверхности материала стенки, приводящее к изменению теплопроводности в условиях сильной эрозии, изменение микроструктуры и др.;

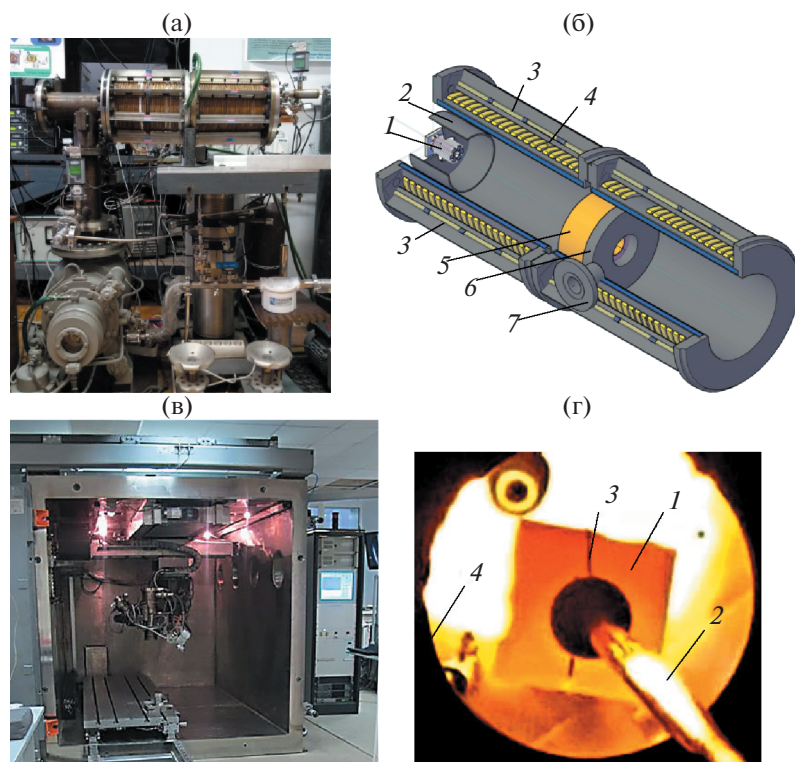
– формирование пыли при разрушении поверхности и влияние пылевых частиц на плазму.

Ввиду сложности вопросов эрозии обращенных к плазме внутрикамерных компонентов, для токамаков рассматриваются отдельно несколько механизмов, которые представляются важными, что позволяет продвинуться в понимании проблемы стойкости материалов при мощных плазменно-тепловых нагрузках.

Несмотря на то, что в различных установках (плазменных, корпускулярных, лазерных) глубина проникновения частиц в поверхность и процессы переноса тепла на поверхность отличаются, в целом, в литературе (см. обсуждение в [2, 3, 15] и др.) отмечается подобие поведения материала при мощных плазменно-тепловых нагрузках. В том числе отмечается схожесть пороговых характеристик разрушения, изменения структуры при мощной нагрузке.

Строгая классификация процессов разрушения графита при мощных плазменно-тепловых нагрузках в термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы (токамаках, стеллараторах и линейных установках) до настоящего времени окончательно не выработана. Это связано с относительно небольшим объемом данных, полученным в экспериментах на термоядерных установках при мощных нагрузках более  $\sim 1 \text{ МВт/м}^2$ . Общие подходы к такой классификации строятся на анализе процессов разрушения, известных в материаловедении, а также анализе данных, полученных при испытаниях в установках, обеспечивающих интенсивное корпускулярное и лазерное облучение импульсными нагрузками. Следует отметить, что процессы разрушения материалов в таких установках не вполне идентичны процессам, происходящим при взаимодействии плазма–стенка в термоядерных установках с магнитным удержанием и ожидаемым при стационарных нагрузках большой длительности – более 1000 с. Это связано с наличием сильного магнитного поля в токамаках, свойствами взаимодействия плазма–стенка в них, в том числе: (i) аномальным переносом энергии и частиц в плазме, из плазмы на поверхность, свойствами анизотропии переноса, вызванной магнитным полем; (ii) состоянием поверхности (свойства эмиссии, проводимость, теплопроводность) и связанными с этим свойствами приповерхностной плазмы; (iii) протеканием токов из плазмы на поверхность, по поверхностным слоям и расплавам (см. обсуждение этих вопросов в [13, 16, 17]).

Для решения проблемы выбора материалов первой стенки и дивертора будущего термоядерного реактора (ТИН, ДЕМО), а также для выбора режимов эксплуатации токамака T-15MD, экспериментальные испытания графитовых компонентов облицовки камеры T-15MD следует про-



**Рис. 1.** (а) – Плазменная установка ПЛМ; (б) – схема экспериментальной камеры ПЛМ: 1 – катод, 2 – экран катода, 3 – постоянные магниты, 4 – соленоид продольного магнитного поля, 5 – медный анод, 6 – стальное кольцо анода, 7 – диагностическое окно; (в) – электронно-лучевая установка АЭЛТК 12; (г) – фото графитовой пластины в условиях эксперимента П2: 1 – нагретая плазмой до температуры 1270°С графитовая пластина, 2 – стержень из нержавеющей стали, 3 – тонкая танталовая проволока подвески образца, 4 – край апертуры медного анода.

