

Валентин Константинович Цхенің

6D072300 – «Техникалық физика» мамандығы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін дайындаған **«Кориум алудың реакторлық әдісін жасау және оның құрылымдық-фазалық күйі мен механикалық қасиеттерін зерттеу»** тақырыбындағы диссертациясына
АҢДАТПАСЫ

В.К. Цхенің диссертациясында баяндалған зерттеулер шапшаң нейтрондардағы ядролық реактордың авариялық жағдайын модельдеу жағдайында кориумды алу әдісін әзірлеуге және ядролық реактордың актив аймағының конструкциялық және отын материалдарынан алынған балқыманың қасиеттері мен сипаттамаларын зерттеуге арналған. Диссертация міндеттерін шешу процессінде алынған нәтижелер кориум алу бойынша реакторлық эксперименттерді іске асыру сапасын арттыруға және зақымдалған реакторлардан балқыманы алу технологияларын әзірлеу үшін қажетті аз мөлшердегі эксперименттік деректерді айтарлықтай толықтыруға мүмкіндік береді.

Зерттеу тақырыбының өзектілігі

АЭС-тағы және атом энергиясы пайдаланылатын басқа да объектілердегі авариялар және олардың радиациялық зардаптары бүгінгі күні бүкіл ғылыми қауымдастық үшін маңызды мәселе болып табылады, бұған «Three Mile Island», ЧАЭС және «Fukushima-1» сияқты АЭС-тарда болған кеңінен танымал ауыр апаттар дәлел бола алады.

Қолданыстағы ядролық энергетика объектілерін пайдалану кезінде ядролық және радиациялық қауіпсіздікті қамтамасыз ету және арттыру бойынша алдын алу шараларын қолданудан басқа, бұрын болған жобадан тыс ауыр авариялардың салдарын жоюға байланысты проблемалар аса маңызды және өзекті. Қазіргі уақытта орын алған авариялардың салдарын жою бойынша зерттеулер мен жұмыстар жалғасуда, ол үшін тұжырымдамаларды әзірлеу және зақымдалған реакторлық қондырғыларды кәдеге жаратуға дайындау және қоршаған ортаға радиациялық әсерін төмендету бойынша ауқымды жобалар іске асырылуда.

Ғылыми тұрғыдан алғанда, ядролық реакторлардағы авариялардың әртүрлі даму кезеңдеріндегі процестерді зерттеуге, сондай-ақ түзілетін қорытпалар мен қосылыстардың қасиеттері мен сипаттамаларын зерттеуге байланысты өзекті тапсырмаларды шешу үшін эксперименттік деректерді алуға мүмкіндік беретін процестер мен құбылыстарды тікелей физикалық модельдеу қазіргі уақытта ең тиімді және өзекті тәсіл болып табылады.

Авариялық жағдайларды модельдеуге бағытталған эксперименттік зерттеулер ЭБДҰ және МАГАТЭ сияқты халықаралық ұйымдардың қолдауымен әлемнің көптеген ғылыми орталықтарында жүргізілуде. Алайда, ғылыми зерттеулердің көпшілігінде сыртынан жылу берілетін (мысалы индукциялық қыздыру) және алюминий тотығы, базальт, құрамында силикаты бар материалдар және сирек уран қостотығы негізіндегі кориум имитаторы қолданылатын эксперименттік қондырғылар мен стендтер қолданылады.

Прототиптік кориум нағыз кориумның қасиеттеріне жақын химиялық және реологиялық қасиеттерге ие, бірақ оның негізгі кемшіліктері тек ядролық энергетикалық қондырғыларда іске асыруға болатын, өзін-өзі қолдайтын радиоактивті ыдырау есебінен қамтамасыз етілетін, автокаталитикалық жылу көзінің болмауы жатады. Сондай-ақ, әртүрлі изотоптық құрамды да атап өту керек, өйткені уран қостотығы негізіндегі кориум имитаторы көбінесе нағыз, байытылған уран диоксидінің орнына оның табиғи немесе кемітілген қосылыстарынан тұрады.

