

ӨОК 533.9.082

«ПЛАЗМАЛЫҚ ФОКУС-30» ТЕРМОЯДРОЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ СТАТИКАЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРІН ЗЕРТТЕУ

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

ал-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан

Қуатты импульсты разрядтардағы плазманың динамикасын зерттеу, термоядролық реактордың жаңа ұрпағын жасауда және өнеркәсіп үшін нейтронды сәулеленуді қуатты рентген көздерін алуда үлкен ғылыми және тәжірибиелік маңызға ие. Осы мақалада плазмалық фокус-30 (ПФ-30) коаксиалды геометриялық электродымен бастапқы 0,1 торр газ қысымындағы жұмысы зерттелді. 0,1 торр газ қысымындағы токтардың таралуы зерттеліп, ПФ-30 термоядролық реакторының статикалық параметрлері анықталды. Бастапқы 0,1 торр газ қысымындағы, 16 кВ кернеудегі КПУ-30 мен ПФ-30 қондырғыларының разрядты тоғы салыстырылды.

Кілттік сөздер: Плазмалық фокус, статикалық параметрлер, разрядты тоқ.

КІРІСПЕ

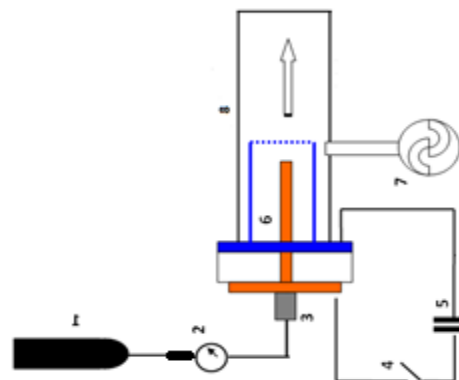
«Плазмалық фокус» құбылысы XX ғасырдың орталарында Н.В. Филиппов (ССРО) [1] пен Дж. Мэйзердің (J. Mather, АҚШ) [2] басқарылатын термоядролық синтез бағдарламасы бойынша жүргізілген зерттеулерге тәуелсіз ашылды. Плазмалық фокусты экспериментальдық қондырғы, немесе «плазмалық фокус» (ағылшын тілінен баламасы – dense plasma focus (DPF)) айтарлықтай қарапайым екі электродты газ толтырылатын электр разрядты прибор [3]. Бәрінен бұрын плазмалық фокус қондырғысы зерттеушілердің өзіне деген қызығушылығын, жұмыс камерасында сиретілген дейтерий сутегі изотоптарын толтырған кезде, камера арқылы разрядты тоқтың өтуімен, жүздеген килоамперді өлшеу мен камера ішінде қуатты қысқа импульсті нейтронды және рентгенді сәулеленудің пайда болуымен байланыстырады [4]. Алғашқы ПФ қондырғысы 50 кДж деңгейінде энергия қоры болды. Осыдан кейін қондырғыларда нейтрондардың шығуы импульсына $\sim 10^9$ нейтронды құрады. ПФ қондырғысы үшін нейтронның импульсінің ұзақтығы ~ 100 нс жетті. Нейтронның әдеттегі энергиясы 2,45 МэВ, ол әлі күнге дейін термоядролық процестердің болуы жайындағы пікірталасты тудырады [3–4].

Бүкіл әлем бойынша оннан көп ПФ типті қондырғылар бар. Қазіргі таңда ең қуатты қондырғы RF-1000 (Варшава, Польша) энергия қоры 1 МДж тең [5]. Лебедев атындағы РФА физикалық институтында (Мәскеу, Ресей) қуатты лазерден және плазмалық фокус типті қондырғыдан «Тюльпан» атты бірегей плазмалық фокус жасалды [6]. Плазмалық қондырғы кешенінің құрамында энергиясы 4 кДж ден 0,4 МДжге дейін, тығыздығы 10 А/см, жоғары плазмадан 300 кА ден 3 МА ге дейін тоқты қамтамасыз ете алатын қондырғы бар [7]. Қазақстанда плазманың пайда болуын зерттеу, ПФ типтес қондырғы импульсты плазмалық үдеткіште КПУ-30 жүргізілді [10]. Қондырғының энергиясы 35 кДж, разрядты тоғы 300 кА, ұзақтылығы 14 мкс. Аталған қондырғыда тығыз және сиретілген плазманың қоюлығы

және олардың динамикасы зерттелді, сонымен қатар плазмалық ұшқындардың фокусталуының негізгі заңдылықтары анықталды [9, 11]. Ұсынылып отырған жұмыста КПУ-30 қондырғысы плазмалық фокус деп аталатын жаңа электродтар жүйесімен жасалды, қондырғының электротехникалық сипаттамалары зерттеліп, екі жүйенің де максималды токтарының шамасы салыстырылды.

