

КАМШАТ АЗАТҚЫЗЫ БЕДЕЛЬБЕКОВАНЫҢ
6D071000 – «Материалтану және жаңа материалдар технологиясы»
мамандығы бойынша философия докторы (PhD)
дәрежесін алу үшін ұсынылған
«КОНСТРУКЦИЯЛЫҚ РЕАКТОРЛЫҚ МАТЕРИАЛДАРДЫҢ
ЖОҒАРЫ ДОЗАЛЫ РАДИАЦИЯЛЫҚ ЗАҚЫМДАЛУЫН ЗОНДТЫ
МЕССБАУЭРЛІК АТОМДАРЫМЕН МОДЕЛДЕУ» тақырыбындағы
диссертациялық жұмысына
АҢДАТПА

Шешілетін ғылыми немесе ғылыми-техникалық мәселенің (міндеттердің) қазіргі жағдайын бағалау

Қазіргі уақытта атом энергетикасын айтарлықтай жаңғырту және баяу нейтронды реакторлардан жылдам нейтронды реакторларға көшу жүріп жатыр, олардың бүлдіруші дозаларының атомға ығысуы (сна) 400 көп болады. Осыған байланысты сенімділігі жоғарылаған перспективті реакторлық материалдарды әзірлеу, және дәстүрлі ферриттік-мартенситті болаттарды аустениттік топтағы болаттарға ауыстыру қажет болады. Мұндай болаттар аз түсірілген радиоактивтілікпен, әлсіз бос орынды және газды ісінуімен, жылжымалылыққа және жоғары температуралық омырылуға жоғары төзімділікпен сипатталады.

Ядролық және термоядролық энергетикаға біртіндеп көшу радиациялық зақымдануға төзімді перспективті реакторлық материалдарды әзірлеуге алып келеді, олардың құрылымы мен қасиеттерін басқару радиациялық материалтану саласының маңызды ғылыми-техникалық міндеті болып табылады. Мұндай жұмыстарды жүргізудің күрделілігі реакторда пайдаланылған материалдардың түсірілген радиоактивтілігімен және бүлдіруші сәулелендіру дозасының ұзақ жинақталу кезеңімен (бірнеше жыл) байланысты. Оны сәтті шешу үшін сәулелендірілген материалдармен жасалған эксперименттерді әдістемелік тұрғыдан қамтамасыз етуде осы кемшіліктері жоқ, түбегейлі жаңа тәсіл талап етіледі.

Перспективті реакторлық материалдарды әзірлеуде ауыр металдардың иондарымен имитациялық сәулелендіру әдісі басым позицияларды алады, бұл ресурстық сынақтау мерзімін қысқартады және эксперименттердің радиациялық қауіпсіздігін қамтамасыз етеді. Мессбауэрлік темір атомдарымен сәулелендірудің бүлдірмейтін әдісі оңтайлы мүмкіндіктерге ие. Бұл бір уақытта материалдардың радиациялық зақымдануын тіркеп қана қоймай, оларды кристалдық тор деңгейінде моделдеуге (жасауға) мүмкіндік береді.

Тақырыпты әзірлеу үшін негіздеме және бастапқы деректер

Дамыған елдердің даму тәжірибесі көрсеткендей, олардың өсіп келе жатқан энергия тұтынуын тек ядролық және термоядролық энергетика қамтамасыз ете алады. Қазақстан Республикасында атом электр станциясын салу мәселесі – бұл уақыт талабы және оған барлық алғышарттар бар. АЭХА-

нің (МАГАТЭ) деректері бойынша, елдің уран қоры 900 мың тоннаға бағаланған. Бұдан басқа, Ақтауда жиырма жылдан астам уақыт жұмыс істеп келе жатқан жылдам нейтронды реакторы бар атом электр станциясын пайдалану тәжірибесі.

Осы ғылыми-зерттеу жұмысын өткізу қажеттілігінің негіздемесі

Жоғары дозалы сәулелендірумен атом реакторларының қуатын арттыру жұмысқа жарамдылығы мен пайдалану сенімділігі жоғарылатылған реакторлық материалдарды жасауды талап етеді. Жұмыс температурасының кең ауқымында атомға ығысуы 200 аса болатын зақымдану деңгейінде жұмыс істеуге жарамды аустениттік топтағы хром-никельді болаттарға басымдық берілетін Халықаралық бағдарламалар бар. Бүлдіруші дозаларды жинақтауды қарқындату, ресурстық сынақтардың мерзімін қысқарту және ғылыми эксперименттерді өткізу қауіпсіздігін қамтамасыз ету қажеттілігі осы ғылыми-зерттеу жұмысының негізгі мазмұнын құрайды. Атом энергетикасын дамытудағы әлемдік тенденцияларды ескере отырып, перспективті реакторлық материалдарды әзірлеуде және қолда барын жетілдірілуге қатысуды кеңейту Қазақстан үшін орынды болып табылады.

