**АЛДАБЕРГЕНОВА ТАМАРА МУСТАФАЕВНА**

**«Плазма және зарядталған бөлшектер ағындары арқылы сәулелендірудің әсерінен графит пен вольфрам бетінің құрылымы мен физика-механикалық қасиеттерінің деградацияға ұшырауын зерттеу»**
тақырыбында

«6D071000 – материалтану және жаңа материалдар технологиясы» мамандығы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін дайындалған диссертациясына

# АҢДАТПА

**Жұмыстың жалпы сипаттамасы.**

Бұл диссертациялық жұмыста жоғары сұрыпты екі рет қыздырылып штампталған вольфраммен реактор графитінің беттік құрылымы мен физика-механикалық қасиеттеріне импульс кезінде бөлінген энергиямен иондық сәулелену әсерінің эксперименттік және теориялық зерттеу кезінде алынған нәтижелері көрсетілген.

**Зерттеу тақырыбының өзектілігі.**

Әлемдегі энергетикалық жағдайларға байланысты өзекті мәселелерді шешу жолының ұтымды тұсы басқарылатын термоядролық синтезді іске асыру. Бүгінгі таңда ыстық плазманы тороидты формада (плазмалық тұзақ) ұстайтын ғылыми зерттеулер жүргізуге арналған термоядролық қондырғыларда, синтез жүргізуге қажет болатын плазмалық ортаның оңтайлы параметрлері алынды, дегенмен атқарылатын жұмыстар әлі көп. Сондықтан, қазіргі кезде әлем ғалымдарының, соның ішінде ядролық физика мен материалтанушы мамандардың басты күш-жігері термоядролық реакторларды (ТЯР) жасақтауға негізделген қондырғыларды жетілдіруге және олардың тиімді жұмыс параметрлерін анықтауға жұмсалып жатыр. ТЯР-ды жасақтаудағы өзекті мәселелер: камераның беткі қабырғасын суыту, асқын өткізгішті соленоидтар көмегімен ыстық плазманы тороидты камера өсіне жақын жерде ұстап тұру, қауіпті тритий элементінің жиналып қалуының алдын алу және т.б. Осыдан көретініміз материалтанымдық мәселелер басты рөлде болып тұр. Демек, бұл жердегі негізгі тапсырмалар энергия қысымы жоғары болатын ТЯР бөліктерін, яғни реактордың ішкі қабырғасы мен дивертор құрылғысының материалдарын зарядталған бөлшектер мен жоғарғы энергия ағыны әсерінен қорғау. ТЯР-дың құрамдас бөліктерінің материалдарын таңдау немесе жасақтау кезінде олардың радиацияға төзімділігіне аса жоғары мән бөліну керек, бұл да өз кезегінде түрлі ерекшеліктерге ие. ТЯР материалдары тек нейтрондық сәулеленумен жылулық ағындар әсерінен ғана емес, сонымен қатар радиациялық эффекті күшейтіп жіберетін нейтрондық және иондық сәулелену кезіндегі синергетикалық әсерден, және плазмалық тұзақтың үзілуі кезіндегі энергия бөліну әсерінен де

зақымдалады. Осыларды алдын алу үшін қолданылатын шешімдердің бірі, ТЯР-дың қабырғасының ішкі бетін арнайы материалдармен қаптау. Демек бұл қабаттың рөлі ТЯР-дың қалыпты режимдегі жұмысын қамтамасыз ету, және оның ұзақ уақыт «өмір сүруін» сақтау.