водить мощными нагрузками в различных режимах удержания плазмы в том числе в стабильной фазе и при переходных процессах – ЭЛМах, срывах, вертикальных смещениях. Для этого следует использовать плазменные и пучковые установки. Для моделирования стационарных плазменных нагрузок на графитовый материал в данной работе использована плазменная установка ПЛМ [18] с параметрами плазмы релевантными периферийной плазме токамака масштаба Т-15МД (см. [13]). Для тепловых испытаний графита, моделирующих нагрузки при ЭЛМах в Т-15МД, в данной работе использована электронно-лучевая установка, обеспечивающая мощные пучковые нагрузки более 300 МВт/м<sup>2</sup>. Результаты анализа структуры графита после таких экспериментальных исследований приведены в данной статье.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ГРАФИТОВОЙ ОБЛИЦОВКИ

### *Плазменная экспериментальная установка ПЛМ для исследования материалов*

Для проведения исследований и плазменных испытаний материалов теплозащитной облицов-

ки камеры токамака Т-15МД использовалась плазменная установка ПЛМ (рис. 1(а)), сооруженная в НИУ “МЭИ” в 2017 г. [18].

Плазменная установка ПЛМ (плазменный линейный мультикас) – линейная ловушка со стационарным удержанием плазмы магнитным полем с мультикасповой конфигурацией. Параметры установки ПЛМ:

продольное магнитное поле на оси – 0.01 Т, в каспах до 0.2 Т;

внутренний диаметр разрядной камеры – 0.16 м; диаметр горячей зоны плазменного пучка (диаметр диафрагмы анода) – 0.035 м;

длина разрядной камеры – 0.72 м. Камера снабжена водяным контуром охлаждения, что обеспечивает стационарный режим разряда.

Параметры стационарного плазменного разряда в установке ПЛМ:

длительность разряда – более 200 мин, ток плазменного разряда – до 30 А; плотность плазмы –  $(0.5–5) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ; электронная температура – 2–5 эВ с фракцией горячих электронов до 50 эВ; ионный поток плазмы – до  $3 \times 10^{21} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ;

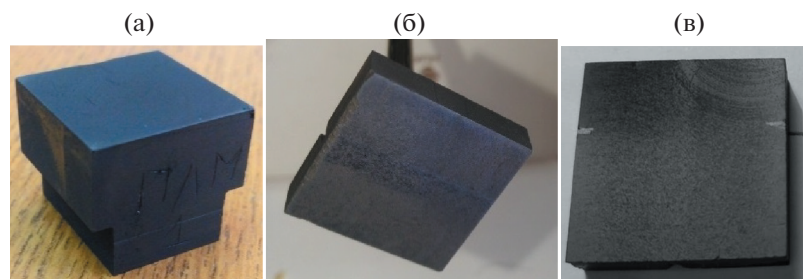


Рис. 2. Образцы после облучения в установке ПЛМ (а) П-1; (б) П-2; (в) П-3.

энергия ионов на образец до 70 эВ при подаче потенциала на образец до  $-100$  В;

тепловой поток на облучаемые в плазме образцы – более  $1$  МВт/м<sup>2</sup>;

рабочий газ – гелий, водород, дейтерий, аргон, ксенон.

Материалы внутрикамерных компонентов ПЛМ: камера изготовлена из нержавеющей стали, анод изготовлен из меди, катод изготовлен из тантала. Плазменные диагностики: зондовая, болометрическая, спектроскопическая; диагностика тепловых потоков, диагностика температуры поверхности материалов.

Конструкция экспериментальной камеры установки ПЛМ (рис. 1) обеспечивает два положения образца при плазменном испытании: за анодом и в зоне между катодом и анодом. В этих двух зонах параметры плазмы значительно отличаются: плазма между катодом и анодом имеет большую температуру и плотность. Образцы устанавливались на тонкий металлический шток, изготовленный из молибдена или нержавеющей стали, через торцевой фланец установки. Нагрев испытуемого образца осуществлялся током из плазмы на поверхность образца методом подачи от дополнительного источника питания на образец положительного напряжения  $+70$  В,  $+75$  В, то есть, электронным током насыщения на образец. В первом эксперименте образец помещался после анода; во втором и третьем экспериментах образец был расположен между катодом и анодом.

Для моделирования стационарных плазменных нагрузок на графитовые образцы теплозащитной облицовки токамака Т-15МД в плазменной установке ПЛМ использовался разряд в гелии с параметрами плазмы, релевантными периферийной плазме токамака Т-15МД (см. [13]).

Параметры плазмы в эксперименте на ПЛМ оценены из измерений спектра излучения гелиевой плазмы и токов насыщения на образец. Измерено значение плавающего потенциала в экспериментах с облучаемым графитовым образцом, которое составило  $\varphi_{fl} \approx -70$  В. В экспериментах с графитовым образцом (размером  $2$  см  $\times$   $2$  см  $\times$

$\times 0.5$  см с обращенной к плазме плоскостью  $2$  см  $\times$   $2$  см площадью  $4$  см<sup>2</sup>) при отрицательном потенциале на образце  $-100$  Вольт измерен ионный ток насыщения на поверхность, равный  $0.52$  А. Это значение тока использовано для оценки концентрации электронов плазмы, которая составила  $3 \times 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Для определения температуры электронов применялся метод с использованием относительной интенсивности атомарной и ионной линий гелия HeII 468.7 нм и HeI 471.3 нм, зарегистрированных в экспериментах на ПЛМ. Наблюдаемая интенсивность спектральной линии атомарного гелия в  $\approx 100$  раз больше интенсивности ионной, что при измеренной концентрации электронов соответствует температуре электронов  $T_e \approx 2.5$  эВ.

