

УДК 533.9.08;669:621.039  
МРНТИ 29.27.49; 53.49.17

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ И ЭКСПЕРИМЕНТ  
НА УСТАНОВКЕ ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС**

**Жукешов Ануар Муратович<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Национальная нанотехнологическая лаборатория, КазНУ им. аль-Фараби, г. Алматы*

**Ибраев Бауржан Мухтарханович<sup>2</sup>**

<sup>2</sup>*НАК Казатомпром, г. Астана*

**Усеинов Бейбут Мейрамович<sup>3</sup>**

<sup>3</sup>*СКГУ им. М. Козыбаева, г. Петропавловск, РК*

**ПЛАЗМА ПАРАМЕТРЛЕРІН БАҒАЛАУ ЖӘНЕ ПЛАЗМАЛЫҚ  
ФОКУС ОРНАТУДАҒЫ ЭКСПЕРИМЕНТ**

**Әнуар Мұратұлы Жүкешов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Ұлттық нанотехнологиялық зертхана, ҚазҰУ әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ.*

**Бауыржан Мұхтарханұлы Ибраев<sup>2</sup>**

<sup>2</sup>*Қазатомөнеркәсіп ҰАК, Астана қ.*

**Бейбіт Мейрамұлы Усеинов<sup>3</sup>**

<sup>3</sup>*М. Қозыбаев атындағы СҚМУ, Петропавл қ., ҚР*

**EVALUATION OF PLASMA PARAMETERS AND EXPERIMENTS  
ON THE PLASMA FOCUS**

**Anuar Muratovich Zhukeshov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*National nanotechnology laboratory, KazNU.al-Farabi, Almaty*

**Bauyrzhan Mukhtarkhanova Ibraev<sup>2</sup>**

<sup>2</sup>*NAC Kazatomprom, Astana*

**Beibut Meiramovich Useinov<sup>3</sup>**

<sup>3</sup>*NKSU named after M. Kozybaev, Petropavlovsk, KR*

**Аннотация**

В данной работе ставится задача расчета параметров плазмы при работе установки в режиме с ПФ и постановки эксперимента по замене коаксиальных цилиндрических электродов на геометрию плазменного фокуса. Рассчитаны фундаментальные параметры фокуса, показаны результаты предварительной оценки условий формирования плазменного фокуса. Определено максимальное значение температуры и концентрации электронов по формулам электродинамической модели. Расчеты по электродинамической модели показывают зависимость концентрации электронов от радиуса анода. Также установлено, что на увеличение электронной температуры влияет увеличение силы тока, но при этом время импульса уменьшается. Получены данные, позволяющие определять значения электронной температуры при изменении радиуса анода от 0,25 см до 2,25 см. Показано, что при разрядном токе в килоамперном диапазоне ожидается вполне измеряемый нейтронный выход, а также достаточно высокие величины температуры и плотности, характерные для горячей плазмы. Показана зависимость тока разряда от величины напряжения. Проведённые эксперименты показали, что динамические параметры плазмы, если не принимать меры по существенному снижению индуктивности системы, недостаточны для сильного сжатия пинча.

**Ключевые слова:** плазменный фокус, разрядный ток, индуктивность системы, электродинамические параметры, геометрия плазменного фокуса, температура концентрации, размеры электродов, сжатие пинча.

#### Аннотация

Бұл жұмыста қондырғы ПФ режимінде жұмыс істеген кезде плазма параметрлерін есептеу және коаксиалды цилиндрлік электродтарды плазмалық фокус геометриясына ауыстыру бойынша эксперимент қою міндеті қойылады. Фокустың іргелі параметрлері есептелген, плазмалық фокустың қалыптасу шарттарын алдын ала бағалау нәтижелері көрсетілген. Электродинамикалық модель формулалары бойынша электрондардың температурасы мен концентрациясының максималды мәні анықталды. Электродинамикалық модель бойынша есептеулер электрондар концентрациясының анод радиусынан тәуелділігін көрсетеді. Сондай-ақ, электронды температураның өсуіне ток күшінің артуы әсер етеді, бірақ импульс уақыты азаяды. Анод радиусы 0,25 см–ден 2,25 см–ге дейін өзгерген кезде электрондық температураның мәнін анықтауға мүмкіндік беретін деректер алынды. Разряд тогының кернеу шамасына тәуелділігі көрсетілген. Жүргізілген эксперименттер, егер жүйенің индуктивтілігін айтарлықтай төмендету бойынша шаралар қолданбаса, плазманың динамикалық параметрлері пинчты қатты қысу үшін жеткіліксіз екенін көрсетті.

