

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-1-25-29>

УДК 533.0.082

ПЛАЗМАЛЫҚ ФОКУС ТЕРМОЯДРОЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫСЫНДАҒЫ НЕЙТРОНДАР ЭМИССИЯСЫНЫҢ АНИЗОТРОПИЯСЫН ЗЕРТТЕУ

Ж.М. Молдабеков, А.М. Жукешов, А.Т. Габдуллина, А.У. Амренова

ал-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

Плазмалық фокус (ПФ) термоядролық қондырғысындағы нейтрондар эмиссиясы мен анизотропиясының динамикалық сипаттамалары газ қысымына қатысты зерттелді. Диагностикалық өлшеу жүргізуде екі пластикалық сцинтилляциялық фотоэлектронды күшейткіш және екі белсендірілген күміс фольгалы детектор қолданылды. Эксперимент нәтижелері бойынша алынған нейтрондар эмиссиясы $5,5 \cdot 10^6 - 5,11 \cdot 10^7$ н/имп аралығында өзгеріп отырды. Оңтайлықсым ауқымындағы нейтрондар эмиссиясы мен оның анизотропиясы негізгі екі механизм бойынша түсіндірілді.

Түйін сөздер: нейтрондық эмиссия, термоядролық механизм, анизотропия, плазмалық фокус.

КІРІСПЕ

Соңғы жылдары плазмалық фокус термоядролық қондырғысын жасақтап, оны ғылыми-зерттеу жұмыстарында қолдануға деген қызығушылық артып келеді [1, 2]. Себебі аталған қондырғыда D-D синтезделу реакциясы кезінде (дейтерий немесе тритий газын толтырған жағдайда) рентген сәулелерімен бірге нейтрондар және энергиялары жоғары иондар мен электрондар ұшып шығады.

Килоджоульды және мегаджоульды плазмалық фокус қондырғыларында нейтрондардың эмиссиясы скейлинг заңына [6] сәйкес қондырғының энергиясына W (конденсатор сымдылығына және кернеуге байланысты) және сығылу тоғына I (пинчтелу тоғы) тәуелді болады. Алайда, кейбір эксперименттік шарттарда (қысымның тұрақсыз болуы, зарядталу кернеуінің артық немесе жеткіліксіз болуы) ПФ қондырғысының W энергиясы мен I сығылу тоғының кейбір сындық мәндерінен артып кетуі нейтрондар эмиссиясының қанығуына, тіпті олардың төмендеуіне де алып келеді [8]. Сондықтан да, нейтрондар эмиссиясының анизотропиясы қондырғының конструкциялық параметрлеріне және эксперимент шарттарына да тәуелді болады.

Заманауи диагностикалық әдістерді пайдалана отырып, D-D реакциясы кезіндегі плазмалық фокус қондырғысындағы нейтрондардың эмиссиясы мен анизотропиясын өлшеу, табиғаттағы синтезделу механизмінің нақты айғағы болып табылады. Термоядролық синтезделу реакциясы кезінде, энергиясы шамамен бірнеше килоэлектронвольттан мегаэлектронвольтқа дейінгі аралықтағы нейтрондардың изотропты эмиссиясы пайда болады. Эксперименттік зерттеу жұмыстарында [3, 4], нейтрондардың осьтік бағыттағы энергиясы, радиалды бағытта шығарылатын нейтрондардың эмиссиясына қарағанда біршама жоғары болатыны көрсетілді.

Соңғы жылдары плазмалық фокус қондырғысында дейтерий газын қолдану кезінде плазманың қалыптасу динамикасы мен оның $10^{-9} - 10^{-6}$ секунд аралығындағы сығылуына (пинчтелу) қатысты теориялық [2] және эксперименттік [1–8] зерттеу

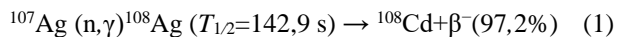
жұмыстары елеулі дәрежеде дамыды. Алайда, қазіргі таңда көптеген зерттеу жобаларының назарын, плазмалық фокус қондырғысындағы интенсивті рентген сәулелері мен жылдам нейтрондардың пайда болу механизмі өзіне тартып келеді. ПФ қондырғысында жүргізілген көптеген эксперименттік модельдеу жұмыстарында [7], нейтрондардың пайда болуына термоядролық механизмімен бірге сәулелі-нысан (beam-target) механизмінің [9, 10] де үстемдік ететіні көрсетіліп келеді. Алайда, ПФ қондырғысында мұндай механизмдердің үстемдік етуі әлі күнге дейін нақты өз шешімін таппады. Сондықтан да, плазмалық фокус қондырғысындағы нейтрондар эмиссиясының анизотропиясын зерттеу, олардың пайда болу механизмін анықтауда маңызды параметр және аталған жұмыстың негізгі мақсаты болып табылады.