Температура испытуемого графитового образца регистрировалась пирометром “Кельвин компакт 1800” через торцевой фланец установки, оснащенный окном из кварцевого стекла. Параметры экспериментов в серии плазменных облучений в ПЛМ образцов графитовой облицовки камеры токамака Т-15МД представлены в табл. 1.

Измерение температуры образцов показало, что при их испытаниях достигалось равновесное состояние, которое поддерживалось в течение  $600$ – $2100$  с, см. табл. 1. Температура образца устанавливалась в результате баланса потока энергии частиц плазмы на его поверхность и теряемого потока энергии в виде радиационного охлаждения и теплопроводности через контакт с несущим штоком.

В первом эксперименте (П-1) Т-образный образец (рис. 2а) крепился непосредственно на молибденовый стержень (диаметром  $5$  мм, длиной  $500$  мм), находился в зоне за анодом. Во втором (П-2) и третьем (П-3) экспериментах образец (рис. 2б, 2в) в форме пластины с обращенной к плазме поверхностью  $20 \times 20$  мм и толщиной  $5$  мм экспонировался в зоне между катодом и анодом. Образец 1 крепился на стержень 2 из нержавеющей стали с помощью тонкой танталовой проволоки 3, продетой через сверление в графите (рис. 2г). Уменьшение площади боковой поверхности образцов и суммарной площади контакта

**Таблица 1.** Параметры плазменных испытаний графитовых образцов облицовки в установке ПЛМ

Параметры эксперимента	Графитовый образец		
	П-1 в зоне после анода	П-2 в зоне между катодом и анодом	П-3 в зоне между катодом и анодом
Потенциал катода, В	-200	-200	-250
Потенциал образца, В	+70	+75	+70
Ток плазменного разряда, А	8	6.8	7
Ток на образец, А	1.4	3.4	3.4
Ток в соленоиде магнита, А	80	120	120
Суммарная длительность облучения, сек	13600	7440	3600
Средняя температура образца, °С	585	1185	1181
Средний тепловой поток на образец, МВт/м <sup>2</sup>	1.2	1.49	1.46
Максимальная температура образца, °С	805	1288	1270
Время плазменного облучения образца с максимальной температурой, сек	2100	600	600
Максимальный локальный тепловой поток на образец, МВт/м <sup>2</sup>	1.89	1.92	1.83

образца со стержнем 2 в сочетании с низкой теплопроводностью нержавеющей стали позволило существенно уменьшить тепловые потери в сравнении с экспериментом П-1. Это позволило достичь средней температуры поверхности образца 1270°С. Учитывая пикированную зависимость плотности и температуры плазмы по сечению плазменного пучка с максимальными значениями в центральной зоне, оценка максимального локального потока плазменно-тепловой нагрузки в центре образца достигала 2 МВт/м<sup>2</sup>.

#### *Электронно-лучевая экспериментальная установка для исследования материалов*

Для проведения исследований и испытаний материалов теплозащитной графитовой облицовки камеры токамака Т-15МД импульсными мощными тепловыми нагрузками уровня ЭЛМов использовалась электронно-лучевая установка АЭЛТК 12 (рис. 1в) НИУ “МЭИ” [19], обеспечивающая мощные пучковые тепловые нагрузки до ~380 МВт/м<sup>2</sup>.

Основные характеристики установки и электронного луча:

- ускоряющее напряжение 60 кВ;
- ток электронного пучка от 1 до 1000 мА;
- максимальная мощность электронной пушки 60 кВт;
- объем вакуумной камеры 12 м<sup>3</sup>;
- остаточное давление в вакуумной камере 10<sup>-3</sup> мм. рт. ст.;
- скорость сканирования пучка по поверхности образца от 5 до 150 м/ч.

На установке АЭЛТК12 были проведены четыре эксперимента (Эл1–Эл4) с графитовыми образцами. Параметры экспериментов представлены в табл. 2. При облучении электронным пучком образцы устанавливались на массивной металлической пластине.

В экспериментах Эл1, Эл3 и Эл4 использовался метод непрерывного сканирования пучка по поверхности в зоне площадью 1 см<sup>2</sup>, количество строк в одном кадре развертки 100, частота последовательных кадров 100 Гц. В результате сканирования поверхность равномерно нагревалась, при отключении нагрузки за 0.1 с поверхность остывала на 100°С.

В эксперименте Эл2 электронный луч на поверхности перемещался между 100 зонами, в каждой зоне время действия пучка было 100 мкс, частота развертки 100 Гц, суммарная длительность облучения была 20 с.