Әзірлеменің жоспарланған ғылыми-техникалық деңгейі туралы мәлімет

Ядролық жанармайдың ыдырауы кезіндегі бүлінуге ұқсас типтегі бүлінуді тудыратын сәулелендірудің тиімді және қауіпсіз тәсілдерін іздеу және пысықтау ғылыми-техникалық әзірлеменің жоспарланған деңгейін анықтайды. Осыған жағынан үдеткіште металдар немесе инертті газдар иондарының жоғары энергетикалық ағындарымен материалдарды сәулелендіру арқылы жүргізілетін имитациялық сынақтар перспективті болып табылады. Жұмыста темірдің жоғары дозалы мессбауэрлік атомдарын қолдану бір уақытта екі міндетті шешуге мүмкіндік береді – радиациялық зақымдануды модельдеу (құру) және олардың түріне талдау жүргізу.

Диссертациялық жұмысты метрологиялық қамтамасыз ету туралы мәлімет

Жұмысты орындау кезеңінде эксперименттік зерттеулер «Өлшем бірлігін қамтамасыз ету туралы заңға» сәйкес келетін және мемлекеттік тексеруден өткен жабдықтар мен аспаптарда жүргізілді. Барлық жағдайда ӨЖ Халықаралық бірліктер жүйесінің метрологиялық ережелері мен нормаларына сәйкес келетін өлшем бірліктері қолданылды.

Ғылыми-зерттеу жұмыстарын жүргізу үшін келесі жабдықтар пайдаланылды: MS-110Em мессбауэрлік спектрометр; BRUKER (Германия) фирмасының D 8 ADVANCE дифрактометр; «Наноскан-компакт» нано-қаттылық өлшегіш (Ресей); LYRA3 TESCAN сканерлеуші электронды растрлық микроскоп (Чехия).

Пайдаланылатын жабдықтар мен аспаптар тиісті бақылау ұйымдарында сертификатталған және құжаттамалық расталған («ҰлтССО» АҚ Алматы филиалы, аккредиттеу аттестатының нөмірі: 2015 жылғы 4 мамырдағы KZ.P.02.0687).

Тақырыптың өзектілігі

Тақырыптың өзектілігі әлемдік державалардың энергетикалық саясатының өзгеруі мен бүлдіруші дозалары жоғарырақ және конструкциялық материалдардың пайдалану шарттары едәуір қатаң болатын ядролық және термоядролық энергетикаға біртіндеп көшуге байланысты. Жаңа буындағы реакторлық материалдарға көшу қажеттілігі ядролық ыдырау кезіндегідей типтегі радиациялық зақымдануды моделдейтін тиімді және қауіпсіз сәулелендіру әдістерін іздеуді талап етеді. Белгілі бір баламасы әртүрлі типтегі үдеткіштерде алынған ауыр металл иондарының жоғары дозалы ағындарын пайдалана отырып жүргізілетін имитациялық сынақтар бола алады.

Тақырыптың жаңалығы

^{57}Fe мессбауэрлік атомдарын пайдалана отырып, сәулелендірудің имитациялық әдістемесін әзірлеу ауыр элементтер үдеткішінде реакторлық материалдардағы радиациялық зақымдануды моделдеуге мүмкіндік береді. Бұл әдістеме ядролық жанармайдың ыдырауы кезіндегі бүлінуге ұқсас типтегі радиациялық зақымдануды құруға, олардың түрін бірегейлеуге, сондай-ақ түсірілетін радиоактивтілікті болдырмауға, бүлдіруші дозаларды жинақтау мерзімін қысқартуға және сәулелендірудің сәулелендірілген материалдардың құрылымдық-фазалық күйі мен қасиеттеріне әсерін анықтауға мүмкіндік береді. Радиациялық зақымданулар туралы объективті ақпарат алу үшін модельдеу режимдерін таңдау және пысықтау зерттеу тақырыбының жаңалығы мен ғылыми-практикалық маңыздылығын сипаттайды.

