

Қуаныш Қанатұлы Самархановтың

8D05301 - «Физика» білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алуға арналған диссертациясына

АНДАТПА

${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ядролық реакциясының өнімдерінің энергиясын оптикалық сәуле шығару энергиясына түрлендіру процестерін эксперименттік зерттеу

Жұмыстың жалпы сипаттамасы. Диссертациялық жұмыс ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ядролық реакциясы өнімдерінің кинетикалық энергиясын оптикалық сәулелену энергиясына түрлендіру процестерін эксперименттік зерттеуге арналған. Жұмыста осы ядролық реакцияның өнімдері қоздырған кезде инертті газдардың төмен температуралы ядролық қоздырылатын плазмасында сәулелену жай-күйінің қалыптасуының негізгі заңдылықтары белгіленген.

Зерттеу тақырыбының өзектілігі. Ядролық қозған плазманың оптикалық (лазерлік және өздігінен) сәулеленуін зерттеу ядролық реактордан энергияны шығару тәсілін әзірлеу үшін, сондай-ақ ядролық реакторлардың параметрлерін бақылау және реттеу үшін қызығушылық тудырады. Болашақта ядролық қоздыру кең ауқымды қолданулар үшін пайдаланылады деп болжануда, әсіресе автономды қашықтағы объектілерде орналастыру үшін қуатты, ықшам лазерлер қажет болған жағдайларда. Белсенді орталарды тікелей қоздыру, әдетте, ядролық реактордың жылу нейтрондарымен ядролық реакциялар өнімдерімен жүзеге асырылады: ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$, ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$, ${}^{235}\text{U}(n,f)\text{F}$ немесе басқалар. Лазердің жұмыс ортасында ${}^{235}\text{U}$, ${}^3\text{He}$ немесе ${}^{10}\text{B}$ болуы тиіс немесе осы изотоптармен қосылу лазерлік камераның қабырғаларына салынады. Аз зерттелген жылу нейтрондарымен литий-6 ядролық реакциясын қолдану болды. Литийдегі (130 мкм) және газ ортасындағы (атмосфералық қысым кезінде гелийде ~35 см-ден) тритий ядроларының жүрісінің салыстырмалы үлкен ұзындығы газдардың едәуір көлемін қоздыруға және ${}^{10}\text{B}$ реакция өнімдерімен салыстырғанда газға салынатын қуаттың үлкен көлемін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Осы саладағы зерттеулерге елеулі қызығушылық сондай-ақ дәстүрлі газ разрядты лазерлерде қоныстану процестерінен құю кезінде энергетикалық деңгейлерді қоныстандыру тетіктерінің елеулі айырмашылығымен байланысты.

Бұл диссертациялық жұмыста ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ядролық реакциясының өнімдері қоздырған кезде инертті газдарда сәулелену жағдайларының қалыптасу заңдылықтарын зерделеу мақсатында литийдің тозаңдану процестері, оның буферлік газбен буларының өзара әрекеттесуі, сондай-ақ $2p-1s$ -өткелінде қоныстанғандығы инверсиясын жасау мүмкіндігін айқындайтын параметрлер қарастырылады. Диссертациялық жұмыстың өзектілігі ядролық реакция энергиясын оптикалық сәулелену энергиясына айналдырудың ғылыми-техникалық проблемасын шешумен және ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ реакция өнімдерімен толтыру кезінде инертті газдар негізінде ядролық қоздырылатын плазмада сәулелену жай-күйінің қалыптасу заңдылықтарын анықтау қажеттілігімен байланысты. Инертті газ атомының $1s$ -деңгейін тиімді

орналастыру үшін және 2p-1s-өткелінде қоныстанғандығы инверсиясын құру үшін газдағы литий буының жеткілікті тығыздығына қол жеткізілетінін анықтау қажет. Осы міндетті шешу инертті газдардың люминесценциясын және наносекундты электронды шокпен қоздыру кезінде литийдің тозаңдану процестерін зерттеуді, сондай-ақ импульстің ұзақтығы 0,12 с болған кезде $7 \cdot 10^{16}$ н/см²с жылу нейтрондарының ағынымен ИГР импульстік ядролық реакторында реакторлық эксперименттер жүргізуді қамтитын кешенді тәсілді талап етеді.

