

МРНТИ: 29.27.15

Б.К. Рахадиллов¹, З.А. Сатбаева^{1,2*}, А.Е. Кусайнов¹, Е. Найманқұмарұлы^{1,2}¹«PlasmaScience» ЖШС,

070010, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Серикбаев к., 37

²Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті,

071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к., 20 А

*e-mail: zarinavkgu@gmail.com

ПЛАЗМАЛЫҚ БЕТТІК ӨЗАРА ӘРЕКЕТТЕСУДІ ЗЕРТТЕУГЕ АРНАЛҒАН СЫЗЫҚТЫҚ ПЛАЗМА ҚҰРЫЛҒЫСЫ

Аңдатпа: "PlasmaScience" ғылыми-өндірістік компаниясында (Өскемен қ., Қазақстан) плазманың материалдармен өзара әрекеттесуін зерттеу үшін Kaz-PSI (Kazakhstan plasma generator for Plasma surface Interactions) жаңа зертханалық желілік плазмалық қондырғы әзірленді және жасалды. Мақалада беттік-плазмалық өзара әрекеттесуді зерттеуге арналған эксперименттік қондырғының кейбір ерекшеліктері сипатталған. Желілік плазмалық қондырғының негізгі элементтері-LaB₆ катодты электронды сәулелік оқпан, плазмалық сәулелік разряд камерасы, өзара әрекеттесу камерасы, мақсатты құрылғы, электромагниттік катушкалардан тұратын электромагниттік жүйе. KAZ-PSI қондырғысы сутегі, дейтерий, гелий, аргон және азоттың үздіксіз плазмасын түрлендіруге мүмкіндік береді. Плазманың электронды тығыздығы 10^{17} - 10^{18} м⁻³ диапазонында, ал электронды температура 1-ден 20 эВ-ге дейін. Түскен иондардың энергиясы нысанаға теріс ығысуды 2 кВ-қа дейін беру арқылы реттеледі. KAZ-PSI қондырғысында алғаш рет вольфрамды гелий плазмасымен сәулелендіру бойынша эксперименттер жүргізілді. Мақалада вольфрам микструкциясының өзгеруін зерттеу бойынша жүргізілген зерттеу нәтижелері келтірілген. Гелий плазмасымен сәулеленгеннен кейін вольфрам бетінің морфологиясының өзгерісін және бетінде бетті гелий иондарымен бүрку арқылы, сондай-ақ көпіршіктердің пайда болуымен рельеф жасалатынын көрсетілген.

Түйін сөздер: плазма, сызықтық плазмалық құрылғылар, плазма бетімен өзара әрекеттесу, вакуум, KAZ-PSI.

Кіріспе. Плазманы қалыптастыратын материал (PFM) термо-ядролық плазма мен реактор дизайны арасындағы негізгі интерфейс болып табылады, сондықтан ол қатты сәулеленуге ұшырайды [1], бұл Халықаралық термоядролық эксперименттік реактор (ITER) сияқты магнитті ұстайтын термоядролық құрылғының қолжетімділігін шектеуі мүмкін. Вольфрам (W) ITER [2] диверторында негізгі PFM ретінде пайдаланылады және China Fusion Engineering Test Reactor (CFETR) [3] сияқты келесі буын құрылғыларында W-бірінші қабырғаны толық пайдалану ұсынылады: жоғары жылу өткізгіштік, жоғары балқу температурасы, төмен тритий ұстау және төмен эрозия жылдамдығы [4]. W-ды PFM ретінде қолдануды шектеу оның сынғыштығына байланысты, бұл компоненттерді өндірудің күрделілігін және жоғары температура мен жоғары жылу жүктемелері жағдайында жұмыс істегенде олардың жойылу мүмкіндігін анықтайды [5]. Икемділік және тұтқырлықтан сынғыштыққа ауысу температурасы (DBTT) сияқты механикалық қасиеттер W жұмысына әсер ететін маңызды факторлар болып табылады.

Сонымен қатар, қатты сәулелену жағдайлары, соның ішінде жоғары ағынды бөлшектердің әсері, жылу жүктемесі және нейтронның зақымдануы W механикалық қасиеттерін нашарлатады және оның DBTT жоғарылатады [6]. Қатты сәулелену жағдайында да құрылымды сақтай алатын жоғары өнімділігі бар W негізіндегі перспективалы материалдар қажет [7]. Сондықтан плазмалық-беттік-плазмалық сипаттамаларды зерттеу қазіргі заманғы термоядролық зерттеулердің негізгі бағыты болып табылады, өйткені болашақ термоядролық энергетикалық қондырғылардың өнімділігі, қызмет ету мерзімі және қауіпсіздігі осыған байланысты. Бұл зерттеулерге плазманың қабырғамен өзара әрекеттесуінің күрделі

физикалық есептерін жүйелі түрде шешуге мүмкіндік беретін, бақыланатын плазма параметрі, икемді мақсатты геометриясы және жақсы диагностикалық қол жетімділігі бар сызықтық плазмалық генераторлар маңызды үлес қосады [8-10]. Сызықтық плазмалық осцилляторлар ТЯР кандидаттық материалдарын сынау, плазмалық-беттік өзара әрекеттесудің әртүрлі аспектілері бойынша дерекқорды толықтыру үшін өте тиімді құралдар болып табылады [11]. Плазманың газ разрядты плазма генераторларымен имитациялық стендтердегі тарту материалымен өзара әрекеттесуін модельдеуге қызығушылық өткен ғасырдың сексенінші жылдарының басында пайда болды. Иондық сәулелік қондырғылардың көмегімен қатты дененің бетіндегі иондардың әсерінен пайда болатын қарапайым процестер туралы негізгі түсініктер алынды, мысалы, материалды бүрку, бөлшектерді ұстап алу және одан шағылыстыру. Барлық зақымдаушы факторлар толық көлемде біріктірілетін ITER толыққанды токамак-реакторын пайдалануға беру кезінде жаңа синергетикалық құбылыстар мен әсерлердің көріністерін күту керек, оларды зерттеу имитациялық эксперименттерде әзірленген деректер базасына және физикалық модельдерге едәуір дәрежеде сүйенуі мүмкін.