Бұл жұмыстың басқа ғылыми-зерттеу жұмыстарымен байланысы

Диссертациялық жұмыс «Қазақстан Республикасында атом энергетикасын дамыту» ғылыми-техникалық бағдарламасы (Грант № 0381/ГҚ4) шеңберінде М.В. Ломоносов атындағы Мәскеу мемлекеттік университетімен (ЯФГЗИ атомдық ядро физикасы бөлімі) бірлесе отырып Қазақстан Республикасының Ядролық физика институты РМК ядролық гамма-резонанстық спектроскопия зертханасында жүргізілді.

Зерттеу мақсаты: зарядталған бөлшектер үдеткіштерінде ^{57}Fe жоғары дозалы зондтық атомдарымен реакторлық материалдарды сәулелендіру кезінде радиациялық зақымдануларды модельдеудің имитациялық әдісін әзірлеу.

Зерттеу объектілері: молибден және тантал фольгалары, аустениттік топтағы тот баспайтын конструкциялық болаттар – 12X18H10T, AISI 304 және AISI 316.

Зерттеу жұмысының мәні: радиациялық зақымдану түріне ^{57}Fe ауыр иондарымен жоғары дозалы сәулелендірудің әсері, атомдық реактордың белсенді аймағында пайдаланылатын молибден мен танталдың және 12X18H10T, AISI 304 және AISI 316 нақты конструкциялық болаттардың құрылымдық-фазалық күйі мен қасиеттері.

Зерттеу міндеттері, олардың жалпы ғылыми-зерттеу жұмыстарын орындаудағы орны

- 1) Жұқа фольгалар түріндегі үш 12X18H10T, AISI 304 және AISI 316 маркалы таза металдар мен болаттардың тәжірибелік үлгілерін дайындау және 1 МэВ энергиялы ^{57}Fe темір иондарымен және 5×10^{16} ион/см² дозасымен сәулелендіруді жүргізу;
- 2) SRIM-2008 программасы бойынша ^{57}Fe темір иондарымен сәулелендірудің өзара әрекеттесуінің негізгі сипаттамаларын алу және есептеу, молибден мен танталдың кристалдық торларында олардың құрылымдық-бағдарлық орналасуын анықтау, пайда болған ақаулардың мөлшерін есептеу;
- 3) Болаттың барлық маркаларының мессбауэрлік спектрлерін алу және өңдеу, рентгенографиялық және электронографиялық зерттеулер жүргізу, алынған деректерді өңдеу, талдау, негізделген қорытындылар жасау;
- 4) бастапқы және жасатылған күйдегі наноқаттылықты өлшеу, индентордың бату тереңдігіне байланысты болаттың әртүрлі түрлерінің радиациялық беріктілік шамасына жай-күйдің әсерін бағалау.

Қойылған міндеттерді шешу ядролық жанармайдың ыдырауы кезінде пайда болатын ұқсас радиациялық зақымдануларды модельдеу үшін ^{57}Fe темір иондарының жоғары дозалы ағынымен имитациялық сәулелендіру әдісін меңгеріп алуға мүмкіндік береді.

Зерттеудің әдістемелік базасы

Мәселені шешу және алға қойған мақсатқа жету үшін келесі әдістер мен зерттеу әдістемелері пайдаланылды:

- УКП-2-1 қайта зарядтау ауыр иондар үдеткішінде ^{57}Fe иондарымен жоғары дозалы сәулелендіру;
- электрондық арна (КЭМС) бойынша және жұтылу режимінде конверсиялық мессбауэрлік спектроскопиясы (МС);
- STRIM-2008 программасының компьютерлік пакеті
- SpectrRelax программасының компьютерлік пакеті
- EXAFS– спектроскопиясы.

Қорғауға шығарылатын ережелер

– SRIM-2008 программасы бойынша темірдің имплантталған иондарының (проективтік жүгіріс, бос орындар/иондар саны, атомға ығысу саны) өзара әрекеттесуін және олардың молибден мен тантал қасиеттеріне тәуелділігін модельдеу нәтижелері;

– ^{57}Fe ядроларында өткізуге конверсия электрондарының (КЭМС) және МС мессбауэрлік спектрлерінің құрылымы, молибден мен тантал матрицаларының күйі мен ақаулығын анықтау бойынша рентгендік дифрактометрия және EXAFS спектроскопиясының нәтижелері;

– 12X18H10T, AISI 316, AISI 304 тот баспайтын аустениттік өнеркәсіптік болаттардағы ^{57}Fe ядроларында конверсиялау электрондарының мессбауэрлік спектрінің (КЭМС) құрылымы никельдің құрамына байланысты;

– сәулелендіруге дейін, кейін және күйдіргеннен кейін «мартенсит кернеуі» пайда болуы сияқты әртүрлі күйдегі – 12X18H10T, AISI316, AISI304 болаттарын рентгендік дифрактометрияда және сканерлеуші электрондық микроскопияда зерттеу нәтижелері;

– инденторды енгізу тереңдігіне байланысты әртүрлі күйдегі 12X18H10T, AISI316, AISI304 болаттарының радиациялық беріктілік шамасын анықтау үшін бетүсті қабаттарын электрондық микроскопиямен зерттеу және наноқаттылықты өлшеу нәтижелері.