**Түйінді сөздер:** плазмалық фокус, разрядтық ток, жүйенің индуктивтілігі, электродинамикалық параметрлер, плазмалық фокус геометриясы, концентрация температурасы, электрод өлшемдері, пинч қысылуы

#### Annotation

In this article, the problem of calculation of plasma parameters during the operation of the installation in the mode of Plasma Focus and setting an experiment on the replacement of coaxial cylindrical electrodes on the geometry of the plasma focus is posed. The fundamental parameters of the focus are calculated and the results of preliminary assessment of the plasma focus formation conditions are shown. The maximum value of temperature and electron concentration is determined by the formulas of the electrodynamic model. Calculations using the electrodynamic model show the dependence of the electron concentration on the anode radius. It is also found that an increase in the electron temperature is affected by an increase in the current, but the pulse time decreases. The obtained data allow to determine the values of the electron temperature if you change the radius of the anode from 0.25 cm to 2.25 cm, it is shown that when the discharge current in the range kiloampere expected measurable neutron output, as well as sufficiently high values of temperature and density characteristic of hot plasma. The dependence of the discharge current on the voltage is shown. The experiments have shown that the dynamic parameters of the plasma, if not to take measures to significantly reduce the inductance of the system, are insufficient for strong pinch compression.

**Key words:** plasma focus discharge current, the inductance of the system, electrodynamic parameters, geometry of plasma focus, temperature, concentration, electrode size, compression of the pinch.

#### Введение

Явление «плазменного фокуса» было открыто в середине XX века независимо друг от друга Н.В. Филипповым (СССР) [1] и Дж. Мэйзером (J.Mather, США) [2] в исследованиях, проводившихся по программе управляемого термоядерного синтеза. Экспериментальная установка с плазменным фокусом, или «плазменный фокус» (ПФ) представляет собой двухэлектродный газонаполненный электроразрядный прибор. Особый интерес для ученых ПФ представляет в связи с тем, что при прохождении через камеру разрядного тока, измеряемого обычно сотнями килоампер, внутри камеры происходит генерация мощного короткого импульса быстрых нейтронов и рентгеновского излучения [3].

Исследование плотных потоков плазмы, формирующихся в импульсном разряде высокой мощности, актуально, прежде всего, для развития представлений о структуре и динамике быстрых и плотных плазменных образований. Вопросы применения плазмы фокуса в термоядерных реакторах рассмотрены в работах [4–6] и некоторых других. При должном уровне понимания этих процессов открываются новые перспективы по созданию термоядерного реактора, в котором главную роль играет не нагрев плазмы, а ее формирование и структуризация. Также актуально изучение поведения материалов электродов реактора под воздействием плазменной радиации, вопросы распыления стенки и др. В Казахстане исследования по формированию плазмы проводятся

авторами на установке КПУ–30. Энергетика установки составляет до 35 кДж, разрядный ток до 1200 кА, импульс 14 мкс. На данной установке исследованы режимы, при которых формируются плотные и разряженные сгустки плазмы и изучена их динамика, а также изучены основные закономерности фокусировки плазменных пучков [7, 8]. В данной работе ставится задача расчета параметров плазмы при работе установки в режиме с ПФ и постановки эксперимента по замене коаксиальных цилиндрических электродов на геометрию плазменного фокуса.

**Расчет фундаментальных параметров фокуса.** Для получения плотной плазмы, точнее фокусировки пучка во времени и в пространстве, необходимо иметь не только большое значение разрядного тока, но и сделать это как можно быстрее, т.е. за короткий промежуток времени. Оценку времени можно сделать из простых соображений. Если температура термоядерной плазмы порядка  $10^8$  К, то тепловая скорость электронов будет

$$v = \sqrt{\frac{kT}{m}}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса электрона,  $k$  – постоянная Больцмана. Оценка по формуле (1) дает для скорости термоядерной плазмы значение порядка  $10^7$  м/с. Геометрический размер плазменного фокуса  $L$  должен быть порядка миллиметра или меньше. Тогда время прохождения электроном данного участка будет порядка

