АҢДАТПА

«6D072300 – Техникалық физика» мамандығы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алуға ұсынылған Тәжен Әйгерім Бегімханқызы
«Плазманың термоядролық реакторлардың бірінші реттік қабырғасымен әсерлесуін модельдеуге арналған қондырғыда импульстік плазма ағыны мен қабырғалық плазмадағы процестерді диагностикалау» диссертациялық жұмысына

Жұмыстың жалпы сипаттамасы. Диссертациялық жұмыс импульстік плазма ағынын диагностикалау және оны қабырға маңындағы процестерді зерттеуге, атап айтқанда плазманың термоядролық энергетикалық реакторлардың бірінші реттік қабырғасымен әрекеттесуі кезінде қабырға материалдарының бүлінуін және тозаңдануын зерттеуге қолдануға бағытталған. Ол үшін эксперименттік деректерді жинау мен өңдеудің заманауи және апробацияланған өлшеу және бағдарламалық-аппараттық құралдары пайдаланылды. Сонымен қатар, міндеттерді орындау үшін PW-7 коаксиалды плазмалық үдеткіште плазма ағынының пайда болуының динамикасын зерттеуге мүмкіндік беретін авторлық әдіс қолданылды.

Тақырыптың өзектілігі. Басқарылатын термоядролық синтез негізіндегі болашақ энергетика саласының әлеуеті бірқатар шешілмеген мәселелермен шектеледі. Осындай мәселелердің бірі термоядролық реакторлардың қабырға маңындағы плазма (SOL) параметрлерін бақылау және басқарумен тығыз байланысты. Қабырға мағындағы плазма параметрлерін бақылау қабырға мен плазма арасындағы тиімді жылу алмасуды қамтамасыз етеді. Осылайша, қабырға маңындағы плазмалық процестерді зерттеу және диагностикалау бүгінгі күнге дейін өте маңызды және өзекті міндеттердің бірі болып табылады.

Айта кету керек, плазманың бірінші реттік қабырғамен әрекеттесуі кезінде бірқатар құбылыстар пайда болады. Олардың ішінде құрылымдық материалдардың эрозиясы ерекше назар аударады. Қолданыстағы және салынып жатқан термоядролық реакторлардағы құрылымдық материалдардың эрозиясын жан-жақты зерттеу эксперименттерді жүргізуге кететін шығындар тұрғысынан өте қымбатқа түседі және екінші жағынан үлкен есептеу ресурстарын қажет етеді. Сол себепті ITER-дегі қабырға маңындағы плазманы имитациялайтын шағын модельдеу қондырғыларын пайдаланған әлдеқайда тиімді болып табылады.

50-ші жылдардың басында бөлшектерге үлкен бағытталған жылдамдықты беру арқылы жоғары энергиялы плазмалық ағындарды алу идеясы пайда болды. Осылайша плазма физикасындағы жаңа ғылыми бағыт – жоғары жылдамдықты плазмалық үдеткіштер тез дами бастады. Бұл үдеткіштерде плазманың үдеуі келесі факторларға: электродинамикалық күштің (ампер күшінің) плазмаға әсеріне, үдеткіш каналындағы қысым градиентінің болуына, плазма ішіндегі электр өрісінің әсеріне (плазманың квазибейтарапты болуы маңызды болған жағдайда) негізделген. Барлық

