

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 2, Number 312 (2017), 57 – 61

T.M. Aldabergenova^{1,2}, G.Z. Ganeyev¹, S.B. Kislitsin¹, M.K. Dosbolaev²¹Institute of Nuclear Physics, Ministry of Energy of the RK, Almaty, Kazakhstan,
²Kazakh national university named after Al-Farabi, Almaty**EFFECT OF PULSED PLASMA IRRADIATION
ON THERMAL EROSION AND STRUCTURE
OF GRAPHITE SURFACE**

Abstract. The results of theoretical and experimental studies of graphite thermal erosion effects under pulsed plasma irradiation have been presented. Irradiation of graphite samples was performed on the pulsed plasma accelerator in the Al-Farabi KazNU. The samples were irradiated with 13 pulses $\sim 2 \mu\text{s}$ long with the surface energy release 10 J/cm^2 per pulse and the pulses $\sim 250 \mu\text{s}$ long with the surface energy release 8 J/cm^2 per pulse. Before and after irradiation, the weight of the samples was measured and the surface structure studies were performed using the methods of raster electronic and atomic force microscopy. The theoretical calculations were carried out according to the model based on determination of temperature distribution as a result of pulsed energy release and sublimation of the carbon atom from the surface.

As a result of the completed experimental studies we established that mass losses under pulsed plasma irradiation, with the energy parameters corresponding to the energy release in the ITER during plasma disruption, lead to thermal erosion of the graphite surface. In case of pulse period about several microseconds and the energy release of $\sim 10 \text{ J/cm}^2$, the mass loss is $\sim 0.1\text{-}0.2 \mu\text{g}$ per pulse. In case of pulse period greater two orders of magnitude, i.e. $250\text{-}300 \mu\text{s}$, but with a lower energy release $\sim 8 \text{ J/cm}^2$, the mass loss is $\sim 0.03 \mu\text{g}$. A comparison of the experimental results with the calculations for the presented model showed the satisfactory agreement between the theoretical and experimental data.

Key words: graphite, pulsed plasma irradiation, thermal erosion.

УДК 621.039.66(075), 533.924(075)

Т.М. Алдабергенова^{1,2}, Г.З. Ганеев¹, С.Б. Кислицин¹, М.К. Досболаев²¹Институт ядерной физики МЭ Республики Казахстан, Алматы, Казахстан;
²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы**ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ОБЛУЧЕНИЯ
НА ТЕРМИЧЕСКУЮ ЭРОЗИЮ И СТРУКТУРУ
ПОВЕРХНОСТИ ГРАФИТА**

Аннотация. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований эффектов тепловой эрозии графита при импульсном плазменном облучении. Облучение образцов графита выполнялось на импульсном плазменном ускорителе КазНУ им. аль-Фараби. Образцы облучались 13 импульсами длительностью $\sim 2 \text{ мкс}$ с энерговыведением на поверхности 10 Дж/см^2 за импульс и импульсами длительностью $\sim 250 \text{ мкс}$ с энерговыведением на поверхности 8 Дж/см^2 за импульс. До и после облучения измерялась вес образцов и выполнялись исследования структуры поверхности методами растровой электронной и атомно-силовой микроскопии. Теоретические расчеты проводились по модели, основанной на определении распределения температуры за счет импульсного выделения энергии и сублимации атом углерода с поверхности.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что потери массы при импульсном плазменном облучении, с энергетическими параметрами, соответствующими энерговыведению

в ТЯР при срывах плазмы, приводят к тепловой эрозии поверхности графита. При длительности импульса порядка нескольких микросекунд и энерговыделении ~ 10 Дж/см², потери массы составляют $\sim 0.1-0.2$ мкг за импульс. При длительности импульса на два порядка больше, т.е. 250-300 мкс, но с меньшим энерговыделением ~ 8 Дж/см², потери массы составляют ~ 0.03 мкг. Сравнение полученных экспериментально результатов с расчетами по представленной модели показали, что наблюдается удовлетворительное согласие теоретических и экспериментальных данных.

Ключевые слова: графит, импульсное плазменное облучение, тепловая эрозия.

