УДК 621.039.6; 533.9.08; 621.039.66

РОЛЬ ИМИТАЦИОННОГО СТЕНДА С ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКОЙ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПЛАЗМЕННО-ПОВЕРХНОСТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Туленбергенов Т.Р., Скаков М.К., Миниязов А.Ж., Соколов И.А., Кайырды Г.К.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

tulenbergenov@nnc.kz

В соответствии с целью программы обеспечения эффективности научных исследований на установке КТМ в 2008 году на базе филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК был создан экспериментальный испытательный имитационный стенд с плазменно-пучковой установкой, роль которого обусловлена испытанием образцов малых размеров из перспективных конструкционных материалов и наладке диагностического оборудования термоядерных реакторов. Установка ориентирована на универсальность и возможность быстрой переналадки для решения различных специализированных задач, а также имеет широкие возможности и позволяет проводить испытание материалов в условиях комплексного воздействия на них как плазменного потока, так и мощной тепловой нагрузки.

Ключевые слова: термоядерные реакторы, конструкционные материалы, вольфрам, бериллий, молибден, плазменные установки, низкотемпературная плазма, пучково-плазменный разряд.

Введение

Сегодня человечество удовлетворяет свои потребности в энергии, главным образом сжигая нефть, газ и уголь. Однако легкодоступные и дешевые их запасы ограничены: с учетом роста потребления энергии они могут быть в значительной мере исчерпаны уже в обозримом будущем. Поискам альтернативных источников энергии заняты ученые многих стран мира, в том числе Казахстана. Термоядерная энергетика и создание термоядерных реакторов является крупным шагом в решении энергетических проблем человечества.

Данные о воздействии плазмы на поверхность конструкционных материалов дивертора и первой стенки термоядерных экспериментальных реакторов являются значимыми в мировой науке на сегодняшний день [1]. Одной из важных проблем в конструкции термоядерных реакторов в процессе эксплуатации является повреждение структуры поверхностей материалов. Вследствие процессов физического и химического распыления материалов плазма загрязняется примесями. Также очень важны эксперименты по изучению процессов, происходящих при «срыве плазмы», когда температура и плотность плазмы приводят к расплавлению, испарению и эрозии реакторных материалов. Экспериментальные исследования процессов, происходящих при взаимодействии плазмы с поверхностью конструкционных материалов, не всегда могут проводиться в больших термоядерных установках, так как это трудоемкая работа, требующая огромных вложений. Для этих целей существуют специально разработанные плазменные установки, которые позволяют моделировать процесс взаимодействия плазмы термоядерных реакторов с конструкционными материалами.

На современных плазменных установках температура и плотность генерируемой плазмы близки к плазме SOL (scrap-off layer), тем самым актуально исследование процессов, непосредственно влияющих на материалы компонентов. К примеру, это модификация поверхности при облучении плазмой или пучками заряженных частиц. Сюда относится: распыление атомов поверхности и изучение эрозии, внедрение в поверхность инородных частиц или напыление, модификация рельефа поверхности, блистерообразование.

В настоящее время существует достаточно много установок, используемых для имитации периферийной плазмы токамаков. Однако, на сегодняшний день общепризнанные и часто цитируемые результаты получены на трех-четырех установках: это американская установка PISCES-A и PISCES-B [2–6], японская NAGDIS-II [7], немецкая PSI (PSI-1, PSI-2, JULE-PSI) [8–11], российские установки ЛЕНТА Курчатовского института [12] и ПР-2 в НИЯУ МИФИ [13]. Некоторые из них показаны на рисунке 1.

На данных установках изучаются вопросы по эрозии поверхности; блистерообразованию; накоплению изотопов водорода в материалах; росту углеводородных пленок; отрыву плазмы; транспорту частиц в плазме; турбулентности; образованию упорядоченных структур; испытанию материалов для дивертора Международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР) и изучению газовых разрядов с возможностью их применения в промышленности.

Имитационный стенд с плазменно-пучковой установкой ИАЭ РГП НЯЦ РК

Имитационный стенд с плазменно-пучковой установкой разработан в филиале ИАЭ РГП НЯЦ РК для поддержки создания и эксплуатации Казахстанского материаловедческого токамака (КТМ). Стенд предназначен для испытаний образцов малых размеров и наладки диагностического оборудования, а также развития существующих и разработки новых мето-



PSI (FEPMAHUS)

ПР-2 (POCCИЯ)

Рисунок 1. Схематические изображения зарубежных установок [2-12]



Рисунок 2. Состав систем имитационного стенда с плазменно-пучковой установкой

дов моделирования нагрузок на конструкционные материалы термоядерных реакторов, изучения свойств и поведения материалов при взаимодействии с плазмой. Состав систем стенда показан на рисунке 2.