ПЛАЗМАЛЫҚ ФОКУС ҚОНДЫРҒЫСЫ

Коаксиалды плазмалық үдеткіш [10] Мейзер типті плазмалық фокус ПФ-30 қондырғысы ретінде қайта жасалып шықты. Аталған қондырғыда коаксиалды геометриялық электродты жүйе мыстан жасалған, олар оргшыны изолятор арқылы бөлінген. Сыртқы электродтың диаметрі 1,5 см, ішкісі – 2,5 см құрайды, сыртқы және ішкі электродтардың ұзындығы сәйкесінше 650 мм және 750 мм [11]. Плазмалық фокус қондырғысындағы электродтар жүйесіндегі катодтың ұзындығы анодтың диаметрінің қатынасы бойынша [12] көрсетілгендей $A > 1$ шарт орындалды, яғни $A = 2,6$ см тең болды. ПФ-30 қондырғысы толығымен Мейзер типті деп айтуға болады. Плазмалық фокустың принциптік схемасы 1- суретте келтірілген.



1 - жұмыс газы, 2 - манометр, 3 - электродинамикалық клапан, 4 - вакуумды разрядник, 5 - конденсатор, 6 - электродтар, 7 - эвакуациялық жүйе, 8 - камера

Сурет 1. ПФ-30 қондырғысының схемасы

Плазмалық фокус қондырғысы үшін изолятордың рөлі аса зор болып табылады [14]. Электродтар арасында жұмыс газы толтырылып, басқарушы пульт тарапынан жоғары кернеу берілген кезде электродтардың арасында Лоренц заңы бойынша остік (аксиал) бағытта қозғалатын плазма ағыны пайда болады. Жоғары жылдамдықпен қозғалған плазма ағыны анодтың басына жеткенде радиалды бағытта қозғалып сығыла бастайды [15], яғни пинчтың (плазманың сығылуына) пайда болуына алып келеді [18]. Плазманың сығылу уақытының ұзақ болуы изолятордың ұзындығына тікелей байланысты болып табылады [14].

ПФ-30 үдеткішіндегі тоқты өлшеу үшін Роговский белдігі қолданылды. Роговский белдігі соленоид тәрізді диаметрі $d=4$ мм ұзындығы $l=20$ см орам саны $N=500$ бұтақтан тұрады. Роговский белдігі разряд шинасының сыртына және үдеткіш жазықтығының ішіне яғни ток ағынының бағытына перпендикуляр бағытта шеңбер түрінде орналасады [9–10].

Белдіктегі сигналды тіркеу үшін UT-3200 осцилографы қолданылды. Сигнал осцилографқа коаксиальды 50 Ом кабель арқылы ешқандай күшейткішсіз арқылы берілді. Сигналдың осциллограмасы осцилограф экранында суретке түсіру жолымен алынды.

СТАТИКАЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРДІ АНЫҚТАУ

Плазмалық фокус қондырғысындағы статикалық параметрлерін есептеу өте маңызды шама болып табылады. Оны мынадай шамалар қамтиды индукция (L_0), кедергі (r_0), және конденсатор сымдылығы (C_0); аталған статикалық параметрлер плазманың параметрлері емес қондырғының (ПФ) параметрлері болып табылады. Конденсатор батареяларының сымдылығы ПФ жалғанған конденсаторлардың жалпы сымдылығымен байланысты. ПФ-30 қондырғысында 6 конденсатор, әрқайсысы 3 мкФ-дан жалпы сымдылығы 18 микрофарадты құрайды. Статикалық параметрлерін өлшеу қондырғыда анод пен катодқа жоғары кернеу беру арқылы жүзеге асады. Электродтардың арасындағы жоғары кернеу режимінде >20 торр неон газы үшін ПФ қондырғыларында статикалық параметрлерін өлшеудің альтернативті жолы болып табылады [13–14]. Әдетте жоғары қысым режимінде плазмалық қабықша (plasma sheath) остік фаза бойынша ұзақ қашықтыққа қозғала алмағандықтан, статикалық параметрлерін бағалау жақсы нәтиже береді [12].

