

Б.М. Усеинов\* , А.А. Солодовник , С.К. Жумабаева 

Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Казахстан, г. Петропавловск

\*e-mail: buseinov@gmail.com

## ВЛИЯНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ НА ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА В ИМПУЛЬСНОМ КОАКСИАЛЬНОМ УСКОРИТЕЛЕ

На основе физического анализа процессов, происходящих в импульсных плазменных ускорителях, обосновывается возможность их использования для создания и исследования плазменного фокуса. В частности, изучено влияние индуктивности на параметры плазменного фокуса в установках типа «Плазменный фокус» (ПФ) килоджоулевого диапазона, создаваемых на основе импульсного коаксиального ускорителя. Предложена и обоснована эквивалентная схема установки, на основании анализа которой исследуется влияние индуктивности контура и ёмкости конденсаторной батареи на значение максимального тока и нейтронного выхода без учёта параметров разрядника и токопроводящих проводов. На основании теоретической оценки индуктивности установки рассчитано её наиболее вероятное значение. Оказалось, что в установках рассматриваемого диапазона энергии индуктивность составляет примерно  $7,5 \cdot 10^{-7}$  Гн и имеет зависимость от ёмкости конденсаторной батареи. Напротив, в установках с мегаджоулевой энергетикой индуктивность не зависит от числа и ёмкости конденсаторов, вследствие чего увеличение последней не влияет на рост силы тока. Получены экспериментальные и теоретические зависимости разрядного тока от приложенного напряжения при различных ёмкостях конденсаторной батареи. Приведён сравнительный анализ теоретических и экспериментальных осциллограмм тока. Обнаружено наибольшее совпадение теоретических и экспериментальных результатов при длительности разрядного импульса  $T = 30$  мкс.

**Ключевые слова:** плазма, плазменный фокус, пинч, высоковольтный разрядник, разрядный ток, индуктивность, конденсатор, килоджоулевый диапазон.

B.M. Useinov\*, A.A. Solodovnik, S.K. Zhumabayeva

M. Kozybayev North Kazakhstan university, Kazakhstan, Petropavlovsk

\*e-mail: buseinov@gmail.com

## Effect of inductance on the parameters of the plasma focus in a pulsed coaxial accelerator

Based on the physical analysis of the processes occurring in pulsed plasma accelerators, the possibility of their use for the creation and study of a plasma focus is justified. In particular, the influence of inductance on the parameters of the plasma focus in kilojoule-range «Plasma focus» (PF) installations created on the basis of a pulsed coaxial accelerator is studied. An equivalent installation scheme is proposed and justified, based on the analysis of which the influence of the inductance of the circuit and the capacitance of the capacitor bank on the value of the maximum current and neutron output is analyzed, without taking into account the parameters of the spark gap and the conducting wires. Based on the theoretical estimate of the inductance of the installation, its most probable value is calculated. It turned out that in the installations of the considered energy range, the inductance is approximately  $7.5 \cdot 10^{-7}$  Gn and depends on the capacitance of the capacitor bank. On the contrary, in installations with megajoule energy, the inductance does not depend on the number and capacity of capacitors, so that an increase in the latter does not affect the increase in current strength. Experimental and theoretical dependences of the discharge current on the applied voltage at different capacitances of the capacitor bank are obtained. A comparative analysis of theoretical and experimental current waveforms is presented. The greatest coincidence of theoretical and experimental results was found for the duration of the discharge pulse  $T = 30$  microseconds.

**Key words:** plasma, plasma focus, pinch, high-voltage spark gap, discharge current, inductance, capacitor, kilojoule range.

Б.М. Усеинов\*, А.А. Солодовник, С.К. Жұмабаева

М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Қазақстан, Петропавл қ.