электромагниттік плазма үдеткіштерінің ішінде импульстік жүйелерге ерекше назар аударылған. Құрылысының қарапайымдылығы және бағасының қол жетімді болуы оларды көптеген қосымшаларда қолдануға мүмкіндік береді. Осылайша, физиктер импульстік плазмалық үдеткіштерде (ИПҮ) термоядролық синтезді жүзеге асыратын қажетті плазма ағынының жылдамдығына қол жеткізуге болатындығын анықтады. Басқарылатын термоядролық синтез (БТС) бағдарламасы аясында жүргізілген алғашқы тәжірибелерде-ақ бағытталған плазма ағынының энергиясы 10^7 эВ-қа дейін жеткен болатын. БТС мәселесін шешуден басқа, импульстік плазмалық үдеткіштер әлсіз гравитациялық өрістерде (ғарышта) қозғалатын қуатты плазмалық электрлік реактивті қозғалтқыштар ретінде де қарастырылады. Сонымен қатар, бұл қондырғыларды термоядролық энергетикалық реакторларда плазмалық белдіктің үзілуін және оның камераішілік материалдармен әсерлесуін зерттеу үшін де қолданады. Кез-келген қарастырылып отырған жүйенің күйін түсінудің, сипаттаудың және бағалаудың ажырамас бөлігі диагностика болып табылады. ИПҮ-де плазманы диагностикалау күрделі процесс, өйткені бұл қондырғыларда плазма стационар емес көп компонентті жүйе ретінде қарастырылады. Жалпы диагностиканың көмегімен қабырғаға бағытталған энергия ағынының (жылу ағыны, энергетикалық бөлшектер ағыны, радиациялық ағын) тығыздығын алдын-ала бағалауға болады. Диагностика сонымен қатар ТЯР-дың бірінші реттік қабырғасына плазмалық белдіктің үзілуін болжауға және осылайша қабырға процестерін модельдеуге мүмкіндік береді. Сондай-ақ, плазмалық ағындардың пайда болу табиғаты мен динамикасын түсіну және ағынның энергиясының артуына әкелетін қолайлы жағдайлар мен параметрлерді таңдау да өте маңызды мәселелердің бірі болып табылады.

Бүгінгі таңда импульстік-периодты разрядтардың нәтижесінде пайда болатын жоғары температуралы, тығыз плазманы диагностикалау міндеттері өте **өзекті**. Импульстік режимдерде стационарлық разряд режимдерімен салыстырғанда физикалық процестер өте қысқа мерзімде жүреді. Сондай-ақ, импульстік режимде бірнеше импульсте бірдей плазма параметрлерін алу әрдайым қол жеткізілмейтінін атап өткен жөн. Бұл шектеулерді жою үшін диагностикалық әдістерді әрі қарай жетілдіріп, дамыту қажет.

Диссертациялық жұмыс ҚР БҒМ ҒК «ғылыми зерттеулерді гранттық қаржыландыру» негізінде жүргізілетін іргелі ғылыми-зерттеу жұмыстарының (ҒЗЖ) жоспарларына сүйене отырып, келесі тақырыптар бойынша жүзеге асырылды: «Термоядролық энергетикалық реакторлардағы плазмалық белдеудің үзілуі нәтижесіндегі радиациялық және жылулық жүктеменің реактор ішінің беткі материалдарына әсері және осы кездегі тозаңды плазманың түзілуі» (2018-2020 жж., шифры: AP05134671, мемлекеттік тіркеу №: 0118РК00708); «Плазманың қасиеттерін және плазмалық белдіктің термоядролық энергетикалық қондырғы камерасының ішкі материалдарымен әсерлесуін зерттеу» (2020-2023 жж., шифры: AP09259081, мемлекеттік тіркеу №: 0121РК00295).

Жұмыстың мақсаты – «PW-7» имитациялық қондырғыда плазма ағынындағы электрондардың тығыздығы мен температурасының және плазмалық белдіктің өздік магниттік өрісінің таралуын алу және токамактағы қабырға маңындағы плазманың бірінші реттік қабырғамен әсерлесу процестерін эксперименттік модельдеу және зерттеу.

Мақсатқа қол жеткізу үшін келесідей **міндеттерді** орындау қажет:

– плазмалық ағынның бір импульсі кезінде электрондар температурасы мен тығыздығының таралуын бір уақытта алуға мүмкіндік беретін көпэлектродты зондтық әдісті жетілдіру.

– цилиндрлік плазмалық белдіктің өздік магниттік өрісін өлшеу арқылы оның кеңістіктік конфигурациясы мен орнын анықтауға мүмкіндік беретін әдісті әзірлеу.