Осы мақсатты іске асыру үшін арнайы эксперименттік қондырғы, газ қоспаларын қоздырудың литий көзі бар сәулелендіру құрылғысын және ИГР реакторында реакторішілік эксперименттер жүргізу әдістемесін әзірлеу қажет. Алдын ала зерттеулер электрондардың наносекундтық үдеткішінде жүргізіледі, бұл неғұрлым қолайлы зертханалық жағдайларда электрондық шоғыр әсерінен литийдің инертті газдарға шашырауын зерттеуге, ядролық бөлшектердің қоздыруымен салыстырғанда айырмашылықтарды анықтауға және осылайша қажетті реакторлық эксперименттердің көлемін айтарлықтай қысқартуға мүмкіндік береді.

Осылайша, диссертациялық жұмыстың тақырыбы газ қоспаларының ядролық қоздырылатын плазмасындағы процестерді іргелі зерделеу қажеттілігіне негізделген. Жұмыс литийді инертті газға электронды шокпен және ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ядролық реакциясының өнімдерімен қоздыру кезінде шашырату бойынша жаңа эксперименттік деректерді алуға бағытталған. Алға қойылған міндеттерді іске асыру жеделдеткіш, сол сияқты реакторлық қондырғыларды пайдалана отырып кешенді зерттеулер жүргізуді талап етеді, бұл Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығының ғылыми және техникалық әлеуетін толық көлемде пайдалануға мүмкіндік береді.

Диссертациялық жұмыстың мақсаты – ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ядролық реакциясы өнімдерімен литийді шашырату кезінде инертті газдар қоспаларында сәулелену жай-күйінің қалыптасуының негізгі заңдылықтарын белгілеу.

Алға қойылған мақсатқа қол жеткізу үшін мынадай **міндеттерді** шешу қажет:

1) ИГР импульстік ядролық реакторында зерттеулер жүргізу үшін газ ортасын қоздырудың литийлік көзі бар эксперименттік қондырғы мен сәулелендіру құрылғысын әзірлеу және дайындау;

2) ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ядролық реакциясының өнімдерімен қоздырылатын газ қоспаларының оптикалық сәулеленуінің спектралдық-уақыттық сипаттамаларын зерттеу бойынша реакторішілік эксперименттер жүргізу әдістемесін әзірлеу;

3) газ орталарының оптикалық сәулеленуінің спектрлік-уақыттық сипаттамалары бойынша жаңғыртылатын эксперименттік деректерді алу, негізгі плазмохимиялық реакцияларды айқындау, сондай-ақ ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ядролық реакциясының өнімдері қоздырған кезде инертті газдар атомдарының 2p-1s өткелдерінде энергетикалық деңгейлерді қоныстандыру және дезактивациялау тетіктерін анықтау.

Зерттеу объектісі ИГР импульстік реакторының белсенді аймағында сәулелену жағдайында ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ядролық реакция өнімдерінің инертті газдардың (He-Ar, He-Xe) газ қоспаларымен өзара әсері кезінде пайда болған газ ортасының төмен температуралы ядролық қоздырылатын плазмасы болып табылады.

Зерттеу мәні ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ядролық реакциясының өнімдері қоздырған кезде инертті газдар атомдарының 2p-1s өткелдерінде энергетикалық деңгейлердің қоныстану және дезактивация процестерінің кинетикасы болып табылады.

Зерттеу әдістері. Диссертациялық жұмыста эксперименттік зерттеулерді іске асыру үшін спектралдық, масс-спектрометриялық және есептеу-теориялық әдістер қолданылды.

Газ қоспаларын (He-Ar, He-Xe) иондаушы сәулеленумен қоздыру кезінде олардың сәулеленуінің спектрлік-уақыттық сипаттамаларын зерттеу плазма диагностикасының спектрлік әдісін пайдалана отырып жүргізілді. Бұл әдіс импульстік реактордың қуатының уақытша тәуелділігін өлшеумен үйлесімде оптикалық сәулелену импульстерінің генерация шегін, нысанын және ұзақтығын анықтауға мүмкіндік берді.

Спектрлерді тіркеу үшін *OceanView* лицензиялық бағдарламалық қамтамасыз етуімен 200-ден 950 нм-ге дейінгі толқын ұзындықтарының диапазонында жұмыс істейтін *Ocean Insight* фирмасының QE Pro-Abs оптикалық спектрометрі пайдаланылды. Сигналдарды жоғары уақыт дәлдігімен тіркеу үшін әртүрлі спектрлік сезімталдығы бар Thorlabs фотодиодтарының сызғышы, сондай-ақ ФЭУ PDM02-9113W-CN модулі бар МДР-204 монохроматоры қолданылды. Сигналдардың уақытша сипаттамалары лицензиялық бағдарламалық қамтамасыз етуі бар Tektronix TBS2204B цифрлық осциллографының көмегімен тіркелді. Масс-спектрометрия газ қоспаларының сапалық құрамын бақылау үшін RGA-100 аспабын пайдалана отырып жүргізілді.