\*e-mail: buseinov@gmail.com

### Импульсті коаксиалды үдеткіштегі плазмалық фокусының параметрлеріне индуктивтіліктің әсері

Импульсті плазмалық үдеткіштерде жүретін процестерді физикалық талдау негізінде оларды плазмалық фокусты құру және зерттеу үшін пайдалану мүмкіндігі негізделген. Атап айтқанда, импульсті коаксиалды үдеткіш негізінде құрылған килоджоуль диапазонының «Плазмалық фокусы» (ПФ) типті қондырғылардағы индуктивтіліктің плазма фокусының параметрлеріне әсері зерттелген. Эквивалентті орнату схемасы ұсынылған және негізделген, оның негізінде тізбектің индуктивтілігінің және конденсатор батареясының сыйымдылығының максималды ток пен нейтрондық Шығыс мәніне разрядтаушы мен өткізгіш сымдардың параметрлерін ескерместен әсері талданады. Қондырғының индуктивтілігін теориялық бағалау негізінде оның ең ықтимал мәні есептеледі. Қарастырылып отырған энергия диапазонының қондырғыларында индуктивтілік шамамен  $7,5 \cdot 10^{-7}$  Гн құрайды және конденсатор батареясының сыйымдылығына тәуелді екендігі белгілі болды. Керісінше, мегаджоуль энергиясы бар қондырғыларда индуктивтілік конденсаторлардың саны мен сыйымдылығына байланысты емес, нәтижесінде соңғысының ұлғаюы ток күшінің өсуіне әсер етпейді. Конденсаторлық батареяның әртүрлі сыйымдылықтарында разряд тогының қолданылатын кернеуге эксперименттік және теориялық тәуелділігі алынады. Токтың теориялық және эксперименттік осциллограммаларына салыстырмалы талдау келтірілген.  $T = 30$  мкс разрядтық импульсінің ұзақтығы кезінде теориялық және эксперименттік нәтижелердің ең үлкен сәйкес келуі анықталды.

**Түйін сөздер:** плазма, плазмалық фокус, пинч, жоғары вольтты разрядтау құралы, разряд тогы, индуктивтілік, конденсатор, килоджоуль диапазоны.

#### Введение

В настоящее время активно развиваются прикладные физические исследования, нацеленные на практическое применение взаимодействия плазменного фокуса с поверхностью различных материалов с целью улучшения их эксплуатационных свойств. Реализация таких проектов связана с решением целого ряда технических и физических задач, одной из которых является исследование влияния индуктивности на параметры плазменного фокуса, формируемого в импульсном коаксиальном ускорителе.

Плазменными ускорителями (ПУ) называются устройства, формирующие квазинейтральные плазменные потоки с достаточно высокой энергией ионов. Сходные физические свойства с ПУ имеют классические газодинамические системы, ускорители заряженных частиц и плазмотроны [1].

В плазменном ускорителе можно получить потоки плазмы со скоростями  $10-10^3$  км/с и более, что соответствует кинетической энергии ионов от  $\sim 10$  эВ до  $10^5-10^6$  эВ. Тепловые процессы, ионизация и процессы возбуждения в плазменных ускорителях являются второстепенными, так как они свойственны скорее ускорителям полностью ионизированной плазмы [2].

Импульсные плазменные ускорители можно разделить на два основных типа: коаксиальные плазменные ускорители (КПУ) и рельсотронные ускорители. КПУ подразделяются, в свою очередь, на: ускорители с импульсным напуском газа, со сплошным наполнением газа и квазистационарные импульсные плазменные ускорители (ИПУ) [1].

В ИПУ формирование потока частиц происходит в несколько последовательных стадий, а образование плазмы состоит из ряда зон: плазменная перемилька в начальной стадии разряда, заполнение плазмой межэлектродного зазора, образование токового слоя и плазменного фокуса. Поэтому, теоретические модели, описывающие процесс ускорения плазмы в ИПУ, необходимо применять к определенной стадии формирования потока, а не к системе в целом [2].

Наиболее простой моделью описания процесса ускорения является электродинамическая модель. Согласно ей плазма имеет вид токопроводящей перемильки с сосредоточенной массой. Интегральная форма данной модели, учитывает явления захватывания и ускорения газа, распределенного по длине ускорителя (модель «снегочистителя»), вклад в ускоряемую массу продуктов эрозии электродов, изменение сопротивления электрической цепи в процессе ускорения.

Однако, электродинамическая модель не дает полноты адекватного описания основных физических процессов, происходящих в плазменных ускорителях.

Существуют режимы работ в ИПУ, сопровождающиеся возникновением плазменного фокуса за срезом электродов. Если коаксиальный ускоритель с положительной полярностью центрального электрода работает в режиме «снегочистителя» (сгребание сгустка в объеме плазموпровода), то при выпадании токового слоя на срез электродов, он сжимается к оси, вблизи которого и возникает плазменный фокус [2].

Благодаря этому, импульсные плазменные ускорители можно отнести к установкам типа плазменный фокус, поскольку при определенных условиях на выходе из торца внешнего электрода ускорителя формируется сжимающийся к оси плазменный сгусток, или плазменный фокус.

#### Описание экспериментальной установки

Экспериментальная часть работы проводилась на модельном прототипе управляемого термоядерного реактора «Плазменный фокус», разработанного на основе импульсного коаксиального ускорителя, а компьютерное моделирование выполнялось с использованием программного языка C++, имеющего лучшие возможно-

сти для визуализации результатов исследования и быстрых расчетов.