Негізгі нәтижелер

– Таза металдар (молибден, тантал) фольгасы және әртүрлі маркалы 12X18H10T, AISI 316 және AISI 304 аустениттік болаттар дайындалған және ауыр иондар үдеткішінде ^{57}Fe темірдің мессбауэрлік атомдарының жоғары дозалы ағынымен сәулелендірілген.

– Мессбауэрлік спектрлері алынған және темірдің имплантталған иондарының молибден, тантал және әртүрлі маркалы аустениттік болаттардың кристалдық торларымен өзара әрекеттесуінің негізгі сипаттамалары есептелген. Пайда болған радиациялық ақаулар мен жаңа фазалардың сәулелендіруі арасындағы сандық арақатынастар анықталды.

– Алғаш рет темірдің имплантталған иондарының құрылымдық-бағдарлық орналасуы анықталды және молибдендегі алмастыру мен танталға енгізу қатты ерітінділер түріндегі радиациялық зақымдану түрі теңестірілді. Алғаш рет бұл процесс сәулелендірілумен қоздырылған бастапқы қайта кристалдану түріндегі түйіршікті қатты ұсақтаумен бірге жүретіні анықталды.

– Үш маркадағы аустениттік болаттың кристалдық торларына темір иондарын импланттау (енгізу) кезінде сәулелендірілумен қоздырылған ақаулық «мартенсит кернеу» пайда болуымен $\gamma \rightarrow \alpha$ -түрлену дамиды, оның тұрақтылығы мен мөлшері никельдің құрамымен шектелетіні анықталды.

– Барлық зерттелген болаттар радиациялық беріктікке ұшырайтындығы көрсетілген (наноқаттылықтың шамасы бойынша), олар реактордың белсенді аймағының жұмыс температурасына жақын күйдіру температурасында никель мөлшері жоғары болаттарда толығымен алынып тасталады, бұл олардың пайдалану қасиеттерінің жоғары тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

Алынған нәтижелер негізінде 1 МэВ энергиялы ^{57}Fe иондарының жоғары дозалы ағынымен сәулелендіру атом реакторларында радиоактивті ыдырау кезіндегі пайда болатын сол типтегі радиациялық зақымдануларды (бос орындар, түйінаралық және ауыстырылған атомдар) реакторлық материалдарда жасауға (модельдеуге), сондай-ақ темір иондарын олардың кристалдық торларына импланттау арқылы құрылымдық-фазалық түрлендірулерді бастауға мүмкіндік береді деген қорытынды жасауға болады.

Зерттеудің тәжірибелік маңыздылығы

Ауыр иондардың жоғары дозалы ағынымен сәулелендіруді пайдалану арқылы алынған зерттеу нәтижелері реакторлық конструкциялық материалдарға радиациялық әсер етудің имитациялық әдістерін әзірлеу және жаңғырту үшін қолданылады. Әдістің тиімділігі және қауіпсіздігі радиоактивтілік түсірілмей радиациялық зақымданулардың жоғары дозасын алумен және реактордың белсенді аймағында пайдаланылған материалдармен салыстырғанда оның аз уақытта жинақталуымен

дәлелденеді. Темірдің мессбауэрлік атомдарымен сәулелендіру әмбебап болып табылады және оны болаттар үшін ғана емес, сонымен қатар басқа негіздегі материалдар үшін де пайдалануға болады.

Жұмыстың тәжірибелік маңыздылығын көрсететін маңызды фактор реактордың белсенді аймағының конструкциялық материалдарының сенімділігі мен жұмысқа жарамдылығын бағалау үшін ресурстық сынақтар мерзімінің едәуір қысқаруы болып табылады. Сәулелендірудің жылдам әдісі (айлардың орнына сағат) ядролық қондырғылардың қауіпсіз жұмысын қамтамасыз ету үшін олардың жарамдылығы мәселесін шешуді жеңілдетеді, сәулелендірудің бүлдіруші жоғары дозалары кезіндегі пайдалану сипаттамаларын әділдікпен бағалауға және әрекетін болжауға мүмкіндік береді.