НЕЙТРОНДАР ЭМИССИЯСЫНЫҢ АНИЗОТРОПИЯСЫН ӨЛШЕУДЕ ҚОЛДАНЫЛАТЫН ДИАГНОСТИКАЛЫҚ ӘДІСТЕРІ

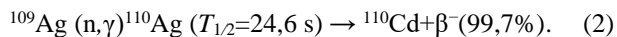
Нейтрондардың эмиссиясын экспериментті түрде өлшеу плазмалық фокус ПФ-4 (20 мкФ, 18 кВ, 5,8 нГн) қондырғысында жүргізіліп, жұмыс газы ретінде дейтерий D_2 газы қолданылды. Разрядты және туынды тоқты тіркеу Роговский белдігі арқылы жүргізіліп, оны калибрлеу үшін жүргізілген эксперименттік өлшеулердің қателігі 2% құрады.

Диагностикалық өлшеу жүйесі екі пластикалық сцинтилляциялық фотоэлектронды күшейткіштен және екі белсендірілген күміс фольгалы детектордан тұрады. Аталған детектордың датчигі ретінде СТС-5 галогенді Гейгер санауыштары пайдаланылды. Гейгер санауышы негізінен электрондар мен гамма-кванттарды (энергиясы көп фотондар) тіркеуде қолданылады. Алайда, иондаушы қабілеті аз болғандықтан, гамма-кванттар тікелей тіркелмейді. Сондықтан да, Гейгер санауышына ^{107}Ag 51,35% және ^{109}Ag 48,65% табиғи күміс изотобы бар фольганы орап, диаметрі 13,6 см, ұзындығы 20 см болатын цилиндрлі тежегіш-контейнердің ішіне орналастырылады. Мұндай санауыштар тек баяу нейтрондарды ғана тіркейтін болғандықтан, санауыш пен цилиндрлі тежегіш-контейнердің арасына, бәсеңдеткіш

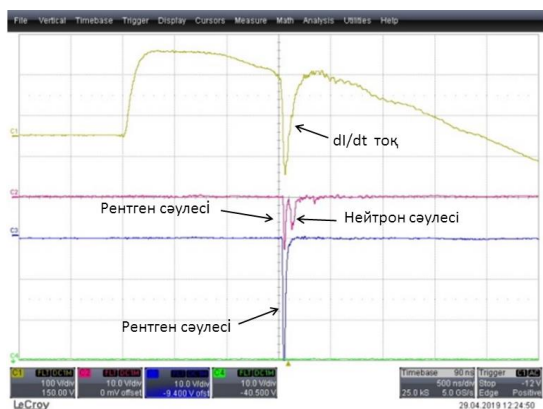
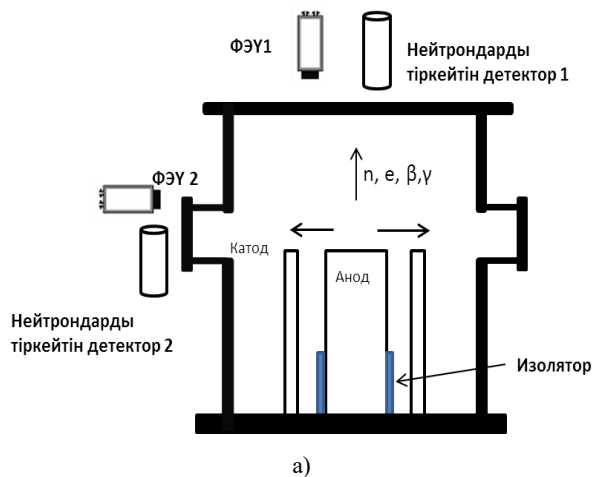
ретінде парафин орналастырылды. Күміс фольгалы детекторда мынадай негізгі ядролық реакциялар, нейтрондық қармап алу арқылы жүреді:



және



Нейтрондардың ^{107}Ag және ^{109}Ag радиоактивті қармауы нәтижесінде ^{108}Ag және ^{110}Ag жартылай өмір сүрі уақыты 142,9 с және 24,6 с болатын тұрақсыз изотоптар пайда болады.