Модель экспериментального термоядерного реактора «Плазменный фокус», выполненный на базе импульсного плазменного ускорителя включает камеру плазменного фокуса (ПФ), емкостный накопитель энергии, высоковольтный разрядник и систему токоподводов. В качестве емкостного накопителя энергии используется конденсаторная батарея из конденсаторов ИК-50-3 с напряжением 50 кВ и суммарной емкостью 72 мкФ [3]. Камера ПФ представляет собой электроразрядное устройство с мейзеровской ( $a_2/a_1 > 1$ ), полусферической системой электродов. Внутренний электрод (анод) диаметром 25 мм изготовлен из меди, в центре анода имеется осевое отверстие диаметром около 5 мм. Внешний электрод (катод) диаметром 50 мм, также изготовлен из меди. Фотография электродной системы приведена на рисунке 1а.

В качестве вакуумной камеры, использовалась готовая камера от турбомолекулярного насоса ТМН-500 [4-5]. Внешний вид камеры приведен на рисунке 1б. Наличие двух фланцев по 18 см и одного диаметром 30 см позволяет полностью реализовать требуемые условия для экспериментов. Толщина стенок камеры составляет более 1 см, предельный вакуум порядка  $10^{-9}$  Торр.



а)



б)

**Рисунок 1** – Фотографии электродной системы (а) и вакуумная камеры (б) экспериментального термоядерного реактора «Плазменный фокус»

Как отмечено выше, в установках ПФ мегаджоулевого диапазона при определении параметров объекта и исследовании разрядных процессов необходимо учитывать индуктивность всей плазменной установки, которая состоит постоянной индуктивности конденсатора и динамической индуктивности камеры [6].

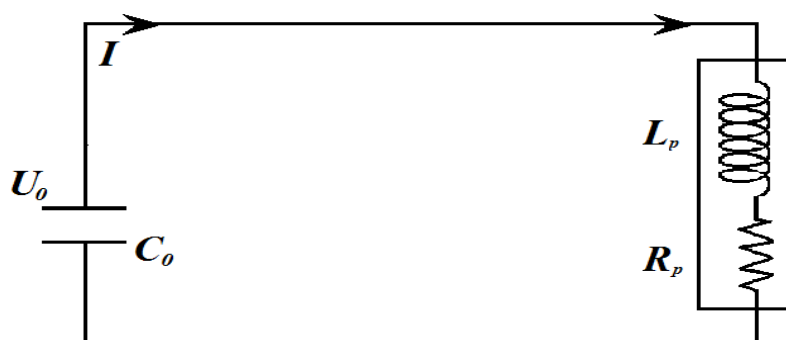


Рисунок 2 – Эквивалентная схема установки ПФ без разрядника и токопроводящих проводов

По данной схеме установка будет работать в следующей последовательности: вначале в вакуумную камеру напускается газ до определенного давления и затем постепенно подается напряжение. При определенном соотношении напряжения и давления в камере в соответствии с кривыми Пашена произойдет разряд и образуется плазма; при другом способе сначала подается напряжение на конденсаторную батарею и затем постепенно уменьшается до определенного давления и произойдет пробой с образованием газа [7-14].

Если пренебречь индуктивностью рабочей камеры и плазменного столба, то индуктивность разряда килоджоулевых установок ПФ, будет определяться только индуктивностью батареи и подводящих проводов. Для нахождения амплитуды тока для такого LC-контура, в приближении малости активного сопротивления пинча и подводящих кабелей, можно найти из выражения (1), полученного на основе анализа закона сохранения энергии для данной цепи:

$$I_m = \sqrt{\frac{CU_m^2}{L}} = U_m \sqrt{\frac{nC_1}{L}} \quad (1)$$

где  $C$  – емкость конденсаторной батареи,  $C_1$  – емкость одного конденсатора,  $n$  – число конденса-

торов, изучаемая в нашей работе, относится к килоджоулевым установкам. В ней можно значительно сократить влияние постоянной индуктивности контура на величину разрядного тока, если поместить батарею конденсаторов в вакуумную камеру без разрядника и токопроводящих проводов, как показано на рисунке 2.

торов,  $L$  – индуктивность конденсаторной батареи, проводящих проводов и проводов и плазмы. Таким образом, индуктивность всей системы складывается из постоянной индуктивности и её динамической составляющей  $L = L_p + L_D$ . Теоретическая оценка индуктивности в нашей модели дала значение  $10^{-7}$  Гн.

### Результаты и обсуждение

Расчеты, выполненные по формуле (1) для разного числа конденсаторов приведены на рисунке 3.

Из данных рисунка 3 следует 2 вывода: с увеличением напряжения ток растет почти линейно; чем больше емкость, тем больше сила тока.