В экспериментах температура поверхности образцов в области обработки пучком электронов измерялась размещенным внутри вакуумной ка-



**Рис. 3.** Графитовые образцы после облучения пучками электронов в установке АЭЛТК 12.

**Таблица 2.** Режимы работы установки АЭЛТК12 при испытании графитовых образцов облицовки токамака Т-15МД

Параметр	Номер эксперимента (образца)			
	Эл1	Эл2	Эл3	Эл4
Ускоряющее напряжение, кВ	60	60	60	60
Ток пучка, мА	20	20	20	40
Частота сканирования, Гц	100	100	100	100
Длительность облучения, сек	10	20	40	10
Сканирование	непрерывное	по 100 точкам	непрерывное	непрерывное
Диаметр пучка, мм	0.5	0.2	0.5	0.5
Площадь пучка, мм <sup>2</sup>	0.196	0.031	0.196	0.196
Площадь поверхности облучения, мм <sup>2</sup>	100	3.1 (100 точек)	100	100
Поток энергии на поверхность образца, МВт/м <sup>2</sup>	12	387	12	24
Максимальная температура поверхности образца, °С	1608	2079	2146	2616

меры оптическим пирометром Raytek Marathon MR1SCCF, диапазон измерений 600–3000°С, до максимальной величины температура повышалась за время облучения 10 с.

### 3. АНАЛИЗ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМОЙ В ПЛМ

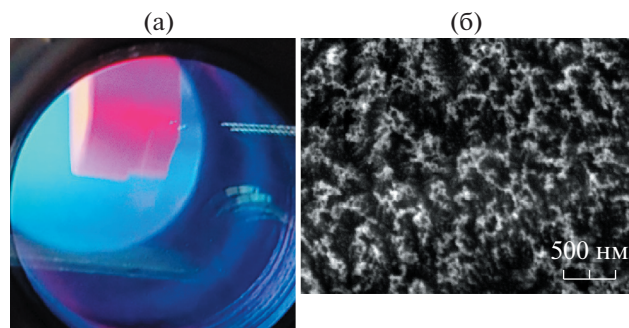
Структура поверхности образцов после испытаний в плазме ПЛМ (рис. 4а) была исследована с использованием растрового сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).

После испытаний образца П-1 плазменно-тепловым потоком в среднем по поверхности 1.2 МВт/м<sup>2</sup> не обнаружено макроскопического изменения рельефа, растрескивания поверхности и значительного распыления графита после испытаний в течение времени до 13600 с. Температура образца достигла 805°С при максимальной тепловой нагрузке 1.89 МВт/м<sup>2</sup>. Длительные плазменные нагрузки приводили к эрозии и пересадению материала и, в результате, к росту на поверхности слоя пористых углеродных структур с иерархической гранулярностью, рис. 4б. Такая форма наблюдалась ранее в экспериментах на токамаках [3].

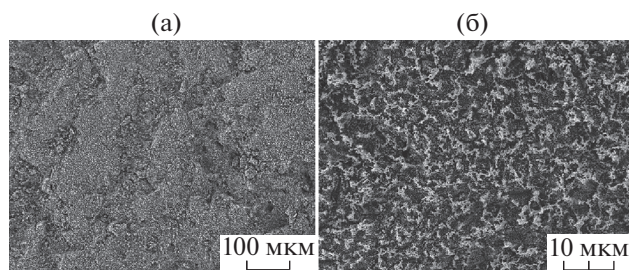
Образцы П-2 и П-3 с различной длительностью облучались в зоне между катодом и анодом с повышенной плазменной нагрузкой в среднем 1.46–1.49 МВт/м<sup>2</sup>, в максимуме до 2 МВт/м<sup>2</sup>, температура образцов достигала 1288°С, табл. 1. Микроскопическое исследование поверхности образца П-2 выявили слои пористых высокоразвитых структур (рис. 5, 6) толщиной 1–10 микрометров. Такие пористые слои наблюдались ранее

в экспериментах на токамаках с графитовыми лимитерами, см. [3].

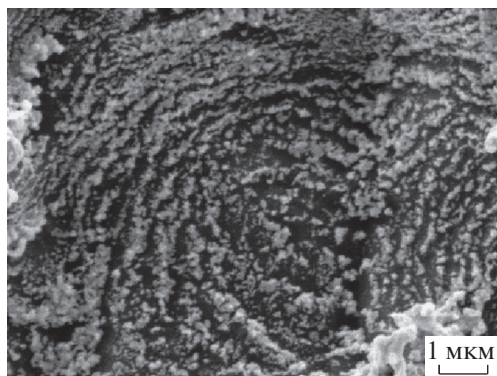
При исследовании элементного состава поверхности образцов обнаружен эффект неоднородной кластеризации примеси на поверхности под действием плазменных потоков. На поверхности образцов П-2 и П-3 при микроскопическом анализе выявлены кластеры тантала, поступившего на поверхность образцов в процессе распыления катода. Количество такого тантала было незначительным – всего 0.83 ат. % при содержании кислорода 1.48 ат. % и углерода 97.69 ат. % от общего числа атомов на всей анализируемой поверхности при анализе с использованием СЭМ. Вместе с тем обнаружены особенности кластеризации тантала на поверхности: кластеры размером менее 100 нм из атомов тантала зарегистрированы (методом BSE при анализе в СЭМ) на



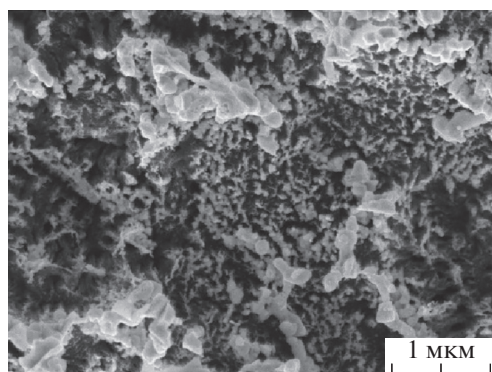
**Рис. 4.** (а) Испытание графитового образца облицовки Т-15МД в плазме ПЛМ; (б) СЭМ микрофотография поверхности образца П-1 после облучения плазменным потоком 1.2 МВт/м<sup>2</sup>.