Прототиптік кориумды қолданумен жүргізілген зерттеулердің нәтижелерін талдай отырып, нағыз кориумға ұқсаудың белгілі бір критерийлерін сақтаудағы шектеулер және кейбір эксперименттердің бастапқы шарттарын толық қанағаттандыру мүмкін еместігі анықталады, нәтижесінде модельдік кориумды алу бойынша реакторлық сынақтарға деген қажеттілік арта түседі.

Ауыр авариялармен ілесіп жүретін процестерді зерделеуге және ядролық реакторлардың белсенді аймағының конструкциялық және отын материалдарының балқымасын алуға бағытталған реакторлық зерттеулер туралы айта отырып, жүргізілетін кешенді сынақтардың техникалық күрделілігін атап өткен жөн. Кориумның әртүрлі қасиеттерін зерттеу үшін реакторлық эксперименттерді іске асыру және арнайы құрылғыларды жасау талап етіледі, олардың ішінде қажетті компоненттік-элементтік құрамы бар балқыма қалыптасады. Сондықтан ауыр авария жағдайларын имитациялайтын нейтрондық сәулеленудің әсері кезінде модельдік кориум алу бойынша зерттеулер бірегей және өте аз болып саналады.

Сонымен қатар, бүгінгі күні кориумның құрылымдық-фазалық күйі мен механикалық қасиеттері туралы анықтамалық деректердің тапшылығы байқалады. Кориумның механикалық қасиеттері уақыт өте келе айтарлықтай өзгеретіні белгілі. Алайда, бұл қасиеттердің жұмыс жағдайында (реакторлық және реактор астындағы үй-жайларда) өзгеруін бақылау радиацияның жоғары деңгейіне және олардың физикалық қол жетімділігінің қиын болуына байланысты аса қиындатылған. Сондықтан кориумның құрылымын, фазалық құрамы мен механикалық қасиеттерін және олардың уақыт динамикасын зерделеуге бағытталған зерттеулер оны алу әдістерін әзірлеуді және жаңа эксперименттер жүргізуді талап етеді, олардың ішіндегі ең өкілді және сенімді болып табылатыны ядролық реакторларда нейтронды сәулелену жағдайындағы арнайылық (реакторлық) сынақтар, ал осындай әдістермен алынған модельдік кориумдар қасиеттерінің жиынтығы бойынша нағыз кориумға ең жақын болады.

Жүргізілген талдау нәтижесінде модельдік кориумның құрылымдық және фазалық күйі, сондай-ақ механикалық қасиеттері туралы мәліметтердің толық еместігі және сонымен бірге жаңа ғылыми зерттеулерді қажет ететіндігі айқын болды.

Осы бағытта жаңа зерттеу жұмыстарын жүргізу қажеттілігі және реактор жағдайында модельдік кориум алу әдістемесінің болмауы ауыр аварияларды зерттеу міндеттерінде ИГР реакторын қолдану саласын шектейді және кориумның қасиеттері мен сипаттамалары бойынша эксперименттік деректердің халықаралық банкін қалыптастыруға ҚР ҰЯО РМК қатысуын болдырмайды.

Осыған байланысты модельдік кориумнің қасиеттері мен сипаттамаларын зерттеу үшін оны алу, сондай-ақ ядролық реакторлардың қауіпсіздігі мәселелерімен айналысатын мамандар үшін ИГР реакторының қолданылуы мен тартымдылығын арттыру мақсатында ИГР реакторында эксперименттер жүргізудің мамандандырылған әдістемесін әзірлеу бағытында ауыр аварияларды модельдеу бойынша алдыңғы реакторішілік эксперименттердің тәжірибесін дамыту өзекті болып отыр.

Диссертацияда ИГР реакторының реактивтілік қорын есептеу әдістемесін қамтитын, модельдік кориум алудың реакторлық әдісін әзірлеу нәтижелері және ампулалық сәулелендіру құрылғысы, компоненттік-элементтік құрамы бойынша шапшаң нейтрондардағы ядролық реактордың белсенді аймағының балқымасына ұқсас шектелген балқыма, сондай-ақ оның құрылымдық-фазалық күйі мен механикалық қасиеттерін реактордан кейінгі материалтану зерттеулерінің нәтижелері келтірілген, бұл кориумды зақымдалған реакторлардан алу тұжырымдамасын қалыптастыру үшін де, физикалық процестерді математикалық модельдеу және верификациялау үшін де пайдаланылатын қолда бар эксперименттік деректер базасын айтарлықтай мөлшерде толықтырады.