Наравне с установками из различных стран, имитационный стенд с плазменно-пучковой установкой обладает отличительными функциональными возможностями, такими как:

 системой вакуумных диафрагм, позволяющих сохранить высокий вакуум в камере электронной пушки при повышении давления рабочего газа в камере взаимодействия;

 системой развертки электронного пучка, которая позволяет равномерно распределять тепловой поток электронов по площади охлаждаемого коллектора мишенного узла;

 несколькими вариантами мишенных устройств вакуумного исполнения с возможностью охлаждения и контроля температуры с облучаемой и тыльной стороны образца;

 системой программируемого нагрева для проведения экспериментальных исследований термодесорбционных характеристик исследуемых материалов (режим in situ);

 системой ускорения ионов, энергия которых регулируется в диапазоне 50 эВ – 2 кэВ.

Основные параметры плазмы имитационного стенда представлены в таблице 1.



Рисунок 3. Тіте-line направлений будущих исследований на имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой

Параметры имитационного стенда	Значения
Уд. макс. мощность электронного пучка	0-500 кВт/см ²
Электронная температура	0–15 эВ
Диаметр электронного пучка	0–30 мм
Ток электронного пучка	0–250 мА
Максимальное давление рабочего газа в режиме пучково-плазменного разряда	<10 ⁻³ Topp
Ток ионов плазмы	0–1 A
Энергия ионов плазмы	0–2 кэВ
Плотность ионного потока	10 ²² м ⁻² ·с ⁻¹
Максимальная плотность плазмы (по H ₂)	10 ¹⁸ м ⁻³

Таблица 1. Основные параметры плазмы, получаемые в имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО СТЕНДА В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОГРАММАХ

За время существования имитационный стенд с плазменно-пучковой установкой использовался для проведения исследований в различных научно-технических программах: в период с 2008 года по 2017 год выполнялись работы по подготовке технической и методической базы для исследований взаимодействия плазмы КТМ с материалами и проведение наладочных экспериментов на имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой; в период с 2015 года по 2017 год в рамках грантового финансирования МОН РК решались задачи по экспериментальному моделированию взаимодействия плазмы с кандидатными материалами; с 2018 года по настоящее время проводятся работы по экспериментальному исследованию влияния покрытий на свойства материалов, обращенных к плазме. На 2021-2023 гг. планируется применение имитационного стенда в рамках научнотехнической программы по исследованию вольфрамовой облицовки дивертора термоядерных реакторов с карбидным слоем после воздействия низкотемпературной плазмы. Тіте-line показан на рисунке 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сегрегация титана. Методами электронной сканирующей микроскопии исследованы структурнофазовые изменения поверхности аустенитной стали 12X18H10T, подвергнутой воздействию непрерывного электронного пучка на имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой.

При облучении образца максимальная реализованная мощность электронного пучка составляла 75 Вт при мощности нагрева катодно-подогреваемого узла (КПУ) 130 Вт. Максимальное значение температуры образца, зарегистрированное установленной термопарой, достигло 920 °С. Внешний вид образца после облучения приведен на рисунке 4. Видно, что на образце стали после воздействия электронного пучка зафиксировалась заметная деградация поверхностного слоя центрального пятна.



Рисунок 4. Образец стали 12X18H10T после воздействия электронного пучка: внешний вид (а) и микроснимок в зоне центрального пятна x30 (б)

Установлено, что рассматриваемое взаимодействие приводит к заметному выделению титана на поверхности образца. Исследования структурно-фазовых изменений поверхности образца показывают, что в области действия пучка электронов происходит образование островковых тонких пленок Ті. В таблице 2 и на рисунке 5 приведены данные анализа элементного состава.

Спектр	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Итог	
1	-	98,49	-	1,51	-	100,00	
2	2,29	2,13	4,02	7,56	21,00	100,00	
Spectrum 2 Spectrum 1 C Fe Ti Fe Fe							

Таблица 2. Элементный анализ в зоне центрального пятна аустенитной стали 12X18H10T после воздействия электронным пучком (в %mass.)