**Рис. 5.** СЭМ микрофотографии поверхности образца П-2 после плазменных испытаний нагрузкой до  $2 \text{ МВт/м}^2$  в установке ПЛМ.



**Рис. 6.** СЭМ микрофотография поверхности образца П-3 в центральной зоне в области действия плотной плазмы в установке ПЛМ.



**Рис. 7.** СЭМ микрофотография структур тантала на поверхности образца П-2.

вершинах субмикронных структур рис. 7. Это наблюдение свидетельствует в пользу модели формирования высокопористых структур (в том числе, типа пух – “fuzz”) механизмом [20] повышенной мобильности атомов на поверхности и движении их на вершины имеющихся неоднородных структур.

Такой механизм кластеризации тяжелых примесей (в результате эрозии элементов внутрикамерных металлических компонентов – нержавеющей стали и вольфрама) на вершинах высокопористых структур следует ожидать при эксплуатации графитовых пластин облицовки в токамаке Т-15МД.

В целом, при плазменных нагрузках до  $2 \text{ МВт/м}^2$  эрозия поверхности образцов была незначительная. Длительные плазменные нагрузки привели к росту на поверхности слоя высокопористых кораллообразных углеродных структур с размерами структурных элементов менее 50–100 нанометров. Скорость роста таких структур была 1–2 мкм/час при непрерывном облучении и сильно зависела от температуры поверхности (уменьшалась на порядок при  $800^\circ\text{C}$  в сравнении с  $1288^\circ\text{C}$ ). Наблюдаемые неоднородные структуры на обращенной к плазме поверхности графита после длительного облучения в ПЛМ имеют схожие черты с поверхностью других материалов – вольфрама, молибдена после облучения в подобных условиях (см. [2, 13, 15, 18]). В экспериментах на ПЛМ с плазменным облучением вольфрамовых материалов формировались подобные высокопористые структуры. На основе анализа экспериментов на других плазменных установках, процессы, которые формируют неоднородный рельеф при плазменных нагрузках на материалах, обращенных к плазме (вольфрама, стали [21, 22]), классифицируются в рамках рассмотрения ряда моделей. Этот ряд моделей включает: процесс эволюции и агломерации материала [23], универсальные механизмы роста интерфейсных слоев с фрактальной структурой [24], стохастическая кластеризация [2] под действием турбулентной плазмы [25], сложные механизмы капельной эрозии металлов под действием мощной плазменной нагрузки при переходных процессах в токамаке [26, 27] и другие (см. [2, 3]). Все такие механизмы могут действовать избирательно или совместно, что может приводить к коллективным эффектам, вызывая рост неоднородной поверхности обращенных к плазме материалов. Черты универсальной морфологии поверхности, наблюдавшиеся при испытании графита в ПЛМ, рис. 4–7, следует рассматривать для разработки обобщенной модели взаимодействия плазма-стенка при длительном облучении плазмой.

#### 4. АНАЛИЗ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ УСТАНОВКЕ

Методом СЭМ проведены исследования графитовых образцов после испытаний в электронно-лучевой установке пучком ускоренных  $60 \text{ кэВ}$  электронов потоками  $12 \text{ МВт/м}^2$ ,  $24 \text{ МВт/м}^2$ ,  $387 \text{ МВт/м}^2$ , что моделирует действие на графитовую облицовку камеры переходных процессов,

ожидаемых в токамаке Т-15МД, в том числе ЭЛ-Мов. Максимальные значения температуры поверхности образцов достигали величины от 1600°С до 2600°С.

Облучение образцов электронными пучками с потоками энергии меньше 12 МВт/м<sup>2</sup> не приводит к изменениям поверхности графитовых образцов.

Образец Эл1 был облучен потоком 12 МВт/м<sup>2</sup>, время воздействия 10 с. Область обработки электронным пучком располагалась в центре образца. Поверхность верхней грани образца прогревалась равномерно, максимальная средняя по площади облучения температура составила 2146°С. На рис. 8 представлены микрофотографии поверхности образца, полученные в растровом электронном микроскопе на разных масштабах. Заметных различий в рельефе и морфологии на поверхности образца в области облучения и вне ее обнаружено не было, сохранился макроскопический рельеф поверхности от механической обработки.

Вес образца (изначально был  $11.45 \pm 0.01$  г) не изменился после проведения испытаний, что свидетельствует об отсутствии макроскопического распыления материала. Не наблюдалось растрескивания поверхности.

Разогрев поверхности образца Эл4 до температур выше 2500°С приводил к растрескиванию поверхности по межзёрненным границам. В экспериментах с нагрузкой 24 МВт/м<sup>2</sup> температура поверхности графитового образца достигала 2600°С, при которой зарегистрирована эрозия поверхности. Согласно [28, 29] у графита основной процесс эрозии — это эмиссия нано- и микрочастиц при хрупком разрушении, которое происходит в результате термонапряжений и разрыва связей между зёрнами. При этом мелкие частицы, размером менее ~50 нм, испаряются в приповерхностной плазме или электронным пучком. Поток энергии 24 МВт/м<sup>2</sup> при облучении электронными потоками является пороговым, выше которого зарегистрированы разрушения поверхности графитовых пластин облицовки Т-15МД.

