

Бауржан Жамбулович Чектыбаевтың

6D072300 – «Техникалық физика» мамандығы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесіне іздену диссертациясына

АННОТАЦИЯСЫ

Плазмада және токамак қондырғысының бірінші қабырғасының бетіндегі үдірістерді диагностикалау әдістерін дамыту

Диссертациялық жұмыста КТМ токамакта плазманы, зерттелетін материалдардың бетіндегі температураны өлшеуді, магнит өрісінің нөл конфигурациясының өзгеруін бақылауға арналған диагностикалық жүйелерді жетілдіру нәтижелері, сондай-ақ оларды пайдаланудың эксперименталдық зерттеулердің нәтижелері берілген.

Тақырыптың өзектілігі. Қазақстан Республикасында КТМ токамагі – термоядролық синтездің болашақ эксперименталдық және өндірістік қондырғыларына арналған бірінші қабырғаның материалдарының жоғары температуралық плазмамен өзара әсерін зерттеуге арналған тороидальдық типті қондырғыны құру аяқталуда. Келешектегі экологиялық таза және қауіпсіз термоядролық энергетиканы құру бойынша алдыңғы қатарлы елдердің кооперациясының маңызды тізбегінің бірі КТМ болып табылады. КТМ қондырғысында $I_p=750$ кА тоғы және $A=2$ аспекті қатынасы бар плазма алынуы керек. Осындай аспектілі қатынасы бар қондырғылар осы уақытқа дейін құрылған жоқ (классикалық токамактарда $A>3$, сфералықтарда $A<2$), сондықтан плазма физикасын осындай қондырғыда зерттеу өте қызықты болып табылады. Осылай, КТМ токамагінің плазмалық бауының параметрлерін және келешектегі термоядролық реакторлардың (ТЯР) бірінші қабырғасының зерттелетін материалдарымен плазманың өзара әсерін зерттеуге арналған диагностика әдістерін жетілдіру және пайдалану өзекті тапсырма болып табылады. Жұмыстардың жалпы қағидасы токамак типті барлық қондырғыларды бірлестіретіне қарамастан, олардың әрқайсысы бірегейлі болып табылады және өздерінің конструктивтік және физикалық ерекшеліктері бар. Бұл кемінде физикалық диагностиканың нақты бір қондырғыға бейімделу қажеттілігіне, көбінесе жаңа құрылғыны әзірлеуге әкеледі.

КТМ токамагіндегі алғашқы эксперименталдық жұмыстар қондырғының конструктивтік ерекшеліктерінің бір қатар ерекшелігін анықтады. Осы ерекшеліктер вакуум камерасының симметриялық емес құрылымына және массивті тоқ өткізгіш элементтердің (дивертті үстел, вакуум камерасының фланеці және т.б. сияқты) бар болуымен байланысты. КТМ вакуум камерасында плазмалық разрядтың бастапқы сатысында 100 кА жететін елеулі тоқ жіберіледі.

Эксперименттер көрсеткендей, массивті бір келкі емес таратылған тоқ өткізгіш элементтердің бар болуы, вакуум камерасында жіберілетін құйынды тоқтарды моделдеу қиындығымен және дәл болмауына, және сәйкесінше КТМ вакуум камерасындағы өріс нөлі конфигурациясының есебінің тақтығына әкеледі. Сонымен қатар, КТМ токамакта электромагнитті жүйеге және қоректендіру көздеріне жобалық шектеу күшіне байланысты айналуында $1,6 \text{ В/м}$ артпайтын электр өрісінің кернеуінің салыстырмалы елеулі мағынасын ғана алуға мүмкін. Бұл тороидалды магнит өрісінің 1 Тл тең салыстырмалы елеулі мағынасымен бірге таратылған полоидалдық магнит өрістерінің көлеміне және тасқынды омдық тесіп өтуге қол жеткізу үшін қажетті өріс нөлі деп аталатын аудан көлеміне шектеу салады. Сондықтан осы орын моделдеудің тақтылығына неғұрлым сезімтал. Сонымен қатар, осы аудандағы магнит өрістерін берік моделдеу, оның бастапқы фазасына плазма разрядын бастамалау кезінде барлық плазма разрядына әсер ететін қажетті шарттардың бірін болжау үшін үлкен маңызы бар. Осылай, КТМ вакуум камерасының ішінде оның нөлдік мағынасына жақын өрістердің таралуын тура өлшеу бойынша жұмыстарды жүргізу және есептемелер кодтарын анықтау өзекті тапсырма болып табылады.

Плазманы бейне бақылау жүйелері токамак типті қондырғылардың диагностикалық кешенінің ажырамас бөлігі болып табылады. Осындай жүйелер қолданысқа енгізу кезегі бойынша алғашқылардың бірі және токамакты іске қосу сатысында сияқты, сондай-ақ қондырғыны келесі пайдалануда да негізделген болып табылды.