Индуктивность всей системы можно выразить из формулы (2):

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

Расчеты показывают, что с ростом емкости конденсаторной батареи (с увеличением числа конденсаторов) в два раза динамическая индуктивность увеличивается в среднем на  $0,8 \cdot 10^{-8}$  Гн.

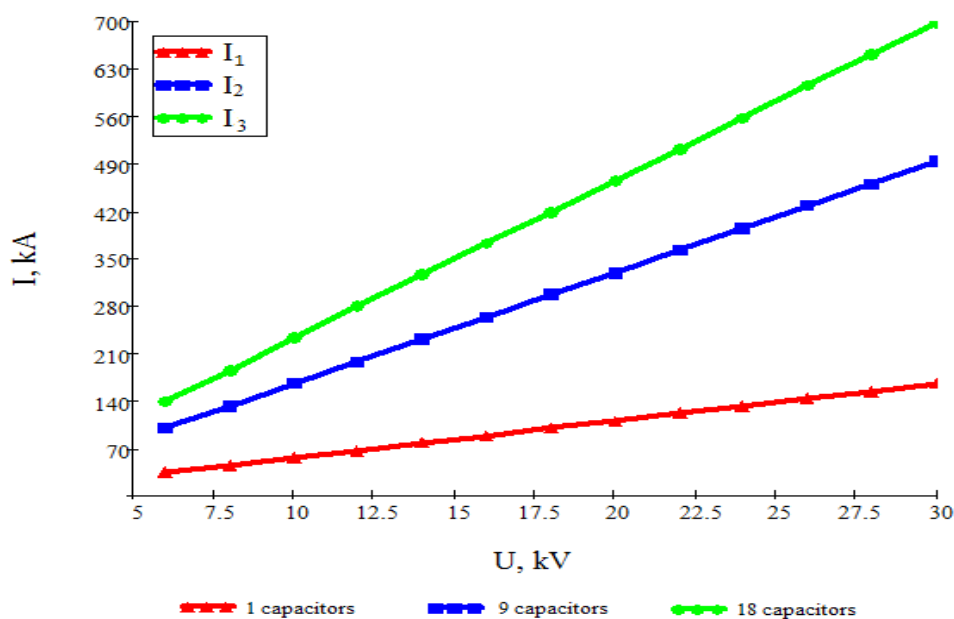


Рисунок 3 – График зависимости силы тока от напряжения

В итоге индуктивность всей системы (сумма постоянной индуктивности конденсаторов и соединительных проводов равной на  $6,5 \cdot 10^{-7}$  Гн и динамической индуктивности плазмы равной

$10^{-7}$  Гн) в реальном эксперименте должна быть  $7,5 \cdot 10^{-7}$  Гн. На рисунке 4 показано сравнение экспериментальных и теоретических результатов.

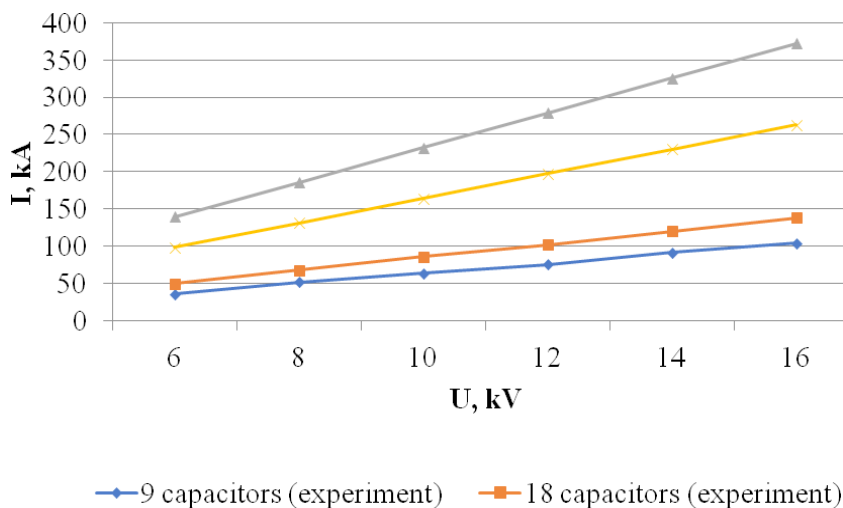


Рисунок 4 – Сравнение экспериментальных и теоретических результатов

Сравнение экспериментальных и теоретических результатов показало их удовлетворительное согласие. Расхождение в результатах можно отнести за счёт не учтёного вклада в индуктивность соединительных проводов и других второстепенных элементов установки. В килоджоуловом диапазоне увеличение емкости

конденсаторной батареи ведет к увеличению силы тока, при том, что увеличение емкости конденсаторов лишь немного увеличивает индуктивность, стоящую в знаменателе формулы (1).