Сурет 1. ПФ-4 қондырғысындағы эксперименттің схемасы: а) қондырғыдағы нейтрондар эмиссиясының анизотропиясын өлшеу диагностикасының схемасы; б) dI/dt туындық тоқ, нейтронды импульс және қатты рентген сәулелерінің осциллограммасы

D-D реакциясы кезінде пайда болатын жылдам нейтрондардың бұрыштық анизотропиясын зерттеу үшін белсендірілген күміс фольгалы детекторлар плазмалық фокус қондырғысының камерасына осьтік (0°) және радиалды (90°) бағытта орналастырылды (1 а-сурет). Детекторлар камера жанына әртүрлі бұрышпен орналастырылсада, электродтардың центрінен детекторға дейінгі қашықтық бірдей 1,5 м құрады. D-D реакциялық синтездеу кезінде

пайда болатын иондардың қабаттасуын болдырмау мақсатында сцинтилляторлық фотоэлектронды күшейткішті детекторлардың алдына қалыңдығы 1,2 мм болатын қорғасын қойылды.

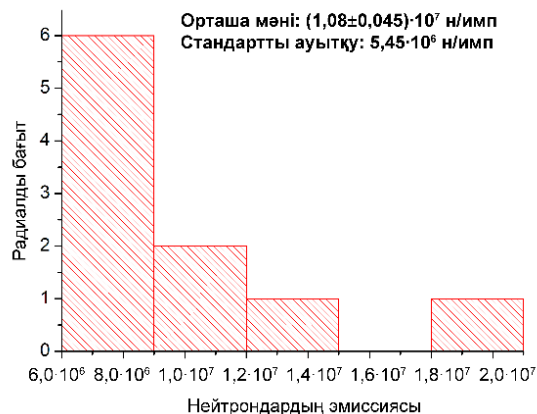
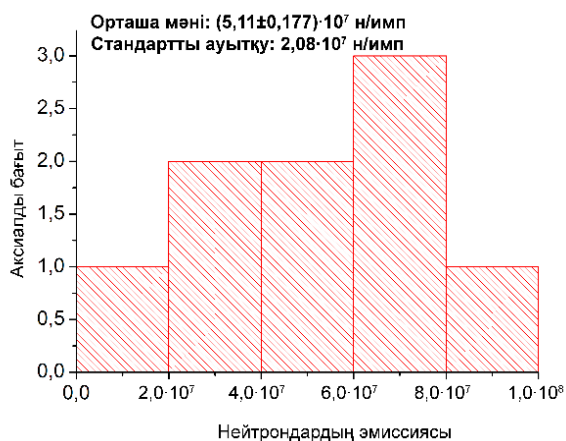
Эксперимент барысында бір уақытта dI/dt туынды ток, рентген сәулелері және нейтрондар эмиссиясы өлшенді (1 б-сурет). Рентгенді сәулелер мен нейтрон импульстарының уақыттық айырымы екі сцинтилляторлы фотоэлектронды күшейткішті детектор арқылы тіркелді. Қызғылт түс осьтік (0°) бағыттағы, ал көк түс радиал (90°) бағыттағы рентген сәулелері мен нейтрондардың эмиссиясына сәйкес келеді. Толық нейтрондардың эмиссиясы жоғарыда аталған белсендірілген күміс фольгалы детектор арқылы өлшенді.