Рисунок 5. Микроснимки центральной зоны x1500

Облучение материалов пучком электронов приводит к аномальному перераспределению элементов в сплавах. Это позволяет создать заранее заданный профиль распределения примеси и обеспечить необходимые эксплуатационные свойства изделий.

Радиационное повреждение. Отдельную проблему представляет радиационное повреждение, эрозия и трансформация приповерхностного слоя материала контактной поверхности первой стенки ИТЭР под действием плазмы. Как отмечено выше, имитационная стенд позволяет получать высокие ионные флюенсы при изменении в широких пределах энергии ионов и температуры поверхности. Были проведены эксперименты по взаимодействию плазмы с образцами из молибдена и вольфрама с рабочим газом гелием. На рисунках 6 и 7 в качестве примеров таких повреждений под действием потока ионов гелия показаны рельефы молибденовой и вольфрамовой мишеней, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа.



Рисунок 6. Образование микропор на поверхности Мо (флюенс ионов $He - 10^{21}$ см⁻², Ei – 150 эВ, T – 1800 K)

Немаловажной проблемой является изучение поведения структуры бериллия в результате воздействия плазмой, так как данный материал будет использоваться в качестве облицовки первой стенки ИТЭР.



Рисунок 7. Образование субмикронных структур на поверхности W (флюенс ионов He – 10²² см⁻², Ei – 400 эВ, T – 1200 K)

Были проведены работы по облучению образцов бериллия марки ТГП-56 плазменным пучком в среде водорода, гелия и дейтерия. Параметры облучения приведены в таблице 3.

Таблица 3. Параметры облучения бериллия в среде водорода, дейтерия и гелия

Обра- зец	Газ	Ионный ток, мА	Температу- ра электро- нов, эВ	Концентра- ция ионов, м⁻³	Темпера- тура, °С
Be-1	H ₂	730	11,7	5,84·1017	1140
Be-2	D	330	10,6	3,04·1017	1090
Be-3	He	290	7,29	5,16·1017	1000

Исследования микроструктуры бериллия в исходном состоянии показали, что на поверхности образца имеются поры не большого размера и малого количества, которые в основном расположены на границах зерен. После облучения основным радиационным дефектом является образование пор различной объемной плотности, зависящей от режима облучения и плазмообразующего газа. Под воздействием облучения в бериллии происходит наполнение пор атомами водорода, дейтерия и гелия, что приводит к увеличению давления внутри пор и, следовательно, к увеличению различного рода напряжений на границах зерен. Снимки микроструктуры бериллия и параметры плазменного воздействия показаны на рисунке 8.



Рисунок 8. Образование пор на поверхности бериллия различной объемной плотности после облучения

Были проведены экспериментальные исследования взаимодействия плазмы с вольфрамом марки ВЧ в газовой смеси азота и аргона. В качестве плазмообразующего газа использовалась смесь азота и аргона. Аргон добавляется в газовую смесь для того, чтобы уменьшить в ней активность азота. В присутствии аргона толщина внешнего нитридного слоя уменьшается, и тем самым снижается барьерный эффект, создаваемый нитридным слоем, что способствует ускорению диффузионного процесса ионов азота в вольфрам. Это дает возможность получать в поверхностном слое азотируемого образца диффузионную зону с более высокой пластичностью и вязкостью по сравнению с азотированием без аргона [14]. Энергия ионов плазмы варьировалась от 500 эВ до 1500 эВ. Температура образцов не превышала 900 °С. Флюенс ионов составил ~3.10²⁰ см⁻². Основным результатом экспериментов является эрозия облученной поверхности вольфрама, показанная на рисунке 9. Наблюдается прямая зависимость между глубиной эродированного слоя и энергией ионов. При энергии ионов 500 эВ глубина эрозии составляет ~10 мкм. Увеличение энергии ионов до 1000 эВ приводит к увеличению глубины эродированного слоя до ~40-50 мкм.

В современном научном сообществе в настоящее время изучаются механизмы образования вольфрамового «пуха» («fuzz») в результате взаимодействия гелиевой плазмы с вольфрамом [15, 16]. В связи с этим было проведено экспериментальное моделирование образования вольфрамового «пуха» на имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой.