Дивертор пластиналарын таңдауға қойылатын талаптар бұдан да қатал. Дивертор пластиналарына жылулық және радиациялық әсердің басым бөлігі тиесілі, себебі олардың басты жұмысы плазмалық тұзақты термоядролық реакциялар кезінде бөлінетін бөлшектерден және қалдықтардан тазалау. Осы себепті дмвертор пластиналарына плазмалық тұзақтың үзілуі сияқты келеңсіз жағдайлардағы энергия ағынынан бөлек реактордың қалыпты жұмысы кезінде бөлінетін бейтарап және зарядталған бөлшектер мен энергия ағыны да әсер етеді. Сондықтан, бүгінгі таңда дивертор пластиналарын жасайтын материалдарды таңдау өзекті мәселелердің бірі және осы дивертор құрылғысы мен реактордың ішкі беткі қабатының материалдарына қойылатын біраз талаптар бар. Олардың негізгілері келесілер: беттің тозаңдануының төмен коэффициенті, жылуөткізгіштіктің жоғары коэффициенті, химиялық активтілігі төмен, балқу температурасы жоғары, температураға беріктілігі жоғары, жарылып кетуге беріктілігі және иілгіштігі жоғары, эрозиялық процестерге қатысты (тозаңдану және қабыршақтану) беттің радиациялық әсерлерге жоғары төзімділігі. Дивертордыдайындау үшін қолданылып жүрген материалдар – молибден, графит және сұйыққристалды материалдар, бірақ бүгінгі таңдағы ең таңдаулысы вольфрам. Себебі вольфрам жоғарыда көрсетілген ерекше қасиеттердің бірқатарына ие. Дайындау әдістеріне және оның құрамындағы лигерленген қоспаларға байланысты әртүрлі физика-механикалық қасиеттерге ие вольфрамның көптеген маркалары бар. Алайда вакуумдық ортада балқытылып дайындалған таза вольфрам қойылған талаптарды қанағаттандырады және ТЯР-дың ішкі беткі қабырғалары мен дивертор пластиналарын дайындау үшін қолдануға үлкен үміт күттіріп отыр. Осы келтірілген мәліметтерге сүйене отырып, диссертациялық жұмысты орындаудағы басты назар таза вольфрамның құрылымы мен физика-механикалық қасиеттеріне импульс кезіндегі энергия ағынымен иондық сәулелену әсерін эксперименттік зерттеуге бөлінді.

**Диссертациялық жұмыстың мақсаты**

Плазманы тороидты формада ұстауға негізделген термоядролық реакторлардың ішкі бетінің қабырғасы мен дивертор пластиналарын қорғауға қолдану үшін үлкен үміт күттіріп отырған DFW маркалы аса таза вольфрамның құрылымы мен физика-механикалық қасиеттеріне импульсті ағын энергиясы мен иондық сәулелену әсерін эксперименттік зерттеу. Бұл мақсатқа жету үшін келесі тапсырмалар мен міндеттер алға қойылды.

**Жұмыстың негізгі тапсырмалары мен міндеттері:**

- Иондық сәулелену кезіндегі вольфрам қасиеттерінің нашарлауы мен беттік тозаңдану эффектілерін зерттеу әдістерін жасақтау және бейімдеу;

- Иондық сәулелену кезіндегі DFW вольфрамы мен графиттің тозаңдану эффектілерін зерттеу;
- Импульстік энергия ағыны (импульсті электронды және плазмалық ағын) әсерінен DFW вольфрамы мен графиттің беттерінің эрозиялану (беттің жергілікті балқуы кезіндегі массасының жоғалуын өлшеу) эффектісін және олардың механикалық қасиеттерінің өзгерісін зерттеу;
- Альфа бөлшектермен және протондармен сәулеленген DFW вольфрамдағы гелий мен сутегінің жиналып қалуын және беттік құрылымның нашарлау (блистерлер-көпіршіктер және флекингтер-қабықшалар) эффектілерін зерттеу;
- Импульстік энергия ағыны әсері кезіндегі беттің эрозия эффектісін бағалауға арналған жаңа теориялық моделдерді жасақтау.

**Зерттеудің нысаны:**

ТЯР-дың ішкі бетінің қабырғасы мен дивертор пластиналарын қорғауға қолдану үшін үлкен үміт күттіріп отырған, ыстық күйде штамптау әдісімен алынған аса таза DFW вольфрамы (double forget high purity tungsten fabricated by firm Plansee AG) және ядролық техникалардың құрамдас бөліктерінің материалы болатын АРВ маркалы графит.

**Зерттеудің пәні:**

Төмен энергиялы альфа бөлшектермен сәулеленген вольфрамның беттік құрылымы мен механикалық қаиеттері және импульсті электрондық және плазмалық ағынмен сәулеленген кездегі вольфрам мен графит бетінің тозаңдануынан олардың массаларының жоғалуы.

**Зерттеу әдістері мен тәсілдері:**

- Бет морфологиясын зерттеу үшін қолданылатын оптикалық микроскоп;
- Беттің «жұқа» құрылымын зерттеу үшін қолданылатын сканерлеуші электрондық микроскоп;
- Беттің құрылымы мен кедір-бұдырлығын зерттеуге қолданылатын атомды күштік микроскоп;
- Альфа бөлшектермен сәулеленген үлдірлердегі гелидің жинақталу мөлшерін анықтауға арналған термодесорбциялық спектрометр;
- Микро- және наноқаттылықты өлшеуге арналған аспаптар;
- Ионды сәулелену әсерінен тозаңданып отырған үлдір қалыңдығын өлшеуге арналған Резерфордтық кері шағылу аспабы.