ПФ-30 қондырғысындағы электрлік тізбек RLC тізбек арқылы жүзеге асырылады [12] және бұл жағдайда T периодты синусоидалы токтың формасын беріп мына шарт орындалады $r_0 \ll 2\sqrt{L_0/C_0}$ [15].

ПФ-30 қондырғысында тізбекті тұйықтау 16 кВ кернеумен жүзеге асырылып, нәтижесінде 2-суретте көрсетілгендей өшетін синусоидалы толқын алынды. Кейбір жуықтаулардан, статикалық параметрлер (r_0

және L_0) және I_0 пиктік ток мына теңдеулер бойынша анықталды [18]:

$$L_0 = \frac{T^2}{4\pi^2 C_0} \quad (1)$$

$$r_0 = -\left(\frac{2}{\pi}\right) (\ln f) \left(\frac{L_0}{C_0}\right)^{0.5} \quad (2)$$

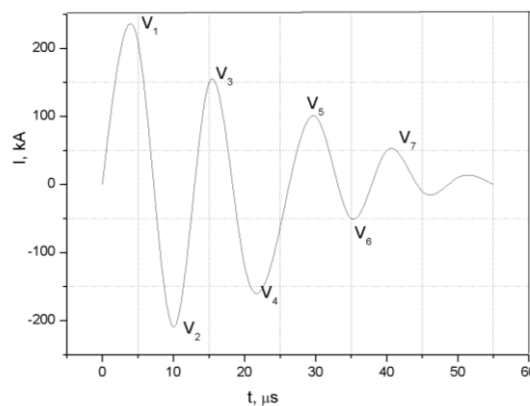
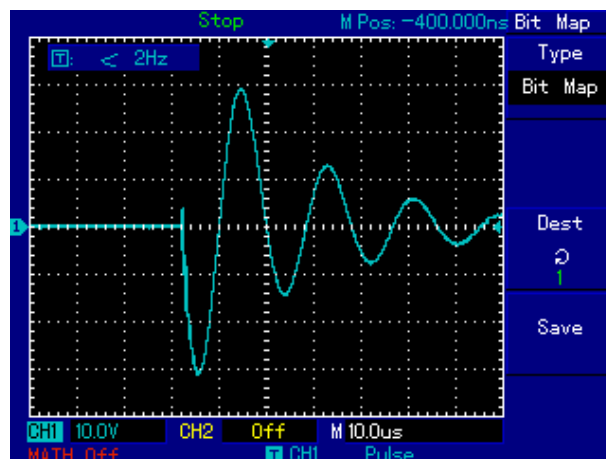
$$I_0 = \frac{\pi C_0 V_0 (1+f)}{T} \quad (3)$$

Мұндағы f суреттегі пиктен табылатын реверсивті коэффициент.

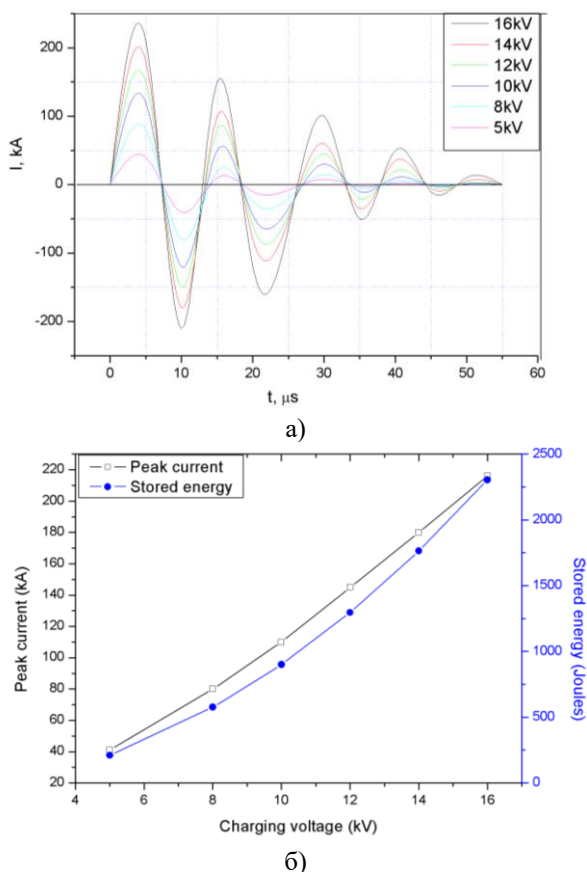
$$f_1 = \frac{V_2}{V_1}, f_2 = \frac{V_3}{V_2}, f_3 = \frac{V_4}{V_3}, f_4 = \frac{V_5}{V_4} \quad (4)$$

$$f = \frac{f_1 + f_2 + f_3 + f_4}{4}$$

ПФ-30 үшін орташа реверсивті коэффициент $f=0.7974$ құрады. Алғашқы үш период бойынша разрядты токтың периоды $T=14$ мкс 2-сурет. Қондырғының және разрядтың параметрлері 16 кВ кернеу берілген кезде есептеліп мына мәнге тең болды $L_0=280$ нГн, $r_0=15$ МОм, және разрядты ток $I_{\text{peak}}=210$ кА.