– «PW-7» имитациялық қондырғыда алынатын плазмалық ағындармен сәулелендірілген кандидаттық бірінші реттік қабырға материалдарын зерттеу.

Зерттеу нысаны: импульстік плазмалық ағын (плазмалық белдік), кандидаттық бірінші реттік қабырға материалдары.

Зерттеу пәні: плазмалық ағындағы электрондардың температурасы мен тығыздығының өзгерісі, плазмалық белдіктің азимуталды магниттік өрісінің таралуы, кандидаттық материалдарға плазмалық ағындардың әсері.

Зерттеу әдістері. Диссертацияда келесі зерттеу әдістері қолданылды: үштік ленгмюрлік зонд әдісі, оптика-эмиссиялық спектроскопия әдісі, сканерлеуші электрондық микроскопия әдісі, рентгендік дифракция әдісі, азимуталды магниттік өрістің таралуын өлшеуге арналған зонд әдісі және жоғары жылдамдықты фототіркеу.

Жұмыстың жаңашылығы.

– 30 км/с астам жылдамдықпен қозғалатын импульстік плазмалық ағынның электрондар тығыздығы мен температурасын бір уақытта анықтауға мүмкіндік беретін көпэлектродты зондтық диагностика әдісі жетілдірілді.

– импульстік плазмалық ағынның (белдіктің) өздік магниттік өрісінің кеңістіктік және уақыттық таралуы бойынша оның динамикасы мен құрылымын зерттеуге бағытталған авторлық әдіс ұсынылды.

– ТЯР-дың қабырға маңындағы плазма параметрлеріне сәйкес келетін ұзақтығы 0,2 мс және ең жоғары энергия тығыздығы 1,1 МДж/м^2 болатын импульстік плазмалық ағынмен сәулелендірілген кезде вольфрам пластинасының бетіндегі микрожарықтар мен әртүрлі ақаулардың пайда болуы мен таралуы туралы жаңа эксперименттік деректер алынды.

Жұмыстың ғылыми-практикалық маңыздылығы. Диссертацияның ғылыми және практикалық маңыздылығы келесіге негізделген: диссертациялық жұмыс нәтижелері термоядролық қондырғылардағы қабырға маңындағы плазманы диагностикалау әдістері мен құралдарының кешенді дамуына негіз болды. Сонымен қатар зерттеу нәтижелері болашақ термоядролық қондырғылардың дизайнын оңтайландыруға, сондай-ақ кейбір штаттық емес жағдайларды алдын ала болжауға пайдалы болуы мүмкін.

Қорғауға шығарылатын ережелер:

1. Жетілдірілген көпзондты диагностика әдісі электрондардың температурасы мен тығыздығының таралуының $n_e = 1{,}2 \cdot 10^{20} - 4{,}8 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$ және kT_e = 12-62 эВ аралығында локальды біртексіздігіне әкелетін плазмалық ағынның үзілуін анықтады.

2. Әзірленген магниттік зондтар жүйесімен алынған плазмалық ағынның электродтардан z = 23 см қашықтықтағы азимуталды магниттік өрісінің уақытқа тәуелділігі 47 км/с жылдамдықпен ұлғаятын тұйық плазмалық-ток белдігінің қалыптасуын анықтауға мүмкіндік берді.

3. Плазмалық ағынмен сәулелену барысында вольфрам пластинасын алдын ала 550°C дейін қыздыру ені 1 мкм-ден асатын жарықтардың пайда болуына жол бермейді, бұл өз кезегінде материалдың тозаңдануының айтарлықтай әлсіреуіне әкеледі.

Автордың жеке үлесі – диссертацияның көлемін, эксперименттік және диагностикалық кешендерді әзірлеу, жасақтау, эксперименттер жүргізу, алынған нәтижелерді талдау, және мақалаларды жариялауға дайындау автормен жүргізілді. Ғылыми міндеттер жоспарлау, нәтижелерді талқылау, және негізгі қорытындыларды тұжырымдау ғылыми кеңесшілермен бірлесе отырып жүргізілді.