Бірақ та конструктивтік және технологиялық негізділігінің күшінде – ұзын диагностикалық келте түтіктер (шолу бұрышын шектейтін), электромагниті және нейтронды әсер, көретін терезелері бар келте түтіктердің жанындағы бейне камераларды тікелей орнату қиындайды немесе мүмкін емес. Осыған байланысты бейне камерасының кіру объективінен матрицасына дейін бейнені беруге арналған арнайы оптикалық трактарды (эндоскопиялық жүйелер) әзірлеу керек. Осылай, плазманы бейне бақылау жүйелері өзінің құрамында түрлі оптикалық элементтердің үлкен жинағы бар техникалық құралдардың күрделі кешенге айнала бастайды. КТМ токамак вакуумы камерасының конструкциясында плазмалық бауды көзбен шолып бақылауды елеулі шектейтін ұзын экваторлық келте түтіктер бар. Осыған байланысты ұзын келте түтіктердің мәселесін шешуге мүмкіндік беретін техникалық шешімдерді пайдалану талап етіледі.

Плазма-қабырғаның өзара әрекеттесуін зерттеу кезінде маңызды бақыланатын параметрлардың бірі плазманың әсер ететін жылу ағындарының мағынасы және плазма материалына айналған бетін қыздыру температурасы болады. КТМ токамагында диверторға плазманың максимальды жылу ағымдары (20 МВт/м^2 дейін) ИТЭР-да күтілетінге сәйкес болады. Сонымен байланысты, плазманың жылу ағымдарының әсер етуінде зерттелінетін материалдарды

қыздыру температурасын бақылау және өлшеу құралдарын маңызды пайдалану болады.

Оптикалық термометрия әдістері температурасы өлшенетін датчиктің денемен түйісуді талап етпейді, сондықтан, түйіспелік тәсілдерді пайдалану кедергісі болған жағдайда қолдану мүмкін болады. ИҚ термометрия әдістері өте жоғары температураларды өлшеуге мүмкіндік береді. Жылувизиялық ИҚ камераны пайдалану кезінде жоғары кеңістік ажыратымдылығы бар материал бетіне температураны тарату суретін белгілеуге болады. Сонымен қатар өлшем жоғары жылдам әрекетпен жүргізілуі мүмкін болады. Оптикалық термометрия әдістері Абсолютті қара дене үшін осындай жақын сәуле шығаратын мүмкіндігі бар дене бетінің температурасын өлшеу кезінде және де ертеде белгілі мәні кезінде (токамактарда, мысалы, оның сәуле шығаратын мүмкіндігі 1-ге жақын болғандықтан, бірінші қабырғаның материалы ретінде белгіленген графиттің температурасын өлшеу кезінде) жақсы қолданылады.

Металл бірінші қабырғасын пайдалану оптикалық ИҚ термометрия әдістерімен өлшеу кезінде оның бетінің температурасын белгілеу дәлдігінің мәселесіне әкеледі. Бұл, металдар «қара» денелер болмайтынымен байланысты, шағын сәуле шығаратын мүмкіндігі бар және көбінесе оның температурадан тәуелділігі бар. Сәуле шығаратын мүмкіндігі материал бетінің күйіне байланысты және плазманың сәуле шығару әрекетінде бетінің түрленуіне байланысты қалай, солай атомдар бетіне қайта тұндыруға байланысты және разрядтық камераның басқа бөліктерінен шаңды бөлшектері, мысалы, бериллий вольфрамнан дайындалған диверторлық тілімдерге. Сонымен қатар, өлшеу қателігі, ерекше жоғары температуралар саласында ондаған проценттерге жетуі мүмкін.

ИТЭР үшін оның күйінің өзгеруі және бетін қыздыру процессінде дененің сәуле шығаратын мүмкіндігін өзгерту мәселесін шешу үшін пирорефлектометрия принципін пайдаланатын арнайы қос түсті пирометр әзірленеді. Осы әдістің әзірлемесі F3TKЖ сатысында табылады. Әзірленетін диагностиканың кемшіліктерінің бірі тек бір кеңістік нүктеде температураны өлшеу болады. Бірақ, дивертордың және металл бірінші қабырғасының бетінде плазма ағындарын бір қалыпты емес тарату салдарынан температураның күшті градиенттері орын алады, сондықтан, зерттелінетін материалдардың бетінде температураны кеңістікті таратуды өлшеуге мүмкіндік беретін өлшеу тәсілін әзірлеу, ерекшелігінде жоғары дәлдігі бар металдар аса өзекті болып табылады.

Сондықтан, КТМ токамагында зерттеулер жүргізуді қамтамасыз етуді эксперименттік деректерді алуға мүмкіндік беретін арнайы өлшеу құралдарын құру және пайдалану, осы бірегей қондырғыда барлық ғылыми-зерттеулік бағдарламаларды іске асыру үшін үлкен маңызы бар.