Алынған нәтижелердің тәжірибелік маңыздылығы, сонымен қатар баяу балқитын молибден мен тантал мысалында коррозиялық бұзылуға тиімді қарсы тұратын жоғары дисперстік құрылымның пайда болу мүмкіндігі суреттермен сипатталғанында. Осы себепті оларды реактордың бірінші контурында металл жылу тасымалдағышқа арналған құбыр элементтері ретінде пайдалануға болады. Құрамында γ - тұрақтандырушы никель мөлшері жоғары аустениттік топтағы болаттардың жоғары дозалы сәулелендіруден туындаған радиациялық зақымдануларға неғұрлым төзімді болуы олардың сөзсіз артықшылығы бар екенін көрсетеді. Қосымша қоспалауыш элементі ретінде AISI316 болаттың мысалында көрсетілгендей молибденді қолданған жөн болып табылады.

Жұмысты мақұлдау

Диссертацияның негізгі нәтижелері отандық және шетелдік халықаралық конференцияларда баяндалды және талқыланды: International conference on the applications of the Mössbauer effect, in September 03-08, 2017, Saint-Petersburg, Russia; International scientific forum «Nuclear science and technologies». September 12-15, 2017, Almaty, Republic of Kazakhstan; «Мессбауэрлік спектроскопия және оны қолдану» атты XV Халықаралық конференциясы, 10-16 қыркүйек, Сочи, Ресей; «Жаңа материалдар және перспективті технологиялар» халықаралық қатысуымен төртінші Пәнаралық ғылыми форумы, 27-30 қараша 2018 ж., Мәскеу, Ресей; Зарядталған бөлшектердің кристалдармен өзара әрекеттесу физикасы жөніндегі XLIX Халықаралық Тулин конференциясы, М.В. Ломоносов атын. ММУ., 28-30 мамыр 2019 ж., Мәскеу, Ресей;

«Ядролық және радиациялық физика» атты 12-ші халықаралық конференциясы, 24-27 маусым 2019 ж., Алматы, Қазақстан; Иондардың бетпен өзара әрекеттесуі «ВИП – 2019» атты XXIV халықаралық конференция, 19-23 тамыз 2019 ж. Мәскеу, Ресей; «Ядролық физика мен ядролық технологиялардың қазіргі заманғы мәселелері» атты IX халықаралық конференция, 24-27 қыркүйек 2019, Ташкент, Өзбекстан.

Жарияланымдар: диссертациялық жұмыстың тақырыбы бойынша 19 баспа жұмысы, соның ішінде Scopus деректер базасына рецензияланатын журналдарда 2 мақала, ҚР БҒМ БҒСБК ұсынған ғылыми журналдар тізімінен

4 мақала, баяндамалардың 8 тезисі, шетелдік басылымдарда жарияланған 5 мақала жарияланды.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі. Диссертация «Кіріспеден», 4 бөлімнен, «Қорытындыдан» және 1 «Қосымшадан» тұрады. Жұмыстың машинкада басылған мәтіні 127 бетте баяндалған, 25 кесте мен 57 суреттен тұрады.

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы на тему:

**«МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОДОЗНЫХ РАДИАЦИОННЫХ
ПОВРЕЖДЕНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ РЕАКТОРНЫХ
МАТЕРИАЛОВ ЗОНДОВЫМИ МЕССБАУЭРОВСКИМИ АТОМАМИ»,
представленной на соискание степени доктора философии (PhD) по
специальности 6D071000 –«Материаловедение и технология
новых материалов»
БЕДЕЛЬБЕКОВОЙ КАМШАТ АЗАТОВНЫ**

Оценка современного состояния решаемой научной или научно-технологической проблемы (задачи)

В настоящее время происходит существенная модернизация атомной энергетики и переход от реакторов на медленных нейтронах к реакторам на быстрых нейтронах, с повреждающими дозами больше 400 смещений на атом (сна). В связи с этим, требуется разработка перспективных реакторных материалов повышенной надежности, и замена традиционных ферритно-мартенситных сталей на стали аустенитного класса. Такие стали характеризуются малой наведенной радиоактивностью, слабым вакансионным и газовым распуханием, высокой устойчивостью к ползучести и высокотемпературному охрупчиванию.