При испытании образца Эл2 создавались нагрузки, ожидаемые в ЭЛМах в Т-15МД: локальные зоны облучались потоками 387 МВт/м<sup>2</sup>, максимальная средняя по площади обработки температура составила 2079°С, локальная температура в точках облучения потоком электронов была значительно выше. В зонах воздействия электронного пучка образовались кратеры, диаметр которых соответствует диаметру пучка 0.2 мм, рис. 8. Глубина кратеров — 35 мкм. В данном режиме скорость изменения глубины кратеров при испарении графита с поверхности была 175 мкм/с.

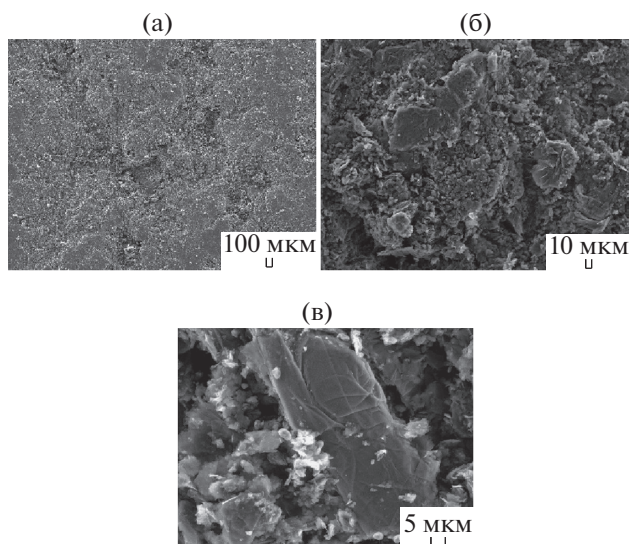


Рис. 8. СЭМ микрофотографии поверхности образца Эл1 в зоне обработки пучком электронов 12 МВт/м<sup>2</sup> (а, б) и вне ее (в) на детекторе вторичных электронов (SE-детекторе).

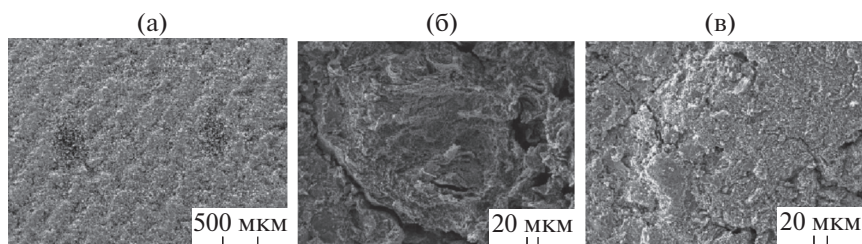
Исследования поверхности внутри кратеров (рис. 10) выявили характер распыления материала. Поскольку энергия связи атомов в базисных слоях кристаллической решетки графита значительно выше энергии связи между слоями, то распыление носит селективный характер. На поверхности кристаллических зерен наблюдаются слоистые структуры толщиной 10 нм. Следует в дальнейшем в экспериментах исследовать механизм селективности испарения и перегрева поверхности, который можно привлечь для объяснения преимущественного испарения аморфной фазы (рис. 10). На дне кратеров осталась только кристаллическая фаза.

Создание высоких градиентов температуры привело к растрескиванию материала по границам зерен рис. 9 в областях обработки пучком и на расстоянии до 100 мкм от края кратера. Ширина трещин достигала 10 мкм в пятне обработки, и до 5 мкм за его пределами, длина трещин — до 150 мкм.

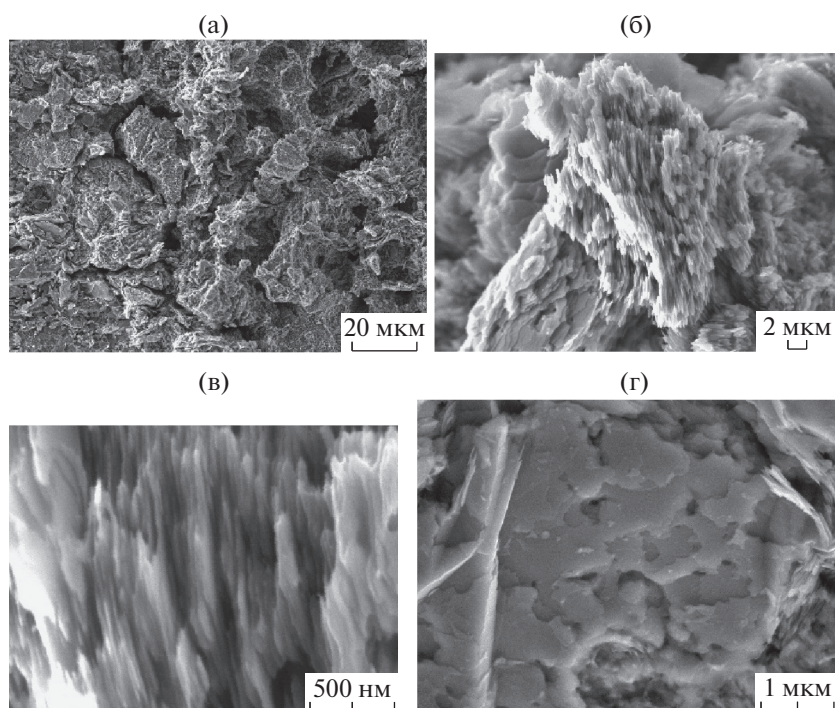
Испаренный из зоны обработки материал поступил на соседние зоны поверхности на расстоянии 200–600 мкм от центра кратера. Сформированные переосажденные слои имеют пористую структуру, отличную от исходной структуры графита. Такие структуры наблюдались ранее при испытаниях мощными плазменными потоками в КСПУ [12].

