

Куанышбек Оразбекович Толеубековтың

8D05302 - «Техникалық физика» білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алуға арналған диссертациясына
АНДАТПА

Жеңіл сулы ядролық реактордың белсенді аймағы материалдарының балқымасының ауыр аварияның корпустан тыс даму сатысындағы салқындатқыш металдармен өзара іс-қимылы

Жұмыстың жалпы сипаттамасы

Диссертациялық жұмыста атом станциясында белсенді аймақты балқыту бар ауыр авария болған жағдайда жеңіл сулы реактордың балқымасында кориумды салқындату үшін металдардың қайнау әсерін пайдалану мүмкіндігін зерттеудің нәтижелері ұсынылған.

Зерттеу тақырыбының өзектілігі

Атом энергетикасының тарихы көрсеткендей, атом станциясындағы ауыр авария кезінде реактордың белсенді аймағын салқындату жоғалған жағдайда оның балқуы кориум деп аталатын конструкциялық материалдардың балқымасының пайда болуымен жүргізіледі. Аварияның одан әрі дамуы кезінде реактор корпусының бұзылуы және кориумның реактор астындағы кеңістікке шығуы орын алады.

Мұндай авариялардың салдарынан қоршаған ортаның едәуір радиоактивтік ластануы болуы мүмкін. Сонымен қатар, атом станциясындағы авариялық жағдайдың дамуына әкелетін осындай ауытқулардың себептері тек адам факторы немесе АЭС конструкциясының жетілмегендігі ғана емес, сонымен қатар түрлі жабдықтардың жұмыс қабілетінің істен шығуына әкелетін табиғи апаттар да болуы мүмкін.

Осылайша, бүгінгі күні атом станцияларын қауіпсіз пайдалануға және авариялық жағдайларды болдырмауға байланысты мәселелер ғана емес, сондай-ақ олар туындаған жағдайда ауыр авариялардың салдарын азайту өзекті болып табылады. Осыған байланысты, ауыр авариялардың дамуы туралы білімнің жинақталуына қарай, сондай-ақ оның өтуінің неғұрлым қауіпті салдарын болдырмау немесе елеулі түрде әлсірету үшін станция контейнментінің герметикалығын сақтауды қамтамасыз ететін ауыр аварияны басқарудың қосымша техникалық құралдары қабылданды.

Белсенді аймақты балқытуы бар ауыр аварияның соңғы сатысын басқару тәсілдерінің бірі ерітіндіні оқшаулау құрылғыларында (ЕОҚ) немесе жай ерітінді тұзақтарында реактор корпусынан тыс кориумды ұстау және салқындату тұжырымдамасы болып табылады.

Жеңіл сулы ядролық реакторлар балқымасының белгілі тұзақтарының арасында едәуір техникалық тұрғыдан пысықталған және іс жүзінде кеңінен пайдаланылатын ВВЭР реакторының тигель типті балқымасының тұзағы болып табылады. Балқыманың мұндай тұзағы Қытайда Тяньвань АЭС құрылысынан бастап ВВЭР реакторлары бар барлық атом станцияларына орнатылады.

ВВЭР реакторының балқымасында кориумды оқшаулау тұжырымдамасы кориумды құрбандық материалдарымен араластыру, су салқындататын тұзақ корпусы арқылы жылуды бұру және кориум бетіне су беру болып табылады. Кориумды араластыру оны салқындату және тұзақтың төменгі бөлігінде орналасқан оның оксидті бөлігінің тығыздығын азайту үшін қолданылады. Бұл бу-металл реакцияларын болдырмау, кориумдағы көлемдік энергия бөлуді азайту және тұзақ корпусы бар жылу алмасу бетін ұлғайту мақсатында кориум қабаттарының гравитациялық инверсиясы деп аталатын процесті жүзеге асыру үшін қажет. Салқындатқыш су кориумның қышқыл бөлігі қалқып шыққаннан кейін оның бетіне беріледі.

ЕОҚ-да кориумды корпустан тыс ұстау тұжырымдамасының жұмыс қабілеттілігі жүргізілген есептік-эксперименттік жұмыстар кешені негізінде расталады, алайда қазіргі уақытта оларды пайдаланудың тиімділігі мен қауіпсіздігін одан әрі арттыруға бағытталған әртүрлі зерттеулерге сұраныс бар.

Кориумды балқыту тұзағында оқшаулау кезінде кориумның үстіңгі бетінің салқындатылуы ұйымдастырылмаған уақыт аралығы бар екенін байқауға болады. Осыған байланысты, ерітінді торындағы кориумды оқшаулау тиімділігін арттыру үшін оның үстіңгі қабатын кориумнан үздіксіз жылу бұруды жүзеге асыру үшін су торға түскенге дейін салқындатуды ұйымдастыруға болады.