Қосымша сандық модельдеу әдістері қолданылды - жылу физикалық және нейтрондық-физикалық есептеулер, сәулелендіру құрылғыларының параметрлерін негіздеуге, сондай-ақ ИГР импульстік реакторының белсенді аймағында эксперименттер жүргізудің қауіпсіздігін қамтамасыз етуге бағытталған ANSYS FLUENT және MCNP5 сияқты лицензиялық бағдарламалық кешендер.

Сондай-ақ жұмыста Арин-2 рентген дефектоскопының негізінде орындалған электрондардың ықшам наносекундтық үдеткіші пайдаланылды, бұл литийді реактордың белсенді аймағынан тыс неғұрлым бақыланатын жағдайларда инертті газға бүрку процестерін алдын ала зерттеуге мүмкіндік берді.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы мынада, бұл алғашқы рет:

– ИГР реакторында реакторішілік зерттеулер жүргізу үшін газ қоспаларын қоздырудың литий көзі бар эксперименттік қондырғы мен сәулелендіру құрылғысы әзірленіп, дайындалды. Әзірленген құрылғы «Импульсті графитті реакторда эксперименттер жүргізуге арналған

сәулелендіру құрылғысы» пайдалы модельге патентпен қорғалған (№ 7162, 03.06.2022 ж. жарияланған).

– ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ядролық реакциясы өнімдерімен қоздырылатын газ қоспаларының оптикалық сәулеленуінің спектралдық-уақыттық сипаттамаларын зерттеу үшін ИГР реакторының белсенді аймағында реакторлық эксперименттер жүргізу әдістемесі ұсынылды және сынақтан өткізілді;

– реакторлық сәулелену жағдайларында ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ядролық реакция өнімдерімен қоздырылатын газ қоспаларының (He-Ar, He-Xe) сәулеленуінің спектрлік-уақыттық сипаттамалары бойынша жаңа эксперименттік деректер алынды;

– ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ядролық реакциясы өнімдерімен қоздыру кезінде инертті газдар қоспаларындағы 2p-1s өтпелерінде сәулелену жай-күйін қалыптастыру және дезактивациялау тетіктері анықталды және белгіленді.

Қорғауға шығарылатын негізгі ережелер:

1. Әзірленген эксперименттік қондырғы, газ қоспаларын қоздырудың литийлік көзі бар сәулелендіру құрылғысы және ИГР импульстік реакторында реакторішілік эксперименттер жүргізу әдістемесі. Алғаш рет ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ядролық реакциясы өнімдерімен газ қоспаларын қоздыру кезінде туындайтын оптикалық сәулеленудің спектралдық-уақыттық сипаттамаларын зерттеуге арналған мамандандырылған эксперименттік қондырғы құрылды. Эксперименттік қондырғы газ-вакуумдық жүйені, ақпараттық-өлшеу жүйесін (АӨЖ) және тікелей ИГР реакторының орталық эксперименттік арнасында - жылу нейтрондарының максималды ағыны аймағында орналастырылатын газ ортасын қоздырудың литийлік көзі бар сәулелендіру құрылғысын (СҚ) қамтиды. Газ-вакуум бөлігі СҚ қажетті жағдайларды жасау және қамтамасыз ету үшін TURBOLAB 90i 63ISO-K/SC7plus/F/N пост базасында іске асырылды. АӨЖ үш кіші жүйені қамтиды: СҚ корпусының температурасын реттеу және тұрақтандыру; оптикалық тіркеу жүйелері; газ фазасының масс-спектрометриялық диагностикасы. Газ қоспаларының оптикалық сәулеленуінің спектрлік-уақыттық сипаттамаларын тіркеу үшін QE Pro-Abs спектрометрі қолданылады (Ocean Insight, Singapore) лицензиялық бағдарламалық қамтамасыз ету OceanView, кремний DET100/AM және индигаллий PDA10D2 фотодетекторлар (Thorlabs, USA), Keithley KickStart Software және TBS2204B (Tektronix) лицензиялық бағдарламалық жасақтамасымен TPS2012 (Tektronix) осциллографтары, PDM02-9113-CN монохроматормен («ЛОМО ФОТОНИКА плюс», РФ) ұштасқан МДР-204 фотоэлектрондық көбейту модулі (ET Enterprises, UK), бұл оптикалық сәулелену параметрлерін жоғары дәлдікпен өлшеуді қамтамасыз етеді. Регламенттелген Бағдарлама түрінде ресімделген «Жарқ ету» режимінде реакторлық эксперименттерді жүргізу әдістемесі әзірленді және сынақтан өткізілді. Әдістеме зерттеулердің жаңғыртылуын және қауіпсіздігін қамтамасыз ете отырып, реактор импульсімен дайындау, іске қосу, синхрондау және алынған деректерді өңдеудің қадамдық рәсімдерін қамтиды.

