

Утегенов А.У., Тажен А.Б., Райымханов Ж., Камбаров А.А.

Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики,
Казахстан, г. Алматы, e-mail: almasbek@physics.kz

ТЕПЛОВАЯ ЭРОЗИЯ ГРАФИТОВОЙ МИШЕНИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИНТЕНСИВНОГО ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА

В данной работе представлены результаты по экспериментальному исследованию взаимодействия импульсного плазменного потока с кандидатным материалом первой стенки ТЯЭР – графитовыми пластинами. Для получения импульсного плазменного потока, а также для имитации и экспериментального моделирования срыва плазменного шнура на стенку, экспериментальная установка импульсный плазменный ускоритель был использован в этой работе. Графитовые пластины были облучены 25 импульсами плазменного потока. На основе электронно-силовой микроскопии были получены СЭМ изображения графитовых образцов после воздействия на них серии импульсов плазменного потока в двух различных напряжениях разряда 5 кВ и 11 кВ. Также показаны Рамановские спектры исходных образцов, проведена оптическая диагностика поверхностей. По Рамановскому спектру было выявлено, что образцы графита в обоих случаях имеют дефектную структуру. В эксперименте также было обнаружено, что на поверхности графитовых пластин образуются медные пленки, данное обусловлено главным образом осаждением молекул меди, вырванных с поверхности электродов ускорителя во время зажигания разряда в межэлектродном пространстве. Полученные результаты хорошо изучены, анализированы и сопоставлены с результатами, полученными в ТЯЭР.

Ключевые слова: импульсный плазменный ускоритель, ТЯЭР, кандидатный материал.

Utegenov A.U., Tazhen A.B., Rayymkhanov Zh., Kambarov A.A.
Al-Farabi Kazakh National University, Institute of Experimental and Theoretical Physics,
Kazakhstan, Almaty, e-mail: almasbek@physics.kz

Heat erosion of the graphite target under effects of intensive pulse plasma flow

In this work the results of an experimental investigation of the interaction of a pulsed plasma flow with a candidate material – graphite plates of the first wall of ITER are presented. To generate a pulsed plasma flow, as well as to simulate and experimental modeling the breakdown of a plasma flow on a wall, an experimental setup pulsed plasma accelerator was used in this work. Graphite plates were irradiated with 25 pulses of plasma flow. On the basis of electron-force microscopy, SEM images of graphite samples were obtained after exposure to a series of pulsed plasma flow in two different discharge voltages of 5 kV and 11 kV. The Raman spectrum of the initial samples are also shown, and optical diagnostics of the surfaces is performed. According to the Raman spectrum, it was found that samples of graphite in both cases have a defective structure. The experiment also found that copper films are formed on the surface of graphite plates, this is mainly due to the deposition of copper molecules, ejected from the surface of the electrodes during ignition of the arc discharge in the interelectrode space. The results are well studied, analyzed and compared with the results taken in the ITER.

Key words: pulsed plasma accelerator, ITER, candidate material.

Утегенов А.У., Тажен А.Б., Райымханов Ж., Қамбаров Ә.А.

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Эксперименттік және теориялық физика ғылыми зерттеу институты,
Қазақстан, Алматы қ., e-mail: almasbek@physics.kz

Графит нысананың интенсивті плазмалық ағынның әсерінен жылулық эрозиясы

Бұл жұмыста ТЯЭР бірінші реттік қабырғасына кандидат материал – графит пластиналарының импульстік плазма ағынымен әсерлесуінің эксперименттік зерттеу нәтижелері көрсетілген. Импульстік плазма ағынын алу үшін және де плазмалық белдеудің үзіліп, қабырғамен әсерлесу процессін тәжірибеде имитациялау және эксперименттік модельдеу мақсатында бұл жұмыста импульстік плазмалық үдеткіш эксперименттік қондырғысы қолданылды. Графит пластиналардың беткі қабаты импульстік плазмалық ағынның 25 импульсімен сәулелендірілді. Электрондық күштік микроскоп әдісінің негізінде 5 кВ және 11 кВ кернеу шамаларында импульстік плазма ағынымен әсерлескеннен кейінгі графит үлгілерінің СЭМ бейнелері алынды. Бұл жұмыста алынған үлгілердің Раман спектрлері көрсетілген, олардың бетіне оптикалық диагностика зерттеу жұмыстары жасалды. Раман спектрлерінің нәтижелерінің көрсетуі бойынша екі жұмыс режимінде де үлгілер құрылымдық өзгерістерге ұшырағандығы анықталды. Тәжірибе барысында сонымен қатар графит пластиналарының беткі қабаты мыс материалынан тұратын пленкалармен қапталатындығы белгілі болды, ол ең алдымен доғалық разрядтың екі электродтар арасында жанғаннан кейін олардың тозаңдануымен және пайда болған мыс молекулаларының пластина бетіне отыруымен тікелей байланысты. Барлық алынған нәтижелер толығымен зерттелді, ТЯЭР нәтижелермен салыстырылды.