Вес образца после испытаний не изменился ( $10.18 \pm 0.01$  грамм), что объясняется переосаждением распыленного материала вблизи от зоны действия пучка.





**Рис. 9.** Испытание графитового образца Эл2 в электронно-лучевой установке пучком ускоренных 60 кэВ электронов тепловой нагрузкой  $387 \text{ МВт/м}^2$ : СЭМ микрофотографии поверхности. а – две зоны действия пучка, б – в зоне действия пучка, в – за его пределами.



**Рис. 10.** СЭМ микрофотографии: (а) дно кратера, (б) поверхность зерна, (в) изображение слоев графита в плоскости перпендикулярной слоям, (г) изображение слоев графита в плоскости параллельной слоям.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены испытания образцов графитовой теплозащитной облицовки камеры токамака Т-15МД стационарными плазменными и мощными тепловыми нагрузками. Испытания таких образцов выполнены в плазменной установке ПЛМ в течение более 200 минут плазменными нагрузками, моделирующими условия в периферийной и диверторной плазме крупного токамака типа Т-15МД. При испытаниях образцов плазменными нагрузками  $2 \text{ МВт/м}^2$  температура поверхности образцов достигала  $1288^\circ\text{C}$ . Нагрев поверхности не приводил к растрескиванию, изменению рельефа и значительной эрозии графита. Проведен анализ морфологии и структуры по-

верхности с помощью методов растровой электронной микроскопии образцов после тепловых нагрузок. Эрозия поверхности незначительная. Плазменное воздействие приводит к росту слоя высокопористых углеродных структур на поверхности в зоне контакта с плазмой. Скорость роста структур не превышает  $1\text{--}2 \text{ мкм/час}$  при максимальной температуре нагрева образцов и уменьшается в 10 раз при  $800^\circ\text{C}$ .

Проведены исследования графитовых образцов в электронно-лучевой установке пучком ускоренных 60 кэВ электронов потоками  $12 \text{ МВт/м}^2$ ,  $24 \text{ МВт/м}^2$ ,  $387 \text{ МВт/м}^2$ , что моделирует действие на графитовую облицовку переходных процессов, ожидаемых в токамаке Т-15МД, в

том числе ЭЛМов. Определена температура нагрева графитовых элементов при различных тепловых нагрузках в проведенных экспериментах. Максимальные средние по зоне обработки значения температуры поверхности образцов составили от 1600°C до 2600°C.

Проведен анализ растрескивания графитовых образцов облицовки токамака Т-15МД, определен характер модификации поверхности и эрозийных свойств графита. Облучение образцов электронными пучками с потоками энергии меньше 12 МВт/м<sup>2</sup> не приводит к изменениям поверхности. Разогрев поверхности образца до температуры выше 2500°C приводил к растрескиванию поверхности по межзёренным границам. Нагрузка 24 МВт/м<sup>2</sup> была пороговым уровнем, выше которого начинались процессы значительной эрозии и разрушения поверхности графитовых пластин облицовки.

Определены скорость распыления и характеристики термической сублимации графита. В экспериментах с электронно-лучевой нагрузкой 24 МВт/м<sup>2</sup> температура поверхности графитового образца достигала 2600°C, зарегистрирована эрозия поверхности. При нагрузке 387 МВт/м<sup>2</sup> скорость удаления материала с поверхности образца — 175 мкм/с.

На основании проведенных экспериментальных работ можно сделать вывод о возможности использования исследованного типа графита для изготовления облицовочных теплозащитных компонентов дивертора и первой стенки и эксплуатации их в токамаке Т-15МД.