Мұндай салқындатуды ұйымдастырудың неғұрлым перспективалы тәсілдерінің бірі металдардың қайнау әсерін пайдалану болып табылады. Металдарды таңдау бірінші кезекте олардың жылу физикалық қасиеттеріне байланысты. Идея су салқындатуға ұқсас кориум бетінде металдардың қайнау әсерін пайдалануға негізделеді. Осылайша, мұндай өзара әрекеттесуінің барлық аспектілерін түсіну үшін есептік-талдамалық және эксперименттік зерттеулер жүргізу орынды болды.

Осы диссертациялық жұмыстың мақсаты жеңіл су реакторының кориумін салқындатқыш ретінде пайдалану мүмкіндігін растау үшін белсенді аймақты балқытуы бар ауыр аварияны модельдеу жағдайларында салқындатқыш металдармен өзара әрекеттесуін зерттеу болып табылады.

Алға қойылған мақсатқа қол жеткізу үшін келесі **міндеттер** шешілді:

1. Балқыту тұзағында кориум бетін салқындату үшін металдардың қайнау әсерін пайдалануды келесіде есептік-талдамалық негіздеумен белгілі металдардың физикалық-химиялық қасиеттеріне талдау жүргізу;

2. ВЧГ-135 стендтегі ауыр авария процестерін модельдеу жағдайында металдардың кориуммен өзара әрекеттесуін зерттеу бойынша эксперименттер жүргізу әдістемесін әзірлеу;

3. ВЧГ-135 стендтегі ауыр авария процестерін модельдеу жағдайында металдардың кориуммен өзара әрекеттесуін зерттеу бойынша эксперименттер жүргізу әдістемесін әзірлеу;

4. Эксперименттер жүргізгеннен кейін қатты металл фрагменттерін балқытуға тастау және металдардың кориумның құрылымдық-фазалық жай-күйіне әсері жағдайында салқындатқыш металдардың кориуммен өзара әрекеттесуінің ерекшеліктерін белгілеу.

Қорғауға шығарылатын негізгі ережелер

1. Кориум бетінен үздіксіз жылу шығаруды ұйымдастыру үшін салқындатқыш металдардың қайнау әсерінің жылу есептеулері.

Моделдеу салқындатқыш металды (мырыш, сурьма және марганец) кориумның бетіне беру кезінде олардың қарқынды жылу алмасу есебінен тез ерігенін көрсетті. Толық балқу уақыты нақты салқындатқыш металдың балқу температурасының мәнімен анықталады: мырыш (~ 1,6 с), сүрме (~ 3,4 с) марганец (~ 5,5 с). Сонымен процесте мырыш толық қайнайды, ал сурьманың қайнауы ішінара сипатта болады (есептік үлгінің кейбір аумақтарында сүрме температурасының мәні қайнау температурасынан төмен Тоқыма = 1908 К). Марганец орташа мәні 1750 К ~ температурадағы кориуммен жылу тепендігін белгілей отырып, қайнау температурасына жетпейді.

2. Зерттелетін салқындатқыш металдарды ВЧГ-135 стендінде кориум балқытылған тигельге тастау жағдайында эксперименттер жүргізудің әзірленген және сыналған әдістемесі.

ВЧГ-135 стендінде кориум балқымасын алу графит тигелінде дайындалған шихтаны индукциялық қыздыру әдісімен жүзеге асырылады. Кориумның ~ 2250°C- тең талап етілетін температурасын алғаннан кейін, электромагниттік жетектің көмегімен жапқышты ашу жолымен арнайы құрылғыдан кориум балқытпасына зерттелетін металдың төгінді орын алады. Металл салқындатқыштың температурасы оны тастаған сәтте ~ 400°C жетеді.

3. Салқындатқыш металдардың жоғары температуралық өзара әрекеттесуі кезінде кориумның құрылымдық-фазалық құрамына әсері.

~ 2250 ° С температурада мырыштың кориум балқымасымен өзара әрекеттесуі салқындатқыш металдың қарқынды қайнауына және тигельден толық булануына әкеледі. Сүрменің қайнауы тасталған металдың жалпы салмағының 20% -нан аспайды, ал қалған бөлігі (Zr,U)O₂ типті уран-цирконийдің бірқатар қатты ерітінділерінің негізінде фазалық құрамды, сондай-ақ α-цирконийге тиесілі оттегімен тұрақтандырылған фазалардың аз санын түзу арқылы кориуммен және Zr-Sb-O қосылу фазасы өзара әрекеттесуді жасайды. Марганец қайнау нүктесіне жетпейді және кориум құрамына өзгерістер енгізеді, бұл ретте уран-цирконий типіндегі қатты ерітінділердің, цирконий-марганец және оттегінің қосылыстарының (Zr-Mn-O, Zr₂Mn, Zr₃O) үлкен қатарын құрады, сондай-ақ балқыту көлемінің материалымен өзара әрекеттесуі тіркеледі.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы мынада, онда алғашқы рет:

- алғаш рет балқытпа торында кориумды оқшаулау кезеңінде үздіксіз жылу таратуды ұйымдастыру үшін кориум балқытпасының бетін суыту үшін металдардың қайнауын пайдалану ұсынылды. Талаптар тұжырымдалды және балқыманың торында кориумды салқындату үшін пайдаланылуы мүмкін металдар айқындалды;

- корий балқымасының болу температурасына қатысты балқу температурасы төмен материалдарға сынақ жүргізу әдістемесі әзірленген және эксперименттер сериясында сыналған;

- белсенді аймақты балқытумен ауыр аварияны модельдеу жағдайларында эксперименттер жүргізу нәтижесінде кориумның құрылымдық-фазалық жай-күйіне зерттелетін металдардың әсері анықталды.

Зерттеу объектісі ерітінді торында кориумды салқындату үшін пайдаланылуы мүмкін кандидаттық металдар болып табылады.

Зерттеу мәні эксперименттерді сапалы жүргізуді қамтамасыз етудің әдістемелік тәсілдері және зерттелетін металдардың ауыр аварияны модельдеу жағдайларында жоғары температуралық өзара әрекеттесу нәтижесінде кориумның құрылымдық-фазалық жай-күйіне әсері болып табылады.

Зерттеу әдістері

Осы диссертациялық жұмыстың қойылған мақсаттары мен міндеттеріне қол жеткізу үшін әртүрлі зерттеу әдістері, оның ішінде физикалық және компьютерлік модельдеу, сондай-ақ материалдардың құрылымы мен құрамын зерттеу әдістері пайдаланылды.

Таңдалған әдістерді пайдалану ANSYS бағдарламалық қамтамасыз етуін, ВЧГ-135 эксперименттік стендін және материалтану зерттеулерін жүргізуге арналған жабдықтар паркін қолдануға негізделген.

Компьютерлік модельдеу ауыр авария жағдайларында металдардың кориуммен өзара әрекеттесуін зерттеу бойынша бірқатар сандық эксперименттер болды. Бұдан басқа, компьютерлік модельдеу ВЧГ-135 стендте ауыр аварияны модельдеу кезінде металл фрагменттерін сұйық кориумға тастау бойынша эксперименттер жүргізудің әзірленген әдістемесінің жұмыс қабілеттілігін негіздеу үшін пайдаланылды.

Металдардың кориуммен өзара әрекеттесуін физикалық модельдеу нәтижесінде алынған материалдарды зерттеудің қазіргі заманғы материалтану әдістерін пайдалану зерттелетін өзара әрекеттесуге кешенді талдау жүргізуге және тиісті қорытындылар жасауға мүмкіндік берді.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы мынада:

- Физикалық үлгілеудің әзірленген әдістемесі металл-салқындатқыштың кориуммен уақтылы жанасуын қамтамасыз етеді және балқыманы салқындатудың ұсынылып отырған тәсілінің жұмысын имитациялай отырып, ауыр авария кезінде болатын процестерге зерттеу жүргізуге мүмкіндік береді.

Осы жұмыста ұсынылған жоғары температуралы ВЧГ-135 стендте эксперимент жүргізу әдістемесі ұқсас эксперименттік қондырғыларда ұқсас міндеттерді шешу үшін қолданылуы мүмкін.

- Ауыр авария жағдайында тез балқытын металдардың кориуммен өзара әрекеттесуінің алынған эксперименттік деректерін перспективалы реакторлық қондырғылардың авариясын оқшаулау жүйелерін әзірлеу кезінде атом энергиясы саласындағы мамандар пайдалануы мүмкін.

Автордың жеке үлесі диссертациялық зерттеу міндеттерін қоюдан және тұжырымдаудан, әдеби деректерге талдамалық шолу жүргізуден, есептік зерттеулер жүргізуден және алынған нәтижелерге талдау жасаудан тұрады.

Автор зерттеулерді сапалы жүргізуді қамтамасыз етудің әдістемелік тәсілдерін қалыптастыруға, ВЧГ-135 стендінде эксперименттер жүргізуге және одан кейінгі материалтану зерттеулеріне тікелей қатысты.

Барлық жұмыстар «Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» республикалық мемлекеттік кәсіпорнының (ҚР ҰАО РМК) жетекші ғалымдарымен және мамандарымен тығыз ынтымақтастықта жүргізілді. Диссертациялық зерттеу барысында алынған нәтижелерді талдау, сондай-ақ зерттеу нәтижелерін қорытындылайтын және жүргізілген есептік, эксперименттік және эксперименттен кейінгі жұмыстардың негізгі қорытындыларын тұжырымдау ғылыми консультанттармен бірлесіп жүзеге асырылды. Диссертациялық зерттеу жүргізу барысында алынған нәтижелерді талдау, сондай-ақ зерттеу нәтижелерін және жүргізілген есептік және эксперименттік жұмыстарды қорытындылайтын диссертациялық жұмыс бойынша негізгі қорытындыларды тұжырымдау ғылыми консультанттармен бірлесіп орындалды.