Түйін сөздер: импульстік плазмалық үдеткіш, ТЯЭР, кандидаттық материал.

Введение

На сегодняшний день эрозия защитных покрытий дивертора и первой стенки при нагрузках в пределах $20 \text{ МВт/м}^2 - 10 \text{ ГВт/м}^2$ является, в частности, одной из нерешенных проблем в создании термоядерного реактора на основе токамака. Вследствие этого, особый интерес представляет выбор материалов обращенных к плазме и противостоящих плазменно-тепловому воздействию: нагреву поверхности до температуры кипения, плавления и сублимации [1-5].

Подвергнутые к эрозии материалы уменьшаются в толщине, ухудшаются их эксплуатационные характеристики. А также за счет эрозии происходит выброс атомарных (ионов, атомов, молекул, молекулярных кластеров) так и макроскопических частиц (пыль, осколки). Последнее сопровождается образованием трещин на поверхности (дефектов) и продуктов эрозии [6-12]. Продукты эрозии: пыли (частицы микронного размера) и наноструктурные образования могут привести к накоплению трития, в результате чего работа на реакторе становится небезопасным, также захват трития приводит к снижению его экономичности (1 гр трития стоит ~30 тыс. долл.). Опасность токсичности и радиоактивности пыли усугубляется ее летучестью [13-14]. Во-вторых, наноструктурные пленки развитой поверхностью представляют опасность при аварийных инцидентах, связан-

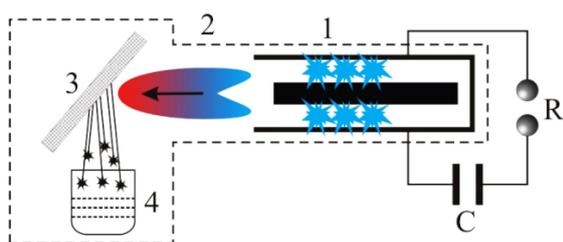
ных, в частности, с прорывами воды в камеру реактора, как катализатор для разложения воды и образования взрывоопасного количества водорода [15].

Данная работа посвящена исследованию процесса взаимодействия плазменного потока с кандидатным материалом – графитовой пластиной. Импульсная плазма была получена на экспериментальной установке ИПУ-30, собранной в лаборатории НИИЭТФ. В ходе работы также были анализированы морфологические и геометрические свойства поверхности графитовой мишени после воздействия на него импульсной плазмы.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка ИПУ-30 состоит из коаксиально расположенных электродов, разделенных между собой диэлектриком. Диаметр внутреннего электрода 55 мм, внешнего 108 мм, длина соответственно 330 мм и 350 мм, рисунок 1 [16-24].

К электродам установки прикладывается высокое напряжение от конденсаторных батарей, а в рабочей камере создается вакуум форвакуумным насосом. Высоковольтное напряжение на электроды подается с помощью разрядника (R). Разрядник представляет собой два круглых плоскопараллельных медных дисков, разделенных изолятором из фторопласта.



- 1) система электродов;
- 2) направленный импульсный плазменный поток;
- 3) мишень; 4) контейнер для сборки продуктов эрозии.

Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментальной установки ИПУ-30

Графитовая пластина во время эксперимента располагалась в положении, как показано на рисунке 1.

Плотность энергии импульсного плазменного потока

Основным механизмом эрозии материалов при их облучении потоком плазмы является тепловая нагрузка на поверхность, которая обусловлена энергозапасом плазменного сгустка, получаемого на ускорителе.

Для измерения плотности энергии импульсного плазменного потока был разработан и применен проволочный калориметр [25].

Результаты измерения плотности энергии плазменного потока проволочным калориметром при различных давлениях рабочего газа показаны на рисунке 2.