Введение

Среди материалов, перспективных для применения в качестве материалов защиты первой стенки термоядерных реакторов (ТЯР), приоритет отдается к материалам с низким атомным номером, высоким порогом физического распыления, высокой теплопроводностью, низкой химической активности к водороду, высокой термостойкостью и температурой плавления [1]. В соответствии с современной точкой зрения, материалы защиты первой стенки и пластин дивертора для токамаков должны быть основаны на углероде, бериллии и вольфраме [2]. Графит обладает перечисленными выше свойствами – высокой температурой плавления, термостойкостью высокой теплопроводностью и может рассматриваться как перспективный материал облицовки первой стенки ТЯР.

В этой связи, нами проведены экспериментальные исследования процессов тепловой эрозии графита марки АРВ при облучении импульсными потоками плазмы, моделирующими срыв плазмы в ТЯР, а также представлена модель и результаты расчетов потери массы при импульсном выделении энергии на поверхности графита, соответствующие выполненным экспериментам. Теоретическая модель расчетов величины тепловой эрозии основана на решении уравнения теплопроводности и определении распределения температур по глубине материала с учетом фазового превращения.

Экспериментальные исследования эффектов тепловой эрозии графита при облучении потоками импульсной плазмы

Для исследований был выбран графит марки АРВ, представляющий собой новое поколение графитов, широко использующийся в настоящее время в реакторостроении. Основные характеристики физико-механических свойств этой марки графита приведены в таблице 1. Подготовлено четыре образца поликристаллического графита, вырезанные из массивной полоски. Образцы имели форму параллелепипеда размерами 10 мм × 10 мм × 0.5 мм. После резки образцы подвергались шлифовке и механической полировке. До облучения импульсными потоками плазмы образцы взвешивали на аналитических весах ОНАУС, точность взвешивания составила ± 0.1 мг. Также были проведены исследования структуры и свойств этих образцов и определен элементный состав методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА). По данным РФА, углерод составляет 99.9 ат.%, содержание примесных элементов незначительно, так, содержание хрома не превышает 0.002 ат.%, меди - 0.02 ат.%, цинка – 0.005 ат.%. До облучения импульсными потоками плазмы проведено определение кристаллической структуры АРВ графита методом рентгеноструктурного анализа и установлено что он имеет гексагональную структуру. Отметим, что кристаллическая структура графита при облучении импульсными потоками плазмы изменятся не существенно.

Таблица 1 - Физико-механические свойства графита марки АРВ.

Физический параметр	Обозначение, единица измерения	Значение
Температура плавления,	$T_{пл}$, К	4000
Масса атома,	m_A , а.е.м	512
Плотность,	ρ , кг·м ⁻³	1.69×10^3
Теплопроводность	k , Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	55
Энтальпия испарения	$\Delta H_{исп}$, Дж·кг ⁻¹	6.0×10^7
Степень черноты	ϵ , отн. ед.	0.86
Прочность на сжатие	σ_b , МПа	24.5-29.4 МПа
Модуль Юнга	E , МПа	7.8 ГПа

Для выявления эффектов плазменного облучения структура поверхности приготовленных образцов до облучения и после облучения исследовалась методами сканирующей электронной микроскопии на электронном микроскопе Quanta 3d 200i и атомно-силовой микроскопии на микроскопе Solver spectrum NT-MDT.

Наряду с исследованиями структуры поверхности до и после облучения импульсной плазмой измерялся вес образцов на аналитических весах, см. таблицу 2.

Облучение подготовленных образцов графита после исследования структуры поверхности и взвешивания выполнялось на импульсном плазменном ускорителе КазНУ им. аль-Фараби. Условия облучения образцов № 1-4 приведены в таблице 2. Образцы № 1 и № 2 облучены тринадцатью импульсами длительностью ~ 2 мкс каждый с интервалом между импульсами более 10 мин. Образцы № 3 и № 4 облучены 5 импульсами длительностью ~ 250 с, интервалы между импульсами также были не менее 10 мин. Существенным различием облучения образцов № 1-2 от облучения образцов № 3-4, помимо длительности импульса, является энерговыделение на поверхности за один импульс, см. таблицу 2.