Сызықтық плазмалық генераторлардың ішінде басқарылатын электронды сәуле плазма генераторы бар сызықтық плазмалық қондырғылар [12-14] жоғары жылу ағыны сынақтарында плазмалық әсерді электронды сәулелермен біріктіруге мүмкіндік беретін құрылғылар ретінде кейбір артықшылықтарға ие. Осыған байланысты, дивертордың кандидаттық материалдарын сынау және плазмалық-беттік өзара әрекеттесуді зерттеу үшін Kaz-PSI зертханалық желілік плазмалық қондырғы әзірленіп, жасалды.

Бұл жұмыстың мақсаты әзірленген Kaz-PSI желілік плазмалық қондырғысының эксперименттік мүмкіндіктерін бағалау және осы қондырғының көмегімен гелий плазмасымен сәулеленген вольфрамды зерттеу болып табылады.

Плазмалық қондырғы параметрлері.

Әзірленген Kaz-PSI эксперименттік плазмалық қондырғысы әмбебап болып табылады және оларға плазмалық ағынның да, электронды сәуленің күшімен жасалған қуатты жылу жүктемесінің де кешенді әсер ету жағдайында материалдарды сынауға мүмкіндік береді. Плазмалық қондырғыны пайдалану жоғары жылу жүктемесі кезінде плазмамен өзара әрекеттесу жағдайында материалдардың беталысы туралы алдын ала эксперименттік деректерді қолма-қол алуға мүмкіндік береді [15]. Kaz-PSI желілік плазмалық қондырғысының жалпы көрінісі 1а суретте көрсетілген.



а)



б)

Сурет 1 – Kaz-PSI желілік плазмалық қондырғысының жалпы түрі және негізгі элементтері

Плазмалық қондырғының негізгі элементтері (сурет. 1б) электронды зеңбірек, вакуумды сенсорлар, газ айдау жүйесі, қалдық газ анализаторы, турбомолекулалық сорғы, вакуумдық өзара әрекеттесу камерасы, нысана торабы, электромагниттік катушкалардан тұратын электромагниттік жүйе болып табылады. Катодты сәулелік оқпан LaB_6 жылытылатын термиялық эмиссиялық цилиндрлік катодтан және қуыс анодтан тұрады. Катодты жылыту резистивті әдіспен жүзеге асырылады және жылыту үшін 25 кВт тұрақты ток көзі қолданылады. Катодты сәулелік оқпан сығылған ауа ағынымен салқындатылады.

Вакуумдық камераға разрядты камерасы мен өзара әрекеттесу камерасы кіреді. Бұл жағдайда разряд камерасы ұзындығы 1 м және диаметрі 0,15 м тар цилиндр түрінде, ал өзара әрекеттесу камерасы 6 ISO160 фланеці бар күрделі дизайн түрінде жасалады.

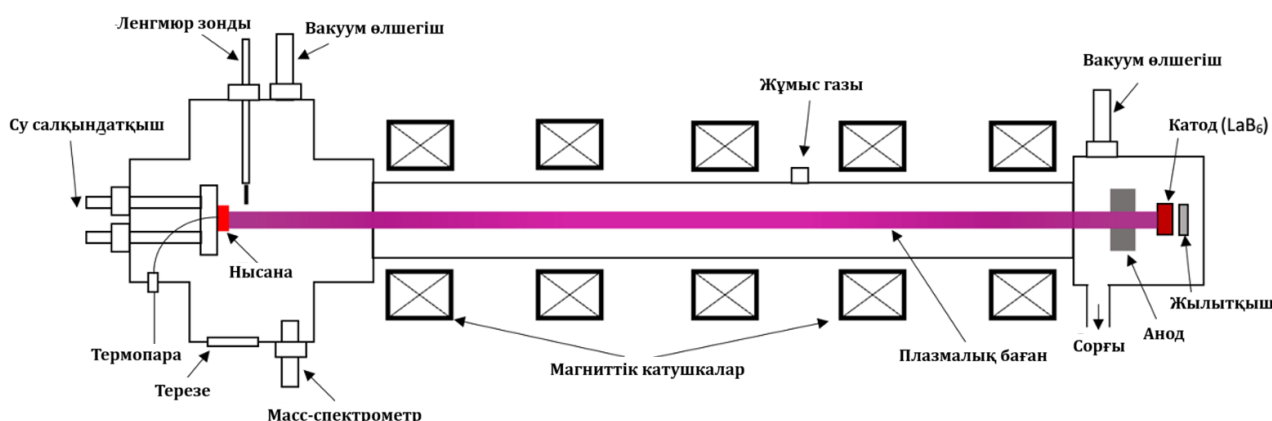
Салқындатылған нысаналық құрылғы бұл суды салқындату үшін кіріс және шығыс түтіктері бар қуыс цилиндр.