НӘТИЖЕЛЕРДІ ТАЛДАУ

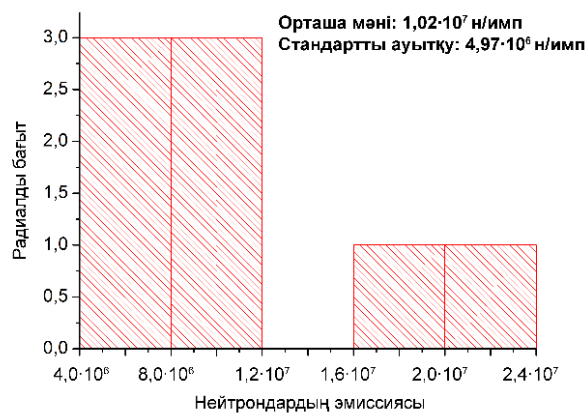
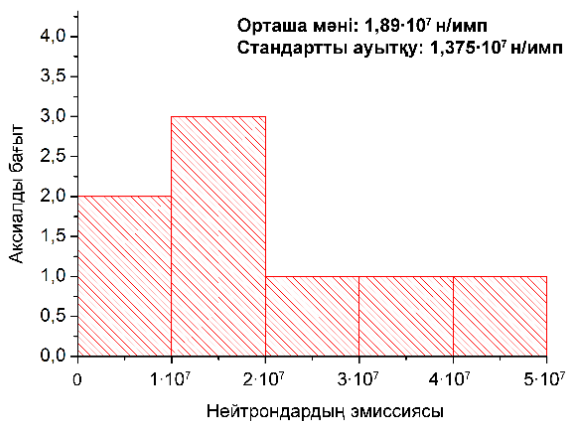
Энергиялары әртүрлі болатын плазмалық фокус термиядролық қондырғылары үшін D-D реакциясы кезіндегі нейтрондар ағыны мен олардың анизотропиясын бағалау өте маңызды параметр болып табылады. Плазманың сығылу уақыты мен пайда болу динамикасы камерадағы газ қысымына, зарядталу кернеуіне және конденсатор батареясына жиналған энергияға тәуелді болады. Осьтік және радиал бағыттағы нейтрондардың эмиссиясы 2–3 Торр газ қысымында өлшенді (2-сурет). Толық эксперимент жүргізу үшін 1710 рет атқылау жүзеге асырылды. Нейтрондардың эмиссиясы үшін орташа және стандартты ауытқу мәндері есептелді. Эксперименттік зерттеу жұмыстары бойынша алынған нәтижелерді (2-сурет) талдау, оптималды нейтрондардың эмиссиясы, камераға толтырылған $P = 2,5$ Торр газ қысымында шамамен $Y = 5,11 \cdot 10^7$ н/имп тең болатынын көрсетті. Сонымен қатар бұл диаграммадан ПФ-4 қондырғысында нейтрондардың шығуы $5,5 \cdot 10^6$ н/имп жоғары шамада жүйелі түрде шығып отыратынын бақылауға болады. Орташа нейтрондардың шығуы осьтік бағытта $P = 2,7$ Торр газ қысымында $Y = 1,89 \cdot 10^7$ н/имп және 3 Торр газ қысымында шамамен $Y = 1,18 \cdot 10^7$ н/имп тең болады.

Нейтрондар эмиссиясының дейтерий газ қысымына тәуелділігі 3-суретте келтірілген. $Y = f(P)$ тәуелділік қисығындағы нейтрондар эмиссиясының максималды мәні $P = 2,5$ Торрға сәйкес келіп тұр. Әртүрлі қысымдағы D-D синтезі кезіндегі нейтрондардың эмиссиясы мен олардың анизотропиясының өзгерісін термиядролық және сәулелі-нысан механизмінің көмегімен түсіндіруге болады.

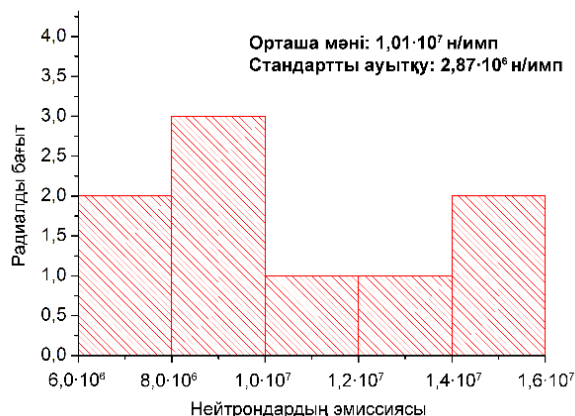
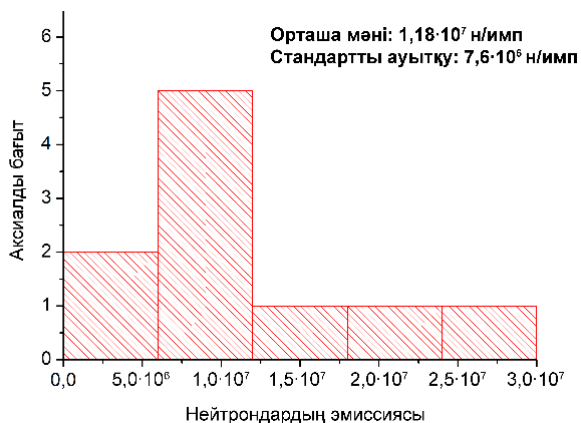
Оптималды нейтрондардың эмиссиясын дейтерий газ қысымына қатысты өзгерісін термиядролық болжам бойынша пинчтік тоқ пен пиктік тоқтың бір мезетте жүзеге асуынан деп (нейтрондардың шығуы I^4 пропорционал) болжанады. Пиктік тоқтар мен пинчтік тоқтардың мұндай өзгерісі қондырғыдағы электродтардың геометриялық параметрлеріне, зарядталу кернеуіне және камераға толтырылған газ қысымына байланысты болады.