2. Иондаушы сәулелену әсерінен литийді инертті газға шашу кезіндегі оптикалық сәулеленудің спектралдық-уақыттық сипаттамалары.

${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ядролық реакциясы өнімдерімен газ ортасын қоздыру процестерін модельдеу мақсатында 150 кэВ қуатымен және ұзақтығы 5 нс жылдам электрондар шоғырымен литий қабатын сәулелендіре отырып, эксперименттер сериясы жүргізілді. Сәулелендіру камерасы 10-нан 60 кПа-ға дейінгі қысымда аргонмен, криптонмен немесе ксенонмен толтырылған. Литий қабатының 650-680 К температурасы кезінде сәулелену спектрінде литий сызықтары пайда болады, олардың қарқындылығы температураның ұлғаюымен айтарлықтай өседі. Литий атомының өткелдерінде жарық сәулелену инертті газдардың атомдарының өткелдерінде сәулеленумен бір мезгілде пайда болады және электрондар шоғының импульсінен кейін 20-30 нс сайын максимумға жетеді.

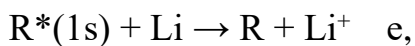
ИГР импульстік реакторында реакторішілік эксперименттер сериясы жүргізілді, олардың барысында жаңа эксперименттік деректер алынды және ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ядролық реакциясының өнімдерімен қоздырылатын газ қоспаларының оптикалық сәулеленуінің жаңғыртылатын спектралдық-уақыттық сипаттамалары тіркелді. Зерттелетін газ қоспалары ретінде 100:1 қатынасында тиісінше 100 кПа және 99,4 кПа қысымдар кезінде He-Ar және He-Xe қоспалары пайдаланылды. Осы эксперименттерде «Вспышка» жұмыс режиміндегі ИГР реакторының жылу қуаты тиісінше 8,9 ГВт және 9,49 ГВт құрады. He-Ar қоспасы үшін 750,4 нм және He-Xe қоспасы үшін тиісінше 823 нм толқын ұзындығына теңестірілген сәулелену спектрлері, сондай-ақ сәулелену осциллограммалары тіркелді.

2. Плазмалық процестердің кинетикасы және қоныстану - ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ядролық реакциясының өнімдерімен қоздыру кезінде инертті газдар атомдарының 2p-1s өткелдерінде энергетикалық деңгейлерді дезактивациялау.

Реактордан тыс эксперименттердің нәтижелері бойынша электрондық шоқпен қоздыру ұзақтығымен салыстырылатын уақыт ішінде литий деңгейлерін қоныстандырудың негізгі арнасы литий қабатының иондармен және инертті газдың метастабильді атомдарымен өзара әсерлесуі есебінен беткі иондау болып табылатыны анықталды. Кейіннен жарық сәулесі газ көлеміндегі плазмохимиялық реакциялар барысында пайда болады. 1 мПа-дан 130 мПа-ға дейінгі қаныққан литий буының қысымына сәйкес келетін қабат температурасы кезінде булардың қажетті тығыздығы (≥ 1 Па) литийді ядролық бөлшектермен бүрку есебінен қамтамасыз етіледі.

Реакторлық эксперименттер негізінде негізгі плазмохимиялық реакциялар айқындалды және He-Ar және He-Xe газ қоспаларының ядролық қоздырылатын плазмасында ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ядролық реакциясы өнімдерімен қоздыру кезінде өтетін процестердің жылдамдығы есептелді. Реакторлық эксперименттер нәтижелерінің негізінде инертті газдар атомдарының 2p-1s өткелдерінде энергетикалық деңгейлерді қоныстандыру және дезактивациялау тетіктері белгіленді, сондай-ақ плазмалық процестердің кинетикасы талданды.