Увеличение емкости конденсаторной батареи влечет за собой увеличение продолжительности разряда, что требует увеличения геометри-

ческих размеров разрядной камеры. В результате индуктивность в разрядной камере становится преобладающей в установке и как следствие увеличение емкости не влияет на рост силы тока, что и реализуется в установках с мегаджоулевой энергетикой.

В ходе эксперимента величина разрядного тока определялась поясом Роговского и рассчитывалась по формуле:

$$I = \frac{nU_0}{R},$$

где  $n$  – число витков катушки ( $n=2000$ ),  $U_0$  – величина измеренного напряжения на выходе катушки, и  $R$  – сопротивление.

В ходе эксперимента получены осциллограммы тока и его производной, и определены

теоретические значения амплитуды разрядного тока. Расчеты проводились по формуле:

$$I(t) = I_0 e^{-\alpha t} \sin \omega t. \quad (3)$$

Синусоиды разрядного тока и его производной, построенные по результатам расчета при  $T_1=20$  мкс,  $\omega=3,14 \cdot 10^5$  рад/с и сравнение экспериментальных и теоретических значений разрядного тока и его производной представлены на рисунке 5.

Установлено наилучшее совпадение теоретических и экспериментальных результатов при  $T=30$  мкс. На рисунке 6 приведены сравнение экспериментальных значений и результатов расчета разрядного тока и его производной  $T_2=30$  мкс,  $\omega=2,09 \cdot 10^5$  рад/с.

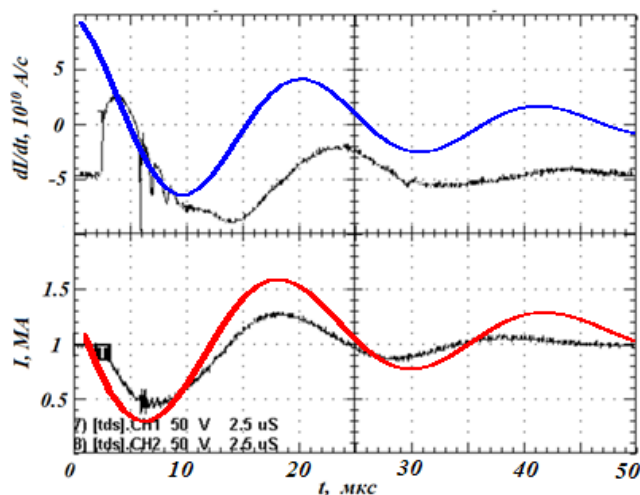


Рисунок 5 – Сравнение экспериментальных и теоретических значений разрядного тока и его производной ( $T_1=20$  мкс)

Особенностью установок типа плазменный фокус является зависимость нейтронного выхода от энергии  $E$ , запасенной в конденсаторной батарее, и соответственно, от величины разрядного тока в момент пинчевания  $I_p$  [15-20]. Эти зависимости можно представить в виде:

$$Y_n = 10E^2, \quad (4)$$

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

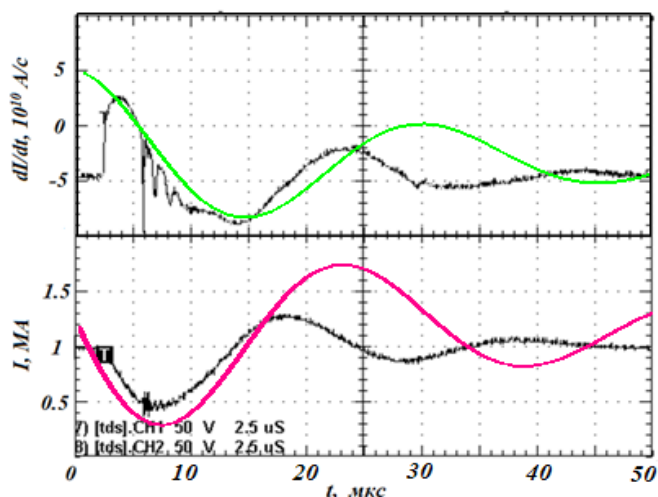
Из уравнения (5) следует, что нейтронный выход для установок с килоджоулевой энергетикой

определяется величиной максимального тока разряда.