Вакуумдық айдау жүйесі камерадағы қалдық газдардың қысымын $5 \cdot 10^{-8}$ Па деңгейінде қамтамасыз етуге қабілетті форвакуум және турбомолекулалық сорғыларды қамтиды. Өдеттегі негізгі жұмыс қысымы шамамен $5 \cdot 10^{-4}$ - $5 \cdot 10^{-5}$ Па құрайды. Газды іске қосу жүйесі газды вакуумдық камераға ағынның шамасы қатаң белгіленген шағын диапазонда, тегіс реттеу мүмкіндігімен жіберуді қамтамасыз етуге арналған вакуумдық ағындардан тұрады.

Электрмен жабдықтау жүйесіне электромагниттік катушкалардың, вакуумдық айдау құралдарының, диагностиканың, салқындатудың, параметрлерді бақылаудың және нысанаға теріс потенциалды беру көзінің қоректендіру блоктары, сондай-ақ плазмалық-сәулелік разрядтың бастапқы сәулесін қалыптастыру үшін тұрақты тоқтың тікелей қыздыру блогынан және реттелетін жоғары вольтты блоктан тұратын электрондық оқпанның электрмен қоректендіру көздерінің кешені кіреді. Диагностикалық жүйеге квадруполды масспектрометр, Лангмюр зонды және пирометрлер кіреді. Орнатуды басқару жүйесі орнату түйіндерін қашықтан басқарудың компьютерлік бағдарламаларын қамтиды.

Плазмалық қондырғы плазмалық ағынның келесі параметрлерін алуды қамтамасыз етеді: разрядты камераның плазмалық сымының диаметрі 25 мм-ге дейін; қондырғы осінде 0,3 Тл-ға дейін пайда болатын магнит өрісінің кернеулігі; плазмадағы токтың шамасы 1 А-ға дейін; Сәуледегі плазманың тығыздығы 10^{18} см-ге дейін⁻³, плазманың электрондық температурасы - 20 эВ дейін.

2-суретте Kaz-PSI сызықтық плазмалық қондырғысының схемалық бейнесі көрсетілген. Плазмалық қондырғы келесідей жұмыс істейді. Электронды оқпан осьтік симметриялы электронды сәулені құрайды. Оқпан катоды вольфрам жібімен қызады. Оқпанның қуаты катодты жылыту қуатымен реттеледі. Разряд камерасына жұмыс газын беру кезінде электронды сәуле жұмыс газымен өзара әрекеттесіп, плазмалық сәулелік разряд түзеді.



Сурет 2 – Kaz-PSI сызықтық плазмалық қондырғысының схемалық бейнесі

Жұмыс газы ретінде: сутегі, дейтерий, гелий және т. Б қолданылады. Плазмалық сәулені фокустау разряд камерасында бойлық магнит өрісін тудыратын электромагниттік катушкалардың көмегімен жүзеге асырылады. Магнит өрісінің кернеулігі электромагниттік катушкалар арқылы өтетін электр тогын азайту немесе арттыру арқылы реттеледі. Плазмалық сәуле орнатылған нысанаға (сыналатын материалға) түседі плазма өзара әрекеттесу қабылдағыш камерасында орналасқан. Иондардың жоғары концентрациясын қамтамасыз ету және үзілістерді дамытпай плазмалық ағынның максималды қуатын алу үшін РСН6000-20Н қуат көзі арқылы нысанаға 2 кВ-қа дейін жеделдетілген теріс потенциал беріледі.

Плазмалық ағынның параметрлерін анықтау үшін Лангмюр зонды қолданылады. Зондты диагностикалау әдісі оның потенциалына байланысты электр өткізгіштің плазмасына орналастырылған кезде зарядталған бөлшектердің ток тығыздығын өлшеуге негізделген [16]. Өзара әрекеттесу камерасындағы ортаны бақылау «Extor inc» шығарған ХТ-100 квадруполды масс-спектрометрдің көмегімен жүзеге асырылады. Kaz-PSI қондырғысындағы плазманың негізгі параметрлері 1-кестеде көрсетілген.

Кесте 1 – Kaz-PSI қондырғысындағы плазманың негізгі параметрлері

Жұмыс режимі	Стационарлық
Жұмыс газы	He, Ar, H ₂
Магнит өрісі, Тл	0,3 дейін
Жұмыс газының қысымы, Торр	$5 \cdot 10^{-5}$
Қалдық газ қысымы, Торр	$5 \cdot 10^{-8}$
Инъекцияланатын электрондық сәуленің қуаты, кВт	5 дейін
Өндірілетін плазманың тығыздығы, м-3	10^{18} дейін
Электрондық температура, эВ	20 дейін
Жерге тұйықталған анодқа қатысты катодтағы теріс ығысу, кВ	0–2

Қазіргі уақытта токамактар мен термоядролық реакторлардың перифериялық плазмасын имитациялау үшін қолданылатын көптеген сызықтық плазмалық генераторлар бар. Алайда, бүгінгі күнге дейін жалпыға бірдей танылған және жиі келтірілген нәтижелер негізінен келесі көзқарастардан алынған: PSI-2 [17], STEP [18], PISCES-B [19], PREFACE [20], VEHICLE-1 [21], NAGDIS-II [22], Pilot-PSI [23], Magnum-PSI [24, 25], PSIEC [26]. 2-кестеде желілік плазмалық генераторлардың техникалық сипаттамалары және KAZ-PSI қондырғысының негізгі сипаттамалары желілік плазмалық құрылғылардың сипаттамаларымен салыстырылған.