Таблица 2 - Результаты взвешивания необлученных и облученных образцов графита и условия облучения импульсными потоками плазмы

№	Вес до облучения, г	U, кВ	Длительность импульса, мкс	P, мм рт.ст.	Q, Дж/см ²	Кол-во импульсов	Вес после облучения, г	Потери массы, г
1	0,772	5	2-3	2,7	10	13	0,768	0,004
2	0,811	5	2-3	2,7	10	13	0,810	0,001
3	0,865	12	250-300	2,7	8	4	0,865	0
4	0,844	12	250-300	2,9	8,3	4	0,844	0

Эффекты термической эрозии под действием импульсного плазменного облучения видны из результатов измерения веса образцов графита, приведенных в таблице 2. Как следует из данных таблицы для образцов облученных 13 импульсами длительностью $\sim 2,5$ мкс с энерговыделением на поверхности 10 Дж/см² потери веса составили 4 мг и 1 мг для образцов №1 и №2, соответственно. Различие в измеренных значениях потери веса, по-видимому, связаны с различиями исходной (после подготовки) структуры поверхности. Усредненное значение потери массы при облучении тринадцатью 2 мкс импульсами с энерговыделением 10 Дж/см² за импульс оставляет $\sim 2,5$ мкг.

Облучение пятью 250 мкс импульсами с энерговыделением на поверхности 8 Дж/см², как видно из таблицы 1, не привело к потере веса графита.

Исследования структуры поверхности графита до и после облучения импульсной плазмой образцов №1-4, см. рисунки 1 а-г, подтверждают результаты взвешивания.

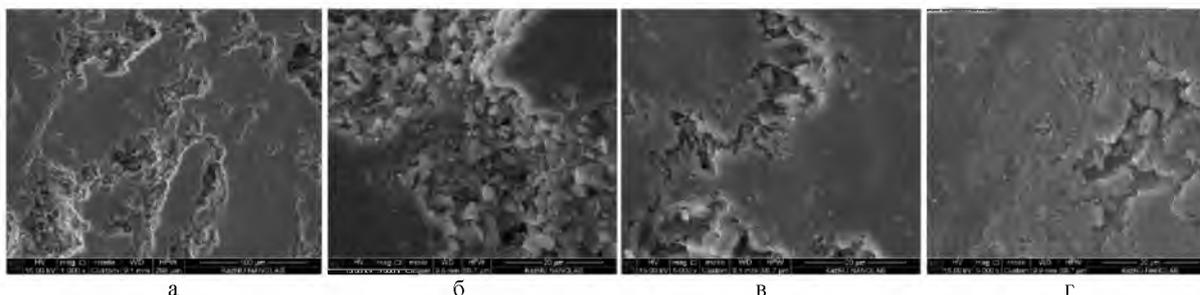


Рисунок 1 - РЭМ снимки поверхности графита: а – образец №1 до облучения, б – образец №1 после облучения 13 импульсами плазмы длительностью 2 мкс, в – образец №3 до облучения, г – после облучения 4 импульсами плазмы длительностью 250 мкс. Увеличение $\times 5000$

Как видно из сравнения изображений поверхности на рисунках 1а и 1б, облучение тринадцатью импульсами плазмы длительностью 2 мкс привело к существенному изменению структуры поверхности. На рисунке 1 б явно наблюдаются следы воздействия облучения, в то время как структура поверхности после облучения четырьмя импульсами длительностью 250 мкс мало

изменилась, см. рисунки 1 в и 1 г. По-видимому, энерговыделения 8 Дж/см^2 недостаточно для существенной сублимации атомов углерода с поверхности. Исследование методом АСМ поверхности графита, подвергнутого воздействию тринадцати импульсных потоков плазмы с энерговыделением 10 Дж/см^2 за импульс длительностью 2 мкс показали, что наблюдается сглаживание поверхности в результате сублимации атомов углерода с облучаемой поверхности, см. рисунки 2 а, б. Структура поверхности образца графита до и после облучения четырьмя импульсами плазмы длительностью 250 мкс и энерговыделением 8 Дж/см^2 практически не изменилась.