Работа выполнена по договору № 09-03/223/74 между НИЦ “Курчатовский институт” и НИУ “МЭИ” в рамках договора с ГК “Росатом” № 1/17519-Д/230/4-19, эксперименты на ПЛМ поддержаны грантом РФ 17-19-01469, испытание электронными пучками поддержано грантом РФ-ФИ 19-29-02020, изготовление АСНИ на ПЛМ поддержано Мегагрантом РФ № 14.Z50.31.0042, анализ материалов поддержан Министерством науки и высшего образования РФ проект № FSWF-2020-0023.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kadomtsev V.B.* Tokamak plasma: a complex physical system. Bristol: IOP Publishing, 1992.
- Budaev V.P.* // Phys. Lett. A.: General, Atomic and Solid State Physics. 2017. V. 381. P. 3706. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2017.09.038>
- Budaev V.P., Grashin S.A., Karpov A.V., Kraevskii S.V., Khimchenko L.N.* // JETP Lett. 2012. V. 95. P. 74. <https://doi.org/10.1134/S0021364012020038>
- Linke J., Du J., Loewenhoff T., Pintsuk G., Spilker B., Steudel I., Wirtz M.* // Matter Radiat. Extrem. 2019. V. 4. P. 056201. <https://doi.org/10.1063/1.5090100>
- Ueda Y., Schmid K., Balden M., Coenen J.W., Loewenhoff Th., Ito A., Hasegawa A., Hardie C., Porton M., Gilbert M.* // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. P. 092006. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6b60>
- Federici G., Skinner C.H., Brooks J.N., Coad J.P., Grisolia C., Haasz A.A., Hassanein A., Philipps V., Pitcher C.S., Roth J., Wampler W.R., Whyte D.G.* // Nucl. Fusion. 2001. V. 41. P. 1967. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/41/12/218>
- Linke J.* // Proc. 5th International Workshop and Summer School on Plasma Physics, Kudowa Zdroj, 2005. Phys. Scr. V. T123. P. 45. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2006/T123/006>
- Mariyama K., Jacob W., Roth J.* // J. Nucl. Mater. 1999. V. 264. P. 56. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(98\)00481-4](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(98)00481-4)
- Winter J., Gebauer G.J.* // J. Nucl. Mater. 1999. V. 266–269. P. 228. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(98\)00526-1](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(98)00526-1)
- Rubel M., Ceconello M., Malmberg J.A., Sergienko G., Biel W., Drake J.R., Hedqvist A., Huber A., Philipps V.* // Nucl. Fusion. 2001. V. 41. P. 1087. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/41/8/312>
- Philipps V., Wienhold P., Kirschner A., Rubel M.* // Vacuum. 2002. V. 67. P. 399. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(02\)00238-5](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(02)00238-5)
- Zhitlukhin A., Klimov N., Landman I., Linke J., Loarte A., Merola M., Podkovyrov V., Federici G., Bazylev B., Pestchanyi S., Safronov V., Hirai T., Maynashv V., Levashov V., Muzichenko A.* // J. Nucl. Mater. 2007. V. 363–365. P. 301. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2007.01.027>
- Будаев В.П.* // ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. (4) С. 5. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2015-38-4-5-33>
- Хвостенко П.П., Анашкин И.О., Бондарчук Э.Н., Инютин Н.В., Крылов В.А., Левин И.В., Минеев А.Б., Соколов М.М.* // ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез. 2019. Т. 42. (1) С. 15. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2019-42-1-15-38>
- Будаев В.П.* // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105. С. 284.
- Игитханов Ю.Л., Крашенинников С.И., Кукушкин А.С., Юшманов П.Н.* Итоги науки и техники: Физика плазмы / Под ред. В.Д. Шафранова. М.: ВИНТИ, 1990. Т. 11. С. 6.
- Stangeby P.C.* The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2000.
- Будаев В.П., Федорович С.Д., Лукашевский М.В., Мартыненко Ю.В., Губкин М.К., Карпов А.В., Лазукин А.В., Шестаков В.А.* // ВАНТ сер. термоядерный синтез. 2017, Т. 40. (3) С. 23. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2017-40-3-23-36>
- Dragunov V.K., Sliva A.P., Terentyev E.V., Goncharov A.L., Marchenkov A.Yu., Portnov M.A.* // Elektro-technica & elektronika E+E. 2018. V. 53 (5–6). P. 112.
- Мартыненко Ю.В., Нагель М.Ю.* // Физика плазмы. 2012. Т. 38. С. 1082.

21. Будаев В.П., Мартыненко Ю.В., Химченко Л.Н., Житлухин А.М., Климов Н.С., Питтс Р.А., Линке И., Базылев Б., Белова Н.Е., Карпов А.В., Коваленко Д.В., Подковыров В.Л., Ярошевская А.Д. // Физика плазмы, 2013. Т. 39. С. 1017.  
<https://doi.org/10.7868/S0367292113110036>
22. Klimov N.S., Linke J., Pitts R.A., Zhitlukhin A.M., Kovalenko D.V., Podkovyrov V.L., Barsuk V.A., Thomser C., Pintsuk G., Bazylev B.N., Giniyatulin R.N., Budaev V.P., Khimchenko L.N. // J. Nucl. Mater. 2013. V. 438. (S) P. 241.  
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.01.036>
23. Крауз В.И., Мартыненко Ю.В., Свечников Н.Ю., Смирнов В.П., Станкевич В.Г., Химченко Л.Н. // УФН 2010. Т. 180. С. 1055.
24. Barabasi A.L., Stanley H.E. Fractal concepts in surface growth. Cambridge: University Press, 1995.  
<https://doi.org/10.1017/SBO9780511599798>
25. Будаев В.П., Савин С.П., Зеленый Л.М. // УФН. 2011. Т. 181. С. 905.  
<https://doi.org/10.3367/UFNг.0181.201109a.0905>
26. Budaev V.P., Martynenko Y.V., Karpov A.V., Belova N.E., Zhitlukhin A.M., Klimov N.S., Podkovyrov V.L., Barsuk V.A., Putrik A.B., Yaroshevskaya A.D., Safro-nov V.M., Giniyatulin R.N., Khimchenko L.N. // J. Nucl. Mater. 2015. V. 463. P. 237.  
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.11.129>
27. Мартыненко Ю.В. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. С. 260.  
<https://doi.org/10.7868/S0367292117030088>
28. Мартыненко Ю.В., Московкин П.Г. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 1991. № 4. С. 17.
29. Мартыненко Ю.В., Московкин П.Г. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 1999. № 2. С. 31.