Кесте 2 – Қолданыстағы желілік плазмалық қондырғылардың және KAZ-PSI плазмалық қондырғысының техникалық сипаттамалары [26].

PSI параметрлер	PSIEC [26]	PSI-2 [5]	STEP [6]	PISCES-B [7]	PREFACE [8]	VEHICLE -1 [9]	NAGDIS-II [10]	Pilot-PSI [11]	Magnum-PSI [12,13]	KAZ-PSI
Ион көзі	ыстық катод	ыстық катод	ыстық катод	рефлекторлық доға	Микро толқын	Микро толқын	Үшкір доға	каскадты доға	каскадты доға	ыстық катод
Плазма түрлері	H, D, He, Ar, N	H, D, He, Ar, N, Ne	H, D, He, Ar, N	H, D, He, Ar, N	H, D, He, Ar	H, D, He, Ar	H, D, He, Ar, N, Ne, Kr	H, D, He, Ar, N	H, D, He, Ar, N, Ne	H, D, He, Ar, N
Импульстің ұзақтығы (с)	белгіленген режим	Белгіленген режим	белгіленген режим	белгіленген режим	Белгіленген режим	Белгіленген режим	Белгіленген режим	3-10	белгіленген режим	белгіленген режим
Электрондық температура (эВ)	1-40	1-40	<40	3-51	2-6	1-5	<10	1-5	<4.7	1-20
Электрондық тығыздық (м ⁻³)	$10^{17} \cdot 10^{18}$	$10^{16} \cdot 10^{19}$	$10^{16} \cdot 10^{18}$	$10^{17} \cdot 10^{19}$	$10^{16} \cdot 10^{17}$	$10^{15} \cdot 10^{16}$	$\sim 10^{20}$	$10^{19} \cdot 10^{21}$	$\sim 10^{21}$	$10^{17} \cdot 10^{18}$
Иондық бомбалау энергиясы (eV)	<110	10-300	<150	10-500	<100	<350	10-200	1-100	1-300	1-2000
Ион ағыны (м ⁻² с ⁻¹)	$10^{21} \cdot 10^{22}$	$10^{20} \cdot 10^{23}$	$10^{20} \cdot 10^{22}$	$10^{21} \cdot 10^{23}$	$10^{19} \cdot 10^{21}$	$10^{19} \cdot 10^{20}$	$\sim 10^{23}$	$\sim 10^{25}$	$\sim 10^{25}$	$10^{21} \cdot 10^{22}$
Магнит өрісі (Т)	0.28	0.1	0.26	0.04	0.2	0.03	0.25	0.4-1.6	2.5	0.2-0,3
Разряд қуаты (kW)	0.5-6.5	<26	0.5-5	-	<2	<1	-	-	-	<5
Плазмалық бағананың диаметрі (мм)	40	60	50	50	40	70	20	15	100	25
Негізгі қысым (Па)	3×10^{-5}	-	5×10^{-5}	10^{-6}	10^{-5}	5×10^{-5}	-	-	2×10^{-4}	5×10^{-5}

2-кестені талдаудан біз әзірлеген Kaz-PSI қондырғысы көптеген сипаттамалары бойынша шетелдік аналогтардан кем түспейді және плазманың термоядролық реактор материалдарымен өзара әрекеттесуін модельдеуге арналған имитациялық стендтердің талаптарына толық сәйкес келеді деген қорытындыға келуге болады.

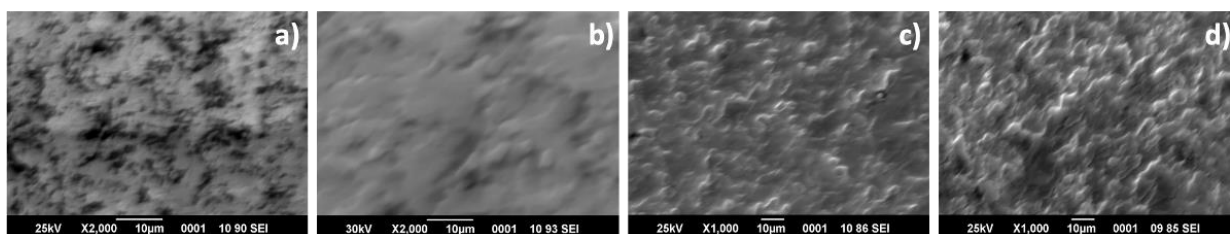
Эксперименттік процедура.

Бұл жұмыста гелий плазмасының вольфраммен өзара әрекеттесуі әзірленген қондырғының көмегімен зерттелді. Диаметрі 6,3 мм және биіктігі 5 мм цилиндр түріндегі тазалығы 99,95% вольфрам үлгілері тегістелді және жылтыратылды. Үлгілерді сәулелендіру гелий ортасында плазмалық сәулемен жүзеге асырылды. Сәулелену кезінде өзара әрекеттесу камерасындағы қысым 5×10^{-4} Торрды құрады. Вольфрам үлгілері гелий плазмасымен $T=500^\circ\text{C}$, $T=900^\circ\text{C}$ және $T=1300^\circ\text{C}$ температурада сәулеленді. Сәулелену ұзақтығы 1 сағат.