Тақырыптың ғылыми-зерттеу бағдарламаларының жоспарларымен байланысы

Аталған диссертациялық жұмыста ұсынылған нәтижелер ҚР ҒЖБМ Ғылым комитетінің 2022-2024 жылдарға арналған «Ауыр авария кезінде АЭС белсенді балқыту аймағының реактивті тұзағында кориумды салқындату тәсілін әзірлеу және зерттеу» тақырыбындағы гранттық қаржыландыру жобасын (AP14870512) орындау шеңберінде алынды.

Нәтижелердің негізділігі мен дұрыстығының дәрежесі жүргізілген талдамалық және есептік-эксперименттік зерттеулердің дұрыстығы мен жүйелілігімен қамтамасыз етіледі. Негізгі нәтижелер тікелей, жақсы сыналған эксперименттік зерттеу әдістерінің көмегімен алынды.

Диссертациялық зерттеудің негізгі нәтижелері ғылыми қызмет нәтижелерін жариялау үшін ҚР ҒЖБМ КОКСНВО ұсынған басылымдарда, Scopus және Web of Science дерекқорларына енгізілген рецензияланатын шетелдік ғылыми журналдарда, сондай-ақ халықаралық және отандық ғылыми конференциялар еңбектерінің жинақтарында жарияланды.

Диссертациялық жұмыс нәтижелерін байқаудан өткізу

Диссертациялық жұмыстың негізгі ережелері мен нәтижелері 9 халықаралық және отандық ғылыми конференцияларда ұсынылды:

1. «Ядролық ғылым және технологиялар» IV Халықаралық ғылыми форумы (Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы, 2022 жылғы 26 - 30 қыркүйек);

2. «Уәлиев оқулары-2022. Қазіргі заманғы сын-қатерлер жағдайындағы ғылым мен білім берудің өзекті проблемалары» (Өскемен қаласы, Қазақстан Республикасы, 2022 жылғы 16-17 қыркүйек);

3. «Әбділдин оқулары: қазіргі заманғы физиканың өзекті мәселелері» халықаралық ғылыми конференциясы (Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы, 2018 жылғы 12-15 сәуір);

4. XX International Conference of students, graduate students and young scientists «Prospects of fundamental sciences development» (Tomsk, the Russian Federation, April 25–28, 2023);

5. «Семей сынақ полигоны: мұра және ғылыми-техникалық әлеуетті дамыту перспективалары» XX халықаралық конференциясы (Курчатов қаласы, Қазақстан Республикасы, 2023 жылғы 12 - 14 қыркүйек);

6. International Conference “Fundamental and Applied Problems of Modern Physics” (Tashkent, the Republic of Uzbekistan, October 19-21, 2023);

7. «Қазақстан Республикасындағы атом өнеркәсібінің қазіргі жай-күйі және даму перспективалары» халықаралық ғылыми-практикалық конференциясы (Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы, 2023 жылғы 27-28 қараша);

8. IX International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (Tomsk, the Russian Federation, September 15-21, 2024);

9. ҚР ҰЯО РМК жас ғалымдары мен мамандарының XXIII ҒЗТКЖ конференция-конкурсы (Курчатов қаласы, Қазақстан Республикасы, 2024 жылғы 16 - 18 қазан).

Сонжай-ақ диссертациялық жұмыстың негізгі нәтижелері «Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» КЕАҚ «Техникалық физика және жылу энергетикасы» кафедрасының ғылыми семинарларында, ҚР ҰЯО РМК БАӘ филиалының ғылыми-техникалық кеңесінің отырыстарында, сондай-ақ PhD-докторанттарының онлайн-семинарларында баяндалды.

Жарияланымдар

Диссертацияда баяндалған зерттеулердің нәтижелері бойынша 12 баспа жұмысы жарияланды, оның ішінде КОКСНВО ұсынған ҚР-ның рецензияланатын ғылыми басылымдарында - 1, Scopus және/немесе Web of Science базасында индекстелген журналдарда - 3, халықаралық конференциялар еңбектерінің жинақтарында - 7, сондай-ақ пайдалы модельге патент - 1.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі

Жұмыс кіріспеден, бес тараудан, қорытындыдан және пайдаланылған көздер тізімінен тұрады. Диссертация 106 беттен тұрады, 53 суреттен, 12 кестеден және 145 атаудан тұратын пайдаланылған дереккөздердің тізімінен тұрады.