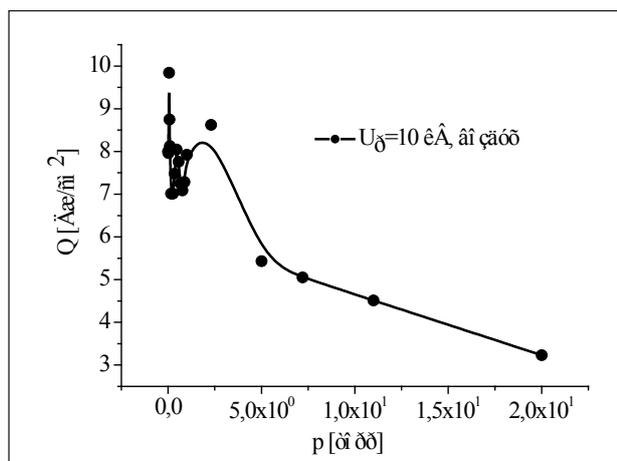


Рисунок 2 – Зависимость плотности энергии плазмы от давления газа

Как видно из рисунка 2, плотность энергии плазмы с увеличением давления рабочего газа при фиксированном напряжении разряда сначала постепенно увеличивается, в некотором значении давления газа наблюдается максимум и с дальнейшим ростом уменьшается. Данная зависимость эквивалентна закону Пашена. То есть некоторому значению давления газа (когда известно межэлектродное расстояние) соответствует разрядное напряжение, при котором происходит максимальная ионизация газа. При таком случае плотность энергии плазмы тоже будет максимальной, что и показывает появление максимума на кривой зависимости 2. В данном случае большее энерговыделение происходит при 0,02 торр.

Чтобы удостовериться в корректности полученных данных, проволочный калориметр был откалиброван. В целях этого нами был поставлен следующий эксперимент: проволочный калориметр помещался в электрическую печь, и подогревался до температуры соответствующего температуре плазменного потока. Таким образом, в обоих случаях были сравнены показания изменения сопротивления проволочного калориметра. Соотношение, рассчитанное по формуле (1) показало, что чувствительность проволочного калориметра лежит в диапазоне 0,99-1.

$$\xi = \frac{\Delta R}{\Delta R_p} \quad (1)$$

Также зависимость сопротивления калориметра от температуры в печи хорошо согласуется с теорией (рисунок 3), где используется классическое уравнение вида (2):

$$R_t = R_0 [1 + a(t - t_0)], \quad (2)$$

где R_0 – сопротивление калориметра при комнатной температуре t_0 , a – температурный коэффициент сопротивления.

Результаты анализа поверхностей графита

В экспериментах графитовые пластины были облучены 25 импульсами плазменного потока в двух различных напряжениях разряда: 5 кВ и 11 кВ. После обработки потоком плазмы модельные образцы защитного покрытия графита, показали различные результаты.

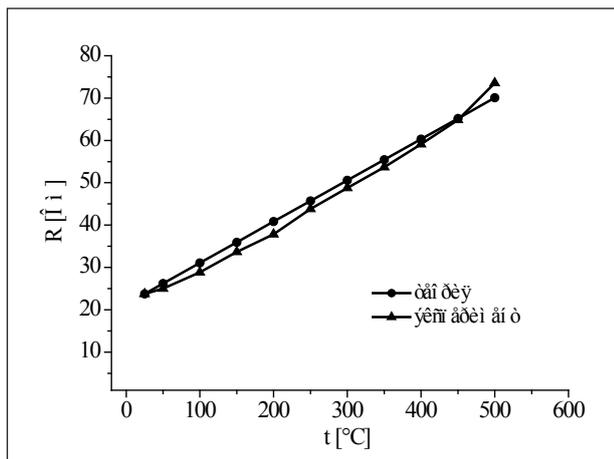
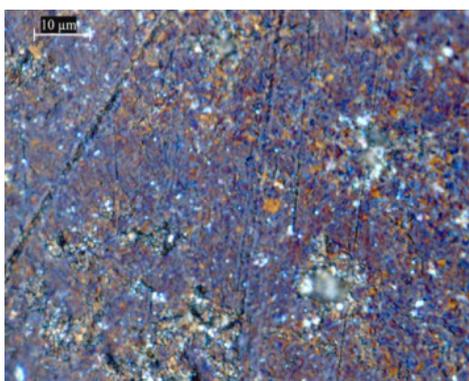