Алынған нәтижелердің сенімділігі мен негізділігі шет елдердің импакт-факторлары бар журналдарында және ҚР БҒМ Білім және ғылым саласында сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған басылымдарда және жақын және алыс шет елдердің халықаралық ғылыми конференцияларының еңбектерінде жарияланған жарияланымдармен расталады.

Жарияланымдар. Диссертациялық жұмыс деректері бойынша 33 баспа жұмысы жарияланды: PhD дәрежесін алуға арналған диссертациялық жұмыстың негізгі нәтижелерін жариялау үшін ҚР ҒЖБМ ҒЖБССҚК ұсынған басылымдар тізбесіне кіретін журналдарда 7 мақала, ЖАК ғылыми басылымдарының тізбесіне кіретін журналда 1 мақала, Web of Knowledge (Thomson Reuters Clarivate Analytics, АҚШ) және Scopus (Elsevier, Нидерланды) халықаралық ақпараттық ресурстарына кіретін импакт-факторы бар алыс шетел журналдарында 5 мақала; халықаралық ғылыми конференциялар жинақтарында 19 жұмыс және ҚР өнертабысына 1 инновациялық патент.

Диссертациялық жұмысты апробациялау. Диссертацияда алынған нәтижелер баяндалды және талқыланды:

«Dusty Plasma Workshop» тозаңды плазма бойынша 15-ші халықаралық ғылыми семинарда (2018, Балтимор қ., АҚШ);

«ESCAMPIG-XXIV» иондалған газдардың атомдық және молекулалық физикасы бойынша 24-ші халықаралық конференцияда (2018, Глазго қ., Шотландия);

«ION-XII» иондық имплантация және иондар мен электрондардың басқа да қосымшаларда қолданылуы бойынша 12-ші халықаралық конференцияда (2018, Казимеж-Дольны қ., Польша);

«РРРТ-9» плазма физикасы және плазмалық технологиялар бойынша 9-шы халықаралық конференцияда (2018, Минск қ., Беларусь Республикасы);

«ФАРАБИ ӘЛЕМІ» студенттер мен жас ғалымдардың халықаралық конференциясында (2018, 2019, 2021, 2023 ж., Алматы қ., Қазақстан);

«ICPIG-XXXIV» иондалған газдардағы құбылыстар жөніндегі 34-ші халықаралық конференцияда (2019, Саппоро қ., Жапония);

Ресей нанотехнологиялық қоғамының 10-шы халықаралық конференциясында (2019, Мәскеу қ., Ресей);

«SMMIB-2019» иондық сәулелермен материалдардың бетін модификациялау бойынша 21-ші халықаралық конференцияда (2020, Томск қ., Ресей);

«Лаплаз-2020» лазерлік, плазмалық зерттеулер және технологиялар жөніндегі 6-шы халықаралық конференцияда (2020, Мәскеу қ., Ресей);

«Лаплаз-2021» лазерлік, плазмалық зерттеулер және технологиялар жөніндегі 7-ші халықаралық конференцияда (2021, Мәскеу қ., Ресей);

«ICPDP-2022» тозаңды плазма бойынша 9-шы халықаралық конференцияда (2022, Мәскеу қ., Ресей);

«CSCPIER-2023» зарядталған бөлшектердің күрделі жүйелері және олардың электромагниттік сәулемен әсерлесуі туралы 19-шы халықаралық конференцияда (2023, Мәскеу қ., Ресей).

Thomson Reuters дерекқоры бойынша немесе Scopus халықаралық ғылыми дерекқорына кіретін басылымдардағы импакт-факторы бар мақалалар:

– M.K. Dosbolayev, **A.B. Tazhen,** A.N. Kholmirzayev, Ye.A. Ussenov, T.S. Ramazanov. Studies of the formation and distribution of cracks and various defects on the heated tungsten plate surface during pulsed plasma flux impact // Nuclear Materials and Energy. – 2023. – Vol. 37. – № 101540. – P. 1-9;