Жұмыстың мақсаты

Энергетикалық реактордың белсенді аймағының конструкциялық және отын материалдарының балқымасын алудың реакторлық әдісін әзірлеу және оның құрылымдық-фазалық күйі мен механикалық қасиеттерін зерттеу.

Қойылған мақсатқа қол жеткізу үшін келесі **міндеттер** шешімін тапты:

- ауыр аварияларды зерделеу бойынша реакторішілік эксперименттер жүргізудің алдыңғы тәжірибесі негізінде импульстік графит реакторының орталық эксперименттік арнасында модельдік кориум алу бойынша зерттеу жүргізу үшін жылу бөлетін жинағы бар ампулалық сәулелендіру құрылғысының конструкциясын әзірлеу;

- реакторлық эксперименттердің режимдерін таңдау мен негіздеудің белгілі әдістерін бейімдеу негізінде авариялық жағдайды модельдеу жағдайында кориум алу бойынша эксперимент жүргізу мүмкіндігін негіздеу үшін нейтрондық-физикалық және жылу физикалық есептеулер жүргізу;

- модельдік кориум алу бойынша экспериментті іске асыру үшін ИГР ядролық зерттеу реакторының қажетті реактивтілік қорын анықтау әдістемесін әзірлеу;

- модельдік ЖБЖ-ның отынын және конструкциялық материалдарын балқыту нәтижесінде берілген құрамда кориумды қалыптастыру шарттарына сай келетін референттік реакторішілік экспериментті таңдау;

- референттік экспериментте алынған модельдік кориумның құрылымдық-фазалық күйін және микроқаттылығын оның кориум туралы жалпы қабылданған көрініске сәйкестігін растау үшін зерттеу.

Қорғауға шығарылатын негізгі ережелер

1. Ауыр аварияны реакторлық модельдеу жағдайында әзірленген ампулалық сәулелендіру құрылғысына орналастырылған, жылу бөлетін жинақты

сәулелендіру бойынша эксперимент жүргізу мүмкіндігін негіздейтін нейтрондық-физикалық және жылу-физикалық есептеулердің нәтижелері.

"Импульс" режимінде ЖБЖ АОУ-да іске асыруға қажетті қуаттың өзгеру диаграммасы анықталды, ол $\sim 2,8$ кДж/г UO_2 отынында берілген меншікті энергияның бөлінуін және $\sim 3170^\circ\text{K}$ температурасын қамтамасыз етуге қабілетті.

2. «Импульс» режимінде іске қосуды іске асыру үшін ИГР реакторының қажетті реактивтілік қорын анықтау әдістемесі.

Реактордың қуатын өзгертудің қажетті диаграммасының параметрлері, белсенді аймақта энергияның бөлінуі және оларды іске асыру үшін минималды жеткілікті теңелтуші өзектерінің саны арасында негізгі тәуелділіктер белгіленген.

3. Ядролық реактордың актив аймағының конструкциялық және отын материалдарының қатайтылған модельдік балқымасының құрылымдық-фазалық күйінің ерекшеліктері және механикалық қасиеттері.

Денеді және металл матрицасы түйіршіктерінің шекараларында уран қосылыстары (до $\sim 1,5$ мас.% по U) түріндегі кірінділердің болуы модельдік кориумның микроқаттылығына ($148 \div 152$ HV_{0,2}) айтарлықтай әсер етпейді.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы мұнда алғаш рет:

– ауыр реакторлық аварияны модельдеу кезінде конструкциялық және отын материалдарының балқымасын оның қорғаныш тосқауылдарының шекараларында ұстап қалуды қамтамасыз ететін ЖБЖ сынақтарын жүргізу үшін эксперименттік ампулалық сәулелендіру құрылғысы әзірленді;

– «Импульс» режимінде іске қосу үшін ИГР реакторының реактивтілік қорын есептеу әдістемесі әзірленді және реакторлық эксперименттер топтамасында пысықталды;

– қасиеттері балқымадағы материалдардың пайыздық мөлшеріне байланысты болатын, модельдік құрастырылған отын мен конструкциялық материалдардың қатқан балқымасы түріндегі кориум алу мүмкіндігі туралы жаңа деректер алынды.