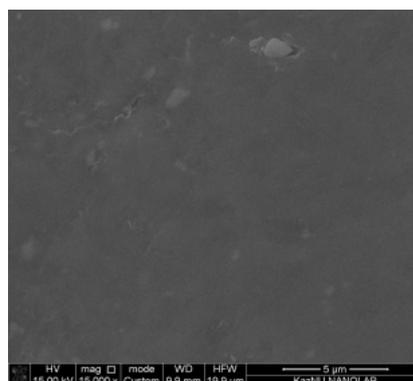
Рисунок 3 – Зависимость сопротивления калориметра от температуры (теория и эксперимент)

СЭМ изображение и оптическая диагностика поверхности графитовой пластины при 5 кВ показаны на рисунке 4. Как можно увидеть на рисунке 4а, на поверхности графитовой пластины после воздействия на него высокотемпературной плазмы образовалась медная пленка. Также на рисунке 4б видно, что поверхность образца не подвергалась разрушению. Появление медной пленки обусловлено осаждением молекул меди, вырванных с поверхности электродов ускорителя во время разряда в межэлектродном пространстве. В данном случае установка работала в режиме «имплантация».

При напряжении разряда 11 кВ, поверхностный анализ графитовой пластины показал, что при таких больших тепловых нагрузках поверхность графита полностью «расплавляется» (рисунок 5).



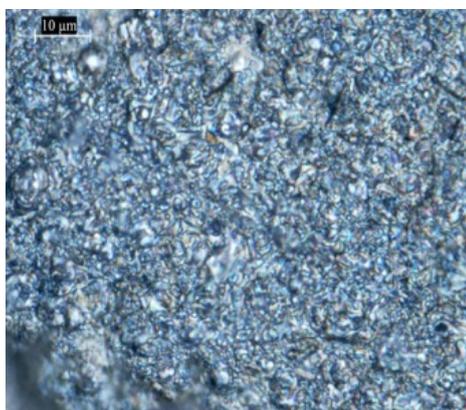
а)



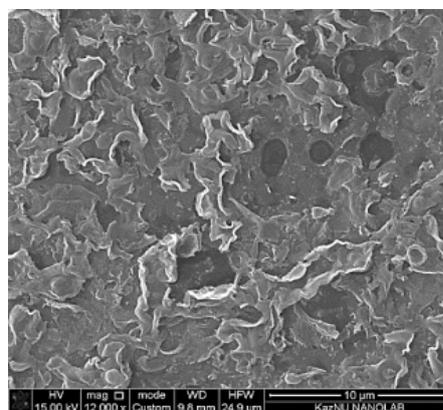
б)

а) Оптический и б) СЭМ изображения поверхности образца

Рисунок 4 – Поверхность графитовой пластины, облученный 25 импульсами плазменного потока при 5 кВ



а)



б)

а) Оптическая и б) СЭМ изображения поверхности образца

Рисунок 5 – Поверхность графитовой пластины, облученный 25 импульсами плазменного потока при 11 кВ

Также наблюдается, что поверхность графитовой пластины не только подвергается к эрозии, но также на ее поверхности образуются блистеры (волдыри, пузыри) (рисунок 6).

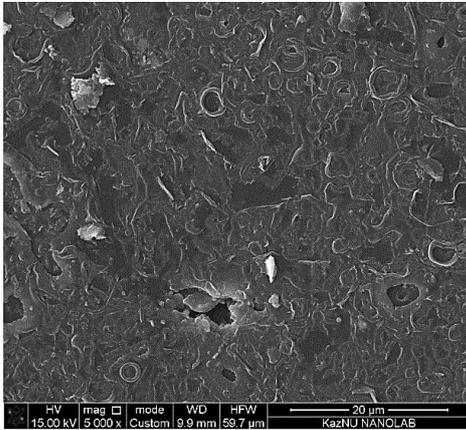


Рисунок 6 – Эрозия и образование блистеров на поверхности исследуемой графитовой мишени при 11 кВ

Блистеры видны как белые кружки на рисунке 6. Предполагается, что причиной возникновения блистеров является имплантирование газа на поверхностный слой графита, в резуль-

тате чего на поверхности появляется высокое механическое напряжение, в конечном итоге это приводит к вздутию некоторых областей поверхностей графита. Также на рисунке 6 можно заметить кратера подобные следам небольшой глубины. Предполагается, что кратеры образуются в местах, где имеется большее скопление молекул газа. После взаимодействия с плазмой (за счет высокой температуры), происходит расширение газа, и в один момент, когда газ начинает выдавливать поверхность, поверхность разрушается, оставляя за собой следы микротрещин.