**Диссертациялық еңбектің ғылыми жаңалығы**

Диссертациялық жұмыста DFW маркалы аса таза вольфраммен графиттің құрылымы мен физика-механикалық қасиеттеріне импульсті ағын энергиясының, сонымен қатар гелий мен сутегі иондарымен сәулелендіру әсерін эксперименттік зерттеу нәтижелері көрсетілген.

- Алғаш рет, вольфрамның тозаңдану коэффициентінің аргон иондары әсерінің флюенсінен (арнайы анықтама беру керек) тәуелділігі экспериментте

өлшенді. Иондардың флюенсінің жоғарылауы кезінде тозаңдану коэффициентінің үлкейетіндігі көрсетілді;

- Алғаш рет, қуатты импульсті электрондық шоқпен атқылу кезінде DFW маркалы вольфрамның массасының жоғалуы эксперименттік өлшенді. Бірдей эксперимент шарттарында вольфрамның масасының жоғалуы молибдендікінен екі есе аз болатындығы көрсетілді.

- Импульстік энергия ағыны әсері кезіндегі масса жоғалтуды бағалауға арналған теориялық модель жасақталды. Бұл модельдің ерекшелігі фазалық түрленуді (балқу және булану), сонымен қатар сәулеленген беттің жылу шығаруын есепке ала алады. Осылайша импульсті электрондық шоқпен сәулеленген DFW маркалы вольфрамның, графиттің және молибденнің масса жоғалтуы теориялық түрде есептелді және эксперимент нәтижелерімен жақсы үйлесімде болатыны көрсетілді.

- Төмен энергиялы альфа бөлшектермен жоғары флюенстерге дейін сәулеленген DFW вольфрамы бетінде блистерлер мен қабыршақтар пайда болатыны экспериментте зерттелді. $1.5\times10^{18}$ $см^{-2}$ сәулелену флюенсі кезінде бетте блистерлердің, яғни гелимен толырылған көпіршіктер бар екені, сонымен қатар олардың кейбір бөлігі жарылып кеткені, яғни беттің қабыршақтанып қалғаны көрсетілді.

- Төмен энергиялы альфа бөлшектермен сәулелену кезіндегі DFW вольфрамға гелидің десорбциялану кинетикасын зерттеуде алынған нәтижелерге сүйеніп алғаш рет гелиді табу формасы анықталды және блистерлер эволюциясымен вольфрамның беріктілік қасиеттері арасындағы байланыс анықталды.

**Қорғауға шығарылған негізгі ғылыми тұжырымдар:**

1. Энергиясы 100 кэВ аргон иондарының флюенсі $5\cdot10^{+17}$ $см^{-2}$ –ден $1\cdot10^{+18}$ $см^{-2}$ –ге дейін артқан сайын вольфрамның тозаңдалу коэффициенті 20%-ға артатыны эксперименттті түрде анықталды. Екі фактор сәулелендіру флюенсімен бірге тозаңдалу коэффициентінің де артуының себебі болып табылады. Біріншісі – флюенстің артуымен үзілген байланыстардың көбеюі есебінен, атомдардың кристалл бетімен байланысу энергиясының кемуі. Екіншісі – атқылаушы иондардың жүгіру жолы аймағында радиациялық зақымдардың артуы. Радиациялық ақаулар түсуші иондардың арналану ықтималдығын төмендетіп, бет үстіне жақын аймақтағы атом-атомдық соқтығысулардың каскадтарын шенемдеуге жағдай жасайды.

2. Энергия ағыны $J = 4\times10^{11}$ $Вт\times м^{-2}$, ұзақтығы $2 \times 10^{-6}$ с импульстік электрондық шоқпен DFW вольфрамын сәулелендіру кезінде ауданы 2 $см^2$ сәулелендіру бетінде 1.6 мг масса шығынына әкелетіні эксперименттті түрде өлшенді. Масса шығынының шамасы сәулелендірілетін вольфрамның жылуөткізгіштігімен және сублимация энергиясымен анықталады, олар балқытылған аймақтан буланып шыққан атомдардың санын анықтайды. Жылулық сәулелену мен фазалық түрлендірулер, яғни сұйық фазаның түзілуі ескерілетін модификацияланған теориялық модель бойынша масса шығынын есептеу нәтижелері эксперименттті түрде өлшенген масса шығынымен үйлеседі.