Микроқұрылымның сипаттамаларын анықтау үшін Oxford INCAEnergy (Oxford Instrument, Англия) энергия дисперсиялық спектрометрімен (ЭДС) біріктірілген JSM-6390 (Jeol, Japan) сканерлеуші электронды микроскоп (СЭМ) пайдаланылды. Рентгендік құрылымды талдау үшін Cu K α сәулеленуі бар X'PertPRO рентгендік дифрактометрі қолданылды.

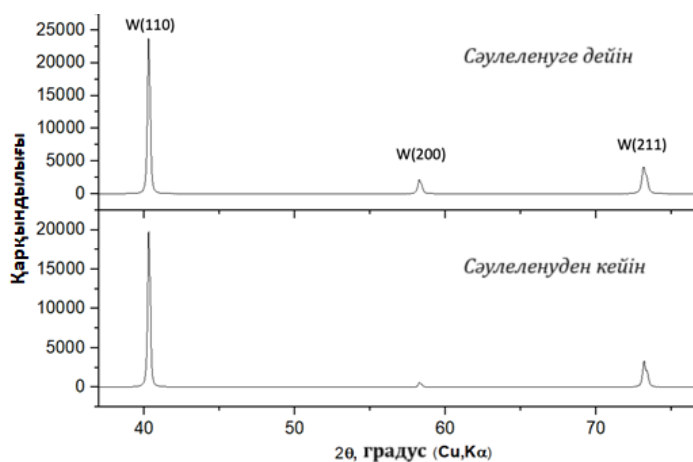
Эксперимент нәтижелері және оларды талқылау.

3-суретте вольфрам үлгілерінің (сурет 3a) және T=500°C температурада гелий плазмасымен сәулеленгеннен кейін (сурет 3b), T=900°C (сурет.3c) және T=1300°C (сурет 3d) РЭМ суреттері көрсетілген. Зерттеу нәтижелері гелий плазмасымен сәулеленгеннен кейін вольфрам бетінің морфологиясы өзгеретінін және бетінде гелий иондарымен бетті бүрку арқылы, сондай-ақ беткі қабатта гелий иондарының жиналуына байланысты рельеф пайда болатынын көрсетті және көпіршіктердің пайда болуына әкеледі. Гелий иондарымен бүрку арқылы T=500°C температурада сәулеленген вольфрам үлгісінің (сурет.3b) бетінде ойық аймақтар байқалады. Ал T=900°C и T=1300°C температурада сәулеленген вольфрам үлгілерінің бетінде қатты бедерлі морфология қалыптасады. Беттен көпіршіктер мен эрозияға ұшыраған жерлерді анықтауға болады. Көпіршіктердің пайда болу себебі гелий атомдарының жиналуына байланысты торда жоғары қысымды аймақтардың пайда болуы болып табылады, бұл материалдың жергілікті кеңеюіне әкеледі, нәтижесінде оның бетінде көпіршіктер пайда болады.



Сурет 3 – Гелий плазмасымен сәулеленуден бұрын (a) және кейін T=500 °C (b), T=900°C (c) және T=1300 °C (d) кезінде сәулеленген вольфрам үлгісінің беткі РЭМ суреттері.

Рентгендік құрылымдық фазалық талдау гелий плазмасымен сәулеленуден кейін вольфрамның фазалық құрамының өзгермейтінін көрсетті (4-сурет). Дифрактограммадан дифракциялық шыңдардың пішінінің өзгеруін байқауға болады. Дифрактограммада дифракциялық шыңдардың (110) және (211) кеңеюі байқалады. Бұл T=1300 °C сәулеленуден кейін механикалық кернеулердің пайда болуын көрсетеді. Гелий плазмасымен сәулелену кезінде вольфрамдағы механикалық кернеулер бірнеше факторлардың әсерінен пайда болуы мүмкін. Материалға гелий иондарын енгізу кезінде олар бос орындар мен интерстициалдар (interstitials) сияқты тор ақауларын тудыруы мүмкін. Бұл ақаулардың жиналуы материалда ішкі кернеулерге әкелуі мүмкін. Сондай-ақ, бұл көпіршіктердің пайда болуына байланысты болуы мүмкін. Гелий иондары материалдың ішінде гелий көпіршіктерінің (немесе қуыстардың) пайда болуына жоғары жақындыққа ие. Бұл көпіршіктер қоршаған материалға қысым жасай алады, бұл оның ісінуіне және механикалық кернеулерге әкеледі.



Сурет 4 – Гелий плазмасымен сәулеленуге дейін және одан кейінгі T=1300°C температурада сәулеленген вольфрам дифрактограммалары

Қорытынды. Осылайша, әдебиеттер мен эксперименттік нәтижелерді талдау негізінде әзірленген Kaz-PSI эксперименттік плазмалық қондырғысы көптеген сипаттамалары бойынша шетелдік аналогтардан қалыс қалмайды және плазманың термоядролық реактор материалдарымен өзара әрекеттесуін модельдеуге арналған имитациялық стендтердің талаптарына толық сәйкес келеді деп айтуға болады. Имитациялық плазмалық қондырғылардың көмегімен плазмалық-беттік өзара әрекеттесулерді зерттеу энергетикалық термоядролық реактордың материалдарын таңдауды негіздеуге, плазмалық-беттік өзара әрекеттесудің әртүрлі аспектілері бойынша мәліметтер базасын толықтыруға, есептік модельдерді тексеруге және диагностикалық әдістемелерді пысықтауға және т. б. мүмкіндік береді. Сондықтан термоядролық реакторлардың материалдарын зерттеу үшін имитациялық плазмалық қондырғыларды құру өте маңызды. Плазманы имитациялайтын қондырғылар ғалымдарға осы жағдайларды кішігірім масштабта көбейтуге және зерттеуге мүмкіндік береді, бұл материалдардың нақты термоядролық реакторда өзін қалай ұстайтынын түсінуге мүмкіндік береді.