На рисунке 7 показаны Рамановские спектры графита после взаимодействия с плазменным потоком при напряжениях разряда 5 кВ и 11 кВ.

По Рамановскому спектру было выявлено, что образцы графита в обоих случаях имеют дефектную структуру. Однако, в первом случае, при 5 кВ (рисунок 7а) наблюдается уширение пиков и отношение интенсивности дефектного пика к графитовому $I(D)/I(G)$ составляет в среднем 0,7. Это связано покрытием графитовой поверхности пленкой. Во втором случае, при 11 кВ (рисунок 7б) пики довольно узкие, т.е. сохраняется кристаллическая структура, однако вклад дефектов здесь значительный, что подтверждается соотношением $I(D)/I(G)=0,85$

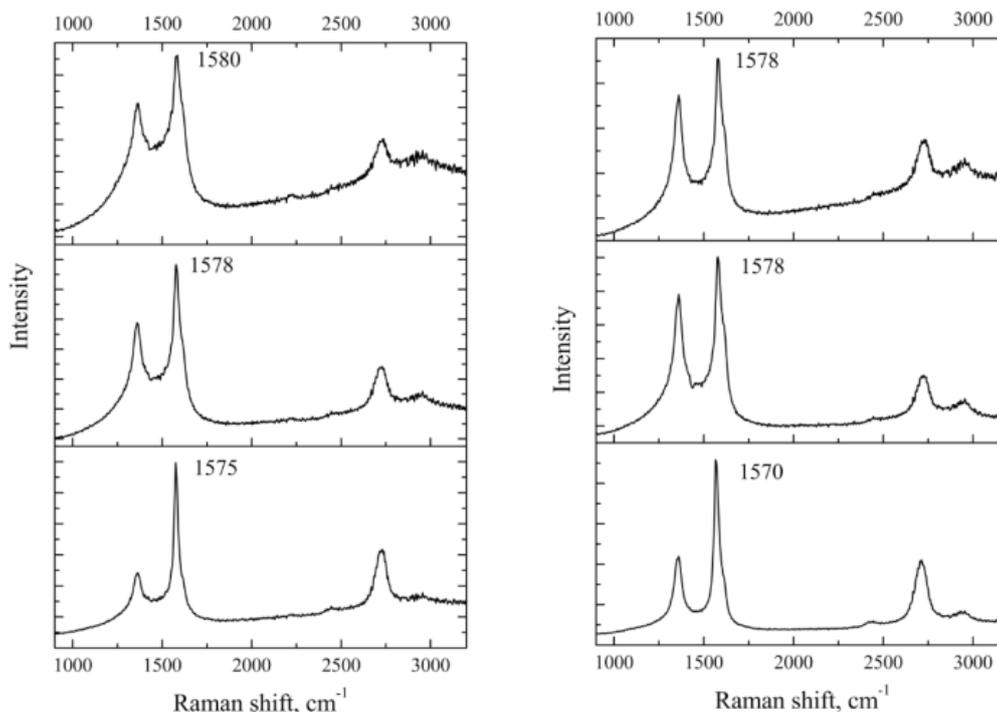


Рисунок 7 – Раман спектр образцов показанные в рисунках 4 и 5: а) при 5 кВ, б) при 11 кВ

А также на поверхности графитовой пластины после взаимодействия с плазмой были обнаружены пылинки с диаметрами несколько мкм. Фотография и химический состав одного из таких пылинок показаны на рисунке 8. Было выявлено, что данная пылинка по своему химическому составу схожа с химическим составом материала, из которого сделан изолятор, находя-

щийся между электродами. Они образуются вследствие эрозии изолятора во время дугового разряда между электродами и ускоряются вместе с плазмой до больших скоростей. Максимальная скорость таких пылинок, обнаруженных нами, достигает, приблизительно 430 м/сек. Пылинки с такими скоростями способны разрушать поверхность мишени, как это показано на рисунке 8.