3. Энергиясы 45 кэВ альфа-бөлшектермен $1.5 \cdot 10^{+18}$ $см^{-2}$ флюенске дейін сеулелендіру кезінде ~ 100 нм тереңдікке дейінгі беттік қабатта гелимен толтырылғын көпіршіктер, блистерлер және қабыршақтар пайда болуына әкеледі. Беттік қабаттағы гелимен толтырылған көпіршіктердің ~ 25-30% имплантталған гелий екені анықталды. Имплантталған гелидің басым бөлігі >1100 ºС жоғары температураға дейін орнықты болатын және беттік қабат аймақтарын беріктендіретін гелий-ваканттық жерлерде орналасқан.

4. Ұзақтықтары 2 мкс және энергия тығыздықтары 10 $Дж/см^2$ графиттің саулеленудегі аумагы 2 $см^2$ болатын 13 импульсті плазмалық ағынмен әсерлескен кезде графит массасының 4 мг – ын жоғалтатындығы экспериментте анықталды. Осы параметрлер үшін зат массасын жоғалту жаңадан жасақталған теориялық модель көмегімен есептелінді және эксперимент нәтижелерімен жақсы үйлесімдікте жатқаны көрсетілді.

**Ғылыми-зерттеу бағдарлама жоспарының диссертациялық жұмыс тақырыбымен байланысы.**

Диссертациялық жұмыс Қазақстан Республикасы энергетика министрлігінің «Атом энергетикасы саласындағы технологиялық сипаттағы қолданбалы ғылыми зерттеулер» 105-ші қосалқы бағдарламасының, «Қазақстандық материалтанымдық токамактағы (ҚМТ) эксперименттік зерттеулерді ғылыми-техникалық қамтамасыздандыру» іс-шарасының 2015 – 2017 жылдардағы (Мемлекеттік тіркеу №0115РК02433 және 2018 жылдағы мемлекеттік тіркеу №0118РК01184) «ТЯР қондырғыларының ішкі беттік қабаты ретінде болашақта қолданылатын материалдарға зарядталған бөлшектермен плазманың жылулық эрозиясын, соның нәтижесінде беттік қабатта газдық қоспалардың жинақталуын және механикалық қасиеттерінің өзгеруін зерттеу» атты ғылыми жобасы аясында орындалды.

**Автордың жеке үлесі**

Автор, Т.М. Алдабергенова диссертациялық жұмысты орындау кезінде диссертациялық жұмыс тапсырмаларын анықтауға және қоюға, эксперименттік зерттеулерді орындауға, қолданбалы және теориялық материалтану лабораториясының қызметкерлерімен бірге эрозия моделін жасақтауға, жұмыс нәтижелерін талдауға және ғылыми мақалаларды басылымға дайындауға жеке үлес қосты.

**Жұмыстың ғылыми және практикалық құндылығы**

Жұмыс барысында орындалған ғылыми зерттеулердің нәтижелері маңызды ғылыми және практикалық құндылықтарға ие:

- Жұмыс барысында алынған плазма ағынымен, импульсті энергия бөлінуімен және зарядталған бөлшектермен әсерлескен DFW вольфрамның құрылымының нашарлауымен физика-механикалық қасиеттерін кешенді зерттеудің нәтижелері негізінде DFW вольфрамды МЭТР (ИТЭР) құрылғысымен энергетикалық ТЯР-дың дивертор материалы ретінде қолдануға болатыны ұсынылды.

- Плазма ағынымен және зарядтарған бөлшектермен әсерлесу кезінде материалдардың қасиеттерінің нашарлау деңгейі мен массаларын жоғалтуды есептеуге арналып жасақталған жаңа теориялық модель реакторлардың ішкі беткі қабырғасын қорғауға және диверторлық құрылғыларды дайындауға қолдануға ұсынылатын материалдарды тез сұрыптауға және таңдауға мүмкіндік береді. Бұл теориялық модельді сонымен қатар материалдардың эксплуатациялық қасиеттерін жақсарту үшін импульсті энергия ағынымен өңдеу кезінде олардың беткі қасиеттерін алдын-ала анықтауға, болжауға қолдануға болады.

- Резерфордтық кері шағылу әдісімен тозаңданған қабат қалыңдығын анықтауға негізделіп жаңадан жасақталған металдарды тозаңдандыру коэффициентін экспериментте өлшеу әдісі, көптеген металдар үшін, соның ішінде комозитті көп компонентті материалдар үшін де қолдануға жарамды.

- Жасақталған эксперименттік әдістемеліктер КТМ Қазақстандық реакторын қолдана отырып көптеген материалтанымдық есептерді тиімді шешуге биімделеді және үлесін қосады.