а) P = 2,5 Торр газ қысымындағы нейтрондардың эмиссиясы

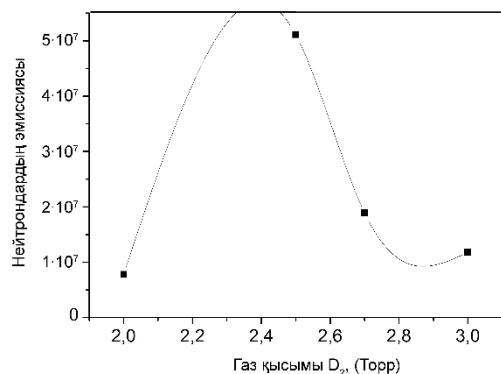


б) P = 2,70 Торр газ қысымындағы нейтрондардың эмиссиясы

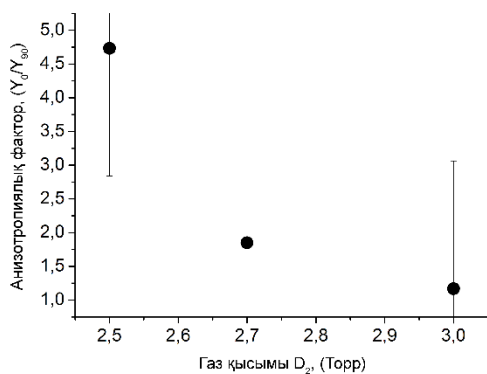


в) P = 3 Торр газ қысымындағы нейтрондардың эмиссиясы

Сурет 2. Әртүрлі газ қысымындағы нейтрондардың эмиссиясы



а)



б)

Сурет 3. а) толық нейтрондар эмиссиясының әртүрлі газ қысымына тәуелділігі; б) нейтрондар эмиссиясының анизотропиясы

Жүргізілген эксперименттік зерттеу нәтижелері бойынша, камераға толтырылған газ қысымының артуымен өзара әрекеттесетін бөлшектердің де тығыздығы артады, осыдан синтезделу реакциясының жылдамдығы мен нейтрондардың эмиссиясының өсу қарқындылығы да артады. Алайда, қысымның белгілі бір сындық мәнінен кейін (плазмалық фокус қондырғысының басқада параметрлеріне тәуелді), нейтрондар эмиссиясының өсуі тоқтайды. Ары қарай газ қысымының артуымен плазманың сығылу уақыты да тұрақтала бастайды. Осы мезетте пиктік ток пен пинчтік токтың өсу қарқындылығы бір мезетте жүзеге аспайды. Нәтижесінде плазманың сығылуы төмендейді, сәйкесінше нейтрондар эмиссиясы да азаяды. Бөлшектік-нысан механизмі бойынша камерадағы газ қысымы оптималды газ қысымынан төмен болғанда (максималды нейтрондардың шығуы байқалатын қысым), дейтрондардың осьтік бағыттағы үдетілуі бәсеңдеп, нәтижесінде нейтрондардың эмиссиясы да төмен болады. Камерадағы қысым оңтайлы қысымнан жоғарылағанда дейтрондар тығыз ортадан өтетін болғандықтан плазманың сығылудан кейінгі фазасында дейтрондардың жылдамдығы азаяды. Нәтижесінде бөлшектің нысанамен эффективті әсерлесуі азайып, нейтрондар эмиссиясының төмендеуіне алып келеді.