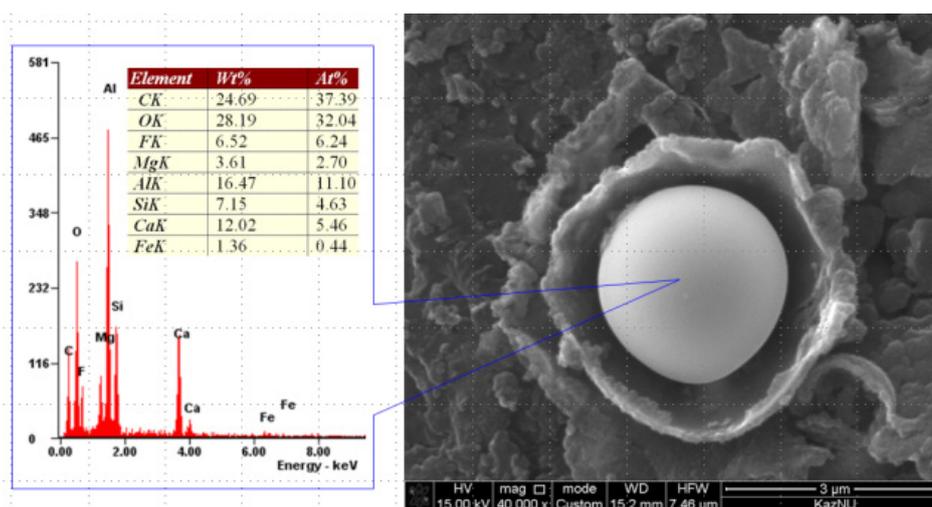


Рисунок 8 – Химический спектр пылинки, образовавшегося во время эрозии изолятора между коаксиальными электродами при появлении дугового разряда и разрушение поверхности пылинкой

Заключение

На первом исследуемом образце графита, при напряжении разряда 11 кВ обнаружались блистерные и кратерные образования по сравнению с напряжением разряда при 5 кВ. Доказательством тому являлись полученные в эксперименте микрофотографии графитовых поверхностей. По данным Рамановского спектра были определены интенсивности дефектного пика образцов в двух значениях напряжения

ускорителя: 5 кВ и 11 кВ. Для первого соотношение $I(D)/I(G)$ составляет в среднем 0,7, для второго $I(D)/I(G)=0,85$. Выявлено, что пылинки с большими скоростями увлеченные импульсной плазмой способны разрушать поверхность графитовой мишени.

Благодарность. Работа была выполнена при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках гранта ИРН AP05134671.

Литература

- 1 ITER Physics Basis Editors. Chapter 1: Overview and summary // Nuclear Fusion. – 1999. – Vol.39. – P. 2137.
- 2 Flanagan J.C., Sertoli M., Bacharis M. et al. Characterising dust in JET with new ITER-like wall // Plasma physics and controlled fusion. – 2015. – Vol.57. – P. 014037.
- 3 Federici G., Skinner C.H. et al. Plasma-material interactions in current tokamaks and their implications for next step fusion reactors // Nuclear Fusion. – 2001. Vol.41. – P. 1967-1979.
- 4 Crauz V.I., Martinenko Yu.V., Svechnikov N.Yu., Smirnov V.P., Stankevich V.G., Khimchenko L.N. Nanosturctures in controlled fusion devices // Uspek. Phys. Nauk. – 2010. – Vol. 180. – P. 1055-1080.
- 5 Vignitchouk L., Tolias P. and Ratynskaia S. Dust-wall and dust-plasma interaction in the MIGRAINE code // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2014. – Vol.56. – P. 095005.