$$t = \frac{L}{v} \quad (2)$$

Оценка по этой формуле (2) дает величину порядка  $10^{-11}$  с. Как видим, это очень малый промежуток времени, с точки зрения практической электротехники. Как показано авторами в [9] гипотезе, в канале КПУ–30 происходят колебания электронов и ионов, под преобладающим действием электрической силы, если давление не выше  $10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Что касается действия магнитной силы, то в геометрии фокуса она создает дрейф в направлении, перпендикулярном силовым линиям, и ее влияние на эти колебания не учитываем. Сказанное поясняет геометрия фокуса, изображенная на рисунке 1. В таком случае время пролета зоны фокуса определяется из действия электрической силы на точечный заряд массой  $m$

$$\frac{v}{t} = \frac{eE}{m} \quad (3)$$

Оценка по этой формуле дает значение порядка  $10^{-10}$  с для поля напряженностью  $10^6$  В/м. Тогда для частоты получим значение порядка  $10^{10}$  Гц, которая совпадает по порядку с плазменной частотой, если для плотности взять величину порядка  $10^{15}$  см<sup>-3</sup>.

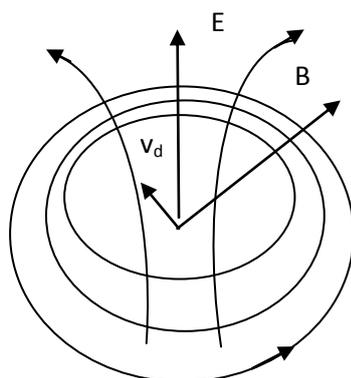


Рисунок 1 Схема формирования ПФ

**Расчет энергетических параметров.** Для установок ПФ с килоджоульной энергетикой индуктивность разряда определяется индуктивностью батареи и подводящих проводов, то есть можно пренебречь индуктивностью разрядной камеры и плазменного столба. Для нахождения амплитуды тока для такого LC-контура, пренебрегая активным сопротивлением пинча и подводящих кабелей, можно найти из закона сохранения энергии для данной цепи. С учётом того, что все конденсаторы одинаковы, получим

$$I_m = \sqrt{\frac{CU_m^2}{L}} = U_m \sqrt{\frac{nC_1}{L}}, \quad (4)$$

где  $C$  – это ёмкость конденсаторной батареи,  $C_1$  – это ёмкость одного конденсатора,  $n$  – число конденсаторов,  $L$  – индуктивность конденсаторной батареи, проводящих проводов и плазмы. Теоретическая оценка индуктивности в нашей модели дало значение индуктивности  $L = 10^{-7} \text{ Гн}$ . Из расчётов, приведённых для различного числа конденсаторов следует, что с увеличением напряжения ток растёт почти линейно. Чем больше ёмкость, тем больше сила тока. Из анализа результатов реального эксперимента по исследованию зависимости силы тока от напряжения, приведённые в [9], можно оценить значение индуктивности всей системы по формуле:

$$L = \frac{U^2 n C_1}{I_m^2} \quad (5)$$

Особенностью установок «плазменный фокус» является зависимость нейтронного выхода от энергии  $E$ , запасенной в конденсаторной батарее, и соответственно, от величины разрядного тока в момент пинчевания  $I_p$ :

$$Y_n = 10 E^2 \quad (6)$$

$$Y_n = 10^{-13} I_p^4 \quad (7)$$

Для установок ПФ килоджоульного диапазона можно пренебречь индуктивностью разрядной камеры и плазменного столба, и тогда индуктивность

разряда будет определяться индуктивностью батареи и подводящих проводов. Величина максимального тока разряда для данных установок находится по формуле (4), с учетом того, что

$$I_m = \sqrt{\frac{2E}{L}} \quad (9)$$

Выразив из уравнения (9) энергию, и подставив полученное выражение в уравнение (6), получим:

$$Y_n = 2,5 \cdot I_m^4 L \quad (10)$$

Из уравнения (9) следует, что нейтронный выход для установок с килоджоульной энергетикой определяется величиной максимального тока разряда. Максимальный нейтронный выход для установки с конденсаторной батареей емкостью 27 мкФ (9 конденсаторов) составил  $1,5 \cdot 10^9$  нейтрон/импульс, а для батареи емкостью 54 мкФ (18 конденсаторов)  $5,9 \cdot 10^9$  нейтрон/импульс.

Что касается диапазона мегаджоулей, связь между током и энергией установки уже не определяется соотношением (4). Нейтронный выход не зависит от энергии так, как рост энергии при постоянном напряжении зарядки батареи сопровождается увеличением количества параллельно включенных конденсаторов, что приводит к падению индуктивности батареи. Напротив увеличение емкости батареи ведет к увеличению длительности разряда и к неизбежному увеличению длины электродов разрядной камеры для сохранения условия согласования момента прихода токовой оболочки к оси установки с максимумом тока. В итоге соотношение между величинами  $L_c$  и  $L_t$  становится обратным килоджоульному диапазону, то есть  $L_c \ll L_t$ . Амплитуда тока уже определяется индуктивностью камеры, а не конденсаторной батареи. Более того, дальнейшее увеличение емкости батареи уже не сопровождается повышением тока разряда, вследствие увеличения индуктивности камеры. Происходит насыщение тока разряда, и соответственно насыщение нейтронного выхода.