– M.K. Dosbolayev, **A.B. Tazhen,** T.S. Ramazanov, Ye.A. Ussenov Investigation of dust formation during changes in the structural and surface properties of plasma-irradiated materials // Nuclear Materials and Energy. – 2022. – Vol. 33. – № 101300. – P. 1-11;

– **A.B. Tazhen,** M.K. Dosbolayev, T.S. Ramazanov. Investigation of self-generated magnetic field and dynamics of a pulsed plasma flow // Plasma Science and Technology. – 2022. – Vol. 24. – № 055403. – P. 1-8;

– **A.B. Tazhen,** Zh.R. Rayimkhanov, M.K. Dosbolayev, T.S. Ramazanov. Generation and Diagnostics of Pulse Plasma Flows // Plasma Physics Reports. – 2020. – Vol. 46(4). – P. 465-471;

– M.K. Dosbolayev, Zh.R. Raiymkhanov, **A.B. Tazhen,** T.S. Ramazanov // IEEE Transactions on plasma science. – 2019. – Vol. 47. – № 7. – P. 3047-3051.

ҚР ҒЖБМ ҒЖБССҚК ұсынған журналдардағы мақалалар:

– **A.B. Tazhen,** M.K. Dosbolayev, Zh.B. Igibaev, A.U. Utegenov, T.S. Ramazanov. Investigation of the plasma column evolution and dynamics in the PW-7 plasma accelerator // Physical sciences and technology. – 2023. – Vol. 10. – № 1. – P. 42-49;

– **A.B. Tazhen,** M.K. Dosbolayev, T.S. Ramazanov. Pulsed plasma flow diagnostics // Recent Contributions to Physics. – 2022. – Vol. 81. – № 2. – P. 35-39;

– M.K. Dosbolayev, **A.B. Tazhen,** T.S. Ramazanov. Investigation and diagnostics of plasma flows in a pulsed plasma accelerator for experimental modelling of processes in tokamaks // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. – 2021. – Vol. 5. – № 4. – P. 198-210;

– **A.B. Tazhen,** M.K. Dosbolayev. Measuring the self-generated magnetic field and the velocity of plasma flow in a pulsed plasma accelerator // Recent Contributions to Physics. – 2021. – Vol. 77. – № 2. – P. 30-39;

– **А.Б. Тажен,** A. Thilo, J. Jacoby, М.Қ. Досболаев, Т.С. Рамазанов. Спектральная диагностика импульсного плазменного потока методом Штарковского уширения линии H_β // Вестник КазНИТУ. –2020. – № 3. – С. 153-158;

– **А.Б. Тажен,** Утегенов А.У., Райымханов Ж.Р, Қамбаров Ә.А. Тепловая эрозия графитовой мишени под воздействием интенсивного импульсного плазменного потока // Вестник КазНУ им. аль-Фараби. Серия физическая. – 2018. – Том 67. – № 4. – С. 1-6;

– **Ә.Б. Тәжен,** Қ. Нұрболат, М.Қ. Досболаев. Импульсті плазма ағынына спектроскопиялық диагностика жасау // Журнал ПЭОС – 2018. – Том 2. – № 20. – Б. 45-51.

ЖАК ғылыми басылымдарының тізбесіне кіретін журналдардағы мақалалар:

– **А.Б. Тажен,** Ж.Р. Райымханов, М.Қ. Досболаев, Т.С. Рамазанов. Получение и диагностика импульсных плазменных потоков // Успехи прикладной физики. – 2019. – Том 7. – № 5. – С. 463-471.

ҚР инновациялық патенті:

– өнертабысқа инновациялық патент: «Импульсті плазмалық ағынның магниттік өрісінің кеңістіктікуақыттық таралуын өлшеу әдісі және оны жүзеге асыру құрылғысы», № 35200, 03.12.2021.

Диссертациялық жұмыстың көлемі мен құрылымы. Диссертациялық жұмыс кіріспеден, 3 бөлімнен, қорытындыдан және 166 пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады, және 79 суретті, 4 кестені қоса есептегенде, негізгі компьютерлік мәтіннің 107 бетін қамтиды.