В качестве плазмообразующего газа использовалась смесь гелия и водорода, соотношение давлений газов $He(6\cdot10^{-6} \text{ Торр})/H_2(1\cdot10^{-6} \text{ Торр}) \approx 6/1$. В результате проведенных экспериментов было облучен вольфрам марки СВИ-1. Эксперименты проводились в стационарном режиме ППР с различной длительностью, при этом параметры электронного пучка были примерно одинаковые и имели значения: ускоряю-

щее напряжение $4,2\pm0,2$ кВ; электронный ток 70 ± 5 мА, температура образца 990 ± 20 °C, энергия ионов 300 эВ, флюенс ионов $0,7-1,4\cdot10^{21}$ см⁻², время экспозиции от 2 ч до 8 ч.



а) поверхность



б) поперечное сечение

Рисунок 9. Микроструктура эродированной поверхности вольфрама

Изображения СЭМ поверхности вольфрама после облучение представлены на рисунке 10. Обнаружено, что после бомбардировки ионами гелия поверхность образцов вольфрама покрыта специфическим наноструктурированным слоем, состоящим из тонких вольфрамовых нитей (рисунок 10 б, в).



а) увеличение х1000

б) увеличение х5000

в) увеличение x20000

Рисунок 10. Образование наноструктурированного слоя на поверхности вольфрама после облучение гелиевой плазмой

Плотность вольфрамовых нитей увеличивается с увеличением времени облучения. На вольфрамовых образцах после облучения гелиевой плазмой зафиксировано равномерное образование пор по всей поверхности. После проведенных экспериментов образцы вольфрама были взвешены на аналитических весах Radwag XA...2X с дискретностью показания 0,1 мг. Установлено, что масса образцов после образования пуха на поверхности уменьшилась.

Модификация поверхности. Нитридизация. Для предотвращения или в какой-то степени уменьшения разрушающих эффектов при взаимодействии плазмы с материалом, существует направление по модификации поверхностей путем внедрения и насыщения ионов для образования фаз. На имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой проведен эксперимент с образцом вольфрама марки ВЧ по изучению влияния азотной плазмы на вольфрам с целью нитрирования в тлеющем разряде постоянного тока. Длительность эксперимента составила 30 ч. В качестве плазмообразующего газа использовалась смесь из азота (70%) и водорода (30%). Добавка водорода используется для минимизации образования оксидов вольфрама на облучаемой поверхности. Плотность ионного тока в тлеющем разряде составила 12 мА/см², энергия ионов ~550 эВ, флюенс ионов 8,26 \cdot 10²¹ см⁻², давление смеси газов в камере ~6 Торр [17].

Изображения СЭМ поверхности вольфрама после облучения при различных увеличениях представлены на рисунке 11.

В результате рентгеноструктурного фазового анализа были обнаружены пики вольфрама (кубическая кристаллическая решетка) и дополнительной фазы. Некоторая часть дополнительных пиков соответствует линиям нитридов вольфрама, как в области пика максимальной интенсивности, так и для значительной части остальных пиков. Результаты анализа энергодисперсионной спектрометрии подтверждают результаты рентгеноструктурного фазового анализа.

В результате ЭДС-анализа поперечного сечения образцов обнаружено, что в приповерхностном слое содержание азота снижается по направлению вглубь образцов. Это подтверждают результаты послойного элементного анализа поперечного сечения, приведенные в таблице 4.



а) увеличение x30

б) увеличение х500

в) увеличение x1500

Рисунок 11. Структура поверхности образцов вольфрама после облучения в среде азота тлеющим разрядом

T (n .						~	1
ໄດ້ທາກ	a 4	-помонтныш	<i>анализ</i> по	1000000000	сецения	HIMMIT	108044020	oppasu	1 ROILANNAMA
aosing	u 1.	Sucmentition	ununus noi	icpe moco	<i>ce winni</i>	numpup	000000000	oopusii	i oonoqpama

Приповерхностный участок поперечного сечения образца	Распределение элементов по глубине (в %mass.)			%mass.)
	N⁰	N	w	TOTAL
TA MAANA MATALALA	1.	1,26	98,74	100,00
	2.	1,24	98,76	100,00
	3.	0,70	99,30	100,00
	4.	0,96	99,04	100,00
51 4 5 5 1 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	5.	0,58	99,42	100,00

Модификация поверхности. Карбидизация. В результате распыления углеродных материалов в термоядерных реакторах в приповерхностном слое вольфрамового дивертора могут образовываться карбиды. Наличие наработанного таким образом углерода выделяет процесс карбидизации вольфрама в отдельную область исследований.

На имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой проведены эксперименты по отработке методики плазменного напыления углеродных покрытий на вольфрам в среде метана. Определены условия образования карбидов вольфрама: флюенс ионов метана (CH₄) 10^{24} м⁻², Ei – 500 эВ, T – 1673 К, для получения двух модификаций карбидов варьировалось время экспозиции от 600 с до 3600 с.

Перед проведением экспериментов все образцы были отожжены при воздействии электронного пучка на поверхность при температуре ~1200 °C с целью рекристаллизации поверхности.

В результате сравнения дифрактограмм, показанные на рисунке 12, образцы по характеру пиков были сгруппированы. Так дифрактограммы некоторых образцов отличаются наличием дополнительных пиков. При сравнении в свою очередь дифрактограмм данных образцов между собой наблюдается перераспределение интенсивностей пиков дополнительных фаз.



Рисунок 12. Наложение дифрактограмм вольфрамовых образиов

Литература

- 1. Kaname Ikeda. ITER on the road to fusion energy. Nucl. Fusion, 2010, T. 50.- DOI:10.1088/0029-5515/50/1/014002.
- 2. Goebel, D. M., Campbell, G., Conn, R. W. Plasma surface interaction experimental facility (PISCES) for materials and edge physics studies. Journal of Nuclear Materials, 1984, vol. 121, p. 277–282.
- 3. Antar G. Y. On the origin of "intermittency" in the scrape-off layer of linear magnetic confinement devices. Physics of plasmas, 2003, vol. 10, No 9, p. 3629-3634.
- 4. Hudson B. F., Doerner R.P. Impurity transport measurements in the PISCES-A linear plasma device. 2011.
- 5. Doerner R.P., Baldwin M.J. Schmid K. The influence of beryllium containing plasma on the evolution of a mixed-material surface. Physica Scripta, 2004, vol. T111, p.75–79.
- 6. Doerner R.P. Measuring the difference between gross and net erosion. Nuclear Fusion, 2012, vol.51, 7 pp.
- 7. N. Ohno, D. Nishijima, S. Takamura et al. Static and dynamic behaviour of plasma detachment in the divertor simulator experiment NAGDIS-II. Nuclear Fusion, 2001, vol.41, p.1055-1065.
- Kastelewicz H., Fussmann G. Plasma modeling for the PSI Linear plasma device. Contrib. Plasma Physics, 2004, vol.44, No 4, p.352–360.
- 9. Pospieszczyk A., et.al. Spectroscopic characterisation of the PSI-2 plasma in the ionising and recombining state. Journal of Nuclear Materials, 2013, vol.438, p. S1249–S1252.

По результатам рентгенофазового анализа покрытий образцов вольфрама можно сделать выводы, что основной фазой в образцах W-8, W-9, W-11 и W-14 является кристаллическая фаза вольфрама с кубической сингонией, пространственной группы Im-3m (229). При этом, на дифрактограмме образцов W-11 и W-14 наблюдаются пики невысокой интенсивности кристаллических фаз карбидов WC и W₂C. Согласно дифрактограммам образцов W-12 и W-13, основой фазового состава является кристаллическая модификация фазы W₂C. Подробные данные по рентгеноструктурному анализу по всем образцам вольфрама представлены в работе [18].

Установлено образование кристаллической модификации фаз монокарбида (WC) и полукарбида (W₂C) вольфрама, что позволило разработать и отработать методику по формированию карбидов в поверхности вольфрама из плазменно-пучкового разряда.

Заключение

Перспективность применения имитационного стенда с плазменно-пучковой установкой ИАЭ в исследованиях плазменно-поверхностного взаимодействия заключается в возможности получения результатов экспериментальных исследований относительно недорогим способом. Полученные данные востребованы при проектировании элементов конструкции термоядерного реактора, анализе их рабочего ресурса и влияния плазмы на материалы, при прогнозировании процесса накопления изотопов водорода в объеме термоядерного реактора.

Высокий научно-технический уровень работ обеспечивается тем, что для исследования изменений структуры и состава кандидатных материалов в результате облучения плазменным пучком используются современные, хорошо апробированные методы растровой электронной микроскопии, оптической металлографии, термодесорбционной и оптико-эмиссионной спектроскопии, а также для определения параметров плазмы использован широко известный зондовый метод диагностики плазмы.