Постепенный переход к ядерной и термоядерной энергетике приводит к тому, что разработка перспективных реакторных материалов, стойких против радиационного разрушения, управление их структурой и свойствами является важной научно-технической задачей радиационного материаловедения. Сложность проведения таких работ связана с наведенной радиоактивностью отработанных в реакторе материалов и длительным периодом наработки повреждающей дозы облучения (несколько лет). Для ее успешного решения требуется принципиально новый подход к методическому обеспечению экспериментов с облученными материалами, лишенный этих недостатков.

Приоритетные позиции в разработке перспективных реакторных материалов занимает метод имитационного облучения ионами тяжелых металлов, который сокращает сроки ресурсных испытаний и обеспечивает радиационную безопасность экспериментов. Оптимальными возможностями обладает неразрушающий метод облучения мессбауэровскими атомами железа. Он одновременно позволяет не только регистрировать радиационные повреждения материалов, но и моделировать (создавать) их на уровне кристаллической решетки.

Основание и исходные данные для разработки темы

Практика развития передовых стран показывает, что только ядерная и термоядерная энергетика может обеспечить их растущее энергопотребление. Вопрос о строительстве атомной электростанции в Республике Казахстан – это вопрос времени и для этого имеются все предпосылки. По данным МАГАТЭ, запасы урана в стране оценены в 900 тысяч тонн. Кроме того,

имеется опыт эксплуатации атомной электростанции с реактором на быстрых нейтронах, которая в течение более двадцати лет работала в г. Актау.

Обоснование необходимости проведения данной научно-исследовательской работы

Наращивание мощности атомных реакторов с высокодозным облучением требует разработки реакторных материалов повышенной работоспособности и эксплуатационной надежности. Имеются Международные Программы, в которых приоритет отдается хромоникелевым сталям аустенитного класса, способным работать при уровнях повреждения свыше 200 смещений на атом в широком интервале рабочих температур. Необходимость интенсификации наработки повреждающих доз, сокращение сроков ресурсных испытаний и обеспечение безопасности проведения научных экспериментов составляет основное содержание данной научно-исследовательской работы. Учитывая мировые тенденции развития атомной энергетики, Казахстану целесообразно расширить свое участие в разработке перспективных и усовершенствования существующих реакторных материалов.

Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки

Поиск и отработка эффективных и безопасных способов облучения, которые создают повреждения того же типа, что и при распаде ядерного горючего, определяет планируемый уровень научно-технической разработки. Перспективными в этом отношении является имитационные испытания путем облучения материалов на ускорителе высокоэнергетическими потоками ионов металлов или инертных газов. Использование в работе высокодозных мессбауэровских атомов железа позволяет одновременно решать две задачи – моделировать (создавать) радиационные повреждения и анализировать их тип.

Сведения о метрологическом обеспечении диссертации

Экспериментальные исследования в период выполнения работы проводились на оборудовании и приборах, соответствующих «Закону об обеспечении единства измерений» и прошедших государственную поверку. Во всех случаях использованы единицы измерений, соответствующие метрологическим правилам и нормам Международной системы единиц СИ.

Для проведения научно-исследовательских работ было использовано следующее оборудование: мессбауэровский спектрометр MS-110Em; дифрактометр D 8 ADVANCE фирмы BRUKER (Германия); нанотвердомер «Наноскан-компакт» (Россия); электронный растровый сканирующий микроскоп LYRA3 TESCAN (Чехия).

Используемое оборудование и приборы сертифицированы и имеют документальное подтверждение соответствующими контрольными организациями (Алматинский филиал АО «НаЦЭКС» номер аттестата аккредитации KZ.P.02.0687 от 04.05.15 г).

Актуальность темы

Актуальность темы обусловлена изменением энергетической политики мировых держав и постепенным переходом к ядерной и термоядерной

энергетике с более высокими повреждающими дозами и более жесткими условиями эксплуатации конструкционных материалов. Необходимость перехода к реакторным материалам нового поколения требует поиска эффективных и безопасных методов облучения, моделирующих радиационные повреждения того же типа, что и при ядерном распаде. Определенной альтернативой могут служить имитационные испытания с использованием высокодозных потоков ионов тяжелых металлов, полученных на ускорителях разного типа.

Новизна темы

Разработка имитационной методики облучения с использованием мессбауэровских атомов ^{57}Fe позволяет моделировать радиационные повреждения в реакторных материалах на ускорителе тяжелых элементов. Такая методика предоставляет возможность создавать радиационные повреждения того же типа, что и при распаде ядерного горючего, идентифицировать их тип, а также исключить наведенную радиоактивность, сократить сроки набора повреждающих доз, определить влияние облучения на структурно-фазовое состояние и свойства облученных материалов. Выбор и отработка режимов моделирования для получения объективной информации о радиационных повреждениях характеризует новизну и научно-практическую значимость темы исследования.

Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами

Диссертационная работа выполнена в РГП Институт ядерной физики Республики Казахстан в лаборатории ядерной гамма-резонансной спектроскопии в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (Грант № 0381/ГФ4) совместно с Московском государственным университетом им. М.В. Ломоносова (отдел физики атомного ядра НИИЯФ).

Цель исследования: разработать имитационный метод моделирования радиационных повреждений при облучении реакторных материалов на ускорителях заряженных частиц высокодозными зондовыми атомами ^{57}Fe .

Объекты исследования: фольги молибдена и тантала, конструкционные нержавеющие стали аустенитного класса – 12X18H10T, AISI 304 и AISI 316.

Предмет исследования : влияние высокодозного облучения тяжелыми ионами ^{57}Fe на тип радиационных повреждений, структурно-фазовое состояние и свойства молибдена и тантала и реальных конструкционных сталей 12X18H10T, AISI 304 и AISI 316, используемых в активной зоне атомного реактора.

Задачи исследования, их место в выполнении научно-исследовательской работы в целом

- 1) Изготовить опытные образцы чистых металлов и сталей трех марок 12X18H10T, AISI 304 и AISI 316 в виде тонких фольг и провести облучение ионами железа ^{57}Fe с энергией 1 МэВ и дозой 5×10^{16} ион/см²;

- 2) Получить и рассчитать основные характеристики взаимодействия облучения ионами железа ^{57}Fe по программе SRIM – 2008, определить их структурно-ориентационное расположение в кристаллических решетках молибдена и тантала, рассчитать количество образующихся дефектов;
- 3) Получить и обработать мессбауэровские спектры всех марок сталей, провести рентгенографические и электронографические исследования, обработать, проанализировать полученные данные, сделать обоснованные выводы;
- 4) Измерить нанотвердость в исходном и отожженном состоянии, оценить влияние состояния на величину радиационного наклепа разных типов сталей в зависимости от глубины погружения индентора.

Решение поставленных задач позволит отработать метод имитационного облучения высокодозным потоком ионов железа ^{57}Fe для моделирования радиационных повреждений, аналогичных образующимся при распаде ядерного горючего.

Методологическая база исследований

Для решения задачи и достижения поставленной цели использованы следующие методы и методики исследования:

- высокодозное облучение ионами ^{57}Fe на перезарядном ускорителе тяжелых ионов УКП-2-1;
- конверсионная мессбауэровская спектроскопия по электронному каналу (КЭМС) и в режиме на поглощение (МС);
- компьютерный пакет программы STRIM – 2008
- компьютерный пакет программы SpectrRelax
- EXAFS – спектроскопия.

Положения, выносимые на защиту

– результаты моделирования взаимодействия имплантированных ионов железа (проективного пробега, числа вакансий/ион, количества смещений на атом) по программе SRIM-2008 и их зависимости от свойств молибдена и тантала;

– строение мессбауэровских спектров электронов конверсии (КЭМС) и МС на пропускание на ядрах ^{57}Fe , результаты рентгеновской дифрактометрии и EXAFS спектроскопии по определению состояния и дефектности матриц молибдена и тантала;

– строение мессбауэровского спектра электронов конверсии (КЭМС) на ядрах ^{57}Fe в нержавеющей аустенитных промышленных сталях 12X18H10T, AISI 316, AISI 304 в зависимости от содержания никеля;

– результаты рентгеновской дифрактометрии и сканирующей электронной микроскопии сталей 12X18H10T, AISI 316, AISI 304 в различных состояниях – до, после облучения и после отжига, образование «мартенсита напряжения»;

– результаты электронной микроскопии приповерхностных слоев и измерения нанотвердости для определения величины радиационного наклепа сталей 12X18H10T, AISI 316, AISI 304, находящихся в разных состояниях, в зависимости от глубины внедрения индентора.

Основные результаты

– Изготовлены и облучены высокодозным потоком мессбауэровских атомов железа ^{57}Fe фольги чистых металлов (молибден, тантал) и аустенитных сталей разных марок 12X18H10T, AISI 316 и AISI 304 на ускорителе тяжелых ионов.

– Получены мессбауэровские спектры и рассчитаны основные характеристики взаимодействия имплантированных ионов железа с кристаллическими решетками молибдена, тантала и аустенитных сталей разных марок. Определены количественные соотношения между образующимися радиационными дефектами и инициированными облучением новыми фазами.