Зерттеу нысаны

Реактор жағдайында ядролық реактордың белсенді аймағының конструкциялық және отын материалдарының модельдік кориумын алу әдістемесі.

Зерттеу пәні

ИГР реакторындағы ампулалық сәулелендіру құрылғысы, ядролық реактордың актив аймағының модельдік балқымасының құрылымы, фазалық құрамы мен механикалық қасиеттері.

Зерттеу әдістері

Модельдік кориумды алу бойынша эксперименттер ИГР импульстік графит реакторында жүргізілді. Есептеу жұмыстары (жылу физикалық және нейтрондық-физикалық процестер) - эксперименттің қауіпсіздігін таңдау және негіздеу үшін заманауи есептеу кодтарының (ANSYS, MCNP) кешені қолданылды. Модельдік кориум үлгілерінің макро - және микроқұрылымын, фазалық құрамын талдау үшін металлографиялық зерттеудің жалпы ғылыми әдістері пайдаланылды. Үлгілердің элементтік құрамы рентгенспектрлік

микроталдау әдісімен зерттелді. Механикалық қасиеттерді анықтау микроқаттылық өлшегіш пен аттестатталған бағдарламалық өнімдерді қолдану арқылы жүргізілді.

Іс-тәжірибелік маңыздылығы

Модельдік кориумды алу әдісін іс-тәжірибеде қолдану реактор қуатын өзгерту процесінде материалдардың балқу режимдерін іске асырудың сапасын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді, бұл реакторда, демек, АСҚ-да интегралды энергия бөлуді рұқсатсыз ұлғайту мүмкіндігін болдырмаудың кепілі.

Ядролық энергетикалық реактордың ауыр авариясын модельдейтін жағдайларда ЖБЖ-ны реакторлық сынауға және зерттеуге арналған эксперименттік құрылғыларды қолдану тәжірибесі негізінде әзірленген өнертабысқа арналған авторлық куәлікпен қорғалған АСҚ одан әрі материалтану зерттеулеріне жарамды модельдік кориум үлгілерін алу үшін пайдаланылуы мүмкін.

Отындағы ішкі энергия бөлу есебінен балқу және өзара әрекеттесу процесінде түрленуден өткен, отын мен конструкциялық материалдарды қамтитын реакторішілік экспериментте алынған модельдік кориум зақымдалған реакторлардан қатқан балқыманы алу технологияларын әзірлеу кезінде пайдаланылуы мүмкін

Диссертациялық жұмыстың нәтижелерін ИГР импульстік реакторында іске қосуларды дайындау және жүргізу рәсіміне, сондай-ақ Базалық инженерлік дайындық факультетінің оқу процесіне енгізу актісі, «Ядролық энергетикалық реактордың ауыр авария жағдайында БҚЖ-ны реттеу өзегінің бағыттаушы құбырының төменгі тірек плитасының бұзылу процесін зерттеуге арналған құрылғы» өнертабысына арналған патент осы диссертацияның қосымшасында келтірілген.

Автордың жеке үлесі.

Автордың жеке үлесі зерттеулердің міндеттерін қою және тұжырымдау, әдеби деректерді талдау мен патенттік ізденіс, ампулалық сәулелендіру құрылғысын әзірлеу, ИГР реакторында тұрақты импульстерді алу үшін реактивтілік қорын есептеу әдістемесін негіздеу үшін теориялық және есептік зерттеулер жүргізу, эксперименттік және аналитикалық жұмыстарды дайындау және жүргізу, сондай-ақ алынған нәтижелерді статистикалық өңдеу. Модельдік кориум үлгілерін электрондық-микроскопиялық және механикалық сынау ҚР ҰЯО РМК «АЭИ» филиалының материалтану сынақтары бөлімінің жұмыскерлерімен бірлесіп жүргізілді.