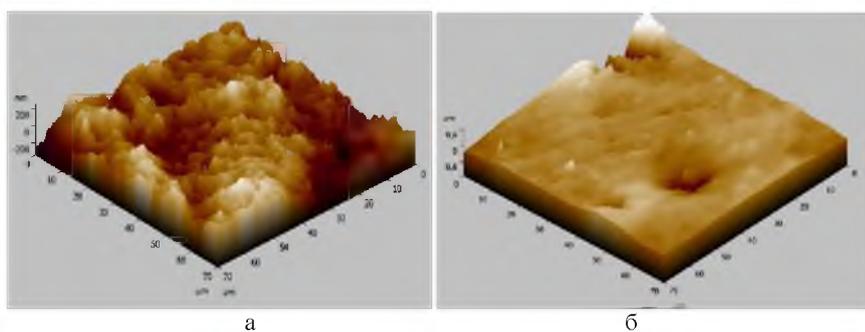


Рисунок 2 - АСМ изображения поверхности графита облучения: а – образец №1 до облучения, б – образец №1 после облучения 13 импульсами плазмы длительностью 2 мкс

Подводя итог экспериментальным исследованиям потерь массы и структуры поверхности, можно заключить, что облучение графита импульсными потоками плазмы может приводить к потерям массы и изменению структуры поверхности при определенном соотношении энерговыделения за импульс и количества импульсов. Так, при энерговыделении 10 кДж/см^2 за импульс, длительностью 2-3 мкс при 13 импульсах наблюдаются эффекты потери массы и сглаживания поверхности. При энерговыделении 8 Дж/см^2 за импульс длительностью $\sim 250 \text{ с}$ потери массы за 4 импульса не превышают 0.0001 мг (точность взвешивания), т.е. заметного испарения графита с облучаемой поверхности не происходит. СЭМ и АСМ исследования структуры поверхности подтверждают результаты взвешивания - заметные изменения структуры поверхности практически отсутствуют.

Теоретическая модель и расчет потери массы графита при облучении импульсными потоками плазмы

При облучении импульсными потоками плазмы потеря массы с облучаемой поверхности происходит за счет сублимации атомов графита [3]. Расчет потерь массы проводится в два этапа. На первом этапе решается уравнения теплопроводности с учетом фазового превращения (твердое тело - газ) и теплового излучения с облучаемой поверхности:

$$\rho \cdot C_p \cdot \partial T / \partial t = k \Delta T + (J + J_{ev} + \varepsilon \cdot \sigma_{SB} \cdot (T - T_{am})^4)_{обл}, \quad (1)$$

где ρ – плотность графита, C_p – удельная теплоёмкость, k – теплопроводность, J – поток энергии вносимый облучением, J_{ev} – поток энергии, уносимый с поверхности за счет сублимации, σ_{SB} – постоянная Стефана Больцмана, T – температура графита, T_{am} – температура окружающей среды. Отметим, что плавление графита в модели не учитывалось, т.к. в литературе отмечается, что плавление графита при воздействии потоков тепла зависит от условий нагрева и наблюдается достаточно редко.

По результатам численных расчетов методом конечных элементов для заданной геометрии облучаемого графита, соответствующей размерам образца в эксперименте по облучению импульсной плазмой (площадь облучаемой поверхности $10 \text{ мм} \times 10 \text{ мм}$, толщина 5 мм), определялось распределение температур по глубине материала в зависимости от времени.

Параметры, используемые в расчетах уравнения (1) для графита приведены в таблице 1.

Теплоёмкость графита C_p в твёрдой фазе задавалась выражениями [4:

$$C_p(T) = 4.18 \cdot (0.44391 + 0.30795 \cdot 10^{-4} \cdot T - 61257/T^2 + 0.10795 \cdot 10^8/T^3), \text{ при } T \leq 3200\text{K} \quad (2)$$

$$C_p(T) = C_p(3200), \text{ при } T > 3200\text{K}.$$

Т.е. согласно (2), выше температуры 3200 К, теплоёмкость графита полагается постоянной.

На втором этапе рассчитывались потери массы в соответствии с полученным из решения уравнения (1) распределением температуры.