– Впервые определено структурно-ориентационное расположение имплантированных ионов железа и идентифицирован тип радиационных повреждений в виде твердых растворов – замещения в молибдене и внедрения в тантале. Впервые установлено, что этот процесс сопровождается сильным измельчением зерна по типу первичной рекристаллизации, инициируемой облучением.

– Установлено, что при имплантировании (внедрении) ионов железа в кристаллические решетки трех марок аустенитных сталей развивается инициируемое облучением $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение с образованием дефектного «мартенсита напряжения», стабильность и количество которого лимитируется содержанием никеля.

– Показано (по величине нанотвердости), что все исследованные стали претерпевают радиационный наклеп, который при температурах отжига, близких к рабочим температурам активной зоны реактора, в сталях с повышенным содержанием никеля практически полностью снимается, чем обеспечивается более высокая стабильность их эксплуатационных свойств.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что облучение высокодозным потоком ионов ^{57}Fe с энергией 1 МэВ позволяет создавать (моделировать) в реакторных материалах радиационные повреждения того же типа (вакансии, межузельные и замещенные атомы), что образуются при радиоактивном распаде в атомных реакторах, а также инициировать структурно-фазовые превращения за счет имплантации ионов железа в их кристаллические решетки.

Практическая значимость исследования

Результаты исследований, полученные с использованием облучения высокодозным потоком тяжелых ионов, найдут применение для разработки и модернизации имитационных методов радиационного воздействия на реакторные конструкционные материалы. Эффективность и безопасность метода иллюстрируется получением повышенной дозы радиационных повреждений без наведенной радиоактивности и малым временем ее наработки по сравнению с материалами, отработавшими в активной зоне реактора. Показано, что облучение мессбауэровскими атомами железа является универсальным и может быть использовано не только для сталей, но и материалов на другой основе.

Важным фактором, указывающим на практическую значимость работы, является значительное сокращение срока ресурсных испытаний для оценки надежности и работоспособности конструкционных материалов активной зоны реактора. Экспрессный метод облучения (часы вместо месяцев) упрощает решение проблемы их пригодности для обеспечения безопасной работы ядерных установок, позволяет объективно оценивать эксплуатационные характеристики и прогнозировать поведение при высоких повреждающих дозах облучения.

Практическая значимость полученных результатов состоит также в том, что на примере тугоплавких молибдена и тантала проиллюстрирована возможность образования высокодисперсной структуры, которая эффективно сопротивляется коррозионному разрушению. По этой причине они могут использоваться в качестве элементов трубопровода для металлических теплоносителей в первом контуре реактора. Тот факт, что стали аустенитного класса с повышенным содержанием γ -стабилизирующего никеля, более устойчивы к радиационным повреждениям, вызываемым высокодозным облучением, показывает, что они имеют неоспоримое преимущество. В качестве дополнительного легирующего элемента целесообразно использование молибдена, как показано на примере стали AISI 316.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на отечественных и зарубежных международных конференциях: International conference on the applications of the Mössbauer effect, in September 03-08, 2017, Saint-Petersburg, Russia; International scientific forum «Nuclear science and technologies». September 12-15, 2017, Almaty, Republic of Kazakhstan; XV Международная конференция «Мёссбауэровская спектроскопия и её применения», 10 - 16 сентября, Сочи, Россия; четвертый междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии», 27-30 ноября 2018 г, Москва, Россия; XLIX Международная Тулиновская конференция по Физике Взаимодействия Заряженных Частиц с Кристаллами, МГУ им. М. В. Ломоносова, 28 – 30 мая 2019 г, Москва, Россия; 12-я Международная конференция «Ядерная и радиационная физика», 24-27 июня 2019 года, Алматы, Казахстан; XXIV Международной конференции Взаимодействие ионов с поверхностью «ВИП-2019», 19 - 23 августа 2019 г. Москва, Россия; IX Международной конференции «Современные проблемы ядерной физики и ядерных технологий» 24-27 сентября 2019, Ташкент, Узбекистан.

Публикации: по теме диссертационной работы опубликовано 19 печатных работ, в том числе 2 статьи в журналах, рецензируемых базой данных Scopus, 4 статьи из списка научных журналов, рекомендованных ККСОН МОН РК, 8 тезисов докладов, 5 статей опубликованных в зарубежных изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из «Введения», 4-х разделов, «Заключения» и 1-го «Приложения». Работа изложена на 127 страницах машинописного текста, содержит 25 таблиц и 57 рисунков.