Диссертациялық жұмыстың мақсаты КТМ токамагында зерттеулер жүргізу үшін өлшеу құралдарын және плазма диагностикасы әдістерін әзірлеу және жетілдіру болып табылады.

Қойылған мақсатқа қол жеткізу үшін келесі міндеттер шешілді:

- КТМ вакуумды камерасында магниттік өрістің нөл конфигурациясын тура дәл өлшеу тәсілдерін әзірлеу;
- КТМ токамагында өрістің нөл конфигурациясын өлшеу;
- КТМ вакуумды камерасының ішінде полоидалдық магниттік өрістердің үлестірілуін, есептеудің сандық кодтарының алынған эксперименттік деректерінің негізінде тексеру;
- КТМ плазмасын бейнебақылау жүйесін әзірлеу;
- КТМ токамагының плазманы бейнебақылау жүйесін пайдалану арқылы плазмалық баудың қалыптасуын зерттеу;
- КТМ токамагында зерттелетін материалдардың бетінде температураның үлестірілуін бақылау үшін ИҚ көзбен шолу диагностикасын әзірлеу;
- КТМ токамагында металдан жасалған материалдарды термографиялық өлшеу дәлдігін арттыруға мүмкіндік беретін тәсілдерді әзірлеу.

Жұмыстың ғылыми жаңашылдығы.

- Алғаш рет КТМ токамагында өрістің нөл конфигурациясын тура өлшеу құрылғысы мен тәсілі әзірленді.
- Алғаш рет КТМ токамагы үшін полоидалдық магниттік өрістерді моделдеудің және қалпына келтірудің есептік кодтарына тексеру жүргізілді.
- КТМ токамагы үшін плазманы көзге көрінетін диапазонда бақылаудың эндоскопиялық жүйесі әзірленді.
- Плазманың жылу ағындарының әсерімен зерттелетін материалдардың бетінде температуралық өрістердің үлестірілуін бақылау үшін КТМ токамагын ИҚ көзбен шолу жүйесі әзірленді.
- Алғашқы рет жоғары температуралы плазма ағындарының әсерімен жылдам қыздыру жағдайларында кең температуралық диапазонда металдардың температурасын термографиялық өлшеуді түзету тәсілдері әзірленді.

Қорғауға шығарылатын негізгі ережелер:

- Үш компонентті Холл сезбегінің матрицасын пайдалану арқылы КТМ токамагының вакуумды камерасының ішінде магниттік өрістің нөл конфигурациясын тура өлшеу тәсілі.
- КТМ токамагының плазмалық бауын көзбен шолу жүйесі;
- КТМ токамагында жылувизиялық камераны, сондай-ақ қаралық деңгейін өлшеуді бақылауға арналған сыртқы инфрақызыл жарықтандыруды пайдалануға негізделген, кандидаттық материалдардың зерттелетін үлгілерінің бетінде температураның үлестірілуін өлшеу тәсілі.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы:

- Әзірленген өрістің нөл конфигурациясын тура өлшеу тәсілі есептік кодтарға тексеру жүргізуге мүмкіндік берді. Алынған өлшеу нәтижелері КТМ ЭМЖ моделін нақтылау үшін пайдаланылды, бұл өз кезегінде жүргізілген есептеулердің дәлдігін арттырды. Тәсілді БТС басқа қондырғыларында қолдануға болады.

– Әзірленген КТМ токамығы плазмасын көзбен шолу жүйесі ұзын экваторлық келтеқұбыр мәселесін шешіп, плазмалық бауға бейнебақылау жүргізуге мүмкіндік берді және КТМ эксперименттік зерттеулер мүмкіндігін айтарлықтай кеңейтті. Осындай жүйе БТС басқа да қондырғыларында пайдаланылуы мүмкін.

– КТМ токамагының жағдайларында плазма ағындарының әсерімен зерттелетін материалдар, атап айтқанда металдар бетінің температурасын термографиялық өлшеу дәлдігін едәуір арттыру тәсілі ұсынылды.

КТМ токамығында өндірілген, диссертациялық жұмыстың нәтижелері диссертацияның Қосымшасында берілген.

Жұмыстардың негізгі нәтижелері КТМ токамығын физикалық іске қосуды (бірінші және екінші кезеңдері) уақытылы дайындауды және жүргізуді жүзеге асыруға, сондай-ақ қондырғының жұмысқа жарамдылығын ЭКСПО-2017 көрсетуге мүмкіндік берді.

Диссертациялық жұмыс тақырыбының ғылыми-зерттеу бағдарламалары жоспарларымен байланысы.