**Жұмыста алынған нәтижелер мен жасалған қорытындылардың сенімділік деңгейі және түсіндірмесі**

Диссертациялық жұмыста алынған нәтижелердің сенімділік деңгейі зерттеулердің мұқият тексеріліп ұсынылған эксперименттік әдістер мен әдістемеліктерді дұрыс пайдаланылуымен және қазіргі заманғы қондырғылардың қолданылуымен сипатталады. Жаңадан жасақталған теориялық модельдің дұрыстығы, ол жерде алынған нәтижелердің әртүрлі материалдар үшін алынған эксперименттік нәтижелермен салыстырып тексеріу арқылы дәлелденді. Жұмыс қорытындыларының түсіндірмесінің дұрыстығы радиациялық материалтану және қатты дене физикасының іргелі ережелерімен және заңдарымен сәйкестігінде. Диссертациялық жұмыс нәтижелері жергілікті және халықаралық конференциялар мен семинарларда кеңінен талқыланды, сонымен қатар жоғары дәрежелі халықаралық және БҒСБК (Білім және ғылым саласындағы бақылау комитеті) ұсынған Отандық жорналдарда жарияланды.

**Зерттеу нәтижелерін сынақтан өткізу және практикаға ендіру:**

Диссертациялық жұмыс нәтижелері төменде көрсетілген конференцияларда баяндалды және ғылыми мақалалар түрінде жаряланды:

**Отандық және шетелдік халықаралық конференциялар:**

- «Heavy Ion Fusion» атты 21-ші Халықаралық симпозиум (Астана қ., Қазақстан, 18-22 маусым 2016 ж.),

- «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» атты Халықаралық ғылыми конференция (Томск, Ресей, 19-23 қыркүйек 2016 ж.)

- «Фараби Әлемі» атты студенттер мен жас ғалымдардың Халықаралық конференциясы (Алматы, Қазақстан, 9-12 сәуір 2018 ж.)

- Фараби Әлемі» атты студенттер мен жас ғалымдардың Халықаралық конференциясы (Алматы, Қазақстан, 10-13 сәуір 2017 ж.)

- «Ядерная и радиационная физика, Ядерная наука и ее применение» атты XI-ші Халықаралық ғылыми конференциясы және VIII-ші Евразиялық конференциясы (Алматы, Қазақстан, 12-15 қыркүйек 2017 ж.)

- «Implantation and other applications of ions and electrons (ION)» атты XII-ші Халықаралық конференциясы (Казимиш Дольна, Польша, 18-21 маусым 2018 ж.)

- «Физика твердого тела, функциональные материалы и новые технологии» атты XIV-ші Халықаралық ғылыми конференциясы (Бішке, Қырғызстан, 1-5 тамыз 2018 ж.)

**Ғылыми мақалалар**

Диссертациялық жұмыс тақырыбы бойынша 15 ғылыми мақала жарияланып басылып шықты, оның 8-і халықаралық конференцияларда тезис түрінде, 4-і философия докторы (PhD) ғылыми дәрежесін алу үшін БҒСБК-мен бекітілген жорналдарда, екі мақала Web of Science мәліметтер базасына кіретін және біс мақала Web of Science мәліметтер базасына кіретін импакт-факторлы жорналдарды жарияланды.

**Диссертациялық жұмыстың құрылымы және көлемі:** Диссертациялық жұмыс кіріспеден, үш бөлімнен, қорытындыдан және пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады. Жұмыс көлемі 102 беттік компьютерлік баспа мәтіннен тұрады, оның ішінде 66 сурет, 44 кесте және 106 пайдаланылған әдебиеттер саны бар.

Бірінші бөлімде иондаушы сәулелер мен энергия ағындарынан қорғау кезінде материалдарды таңдауды шектейтін негізгі факторларға қатысты жұмыстарға терең талдау жасалып әдеби шолу жүргізілген. Осы бөлімнің соңында диссертациялық жұмыстың негізгі тапсырмалары көрсетілген.

Екінші бөлімде диссертациялық жұмысты орындау барысында қолданылған негізгі әдістер келтірілген. Оның ішінде басты назар беттің тозаңдану коэффициентін анықтаумен материалдың қаттылығын беттен тереңдігі бойынша өлшеу әдістеріне бөлінді.

Үшінші бөлімде импульсті энергия ағындарының және зарядталған бөлшектер шоқтарының DFW вольфрам мен графиттің құрылымы мен қасиеттеріне әсерін кешенді зерттеу кезіндегі эксперименттік және есептелінген нәтижелері ұсынылған.