Равновесное значение давления сублимированного газа графита P_{eq} задавалось в соответствии с работой [5]:

$$P_{\text{eq}} = 6.77 \cdot 10^{12} \cdot 10^{(-36781/T)}. \quad (3)$$

Поток энергии J_{ev} , уносимой сублимированными с поверхности атомами, определялся выражением:

$$J_{\text{ev}} = 1/4 \cdot n \cdot v \cdot m_a \cdot \Delta H_{\text{исп}}, \quad (4)$$

где n – число атомов газа в единице объёма, m_a – масса атома, v – средняя скорость молекулы газа. В приближении идеального газа соотношение (4) примет вид:

$$J_{\text{ev}} = P_{\text{eq}} \times [m_a / (2kT\pi)]^{1/2} \Delta H_{\text{исп}}. \quad (5)$$

Соответственно, поток уносимой массы J_m :

$$J_m = J_{\text{ev}} / \Delta H_{\text{исп}}. \quad (6)$$

Результаты расчетов распределения температуры на поверхности образца в зависимости от времени приведены на рисунке 3.

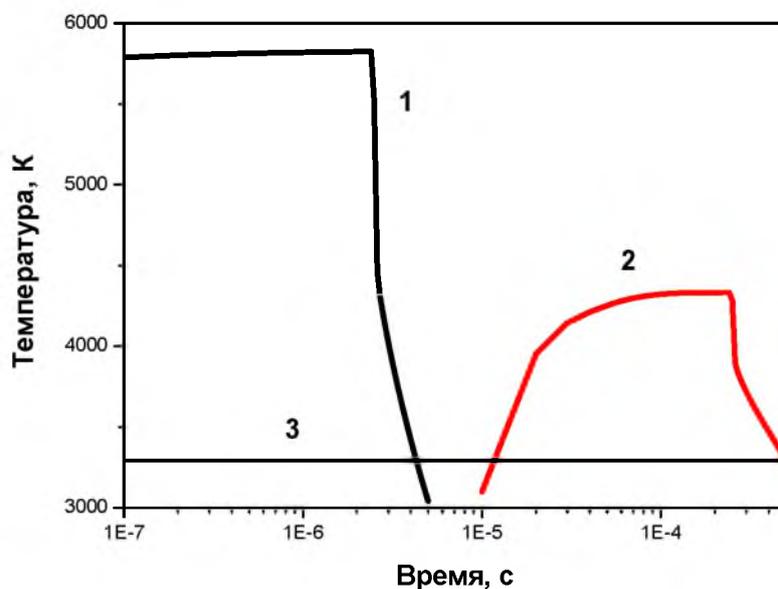


Рисунок 3 - Зависимость температуры на облучаемой поверхности графита от времени при импульсном облучении потоком плазмы; 1 – длительность импульса 2.5 мкс, энерговыделение 10 Дж/см²; 2 – длительность импульса 250 мкс, энерговыделение 8 Дж/см²; 3 - температура сублимации

Из рисунка 3 видно, что температура поверхности графита при импульсе длительностью 2.5 мкс и энерговыделением 10 Дж/см² за импульс (кривая 1) почти на 2 порядка выше температуры поверхности при воздействии импульса длительностью 250 мкс с энерговыделением 8 Дж/см² (кривая 2).

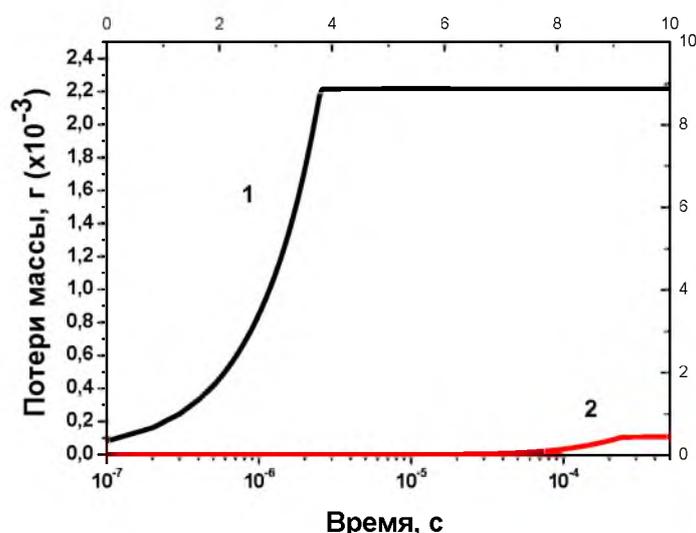


Рисунок 4 - Зависимость потери массы графита от времени облучения импульсными потоками плазмы,
 1 – 13 импульсов длительностью 2.5 мкс с энерговыведением 10 Дж/см²;
 2 – 4 импульса длительностью 250 мкс с энерговыведением 8 Дж/см²