Вольфрам микструкциясының өзгеруін зерттеу бойынша жүргізілген тәжірибелер гелий плазмасымен сәулеленгеннен кейін вольфрам бетінің морфологиясы өзгертінін және бетінде гелий иондарымен бетті бүрку арқылы, сондай-ақ беткі қабатта гелий иондарының жинақталуы арқылы рельеф пайда болатынын көрсетті және ол көпіршіктерге әкеледі. $T = 500^{\circ}\text{C}$ температурада сәулеленген вольфрам үлгісінде гелий иондарымен бүрку арқылы бетте ойық жерлер байқалады. Ал $T=900^{\circ}\text{C}$ және $T=1300^{\circ}\text{C}$ температурада сәулеленген вольфрам үлгілерінде бетінде көпіршіктердің пайда болуына және бүрку салдарынан эрозияға ұшыраған жерлердің пайда болуына байланысты қатты бедерлі морфология пайда болады. Көпіршіктердің пайда болу себебі гелий атомдарының жиналуына байланысты торда жоғары қысымды аймақтардың пайда болуы болып табылады, бұл материалдың жергілікті кеңеюіне әкеледі, нәтижесінде оның бетінде көпіршіктер пайда болады. Рентгендік құрылымдық талдау гелий плазмасымен сәулеленгеннен кейін вольфрамдағы механикалық кернеулердің пайда болуын растады.

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (Грант № AP09058568).

Әдебиеттер тізімі

1. Kallenbach, A.; Bernert, M.; Dux, R.; Casali, L.; Eich, T.; Giannone, L.; Herrmann, A.; McDermott, R.; Mlynec, A.; Müller, H.; Reimold, F.; Schweinzer, J.; Sertoli, M.; Tardini, G.; Treutterer, W.; Viezzer, E.; Wenninger, R.; Wischmeier M.; the ASDEX Upgrade Team. Impurity seeding for tokamak power exhaust: from present devices via ITER to DEMO. Plasma Physics and Controlled Fusion 2013. – 55(12), 124041. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/55/12/124041>.
2. Zinkle, S.J.; Blanchard, J.P.; Callis, R.W.; Kessel C.E.; Kurtz, R.J.; Lee, P.J.; McCarthy, K.A.; Morley, N.B.; Najmabadi, F.; Nygren, R.E.; Tynan, G.R.; Whyte, D.G.; Willms, R.S.; Wirth, B.D. Fusion materials science and technology research opportunities now and during the ITER era. Fusion Engineering and Design 2014, 89(7-8), 1579. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2014.02.048>.
3. Wan, Y.; Li, J.; Liu, Y.; Wang, X.; Chan, V.; Chen, C.; Duan, X.; Fu, P.; Gao, X.; Feng, K.; Liu, S.; Song, Y.; Weng, P.; Wan, B.; Wan, F.; Wang, H.; Wu, S.; Ye, M.; Yang, Q.; Zheng, G.; Zhuang, G.; Li, Q. Overview of the present progress and activities on the CFETR. Nuclear Fusion 2017, 57(10), 102009. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa686a>.
4. Andrea Malizia, Luigi Antonio Poggi, Jean-François Ciparisse, Riccardo Rossi, Carlo Bellecci and Pasquale Gaudio. A Review of Dangerous Dust in Fusion Reactors: from Its Creation to Its Resuspension in Case of LOCA and LOVA. Energies 2016, 9, 578; <https://doi.org/10.3390/en9080578>.
5. Chao Yin, Dmitry Terentyev, Tao Zhang, Shuhei Nogami, Steffen Antusch, Chih-Cheng Chang, Roumen H. Petrov, Thomas Pardoën, Ductile to brittle transition temperature of advanced tungsten alloys for nuclear fusion applications deduced by miniaturized three-point bending tests, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials 2021, Vol. 95, 105464. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105464>.