Y_0/Y_{90} бағыттары бойынша анизотропия коэффициенті есептелді. Мұндағы Y_0 , Y_{90} – ПФ қондырғысындағы нейтрондардың 0° және 90° градус бойынша эмиссиясы. 3 б суреттен көрініп тұрғандай камерадағы газ қысымы артқанда, кеңістіктегі анизотропия коэффициенті төмендейді. Бұл камерада газдың қысымы төмендегенде разрядтағы иондардың жылдамдығының артуымен түсіндіріледі, яғни плазмалық фокус камерасында жұмыс газының қысымы артқанда нейтрондардың пайда болуы төмендейді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген эксперимент нәтижелері бойынша келтірілген графиктен, жоғары нейтрондардың эмиссиясынан сәйкесінше жоғарғы және төменгі нейтрондардың анизотропиясын бақылауға болады. Мұндай бақылаулар арқылы аталған плазмалық фокус қондырғысындағы нейтрондардың пайда болуына бөлшектік-нысан механизмі (beam target mechanism) басымдылық ететінін бақылауға болады.

Қарастырылып отырған газ қысымының төменгі және жоғарғы шектеріндегі нейтрондар анизотропиясының төмен болуы, Рэлей Тэйлор тұрақсыздығының жеткілікті дәрежеде күшті болмауынан деп болжанады. Сәйкесінше үдетілген дейтрондардың жылдамдығы мен энергиясы төмен бола тұра, олар сол аумақтағы магнит өрісіне ұсталынып, спирал бойымен айнала қозғалыста болады. Осыдан нейтрондардың пайда болуы көп немесе аз мөлшерде шамамен изотропты болады (плазманың магнит өрісінде иондар кездейсоқ түрде қисық сызықты қозғалыста болады деп болжанғандықтан).

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 M. Akel., S. Alsheikh Salo., Sh. Ismael., S.H. Saw., S. Lee. Deuterium Plasma focus as a Tool for Testing Materials of Plasma Facing Walls in Thermonuclear Fusion Reactors // J Fusion Energ (2016), 35. – P. 694–701.
- 2 Berit Vali, Tonu Laas, Jana Paju and et all. The experimental and theoretical investigations of damage development and distribution in double-forged tungsten under plasma irradiation-initiated extreme heat loads // Nukleonika. – 2016). Vol. 61(2). – P. 169–177.
- 3 Herold H., Jerzykiewicz A., Sadowski M., Schmidt H. (1989) Comparative analysis of large plasma focus experiments performed at IPF, Stuttgart, and at IPJ, Swierk. Nucl Fusion 29:1255–1269.
- 4 Sadowski M. (1998) Studies of neutron emission from various plasma-focus facilities in Poland. J Moscow Phys Soc 8:197–211.
- 5 Krokhin O.N., Nikulin V.Ya. The upgraded plasma focus installation “FLORA” – the installation “TULIP” // Journal of Technical Physics. – 1999. – Vol. XL, No. 1.
- 6 Никулин В.Я., Полухин С.Н. О насыщении нейтронного выхода плазменных фокусов мегаджоульного диапазона. //Физика плазмы. – 2007. – Т.33, № 3. – С. 1–7.
- 7 O.N. Krokhin, V.Ya. Nikulin, I.V. Volobuev. Compact activation detectors for measuring of absolute neutron