Литий деңгейлерінің қоныстануына әкелетін негізгі арна Пеннинг процесі (R - инертті газ атомы) болып табылады:



Литийдің шашыранды атомдарының қоздыруы газдағы одан әрі плазмохимиялық реакциялар нәтижесінде болады. Литий төменгі деңгейді инертті газдардың 2p-1s-өткелдерінде селективті түрде сөндіре алады. Реакторлық және реактордан тыс эксперименттердің нәтижелерін салыстыру иондаушы әсердің әртүрлі типтері кезінде плазмалық процестердің өтуінің жалпы заңдылықтарын анықтауға мүмкіндік берді.

Практикалық маңыздылығы. Диссертациялық жұмыстан алынған эксперименттік деректер және ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ядролық реакциясының өнімдері қоздырған кезде инертті газдардағы энергетикалық деңгейлердің қоныстануы мен дезактивациясы процестері кинетикасының анықталған заңдылықтары оптикалық сәулелену нысанында ядролық реактордан энергияны шығарудың жаңа тәсілдерін әзірлеу үшін практикалық құндылық болып табылады. Нәтижелер когерентті (лазерлік) немесе өздігінен оптикалық сәулеленуді генерациялауға қабілетті ядролық-энергетикалық қондырғыларды құру кезінде пайдаланылуы мүмкін. Зерттеулер сондай-ақ иондаушы сәулелену детекторларын жасау тұрғысынан, сондай-ақ ядролық реакторлардың белсенді аймағының параметрлерін бақылау және диагностикалау жүйелерінде қызығушылық тудырады. ҚР ҰЯО АЭИ филиалында ядролық бөлшектердің кинетикалық энергиясын оптикалық сәулелену энергиясына тікелей түрлендіру саласында қолданбалы ғылыми зерттеулер жүргізу рәсіміне диссертациялық жұмыс нәтижелерін енгізу туралы акт алынды.

Эксперименттік зерттеулерден алынған нәтижелер ҚР ҰЯО-ның «Қазақстан Республикасында атом энергетикасын дамытуды қолдаудағы зерттеулер»/Ә.Ғ.Батырбековтың жалпы редакциясы және В.В. Баклановтың еңбектері жинағына кірді ҚР Энергетика министрлігінің ҚР ҰЯО РМК АЭИ филиалы. - Курчатова, 2021.- 278 бет: ил. 269 – ISBN 978-601-06-7963-4».

Автордың жеке үлесі. Диссертациялық зерттеудің мақсаты мен міндеттерін қою, алынған нәтижелерді талқылау және негізгі қорытындыларды тұжырымдау ғылыми консультанттармен бірлесіп жүргізілді. Автордың жеке үлесі әдеби деректерге талдамалық шолу және патенттік іздестіру жүргізуден, ИВГ.1М мен ИГР реакторларында реактордан тыс зерттеулер мен эксперименттер жүргізуді қамтамасыз етуге әдістемелік тәсілдерді қалыптастыруға, тікелей эксперименттік жұмыстарды дайындау және жүргізу, алынған эксперименттік деректерді талдау және өңдеу, есептеу жұмыстарын жүргізу, ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ядролық реакциясы өнімдерімен литийді шашырату кезінде инертті газдар қоспаларында сәулелену жай-күйінің қалыптасу заңдылықтарын зерттеу, сондай-ақ диссертациялық жұмыстың тақырыбы бойынша негізгі жарияланымдарды дайындауға тікелей қатысудан тұрады. Барлық жұмыстар ҚР ҰЯО РМК АЭИ филиалының жетекші ғалымдарымен және мамандарымен тығыз ынтымақтастықта жүргізілді.

Диссертациялық жұмыс тақырыбының ғылыми-зерттеу бағдарламаларының жоспарларымен байланысы. Осы жұмыстың едәуір бөлігі «Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің Ғылым комитеті» мемлекеттік мекемесінің қаржылық қолдауымен 16.11.2020 жылғы № 187 шарттың шеңберінде « ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ядролық реакциясының өнімдерімен қоздырылған инертті газ атомының р-s ауысуындағы квазиүздіксіз лазерін жасау бойынша зерттеу» тақырыбында (AP08856017) орындалды, сондай-ақ жұмыстың бір бөлігі «Когерентті оптикалық сәулелену түрінде ядролық реактордан энергия шығарудың физикалық негіздерін әзірлеу» тақырыбы бойынша «Қазақстан Республикасында атом энергетикасын дамыту» (BR09158470) ғылыми-техникалық бағдарламасын іске асыру шеңберінде орындалды.