6. Chai Ren, Z. Zak Fang, Mark Koopman, Brady Butler, James Paramore, Scott Middlemas, Methods for improving ductility of tungsten - A review, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 2018, Volume 75, 170-183. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.04.012>.
7. Li, Y.G.; Zheng, Q.R.; Wei, L.M.; Zhang, C.G.; Zeng, Z. A review of surface damage/microstructures and their effects on hydrogen/helium retention in tungsten. *Tungsten* 2020, 2, 34-71. <https://doi.org/10.1007/s42864-020-00042-w>.
8. Miyamoto, M.; Mikami, S.; Nagashima, H.; Iijima, N.; Nishijima, D.; Doerner, R.; Yoshida, N.; Watanabe, H.; Ueda, Y.; Sagara, A. Systematic investigation of the formation behavior of helium bubbles in tungsten.. *Nuclear Materials* 2015, 463, 333–6. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.10.098>.
9. Qin, W.; Ren, F.; Doerner, R.P.; Wei, G.; Lv, Y.; Chang, S.; Tang, M.; Deng, H.; Jiang, C.; Wang, Y, Nanochannel structures in W enhance radiation tolerance. *Acta Materialia*. 2018, 153, 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.04.048>.
10. Thompson, M.; Doerner, R.; Ohno, N.; Kirby, N.; Kluth, P.; Riley, D.; Corr C. Measuring temperature effects on nano-bubble growth in tungsten with grazing incidence small angle x-ray scattering. *Nuclear Materials and Energy* 2017, 12 1294-1297. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.11.025>.
11. Rakhadilov B.K. et al. Plasma installation for research of plasma-surface interaction // *EurasianPhysicalTechnicalJournal*, 2019, Vol.16, No 2(32).
12. Yang HH, Wu ZX, Huang RJ, Huang CJ, Li SP and Li LF, Stress-induced martensitic transformation during tensile test of full-size TF conductor jacket tube at 4.2 K, CEC-ICMC 2013; 1574:48-53. <https://doi.org/10.1063/1.4860603>.
13. Yang HH, Huang CJ, Wu ZX, Huang RJ, Li LF, Analysis on the structural transformation of ITER TF conductor jacket tube, *Advanced Engineering Materials* 2014, Volume 17, Issue 3, 305-310. <https://doi.org/10.1002/adem.201400050>.
14. Yang HH, Huang CJ, Wu ZX, Huang RJ, Li LF, Analysis on the structural transformation of ITER TF conductor jacket tube, *Advanced Engineering Materials* 2014, Volume 17, Issue 3, 305-310. <https://doi.org/10.1002/adem.201400050>.
15. Hirai T., Pintsuk G., Linke J., Batilliot M. // Cracking failure study of ITER-reference tungsten grade under single pulse thermal shock loads at elevated temperatures, *Journal of Nuclear Materials* 2009, V. 390–391. P. 751-754. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2009.01.313>.
16. Rakhadilov, B.K.; Miniyaev, A.Z.; Skakov, M.K.; Sagdoldina, Z.B.; Tulenbergenov, T.R.; Sapataev, E.E. Structural Modification and Erosion of Plasma-Irradiated Tungsten and Molybdenum Surfaces. *Technical Physics* 2020, 65, 382-391. <https://doi.1134/S1063784220030202>.
17. Goebel D.M., Campbell G., Conn R.W. Plasma surface interaction experimental facility (PISCES) for materials and edge physics studies. — *J. Nucl. Mater.*, 1984, vol. 121, p. 277; [http://dx.doi.org/10.1016/0022-3115\(84\)90135-1](http://dx.doi.org/10.1016/0022-3115(84)90135-1).
18. Orlov K. E. Diagnostics of low-temperature plasma: Textbook. allowance. SPb.: Publishing House Polytechnic. University, 2005. 110 p.
19. A. Kreter, C. Brandt, A. Huber, et al., Linear plasma device PSI-2 for plasma- material interaction studies, *Fusion Sci. Technol.* 68 (2015) 8-14.
20. G.-H. Lu, L. Cheng, K. Arshad, et al., Development and optimization of STEP-A linear plasma device for plasma-material interaction studies, *Fusion Sci. Technol.* 71 (2017) 177-186.
21. Y. Hirooka, R.W. Conn, T. Sketchley, et al., A new plasma-surface interactions research facility: PISCES-B and first materials erosion experiments on bulk- boronized graphite, *J. Vacuum Sci. Technol. A* 8 (1990) 1790-1797.
22. H.-S. Zhou, H.-D. Liu, Z.-Q. An, et al., Deuterium permeation and retention in copper alloys, *J. Nucl. Mater.* 493 (2017) 398-403.
23. Y. Hirooka, H. Ohgaki, Y. Ohtsuka, et al., A new versatile facility: Vehicle-1 for innovative PFC concepts evaluation and its first experiments on hydrogen recycling from solid and liquid lithium, *J. Nucl. Mater.* 337–339 (2005) 585–589.
24. N. Ohno, D. Nishijima, S. Takamura, et al., Static and dynamic behaviour of plasma detachment in the divertor simulator experiment NAGDIS-II, *Nucl. Eng.* 41 (2001) 1055-1065.
25. G. De Temmerman, J.J. Zielinski, S. van Diepen, et al., ELM simulation experiments on Pilot-PSI using simultaneous high flux plasma and transient heat/particle source, *Nucl. Eng.* 51 (2011), 073008.

26. H.J.N. van Eck, G.R.A. Akkermans, S. Alonso van der Westen, et al., High-fluence and high-flux performance characteristics of the superconducting Magnum-PSI linear plasma facility, Fusion Eng. Des. 142 (2019) 26-32.
27. Y. Xu et al. Plasma-surface interaction experimental device: PSIEC and its first plasma exposure experiments on bulk tungsten and coatings // Fusion Engineering and Design 164 (2021) 112198.