Диссертациялық жұмыс 2015-2016 жж. арналған «Токамақтың вакуумды камерасында бағытталған құйынды токтарды және КТМ токамагы өрісінің нөл конфигурацияларында оның тексерілуін ескеріп, магнитті өрістер динамикасының сандық моделін әзірлеу» тақырыбы бойынша 12.02.2015 ж. №2064/ГФ4 шарттың, сондай-ақ 2018-2020 жж. арналған АР05133148 «ТЯР бірінші қабырғасындағы кандидаттық материалдардың бетін термографиялық өлшеу тәсілін әзірлеу және оны КТМ материалтану токамагында енгізу» тақырыбы бойынша 30.03.2018 ж. №305 шарт аясында, сондай-ақ Қазақстан Республикасының Энергетика министрлігінің «Токамак қазақстандық термоядролық материалтану реакторын құруды және пайдалануды ғылыми-техникалық қолдау» іс-шарасы бойынша «Технологиялық сипаттағы қолданбалы ғылыми зерттеулер» республикалық бюджеттік бағдарламаның 2015-2017 жж. «КТМ токамагы плазмасының параметрлерін анықтауға арналған физикалық диагностикалар және әдістемеліктер кешенін дайындау» тақырыбы аясында «Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің Ғылым комитеті» Мемлекеттік мекемесінің гранттарды қаржылық қолдауымен орындалды.

Автордың жеке үлесі. Диссертациялық жұмыстың негізгі нәтижелері мен ережелері автордың жеке өзімен немесе оның басшылығымен, сондай-ақ ҚР ҰЯО АЭИ мамандарының қатысуымен алынды және әзірленді. Алынған нәтижелердің талдауы және негізгі қорытындылардың тұжырымдары ғылыми консультанттармен бірлесе жүргізілді.

Диссертациялық зерттеулердің нәтижелерінің апробациясы.

Зерттеулердің негізгі нәтижелері 8 халықаралық ғылыми конференцияларда баяндалды және талқыланды:

1. 25-th IAEA Fusion Energy Conference (St. Petersburg, 2014);

2. IX Халықаралық конференция «Плазма диагностикасының қазіргі заманғы әдістері және оларды қолдану» (Мәскеу, МЗФИ ҰЗЯУ, 2014)
3. X Халықаралық конференция «Плазма диагностикасының қазіргі заманғы әдістері және оларды қолдану» (Мәскеу, МЗФИ ҰЗЯУ, 2016);
4. Дүниежүзілік инженерлер мен ғалымдар конгресі (WSEC-2017, Астана);
5. VIII Халықаралық конференция Семей сынақ полигоны: мұра және ғылыми-техникалық әлеуетін дамыту перспективалары (Курчатов, Қазақстан, 2018);
6. 27-th IAEA Fusion Energy Conference (Ahmedabad, India, 2018);
7. 46-шы Плазма физикасы және БТС жөніндегі Звенигород конференциясы (Звенигород, Ресей, 2019);
8. 3-rd Quantitative Infrared Thermography Asian Conference (Tokyo, Japan, 2019);

Сондай-ақ 4 конференцияларда-конкурстарда, мектептер мен кеңестерде:

1. XIII ҚР ҰЯО жас ғалымдары мен мамандарының ҒЗТКЖ конференция-конкурсы (Курчатов, Қазақстан, 2014);
2. XIV Курчатов пәнаралық жастар ғылыми мектебі (Мәскеу, Ресей, 2016);
3. 9-th IAEA Technical Meeting on Steady State Operation of Magnetic Fusion Devices (IAEA Headquarters, Vienna, Austria, 2017).
4. Шәкәрім атындағы МУ докторанттары арасындағы постерлік баяндамалар конкурсы (Семей, 2018)

Диссертация ережесі МЗФИ ҰЗЯУ «Плазма физикасы» кафедрасының, сондай-ақ ҚР ҰЯО ҒТК отырыстарында баяндалды.

Бұдан басқа, диссертациялық жұмыстың негізгі нәтижелері Шәкәрім атындағы МУ «Техникалық физика және жылу энергетикасы» кафедрасының ғылыми семинарларында, Семей қаласының Шәкәрім атындағы МУ ҒТК баяндалды және талқыланды.

Жарияланымдар. Диссертациядағы зерттеулерде мазмұндалған нәтижелер бойынша қысқаша мазмұн жасалатын ғылыми журналдарда барлығы 9 мақала жарияланған. Олардың ішінде ҚР БҒСБК ұсынылған рецензияланатын ғылыми басылымдарында – 3, Scopus және Web of Science индекстелетін журналдарда – 3, АТЭХАГ техникалық құжатында – 1.

Диссертацияның құрылымы және көлемі. Диссертация кіріспеден, төрт тараудан, қорытынды және пайдаланған әдебиеттер тізімінен тұрады, барлығы 129 бет, 86 сурет, 37 таблица, 95 атаудан тұратын библиография, 3 қосымша.