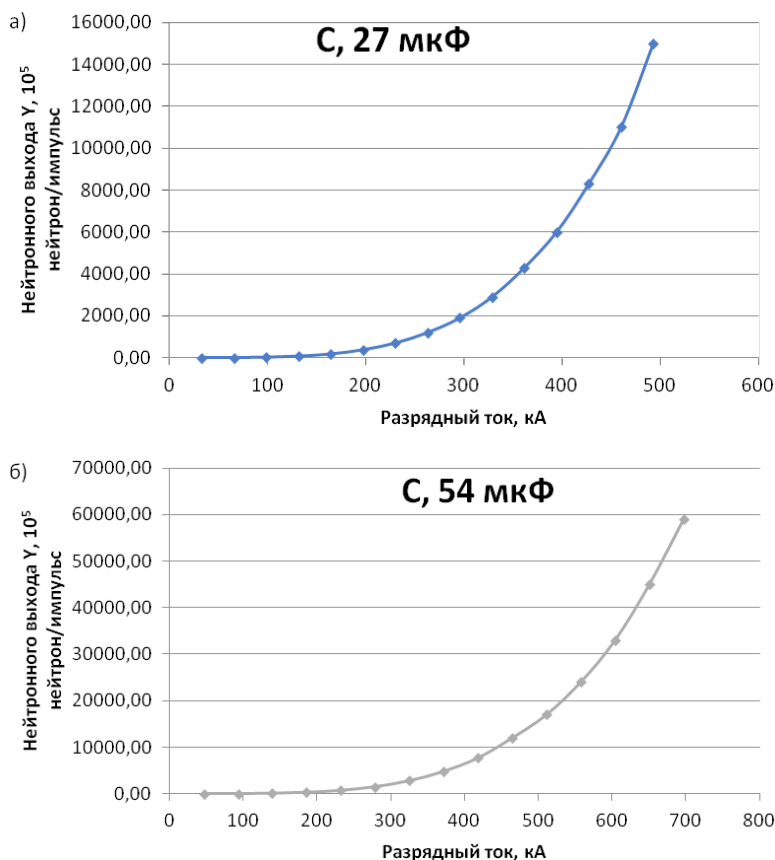
Изменение величины нейтронного выхода с ростом разрядного тока при различных значениях емкости конденсаторной батареи представлена на рисунке 7.

На рисунке 7а показана зависимость нейтронного выхода от разрядного тока для установки с конденсаторной батареей емкостью 27 мкФ (9 конденсаторов), максимальный нейтронный выход составил  $1,5 \cdot 10^9$  нейтрон/импульс, на рисунке 7б – для батареи емкостью 54 мкФ (18 конденсаторов), максимальный нейтронный выход –  $5,9 \cdot 10^9$  нейтрон/импульс.





**Рисунок 6** – Сравнение экспериментальных и теоретических значений разрядного тока и его производной ( $T_2=30$  мкс)



**Рисунок 7** – Зависимость нейтронного выхода от разрядного тока

Для мегаджоулевого диапазона нейтронный выход не зависит от энергии. При постоянном напряжении зарядки батареи рост энергии сопровождается увеличением количества конден-

саторов, что приводит к падению индуктивности батареи. А увеличение емкости конденсаторной батареи приводит к увеличению длительности разряда и к увеличению длины электродов раз-

рядной камеры, что является неизбежным для сохранения условия согласования момента прихода токовой оболочки к оси установки с максимумом тока [20-25]. В итоге соотношение между величинами  $L_c$  и  $L_t$  становится обратным килоджоульному диапазону, то есть  $L_c \ll L_t$ . Более того, при дальнейшем увеличении емкости батареи уже не происходит повышением тока разряда, вследствие увеличения индуктивности камеры. Максимальное значение тока разряда в этом случае определяется индуктивностью камеры, а не конденсаторной батареей. Происходит насыщение тока разряда, и соответственно насыщение нейтронного выхода.

### Заключение

Таким образом, в статье предлагается эквивалентная схема исследования влияния индуктивности на параметры плазменного фокуса и приведены результаты эксперимента и теоретических расчётов. Показано, что в реальных экспериментальных установках килоджоулевого диапазона индуктивность составляет при-

мерно  $7,5 \cdot 10^{-7}$  Гн. и зависит от ёмкости конденсаторной батареи, напротив, в установках с мегаджоулевой энергетикой индуктивность не зависит от числа конденсаторов. Некоторое расхождение экспериментальных данных и теоретических зависимостей силы тока от напряжения можно объяснить различием индуктивностей теоретической модели и установки. В работе установлена зависимость параметров плазменного фокуса от характеристик накопителя энергии и разрядника. На основе анализа осцилляций тока и его производной, определены значения амплитуды разрядного тока. Так амплитуда разрядного тока для одного конденсатора составляет 0,14 МА, а для 18 конденсаторов составляет 0,7 МА, в пределе возможно получение 1 МА и более. Изученный характер зависимости нейтронного выхода от тока разряда подтверждают теоретическую возможность нейтронного выхода при емкости 54 мкФ до  $Y_n = 5,9 \cdot 10^9$  нейтрон/импульс. Нейтронный выход для установок с килоджоулевой энергетикой определяется величиной максимального тока разряда.