- 6 Ratynskaia S., Bergsaker H., Emmoth B., Litnovsky A., Kreter A. and Philipps V. Capture by aerogel—characterization of mobile dust in tokamak scrape-off layer plasmas // *Nucl. Fusion.* – 2009. – Vol.49. – P. 122001.
- 7 Pigarov A. Yu., Krashennnikov S.I., Soboleva T.K., Rognlien T.D. Dust–particle transport in tokamak edge plasmas // *Physics of Plasmas.* – 2005. – Vol.12. – P. 122508.
- 8 Sizyuk V. and Hassanein A. Kinetic Monte Carlo simulation of escaping core plasma particles to SOL for accurate response of plasma-facing components // *Nuclear Fusion.* – 2013. – Vol.53. – P.073023.
- 9 Utegenov A.U., Tazhen A.B., Dosbolayev M.K., Ramazanov T.S. Experimental investigation of the interaction of plasma flow with the wall of fusion reactor // 21st International symposium on Heavy Ion Inertial Fusion. Book of abstracts. – 2016. – P. 53.
- 10 Krauz V.I., Martynenko Yu.V., Sevchinkoav N.Yu., Smirnov V.P., Stankevich V.G., Khimchenko L.N. Nanostructures in controlled thermonuclear fusion facilities // *UFN.* – 2010. – Vol.180. – P.1055-1080.
- 11 Bartels H-W. et al. Accident Analysis Specifications for GSSR // Safety, Environment and Health Group. Garching ITER Joint Central Team. – 2000. – Vol.41. – P.11-14.
- 12 Shukla P.K. and Mamun A.A. Introduction to Dusty Plasma Physics // Series in Plasma Physics. – London: Institute of Physics Publishing. – 2002. – Vol.44. – P.123-165.
- 13 Klimov N.S., Podkovyrov V.L., Zhitluhin A.M., Arkhipov N.I., Safronov V.M., Barsuk V.A., Poznyak I.M., Loarte A., Merola M., Linke J. Effect of intense pulsed plasma flows on shielding materials of intracameral components of a fusion reactor // *Nuclear Physics and Engineering.* – 2010. – Vol.1. – P.210-219.
- 14 Bevelacqua J.J. Health physics considerations for the ITER // *International nuclear safety journal.* – 2014. – Vol.3. – P.25-52.
- 15 Martynenko Yu.V., Nagel M.Yu. Dust formation in TOKAMAK // *Thermonuclear fusion.* – 2009. – Vol.389. – P. 65-72.
- 16 Tong L., Hou L., Cao X. Study on hydrogen risk induced by dust for fusion device // *Journal of Fusion Energy.* – 2015. – Vol. 34. – P. 1-8.
- 17 Dosbolayev M.K., Utegenov A.U., Tazhen A.B., Ramazanov T.S. // *Laser and Particle Beams.* – 2017. – Vol.35. – P. 741-749.
- 18 Dosbolayev M.K., Utegenov A.U., Tazhen A.B., Ramazanov T.S., Gabdullin M.T. Dynamic properties of pulse plasma flow and dust formation in the pulsed plasma accelerator // *News of the Natnl. Acad.Sci. RK.* – 2016. – Vol.6. – P. 59–66.
- 19 Tazhen A.B., Utegenov A.U., Dosbolayev M.K., Ramazanov T.S., Kaikanov M.I. Definition of the density of energy of a pulsed plasma flow using a wire calorimeter // *J. PEOS.* – 2016. – Vol. 2. P. 40-44.
- 20 Tazhen A.B., Dosbolayev M.K., Ramazanov T.S. Diagnostics of pulsed plasma flow using Faraday cup // *Nuclear and Radiation Physics. Book of abstracts.* – 2015. – P. 84-85.
- 21 Tazhen A.B., Dosbolayev M.K., Raiymkhanov Zh., Ramazanov T.S. Diagnostics of pulsed plasma in accelerator ipu-30 // IX International Conference Plasma Physics and Plasma Technology. Book of abstracts. – 2018. – P. 304-307.
- 22 Tazhen A.B., Dosbolayev M.K., Utegenov A.U., Raiymkhanov Zh.R., Ramazanov T.S. Dust formation during the interaction of a pulsed plasma flow with ITER candidate wall materials // *ESCAMPIG XXIV Proceedings.* – 2018. – P. 146-147.
- 23 Dosbolayev M.K., Raiymkhanov Zh., Tazhen A.B., Utegenov A.U., Ramazanov T.S. Experimental Investigation of the Properties of Plasma-Dust Formations on Pulsed Plasma Accelerator // 15th Dusty Plasma Workshop. – 2018. – P.59.
- 24 Dosbolayev M.K., RaiymkhanovZh., Tazhen A.B., Utegenov A.U., Ramazanov T.S., Impulse Plasma Deposition of Carbon Nanoparticles // XII-th International Conference Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons. Book of Abstracts. – 2018. – P. 82.
- 25 Tazhen A.B., Suleymenova A.Kh., Dosbolayev M.K., Ramazanov T.S. Determination of energy density of pulsed plasma flow using wire calorimeter // *J. PEOS.* – 2017. – Vol.19. – P. 510.