Б.К. Рахадиллов¹, З.А. Сатбаева^{1,2*}, А.Е. Кусайнов¹, Е. Найманқұмарұлы^{1,2}

¹ТОО «PlasmaScience»,

070010, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаев, 37

²Университет имени Шакарима города Семей,

071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинка, 20 А

*e-mail: zarinavkgu@gmail.com

ЛИНЕЙНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННО-ПОВЕРХНОСТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

В научно-производственной компании «PlasmaScience» (г. Усть-Каменогорск, Казахстан) разработана и построена новая лабораторная линейная плазменная установка KAZ-PSI (Kazakhstan plasma Generator for Plasma Surface Interactions) для изучения взаимодействия плазмы с материалом. В статье описаны некоторые особенности разработанной экспериментальной установки для исследования поверхностно-плазменных взаимодействий. Основными элементами линейной плазменной установки являются электронно-лучевая пушка с катодом из LaB₆, камера плазменно-пучкового разряда, камера взаимодействия, мишенное устройство, электромагнитная система, состоящая из электромагнитных катушек. Установка KAZ-PSI позволяет генерировать непрерывную плазму водорода, дейтерия, гелия, аргона и азота. Электронная плотность плазмы находится в диапазоне порядка 10^{17} - 10^{18} м⁻³, а электронная температура - в диапазоне от 1 до 20 эВ. Энергия падающих ионов регулируется путем подачи на мишень отрицательного смещения до 2 кВ. На установке KAZ-PSI впервые были проведены эксперименты по облучению вольфрама гелиевой плазмой. В статье представлены результаты исследований, проведенных по изучению изменений вольфрамовой смеси. Результаты исследования показали, что после облучения гелиевой плазмой изменяется морфология поверхности вольфрама и на поверхности создается рельеф за счет распыления поверхности ионами гелия, а также за счет формирования блистеров.

Ключевые слова: плазма, линейная плазменная установка, плазменно-поверхностное взаимодействие, вакуум, KAZ-PSI.

B.K. Rakhadilov¹, Z.A. Satbayeva^{1,2*}, A.E. Kusainov¹, E. Naimankumaruly^{1,2}

¹«PlasmaScience» LLP,

070010, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, Serikbayev str., 37

²Shakarim University of Semey,

071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka str., 20 A

*e-mail: zarinavkgu@gmail.com

LINEAR PLASMA DEVICE FOR THE STUDY OF PLASMA-SURFACE INTERACTIONS

In the research and production company "PlasmaScience" (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan) a new laboratory linear plasma installation KAZ-PSI (Kazakhstan plasma Generator for Plasma Surface Interactions) for studying the interaction of plasma with material has been developed and built. The article describes some features of the developed experimental setup for the study of surface-plasma interactions. The main elements of the linear plasma setup are an electron-beam gun with a LaB₆ cathode, a plasma-beam discharge chamber, an interaction chamber, a target device, and an electromagnetic system consisting of electromagnetic coils. The KAZ-PSI facility allows generating continuous plasma of hydrogen, deuterium, helium, argon and nitrogen. The electron density of the plasma is in the range of the order of 10^{17} - 10^{18} m⁻³ and the electron temperature is in the range of 1

to 20 eV. The incident ion energy is controlled by applying a negative bias of up to 2 kV to the target. Experiments on irradiation of tungsten with helium plasma were carried out for the first time at the KAZ-PSI facility. The paper presents the results of studies conducted to study changes in the tungsten mixture. The results have shown that after helium plasma irradiation the morphology of tungsten surface changes and relief is created on the surface due to atomisation of the surface by helium ions, as well as due to the formation of blisters.

Key words: plasma, linear plasma unit, plasma-surface interaction, vacuum, KAZ-PSI.

Авторлар туралы мәліметтер

Б.К. Рахадиллов – PhD, қауымдастырылған профессор, жетекші ғылыми қызметкер, «PlasmaScience» ЖШС, Қазақстан Республикасы; e-mail: rakhadilovb@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5990-7123>.

З.А. Сатбаева* – PhD, аға ғылыми қызметкер, «PlasmaScience» ЖШС, Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: zarinavkgu@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7161-2686>.

А.Е. Кусайнов – инженер, «PlasmaScience» ЖШС, Қазақстан Республикасы; e-mail: arys20055@gmail.com.

Е. Найманкумарулы – ғылыми қызметкер, «PlasmaScience» ЖШС, "Техникалық физика" мамандығының докторанты, Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: naimankumarylu@gmail.com.

Сведения об авторах

Б.К. Рахадиллов – PhD, ассоциированный профессор, ведущий научный сотрудник, ТОО «PlasmaScience», Республика Казахстан; e-mail: rakhadilovb@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5990-7123>.

З.А. Сатбаева* – PhD, старший научный сотрудник ТОО «PlasmaScience», Университет имени Шакарима города Семей, Республика Казахстан; e-mail: zarinavkgu@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7161-2686>.

А.Е. Кусайнов – инженер ТОО «PlasmaScience», Республика Казахстан; e-mail: arys20055@gmail.com.

Е. Найманкумарулы – научный сотрудник ТОО «PlasmaScience», докторант специальности «Техническая физика» Университета имени Шакарима города Семей, Республика Казахстан; e-mail: naimankumarylu@gmail.com.

Information about the authors

B.K. Rakhadilov – PhD, Associate Professor, Leading Researcher, PlasmaScience LLP, Republic of Kazakhstan; e-mail: rakhadilovb@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5990-7123>.

Z.A. Satbaeva* – PhD, Senior Researcher, PlasmaScience LLP, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: zarinavkgu@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7161-2686>.

A.E. Kusainov – engineer, PlasmaScience LLP, Republic of Kazakhstan; e-mail: arys20055@gmail.com.

E. Naimankumaruly – researcher of "PlasmaScience" LLP, doctoral student of "Technical Physics" speciality of Shakarim University, Semey city, Republic of Kazakhstan; e-mail: naimankumarylu@gmail.com.

Материал 11.08.2023 ж. баспаға түсті.