### Литература

- 1 Физика и применение плазменных ускорителей, под редакцией Морозова А.И. – Минск, 1974. – 400 с.
- 2 Баимбетов Ф.Б., Усеинов Б.М. Импульсные коаксиальные плазменные ускорители и методы диагностики плазменных потоков [Электр.ресурс]: view pdf. – Режим доступа: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/33/019/33019316.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/019/33019316.pdf)
- 3 Жукешов А.М., Ибраев Б.М., Гиниятова Ш.Г., Амренова А.У. Разработка разрядной камеры экспериментальной установки «Плазменный фокус» // Вестник ЕНУ. – 2016. – №2. – С. 386–389.
- 4 Zhukeshov A.M., Ibraev B.M., Giniyatova Sh.G., Useinov B.M., Nikulin V.Ya., Gabdullina A.T., Amrenova A.U. Parameters calculation and design of vacuum camera for «Plasma focus» facility // International Journal of Mathematics and Physics. – 2016. – Vol 7, №1. – P. 137-140.
- 5 Zhukeshov A.M., Amrenova A.U., Gabdullina A.T., Moldabekov Zh.M., Useinov B.M. Calculation and Analysis of Electrophysical Processes in a High-Power Plasma Accelerator with an Intrinsic Magnetic Field 2019 // Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki. – 2019. – Vol. 89, No. 3. – P. 378–383.
- 6 Крауз В.И., Войтенко Д.А., Митрофанов К.Н., Мялтон В.В., Аршба Р.М., Астапенко Г.И., Марколия А.И., Тимошенко А.П. Исследование параметров плазменных потоков и их распространения в фоновой плазме в установках типа «плазменный фокус» с различной конфигурацией разрядной системы // ВАНТ. Серия термоядерный синтез. – 2015. – Т. 38. – Вып. 2. – С. 19-31.
- 7 Усеинов Б.М., Солодовник А.А., Алимова Н.М., Жукешов А.М., Ибраев Б.М., Амренова А.У., Габдуллина А.Т., Молдабеков Ж.М. Модель солнечной вспышки в рамках управляемого термоядерного реактора «Плазменный фокус». // Журнал проблем эволюции открытых систем. – 2019. – Т. 2, вып. 21. – С. 31-40.
- 8 Волобуев И.В., Крюков Л.Х., Никулин В.Я., Полухин С.Н. Влияние конфигурации разрядной камеры плазменного фокуса на нейтронный выход. //Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2012. – №10. – С. 20-27.
- 9 Никулин В.Я., Полухин С.Н. О насыщении нейтронного выхода плазменных фокусов в мегаджоульном диапазоне. //Физика плазмы. – 2007. –Т. 33., № 4. – С. 304-310.
- 10 Никулин В.Я., Полухин С.Н. К вопросу о нейтронном скэйлинге плазменного фокуса. Электротехнический подход. – М., 2006. – 18 с.
- 11 Дулатов А.К., Лемешко Б.Д., Михайлов Ю.В., Прокуратов И.А., Селифанов А.Н. Экспериментальное изучение параметров жесткого рентгеновского излучения установок плазменного фокуса. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2016. – Т. 39. – Вып. 3. – С. 66-72.