Сурет 2. 0.1 торр қысымдағы разрядты ток



Сурет 3. Разрядты токтың кернеуге тәуелділігі

Есептеу нәтижелері тек қана 16 кВ кернеу үшін ғана жүзеге асырылды. Плазмалық қабықшаның өстік бағыты бойынша қозғалғандағы разрядты токтың өсуін 5, 8, 10, 12, 14 және 16 кВ зарядтаушы кернеу аралығында зерттеліп статикалық параметрлері есеп-

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

- Петров Д.П., Филиппов Н.В., Филиппова Т.И., Храбров В.А. Мощный импульсный газовый разряд в камерах с проводящими стенками. //В сб. Физика плазмы и проблемы управляемых термоядерных реакций. Изд. АН СССР, 1958. - Т. 4. - С. 170-181.
- Mather J. W. Formation of the high-density deuterium plasma focus. //Phys. Fluids, 1965, Vol. 8. - P. 366.
- Filippov N.V., Filippova T.I., Khutoretskaia I.V., Mialton V.V., Vinogradov V.P.. Megajoule Scale Plasma Focus as Efficient X-ray Source // Physics Letters A -1996. – 211. - P. 168-171.
- Плазменный фокус. Физическая энциклопедия. В 5-ти томах. – М.: Советская энциклопедия. 1988. – С.1437.
- Krokhin O.N., Nikulin V.Ya. The upgraded plasma focus installation “FLORA” – the installation “TULIP” // Journal of Technical Physics, -1999, vol. XL, № 1.
- Никулин В. Я., Полухин С. Н. О насыщении нейтронного выхода плазменных фокусов мегаджоульного диапазона. //Физика плазмы, 2007. – Т.33, № 3. - С. 1–7.
- Nikulin V.Ya., Polukhin S.N., and Tikhomirov A.A. A Simple Criterion for the Snowplowing Efficiency of the Working Gas in a kJ Plasma Focus // Plasma Physics Reports, 2005. -Vol. 31, No. 7. - P. 591-595.
- 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.
- F.B Baimbetov, A.M. Zhukeshov and A.U. Amrenova. Dynamics of Plasma Flow Formation in a Pulsed Accelerator Operating at a Constant Pressure. Technical Physics Letters, 2007. - Vol. 33, No. 1. - P. 77–79.
- 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.
- Zhukeshov A.M., Gabdullina A.T., Amrenova A.U., Ibraev B.M. Parameters calculation and design of vacuum camera for “Plasma Focus” facility. International Journal of Mathematics and Physics. – 2016. – №1, – P. 137-140.
- M. Frignani, “Simulation of gas breakdown and plasma dynamics in plasma focus devices,” Ph.D. dissertation, Alma Mater Studiorum Università degli Studi di Bologna, Rimini, Italy, 2007.

телді. Сәйкесінше I_{peak} токтың өсуі кернеуге тікелей қатысты болды (3 б-сурет). I_{peak} токтың өзгеруі 47–210 кА аралығында өзгерісі байқалды. Индукция 2,6–280 нГн аралығында өзгерді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Плазмалық фокус типті қондырғылардың басқада коэксиалды эксперименталды қондырғылардан айырмашылығы рентген сәулелері мен нейтрондар көзіне бай болуымен ерекшелінеді. ПФ электродтар жүйесіне жоғары кернеу берілген кезде электродтар арасында плазма пайда болады. Плазмалық қабықша сыртқы электродтардың ішкі бетіне жеткен кезде, Лоренц $J_r \times B_\theta$ күшінің әсерімен коэксиалды электродтардың бойымен аксиалды бағытта қозғалады. Осы күштің радиалды құраушылары қабықшаны сыртқы электродқа қарай, аксиалды құраушылары коэксиалды электродтардың соңына жеткенге дейін итереді. J_r ток тығыздығы және B_θ магниттік өрістің тәуелділігі $1/r$ байланысты болғандықтан, ішкі электродтардың маңындағы қабықшаның жоғары жылдамдықпен жүргізетін Лоренц күшінің мәні жоғары болады.