Концентрацию электронов можно найти воспользовавшись следующим выражением:

$$n_e = \frac{I^2 f_0 \mu_0 t}{4\pi \epsilon r^2} \quad (11)$$

где  $I$  – сила тока,  $f_0$  – частота,  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $r$  – расстояние между электродами,  $\epsilon$  – энергия ионизации. Из уравнения (11) следует, что концентрация электронов зависит от силы тока и расстояния между электродами. На рисунке 2 видно, что концентрация электронов уменьшается при увеличении радиуса анода. Хорошо видно, что изменение силы тока контура так же оказывает влияние на концентрацию электронов, а именно увеличение тока ведет к увеличению концентрации. Также установлено, что на увеличение электронной температуры влияет увеличение силы тока, но при этом время импульса уменьшается. То есть при максимальном значении тока в 1 МА электронная температура примет свое максимальное значение 126 эВ, а время импульса будет минимальным 1 мкс. Получены данные, позволяющие

определять значения электронной температуры при изменении радиуса анода от 0,25 см до 2,25 см.

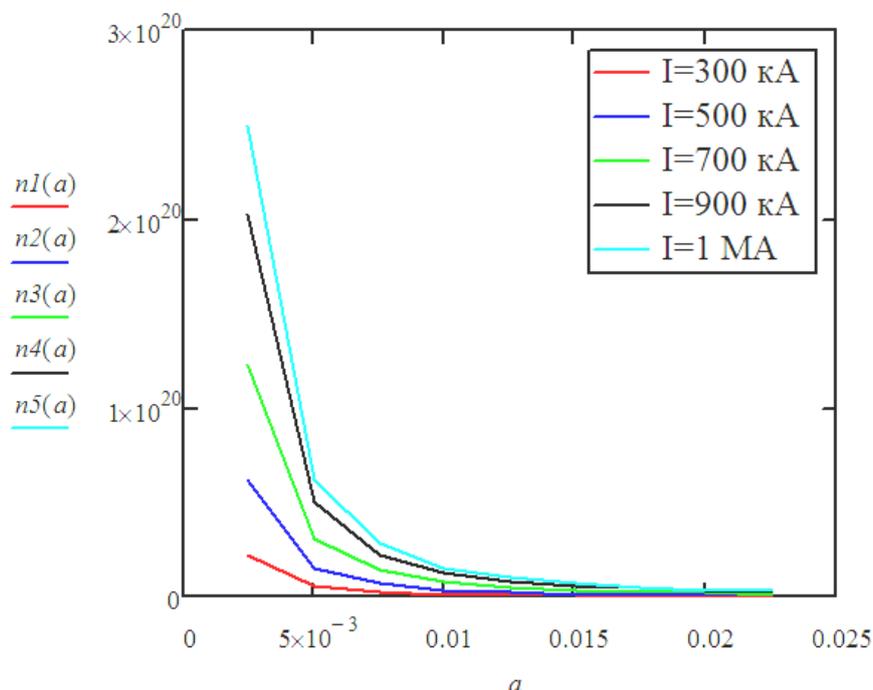


Рисунок 2 График изменения концентрации электронов от расстояния между электродами при различных значениях силы тока

Таким образом, определено максимальное значение температуры и концентрации электронов по формулам электродинамической модели. Расчеты по электродинамической модели показывают, что концентрация электронов уменьшается при увеличении радиуса анода. При этом, увеличение тока ведет к увеличению концентрации. Также установлено, что на увеличение электронной температуры влияет увеличение силы тока, но при этом время импульса уменьшается.

Электронную температуру плазмы в ПФ можно определить при условии постоянства скорости радиального сжатия на стадии формирования ПФ из равенства газокINETического и магнитного давления. Условия, при которых газокINETическое давление плазмы  $n_e kT$  становится равным магнитному давлению  $\frac{H^2}{8\pi}$ , описываются

соотношением Беннета. Расчеты концентрации по формуле Беннета показали, что ее максимальное значение меняется от  $8,20 \cdot 10^{18}$  при температуре 100 эВ, до значения  $4,10 \cdot 10^{18}$  при температуре 200 эВ, при параметре электродов  $a_1 = 1,25 \text{ см}$ .