Жұмыста алынған нәтижелердің негізділігі мен дұрыстығы дәрежесі қойылған міндеттердің дұрыстығымен, дәлдігімен және түпнұсқалығымен, реакторлық және реактордан тыс эксперименттердің, масс-спектроскопияның, оптикалық-эмиссиялық спектрометрияның өзара келісетін нәтижелерімен қамтамасыз етіледі. Диссертацияның негізгі нәтижелері Scopus және Web of Science дерекқорына кіретін рецензияланатын шетелдік ғылыми журналдарда жарияланды.

Жұмыс нәтижелерін апробациялау. Диссертацияның негізгі нәтижелері ондаған халықаралық конференцияда баяндалды және талқыланды:

1. International online conference «Advanced manufacturing materials and research: new technologies and techniques AMM&R2021» (Ust-kamenogorsk, Kazakhstan, 2021, February 19);

2. «Семей сынақ полигоны: мұра және ғылыми-техникалық әлеуетті дамыту перспективалары» IX халықаралық конференциясы (Курчатов к., Қазақстан, 2021 жылғы 07-09 қыркүйек);

3. XV International conference on pulsed lasers and laser applications. – AMPL-2021 – Tomsk, October 12-17, 2021.;

4. 20th International Conference Laser Optics (ICLO 2022).– St.Petersburg, Russian Federation, June 20-24, 2022;

5. 10th International Conference on Nanomaterials and advanced energy storage systems (INESS-2022), (Astana, August 4–6, 2022);

6. 13th International Conference on Tritium Science and Technology - Tritium 2022. – Bucharest, Romania, October 16-21, 2022;

7. 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2022). – Tomsk, Russia, October 2-8, 2022;

8. Физика бойынша Нобель сыйлығының лауреаты Николай Геннадиевич Басовтың туғанына 100 жыл толуына арналған ЛАПЛАЗ-2022 «Лазерлік, плазмалық зерттеулер мен технологиялар» VIII халықаралық конференциясы. – Мәскеу, ФЗЯУ МИФИ, РФ, 22-25 наурыз, 2022;

9. XXIII International Symposium on Solid State Dosimetry – ISSSD-2023 – Monteria, Colombia. September 25-29, 2023;

10. «Семей сынақ полигоны: мұра және ғылыми-техникалық әлеуетті дамыту перспективалары» X халықаралық конференциясы (Курчатов қ., Қазақстан, 2023 жылғы 12–14 қыркүйек).

Конференция-конкурстарда:

1. ҚР ҰЯО РМК жас ғалымдары мен мамандарының XX ҒЗТКЖ конференция-конкурсы, ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты (Курчатов қ., Қазақстан, 2021 жылғы 6–8 қазан);

1. Қазақстан физикалық қоғамының үшінші жыл сайынғы жиналысы (Курчатов қ., Қазақстан, 2023 жылғы 7–11 маусым).

Сонымен қатар, диссертациялық жұмыстың негізгі нәтижелері физика кафедрасының ғылыми семинарларында, жаратылыстану ғылымдары мен технологиялар факультетінің біріккен ғылыми семинарларында және С.Аманжолов атындағы ШҚҰ Ғылыми-техникалық кеңесінде, сондай-ақ ҚР ҰЯО РМК мен ҚР ҰЯО РМК АЭИ филиалының Ғылыми-техникалық кеңестерінде, сондай-ақ PhD-докторанттардың семинарларында баяндалды және талқыланды.

Жарияланымдар. Диссертациялық жұмыстың негізгі нәтижелері 20 баспа жұмысында жарияланды, оның ішінде: Scopus және Web of Science деректер базасында индекстелетін журналдарда 5 мақала, Қазақстан Республикасының пайдалы моделіне 1 патент, халықаралық конференциялар еңбектерінің жинақтарында - 14 және басқа басылымдарда - 1.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі. Диссертациялық жұмыс кіріспеден, бес бөлімнен, қорытындыдан және пайдаланылған дереккөздердің тізімінен тұрады. Жұмыс 112 беттен тұрады, 52 суреттен, 10 кестеден және 102 атаудан тұратын пайдаланылған дереккөздердің тізімінен тұрады.