Бұл жұмыста жүргізілген эксперимент нәтижелері ПФ-30 қондырғысында Аргон газы негізінде қысымы 0,1 торр да плазманың өстік (аксиалды) бағытта қозғалатынын көрсетті. Аталған бағыт бойынша разрядты токтың өсуі 16 кВ 210 кА жетті. Авторлардың алдыңғы жұмысында КПУ-30 қондырғысында 16 кВ 180 кА жеткен болатын [10]. Бұл бағыт бойынша ПФ-30 қондырғысында разрядты токтардың өсуі байқалады. Разрядты токтардың өсуі электродтардың басында плазманың радиалды бағыттағы қозғалысын туғызады. Есептелген статикалық мәліметтер алдағы уақытта плазманың радиалды қозғалысын зерттеуде өстік (аксиалды) ток бағытының қозғалысы жеткілікті болатынын көрсетті.

- 13 S. H. Saw, S. Lee, F. Roy, P. L. Chong, V. Vengadeswaran, A. S. M. Sidik, Y. W. Leong, and A. Singh, "In situ determination of the static inductance and resistance of a plasma focus capacitor bank," *Rev.Sci. Instrum.*, vol. 81, no. 5, p. 053 505, May 2010.
- 14 C. Moreno, A. Clausse, H. Bruzzone, J. Martínez, R. Llovera, and A. Tartaglione, "Small-chamber 4.7 kJ plasma focus for applications," in *Proc. Plasma Phys.—IX Latin Amer. Workshop*, 2001, vol. 563, pp. 276–281.
- 15 V. Siahpoush and M. A. Mohammadi, "Preliminary results of neutron production in Sahand plasma focus device," in *Proc. 2nd Int. Conf. Nucl. Sci. Technol. Iran, Shiraz Univ.*, Apr. 27–30, 2004, pp. 27–30.
- 16 Zhukeshov A.M., Ibraev B.M., Useinov B.M., Giniatova Sh.G. Pulsed plasma flow interaction with a steel surface //High Temperature materials and processes: – 2015. – Vol. 19. –No2, – P. 113-119 (индексируется в Scopus).
- 17 Ibraev B.M., Zhukeshov A.M., Gabdullina A.T., Amrenova A.U., Research of plasma accelerator KPU 30. *Int. J. of Math. and Physics.* – 2012.– Vol. 3, – No1. – P. 50 – 53.
- 18 S. Lee, T.Y. Tou, S.P. Moo, M.A. Eissa, A.V. Gholap, K.H. Kwek, S. Mulyodrono, A.J. Smith, Suryadi, W. Usada, and M. Zakauallah, "A simple facility for the teaching of plasma dynamics and plasma nuclear fusion," *Amer. J. Phys.*, vol. 56, no. 1, pp. 62–68, Jan. 1988.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА «ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС-30»

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

Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Изучение динамики плазмы в мощных импульсных разрядах представляет большой научный и практический интерес для создания термоядерных реакторов нового поколения и мощных источников рентгеновского и нейтронного излучения для индустрии. В данной статье проведено экспериментальное изучение работы установки «Плазменный фокус–30» (ПФ-30) с коаксиальной геометрией электродов при начальном давлении рабочего газа 0.1 торр. Исследовано распределение тока и определены статические параметры термоядерного реактора ПФ-30, проведено сравнение разрядного тока КПУ-30 и ПФ-30 при начальном давлении 0,1 торр и напряжении 16 кВ.

Ключевые слова: *плазменный фокус, статические параметры, разрядный ток.*

THE STUDY OF THE STATIC PARAMETERS OF FUSION REACTOR "PLASMA FOCUS-30"

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

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

Investigation of the dynamics of plasma in powerful-pulsed discharges has great scientific and practical interest for creation of fusion reactors of new generation and powerful sources of X-ray and neutron radiation for industry. In this article the experimental study of work of the Plasma focus-30 (PF-30) is conducted with coaxial geometry of electrodes at 0,1 torr initial pressure of working gas. Distribution of current is investigational and the static parameters of the thermonuclear reactor PF-30 are determined compared discharge current CPA-30 and PF-30 at an initial pressure of 0.1 Torr at a voltage of 16 kV.

Keywords: *plasma focus, static parameters, discharge current.*