Несмотря на то, что длительность импульса во втором случае также на два порядка выше, сублимация атомов графита и, соответственно, потери массы в первом случае более чем на порядок выше, см. рисунок 4. На рисунке 4 приведены зависимости потери массы образцом графита за 13 импульсов длительностью 2.5 мкс и потоке энергии 10 Дж/см² (кривая 1) и за 4 импульса длительностью 250 мкс и потоке энергии 8 Дж/см² (кривая 2). Поскольку экспериментально определялась суммарная потеря массы графитом за 4 и 13 импульсов (см. таблицу 2), то на рисунках 4 приведен результат расчета, соответствующий эксперименту. Расчетные значения суммарной потери массы за тринадцать 2.5 с с выделением энергии 1 Дж/см² составило 2.16 мкг, для импульсов длительностью 250 мкс и потоке энергии 8 Дж/см² – 0.11 мкг, что соответствует точности измерений веса с помощью аналитических весов ОНАУС. Как видно из сравнения результатов расчетов потери массы с экспериментально измеренными значениями (таблица 2), наблюдается удовлетворительное согласие экспериментальных данных с теоретическими оценками.

Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что потери массы при импульсном плазменном облучении, с энергетическими параметрами, соответствующими энерговыведению в ТЯР при срывах плазмы, приводят к тепловой эрозии поверхности графита. При длительности импульса порядка нескольких микросекунд и энерговыведении ~ 10 Дж/см², потери массы составляют ~ 0.1-0.2 мкг за импульс. При длительности импульса на два порядка больше, т.е. 250-300 мкс, но с меньшим энерговыведением ~ 8 Дж/см², потери массы составляют ~ 0.03 мкг. Сравнение полученных экспериментально результатов с расчетами по представленной модели показали, что наблюдается удовлетворительное согласие теоретических и экспериментальных данных.

Как показал анализ расчетных данных, потери массы зависят от соотношения параметров облучения (энерговыведения и длительности импульса) и физических свойств облучаемого материала – теплопроводности, энергии сублимации, равновесного давления газа. Для материалов с высокой теплопроводностью интенсивный отвод тепла с облучаемой поверхности препятствует локальному плавлению поверхности и испарению, что снижает потери массы.

На основе полученных в работе результатов можно заключить, что представленную модель можно использовать для оценочных расчетов эрозии поверхности графита при импульсном выделении энергии на его поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Мазуль И.В. Идеология выбора материалов защиты первой стенки и дивертора ТЯР. Конструкционные материалы для КТМ. Тезисы Международного семинара «Экспериментальные возможности токамака КТМ и программа исследований». Астана, 10-12 октября 2005. С. 33-35.

[2] Айрапетов А.А., Беграмбеков Л. Б., Вергазов С.В., Кузьмин А.А., Смирнов В.М., Шигин П. А.. Захват и удержание дейтерия в углеродных материалах, облучаемых в плазме // Известия РАН. Серия физическая. - 2010. - Т. 74, N 2. - С.248-253.

[3] Hassane A.M., Kulcinski G.L. and Wolfer W.G. Vaporization and melting of materials in fusion devices // J.Nucl. Mater. - 1981. - V. 103&104. - P.321-326.

[4] Физические величины / Справочник под ред. И.С. Григорьевой, Е.З. Мелихова. -М.: Энергоиздат, 1991. - 1232 с.

[5] Properties and characteristics of graphite. For industrial applications. Special materials. POCO GRAPHITE INC. January 2015. <http://poco.com/Portals/0/Literature/Semiconductor/IND-109441-0115.pdf>

REFERENCES

[1] Mazul I.V. The ideology of selecting the materials for protection of ITER first wall and divertor. Structural materials for KTM. Abstracts of the International Seminar "Experimental Opportunities of Tokamak KTM and Research Program". Astana, 10-12 October, 2005. P. 33-35.