- 10. Kreter A. et.al. Status of technological development for the JULE-PSI project. 4th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF), 2013.
- 11. Kreter A., et.al. Linear plasma device PSI-2 for PMI studies. Fusion science and technology, 2015, vol.68, p.8–14.
- 12. B. Unterberg et al. New linear plasma devices in the trilateral euregio cluster for an integrated approach to plasma surface interactions in fusion reactors. Fusion Engineering and Design, 2011, vol.86, p.1797–1800.
- 13. Мартыненко Ю.В., Хрипунов Б.И., Петров В.Б. Изменение поверхности вольфрама и графита под воздействием больших потоков плазмы. ВАНТ Сер. Термоядерный синтез, 2009, вып. № 4, с.14–23.
- 14. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей / Е.В. Берлин, Н.Н. Коваль, Л.А. Сейдман.– М.: Техносфера, 2012.– 464 с.– ISBN: 978-5-94836-328-8.
- Formation process of tungsten nanostructure by the exposure to helium plasma under fusion relevant plasma conditions / S. Kajita, W. Sakaguchi, N. Ohno, N. Yoshida, T. Saeki // Nuclear Fusion. – 2009. – 49. – 095005.
- 16. Nanostructuring of molybdenum and tungsten surfaces by low-energy helium ions / G. De Temmerman, K. Bystrov,
- J.J. Zielinski, M. Balden, G. Matern, C. Arnas, L. Marot // Journal of Vacuum Science and Technology. 2012. A 30.– 041306. 17. Interaction between nitrogen plasma and tungsten / T. Tulenbergenov, M. Skakov, A. Kolodeshnikov, V. Zuev, B. Rakhadilov,
- I. Sokolov, D. Ganovichev, A. Miniyazov, O. Bukina // Nuclear Materials and Energy, July 2017.– P. 1–5.
- 18. Рентгенофазовый анализ материала покрытий на поверхности образцов вольфрама, полученных на плазменно-пучковой установке: протокол №12-230-02/1365 от 19.09.18 // Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК. Курчатов, 2018.

ПЛАЗМАЛЫҚ-ҮСТІРТІН ӘСЕРЛЕРДІ ЗЕРТТЕУДЕГІ ПЛАЗМАЛЫҚ-ШОҚТЫ ҚОНДЫРҒЫЛЫ ЕЛІКТЕГІШ СТЕНДТІҢ РОЛІ

Т.Р. Туленбергенов, М.К. Скаков, А.Ж. Миниязов, И.А. Соколов, Г.К. Кайырды

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

КТМ қондырғысындағы ғылыми зерттеулердің тиімділігін қамтамасыз ету бағдрламасының мақсатына сәйкес 2008 жылы ҚР ҰЯО РМК АЭИ филиалының базасында плазмалық-шоқты эксперименттік сынақтық еліктегіш стенді құрылған болатын, оның ролі перспективалық құрылымдылық материалдардан алынған кіші көлемді үлгілерді сынау және термоядролық реакторлардың диагностикалық жабдықтарын реттеуге негізделген. Қондырғы түрлі арнайы міндеттерді шешуге арналған әмбебаптылыққа және жылдам қайта реттеу мүмкіндігіне бағытталған, сонымен қатар оның үлкен мүмкіндіктері бар және материалдарды кешендік жағдайларда оларға плазмалық ағынмен де және қуатты жылу жүктемесімен де әсер ету жағдайында сынауға мүмкіндік береді. *Кілт сөздер:* термоядролық реактор, құрылымдылық материалдар, вольфрам, бериллий, молибден, плазмалық кондырғылар, төмен температуралық плазма, шоқты-плазмалық разряд.

THE ROLE OF A SIMULATION BENCH WITH PLASMA- BEAM INSTALLATION IN RESEARCHES OF PLASMA-SURFACE INTERECTION

T.R. Tulenbergenov, M.K. Skakov, A.Zh. Miniyazov, I.A. Sokolov, G.K. Kayyrdy

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

In accordance with purpose of the program for ensuring scientific study efficiency, an experimental simulation bench with a plasma-beam installation was created based on IAE Branch RSE NNC RK at the KTM installation, in 2008, whose role is the testing of small samples from promising structural materials and the setting up of diagnostic equipment for thermonuclear reactors. The installation is oriented on universality and possibility of quick readjustment to solve various specialized tasks, and also has wide possibility and allows testing materials under the complex effect of plasma flow and powerful heat load on them.

Keywords: thermonuclear reactors, constructional materials, tungsten, beryllium, molybdenum, plasma installations, low-temperature plasma, beam-plasma discharge.