Таким образом, максимальное значение температуры и концентрации электронов, определенные по формулам электродинамической модели и по формулам Беннета, по порядку величины сравнимы. Однако, оценка температуры по разрядному току дает существенно заниженные значения. Это противоречие с одной стороны проявляет недостатки данных подходов, не учитывающих степень ионизации плазмы и магнитное поле, но также и ставит задачу о развитии новых методов расчета, с учетом динамики и коллективных явлений в плазме.

*Данные эксперимента КПУ–30.* Установка состоит из вакуумной камеры из нержавеющей стали диаметром, емкостного накопителя энергии, вакуумного разрядника и токопроводов. В качестве емкостного накопителя энергии используется конденсаторная батарея из конденсаторов ИК–50–3 с рабочим напряжением 50 кВ и суммарной ёмкостью 72 мкф. В данной установке ранее использовались сплошные коаксиальные электроды. Для настоящих экспериментов была разработана новая электродная система. В данном случае внешний электрод представляет собой беличье колесо с диаметром 12 см, а внутренний электрод – цилиндр диаметром 2,5 см (рисунок 3а). Поджиг осуществляется через управляемый вакуумный разрядник, показанный на рисунке 3 б. Разряды проводили в среде остаточного вакуума при давлении 0,1–0,05 Торр.



Рисунок 3 Электродная система ПФ и вакуумный разрядник установки КПУ–30

Зависимость тока разряда от величины напряжения показало практически линейную зависимость ВАХ. Максимальный экспериментальный ток при разряде в вакууме при напряжении 24 кВ составил 1,24 МА. Линейная зависимость тока от напряжения свидетельствует о практически полной ионизации плазмы уже при начальном токе, а также о том, что индуктивность плазмы весьма мала. Изучение осциллограмм разрядного тока показало, что период разрядного тока изменений не претерпел и остался в районе 12–14 мкс, а скорость роста стала больше. Также проведены измерения плотности энергии потока, ее величина составила порядка 200 Дж/см<sup>2</sup>, что в три раза превышает данные на коаксиальной электродной системе.

#### Заключение

По результатам предварительной оценки условий формирования плазменного фокуса можно сделать вывод, что создание установки плазменного фокуса требует предельных параметров по быстродействию накопительной и коммутирующей аппаратуры с учетом современного состояния в данной области техники. Расчеты показывают, что при разрядном токе в килоамперном диапазоне ожидается вполне измеряемый нейтронный выход, а также достаточно высокие величины температуры и плотности, характерные для горячей плазмы. Но несмотря на это, эксперименты показали, что динамические параметры плазмы, если не принимать меры по существенному снижению индуктивности системы, недостаточны для сильного сжатия пинча, так как не наблюдается особенности на начальном участке роста кривой разрядного тока. Однако в данном случае делать окончательные выводы рано, так как все будет зависеть от конкретной геометрии разряда и особенно от используемого материала для получения плазмы. Недавние эксперименты Лернера [9] и других

исследователей ПФ показывают, что ключевые эксперименты с безнейтронными материалами еще впереди.

**Литература:**

1. 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.
2. Mather J.W. Formation of the high-density deuterium plasma focus //Phys. Fluids.–1965. – Vol. 8. – P. 366.
3. 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.
4. Gribkov V.A. Feasibility study for developing a hybrid reactor, based on the DPP – device// Atomkernenergie / Kerntechnik. – 1980. – Vol. 36, No3.–P. 167.
5. Lerner E.J., Murali S.K. and Hapoub A. Theory and Experimental Program for p– B<sup>11</sup> Fusion with the Dense Plasma Focus // Journal of Fusion Energy. – 2011. – Vol. 30, Is.5. –P. 367–376.
6. Zakaullah M., Alamgir K., Shafiq M. Low-energy plasma focus as a Tailored X-ray source // Journal of Fusion Energy. – 2000.– Vol. 19, No. 2, – P. 143.
7. Baimbetov F.B., Zhukeshov A.M. and Amrenova A.U. 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.
8. 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.
9. Eric J. Lerner, Syed M. Hassan, IvanaKaramitsos, and Fred Von Roessel //Confined ion energy >200 keV and increased fusion yield in a DPF with monolithictungsten electrodes and pre-ionization. Physics of Plasmas 24, 102708 (2017); doi: 10.1063/1.4989859.