[2] Airapetov A.A., Begrambekov L.B., Vergazov S.V., Kuzmin A.A., Smirnov V.M., Shigin P.A. Capture and retention of deuterium in carbon materials irradiated in plasma // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Physical series. - 2010. - V. 74, N 2. - P.248-253.

[3] Hassane A.M., Kulcinski G.L. and Wolfer W.G. Vaporization and melting of materials in fusion devices // J.Nucl. Mater. - 1981. - V. 103&104. - P.321-326.

[4] Physical quantities/Handbook under revision of Grigorieva I.S., Melikhova E.Z. - M: Energoizdat, 1991. - 1232 p.

[5] Properties and characteristics of graphite. For industrial applications. Special materials. POCO GRAPHITE INC. January 2015. <http://poco.com/Portals/0/Literature/Semiconductor/IND-109441-0115.pdf>

ӘОЖ: 621.039.66(075), 533.924(075)

Т.М. Алдабергенова^{1,2}, Г.З. Ганеев¹, С.Б. Кислицин¹, М.К. Досболаев²

¹Ядролық физика институты, Алматы қ., Қазақстан;

²Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ., Қазақстан.

**ГРАФИТ БЕТІНІҢ ТЕРМИЯЛЫҚ ЭРОЗИЯСЫ МЕН ҚҰРЫЛЫМЫНА
ИМПУЛЬСТІК ПЛАЗМАЛЫҚ СӘУЛЕЛЕНДІРУДІҢ ЫҚПАЛЫ**

Аннотация. Импульстік плазмалық сәулелендіру кезінде графиттің жылудық эрозиясы эффектілерінің теориялық және эксперименттік зерттеу нәтижелері ұсынылған. Графит үлгілерін сәулелендіру әл-Фараби атындағы ҚазҰУ импульстік плазмалық үдеткішінде өткізілді. Үлгілер импульсіне 10 Дж/см² бетте энергияның бөлінуімен ұзақтығы ~ 2 мкс болатын 13 импульспен және импульсіне 8 Дж/см² бетте энергияның бөлінуімен ұзақтығы ~ 250 мкс болатын импульстермен сәулелендірілді. Сәулелендіруге дейін және кейін үлгілердің салмағы өлшенді және растрлы электрондық және атом-күштік микроскопия әдістері арқылы бет құрылымына зерттеулер орындалды. Теориялық есептеулер импульстік энергияның бөлінуі және беттен көміртегі атомының сублимациясы есебінен температураның үлестірілуін анықтауға негізделген модель бойынша жүргізілді.

Өткізілген эксперименттік зерттеулер нәтижесінде плазманың үзілуі кезінде ТЯР энергия бөлулерге сәйкес энергетикалық параметрлермен импульстік плазмалық сәулелендіруде массаның шығыны графит бетінің жылудық эрозиясына әкелетіні анықталды. Импульстің ұзақтығы бірнеше микросекунд және энергияның бөлінуі ~ 10 Дж/см² болғанда, масса шығыны импульсіне ~ 0.1-0.2 мкг құрайды. Екі есе көп импульс ұзақтығында, яғни 250-300 мкс, бірақ энергияның бөлінуі аз ~ 8 Дж/см² болғанда, масса шығыны ~ 0.03 мкг құрайды. Алынған эксперименттік нәтижелерді ұсынылған модель бойынша есептеумен салыстыру теориялық және эксперименттік деректердің қанағаттанарлық келісімі байқалатынын көрсетті.

Түйін сөздер: графит, импульстік плазмалық сәулелендіру, жылудық эрозиясы.

Сведения об авторах:

Алдабергенова Тамара Мустафаевна, ведущий инженер сотрудник, ИЯФ МЭ РК, 050032, Казахстан, Алматы, ул. Ибрагимова,1. tamaraalga@mail.ru;

Кислицин Сергей Борисович, к.ф.-м.н., нач. Отдела радиационной физики твердого тела, ИЯФ МЭ РК, 050032, Казахстан, Алматы, ул. Ибрагимова,1. skislitsin@inp.kz;

Ганеев Гелий Закирович, к.ф.-м.н., Ведущий научный сотрудник, ИЯФ МЭ РК, 050032, Казахстан, Алматы, ул. Ибрагимова,1. ganeev@inp.kz