References

- 1 ITER Physics Basis Editors. Chapter 1: Overview and summary // *Nuclear Fusion.* 39, 2137 (1999).
- 2 J.C. Flanagan, M. Sertoli, M. Bacharis et al., *Plasma physics and controlled fusion.* 57, 014037 (2015).
- 3 G. Federici, C.H. Skinner et al. *Nuclear Fusion.* 41, 1967-1979 (2001).
- 4 V.I. Crauz., Yu.V. Martinenko, N. Yu. Svechnikov, V.P. Smirnov, V.G. Stankevich, L.N. Khimchenko, *Uspekh. Phys. Nauk.*180, 1055-1080 (2010).
- 5 L. Vignitchouk, P. Tolias and S. Ratynskaia, *Plasma Physics and Controlled Fusion.* 56, 095005 (2014).
- 6 S. Ratynskaia, H. Bergsaker, B. Emmoth, A. Litnovsky, A. Kreter and V. Philipps, *Nucl. Fusion.* 49, 122001 (2009).
- 7 Yu. Pigarov, S. I. Krashennnikov, T.K. Soboleva, T.D. Rognlien, *Physics of Plasmas.* 12, 122508 (2005).
- 8 V. Sizyuk and A. Hassanein, *Nuclear Fusion.* 53, 073023 (2013).
- 9 A.U. Utegenov, A.B. Tazhen, M.K. Dosbolayev, T.S. Ramazanov, 21st Intern. symposium on Heavy Ion Inertial Fusion, Book of abstracts. 53 (2016).
- 10 V.I. Krauz, Yu.V. Martynenko, N.Yu. Sevchinkoav, V.P. Smirnov, V.G. Stankevich, L.N. Khimchenko, *UFN,* 180, 1055-1080 (2010).
- 11 H-W. Bartels et al. Safety, Environment and Health Group, Garching ITER Joint Central Team. 41, 11-14 (2000).
- 12 P.K. Shukla and A.A. Mamun. Series in Plasma Physics. – London: Institute of Physics Publishing, 44, 123-165 (2002).
- 13 N.S. Klimov, V.L. Podkovyrov, A.M. Zhitluhin, N.I. Arkhipov, V.M. Safronov., V.A. Barsuk, I.M. Poznyak, A. Loarte, M. Merola, J. Linke, *Nuclear Physics and Engineering,* 1, 210-219 (2010).
- 14 J.J. Bevelacqua Health physics considerations for the ITER // *International nuclear safety journal,* 3, 25-52 (2014).
- 15 Yu.V. Martynenko, M.Yu. Nagel, *Thermonuclear fusion.* 389, 65-72 (2009).

- 16 Tong L., Hou L., Cao X. *Journal of Fusion Energy*, 34, 1-8 (2015).
- 17 M.K. Dosbolayev, A.U. Utegenov, A.B. Tazhen, T.S. Ramazanov, *Laser and Particle Beams*. 35, 741-749 (2017).
- 18 M.K. Dosbolayev, A.U. Utegenov, A.B. Tazhen, T.S. Ramazanov, M.T. Gabdullin, *News of the Natnl. Acad.Sci. RK*. 6, 59–66 (2016).
- 19 A.B. Tazhen, A.U. Utegenov, M.K. Dosbolayev, T.S. Ramazanov, M.I. Kaikanov, A.V., *J. PEOS*. 2, 40-44 (2016).
- 20 A.B. Tazhen, M.K. Dosbolayev, T.S. Ramazanov, *Nuclear and Radiation Physics, Book of abstracts*, 84-85 (2015).
- 21 A.B. Tazhen, M.K. Dosbolayev, Zh. Raiymkhanov, T.S. Ramazanov, *IX Intern. Conf. Plasma Physics and Plasma Technology2 Book of abstracts2* 304-307 (2018).
- 22 A.B. Tazhen, M.K. Dosbolayev, A.U. Utegenov, Zh.R. Raiymkhanov, T.S. Ramazanov, *ESCAMPIG XXIV Proc.*, 146-147 (2018).
- 23 M.K. Dosbolayev, Zh. Raiymkhanov, A.B. Tazhen, A.U. Utegenov, T.S. Ramazanov, *15th Dusty Plasma Workshop*, 59 (2018).
- 24 M.K. Dosbolayev, Zh. Raiymkhanov, A.B. Tazhen, A.U. Utegenov, T.S. Ramazanov, *XII-th Intern. Conf. Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons, Book of Abstracts*, 82 (2018).
- 25 A.B. Tazhen, A.Kh. Suleymenova, M.K. Dosbolayev, T.S. Ramazanov, *J. PEOS*. 19, 510 (2017).