- yield generated by powerful pulsed plasma installations // Czech. J. Phys. – 2004. – Vol. 54, – P. 28–31.
- 8 Волобуев И.В., Гурей А.Е., Никулин В.Я., Полухин С.Н. Магнито-зондовые и нейтронные измерения на плазменном фокусе ПФ-400. // Физика плазмы, 2010. – Т. 36, № 12. – С. 1075–1084.
 - 9 А.М. Жукешов, Ж.М. Молдабеков, В.Я. Никулин, А.Т. Габдуллина, А.У. Амренова, Д.Н. Кабрешова. Плазмалық фокус термоядролық қондырғысындағы разрядты ток пен нейтрондар эмиссиясының қатынасы // ҚР ҰЯО Жаршысы. – 2020. – Vol. 1(81). – бет 30–34.
 - 10 Zhukeshov A.M., Amrenova A.U., Gabdullina A.T., Ibraev B.M. A plasma Formation in Pulsed Coaxial Gun at Continuously Filling Regime // American Journal of Physics and Applications. – 2013. – Vol. 1, No. 1. – P. 5–9.
- REFERENCES**
- 1 M. Akel., S. Alsheikh Salo., Sh. Ismael., S.H. Saw., S. Lee. Deuterium Plasma focus as a Tool for Testing Materials of Plasma Facing Walls in Thermonuclear Fusion Reactors // J Fusion Energ (2016)35, P. 694–701.
 - 2 Berit Vali, Tonu Laas, Jana Paju and et all. The experimental and theoretical investigations of damage development and distribution in double-forged tungsten under plasma irradiation-initiated extreme heat loads // Nukleonika (2016), 61(2), P. 169–177.
 - 3 Herold H., Jerzykiewicz A., Sadowski M., Schmidt H. (1989) Comparative analysis of large plasma focus experiments performed at IPF, Stuttgart, and at IPJ, Swierk. Nucl Fusion 29:1255–1269.
 - 4 Sadowski M. (1998) Studies of neutron emission from various plasma-focus facilities in Poland. J Moscow Phys Soc 8:197–211.
 - 5 Krokhin O.N., Nikulin V.Ya. The upgraded plasma focus installation “FLORA” – the installation “TULIP” // Journal of Technical Physics, – 1999, Vol. XL, No. 1.
 - 6 Nikulin V.Ya., Polukhin S.N. O nasyshchenii neytronnogo vykhoda plazmennykh fokusov megadzhoul'nogo diapazona. // Fizika plazmy, 2007. – Vol. 33, No. 3. – P. 1–7.
 - 7 O.N. Krokhin, V.Ya. Nikulin, I.V. Volobuev. Compact activation detectors for measuring of absolute neutron yield generated by powerful pulsed plasma installations // Czech. J. Phys., 2004. – Vol. 54, – P. 28–31.
 - 8 Volobuev I.V., Gurey A.E., Nikulin V.Ya., Polukhin S.N. Magnito-zondovye i neytronnnye izmereniya na plazmennom fokuse PF-400. // Fizika plazmy, 2010. – Vol. 36, No. 12. – P. 1075–1084.
 - 9 A.M. Zhukeshov, Zh.M. Moldabekov, V.Ya. Nikulin, A.T. Gabdullina, A.U. Amrenova, D.N. Kabreshova. Plazmalық fokus termoyadrolyқ kondыrgыsyndagy razryadty tok pen neytrondar emissiyasynyn katynasy // Vestnik NYaTs RK. – 2020. – Vol. 1(81). – P. 30–34.
 - 10 Zhukeshov A.M., Amrenova A.U., Gabdullina A.T., Ibraev B.M. A plasma Formation in Pulsed Coaxial Gun at Continuously Filling Regime // American Journal of Physics and Applications. – 2013. – Vol. 1, No. 1. – P. 5–9.

ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ НЕЙТРОННОЙ ЭМИССИИ В УСТАНОВКЕ ТЕРМОЯДРОНОГО ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА

Молдабеков Ж.М., Жукешов А.М., Габдуллина А.Т., Амренова А.У.

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Исследованы динамические характеристики нейтронной эмиссии и анизотропии в зависимости от давления газа в термоядерной установке плазменного фокуса. Для диагностических измерений использовано два пластиковых сцинтилляционных фотоэлектронных умножителя и два активационных детектора. Экспериментальные результаты показали, что значения нейтронной эмиссии колеблется в диапазоне $5,5 \cdot 10^6$ – $5,11 \cdot 10^7$ н/имп. Объяснено два механизма образования нейтронов и его анизотропия в оптимальном диапазоне давлений.

Ключевые слова: нейтронная эмиссия, термоядерный механизм, анизотропия, плазменный фокус.

INVESTIGATION OF ANISOTROPY OF NEUTRON EMISSION IN THE THERMONUCLEAR PLASMA FOCUS INSTALLATION

Zh.M. Moldabekov, A.M. Zhukeshov, A.T. Gabdullina, A.U. Amrenova

al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

The dynamic characteristics of neutron emission and anisotropy depending on the gas pressure in a thermonuclear installation of a plasma focus were studied. Two plastic scintillation photoelectron multipliers and two activation detectors were used for diagnostic measurements. Experimental results showed that the values of neutron emission fluctuate in the range $5.5 \cdot 10^6$ – $5.11 \cdot 10^7$ n/imp also were explained two mechanisms of neutron production and anisotropy in the optimal pressure range.

Keywords: neutron emission, thermonuclear mechanism, anisotropy, plasma focus.