Диссертация шеңберінде іске асырылған жұмыстар «Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» Республикалық мемлекеттік кәсіпорнының ғылыми қызметкерлерімен және мамандарымен тығыз ынтымақтастықта жүргізілді. Диссертацияда көрсетілген есептік-эксперименттік жұмыстардың нәтижелерін талдау, сондай-ақ негізгі ережелерді, қорытындыларды тұжырымдау отандық және шетелдік ғылыми консультанттармен бірлесе орындалды.

Тақырыптың ғылыми-зерттеу бағдарламаларының жоспарларымен байланысы

Осы диссертацияның эксперименттік нәтижелері «ИГР зерттеу реакторында алынған ядролық реактордың актив аймағының материалдары балқымасының қасиеттері мен сипаттамалары» (№АР05133086) тақырыбы бойынша 30.03.2018 ж. № 305 шарттың шеңберінде «Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғары білім беру министрлігінің Ғылым комитеті» Мемлекеттік мекемесінің қаржылық қолдауымен алынды.

Жұмыста алынған нәтижелердің негізділігі мен дұрыстығының деңгейі конструкциялық және отын материалдарының балқымасын алу бойынша реакторішілік эксперименттерді қамтитын, жүргізілген есептік-эксперименттік зерттеулердің қисындылығымен және жүйелілігімен, сондай-ақ дұрыс тексерілген жалпы ғылыми зерттеу әдістерін қолданумен қамтамасыз етіледі. Диссертацияның негізгі нәтижелері ҚР ҒжәнеЖББМ Ғылым және жоғары білім беру саласында сапаны қамтамасыз ету комитеті ғылыми жұмыстың нәтижелерін жариялау үшін ұсынған, сондай-ақ шетелдік ғылыми журналдарда рецензияланатын, Scopus және Web of Science дерекқорына кіретін басылымдарда жарияланды.

Жұмыс нәтижелерін сыннан өткізу.

Диссертацияның негізгі нәтижелері бес халықаралық конференцияда баяндалды және талқыланды:

«Атом энергетикасының болашағы» XIV Халықаралық ғылыми-практикалық конференция (Обнинск қ., Ресей, 29-30 қараша 2018 ж.);

«Радиоэлектроника, электроника және энергетика» Халықаралық студенттер мен аспиранттардың ғылыми-техникалық конференциясы (Мәскеу қ., Ресей, 14-15 наурыз 2019 ж.);

«Advanced manufacturing materials and research: new technologies and techniques AMM&R2021» Халықаралық конференциясы (Өскемен қ., Қазақстан, 19 ақпан 2021 ж.);

«Семей сынақ полигоны: мұра және ғылыми-техникалық әлеуеттің даму перспективасы» IX Халықаралық конференция (Курчатов қ., Қазақстан Республикасы, 7-9 қыркүйек 2021 ж.);

«Ғылым мен технологиялардың жетістіктері – ҒменТЖ 2021» Бүкілресейлік ғылыми конференция (Красноярск қ., Ресей, 10-11 желтоқсан 2021 ж.).

Сондай-ақ диссертацияда баяндалған негізгі нәтижелер Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ техникалық физика кафедрасының ғылыми семинарларында, Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы Атом энергиясы институты филиалының ғылыми-техникалық кеңестерінде, Ұлттық зерттеу Томск политехникалық университетінің PhD-студенттерінің онлайн-семинарларында (Томск қ., Ресей) баяндалды және талқыланды.

Жарияланымдар

Диссертацияда баяндалған зерттеулердің нәтижелері бойынша 12 баспа жұмысы жарияланды, олардың ішінде:

- ҚР ҒжәнеЖББМ Ғылым және жоғары білім беру саласында сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған ҚР ғылыми басылымдарда 2 мақала;

- халықаралық ақпараттық қорлар қатарына кіретін және Web of Science Core Collection (Clarivate Analytics) және Scopus дерекқорларында индекстелетін журналда 3 мақала;

- халықаралық конференциялардың материалдар жинақтарында 6 мақала және баяндамалар тезисі;

- өнертабысқа арналған 1 патент.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі

Жұмыс кіріспеден, бес бөлімнен, қорытынды мен пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады. Жұмыс 116 бетте мазмұндалған, 73 суреттен, 12 кесте, 134 атаудан тұратын пайдаланылған әдебиеттер тізімінен мен 3 қосымша тұрады.