- 12 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.
- 13 Lerner E.J., Murali S.K., Napoub A. Preliminary experimental results from a new megamp dense plasma focus //IEEE 37th International Conference on Plasma Sciences, 2010. – P. 211-215.
- 14 Майоров А.Н., Никулин В.Я., Огинов А.В., Жукешов А.М. Исследование аксиальных плазменных потоков в установке типа плазменный фокус ПФ-4. //Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2015. – №7. – С. 3-13.
- 15 Никулин В.Я., Старцев С.А., Цыбенко С.П. Стационарные цилиндрические структуры в пинчевых разрядах. // Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук. – 2015. – № 5. – С. 21–26.
- 16 Дулатов А.К., Лемешко Б.Д., Михайлов Ю.В., Прокуратов И.А., Селифанов А.Н. Измерение динамической индуктивности камер плазменного фокуса. // Успехи прикладной физики. – 2013. – Т. 1, № 4. – С. 559-563.
- 17 Scholz M. Plasma-focus and controlled nuclear fusion. Habilitation dissertation. Kraków: Institute of Nuclear Physics PAN. – 2014. – 146 p.
- 18 Савелов А.С., Салахутдинов Г.Х., Колтунов М.В., Лемешко Б.Д., Юрков Д.И., Сидоров П.П. Исследование импульсного рентгеновского излучения плазменного фокуса в широком энергетическом диапазоне. //Прикладная физика. – 2010. – №4. – С. 52-55.
- 19 Полухин С.Н., Джаманкулов А.М., Гурей А.Е., Никулин В.Я., Перегудова Е.Н., Силин П.В. Измерение лазерно-оптическим методом скорости плазменных струй, генерируемых в килоджоульном Плазменном фокусе для различных газов. //Физика плазмы. – 2016. – Т. 42. – Вып. 12. – С. 54-60.
- 20 Morad R.I., Jassim M.K., Majeed R.H. A Theoretical Design of Plasma Focus and its Achievements. //Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences. – Vol. 4, No. 3. – 2014. – P. 576-587.
- 21 Юрков Д.И., Дулатов А.К., Лемешко Б.Д., Андреев Д.А., Голиков А.В., Михайлов Ю.В., Прокуратов И.А., Селифанов А.Н., Фатиев Т.С. Установка плазменного фокуса с током до 2 МА как источник жесткого рентгеновского излучения. // Успехи прикладной физики. – 2017. – Том 5. – № 1. – С. 45-53.
- 22 Грибков В.А., Боровицкая И.В., Демин А.С., Масляев С.А., Морозов Е.В., Пименов В.Н., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И. Исследование повреждаемости материалов с использованием установки типа плазменный фокус «Вихрь». Заводская лаборатория. //Диагностика материалов. – 2019. – Т.85. – №8. – С. 29-36.
- 23 Михайлов Ю.В., Лемешко Б.Д., Прокуратов И.А. Экспериментальные зависимости выхода нейтронного излучения камер плазменного фокуса от разрядного тока для дейтериевого и дейтерий-третиевого наполнений. //Физика плазмы. – 2019. – Т. 45. – № 4. – С. 323-334.
- 24 Epifanov N.A., Bondarenko G.G., Gribkov V.A., Latyshev S.V., Nikitushkina O.N., Pimenov V.N. Action of shocks generated in solid targets by dense plasma focus devices and at pulsed laser irradiation. //Procedia Manufacturing, 2019, vol. 37, pp. 500–507.
- 25 Боровицкая И.В., Грибков В.А., Демин А.С., Епифанов Н.А., Латышев С.В., Масляев С.А., Морозов Е.В., Пименов В.Н., Сасиновская И.П., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И., Шольц М. Повреждаемость и деформационные эффекты в поверхностных слоях меди и сплава системы медь-галлий при импульсном облучении в установке Плазменный фокус. // Перспективные материалы. – 2020. – № 5. – С. 23-36.

## References

- 1 Fizika i primeneniye plazmennyykh uskoriteley, pod redaktsiyey A.I. Morozova (Minsk, 1974), 400 s. (in Russ).
- 2 F.B. Baimbetov, B.M. Useinov, Impul'snyye koaksial'nyye plazmennyye uskoriteli i metody diagnostiki plazmennyykh potokov [Elektr.resurs]: view pdf. Access mode: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/33/019/33019316.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/019/33019316.pdf) (in Russ).
- 3 A.M. Zhukeshov, B.M. Ibraev, et al, Bulletin of ENU, 2, 386-389 (2016). (in Russ).
- 4 A.M. Zhukeshov, B.M. Ibraev, et.al, International Journal of Mathematics and Physics, 7 (1), 137-140 (2016).
- 5 A.M. Zhukeshov, A.U. Amrenova, et.al., Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki, 89 (3), 378-383 (2019).
- 6 V.I. Krauz, D.A. Voitenko, et.al., VANT. Thermonuclear fusion series, 38 (2), 19-31 (2015). (in Russ).
- 7 B.M. Useinov, A.A. Solodovnik, et al., Journal of Problems of the Evolution of Open Systems, 2 (21), 31-40 (2019). (in Russ).
- 8 I.V. Volobuev, L.Kh. Kryukov, et.AL., Brief communications on physics FIAN, 10, 20-27 (2012). (in Russ).
- 9 V.Ya. Nikulin and S.N. Polukhin, Plasma physics, 33 (4), 304-310 (2007). (in Russ).
- 10 V.Ya. Nikulin and S.N. Polukhin, K voprosu o neytronnom skeylinge plazmennogo fokusa. Elektrotekhnicheskii podkhod, (Moscow, 2006), 18 p. (in Russ).
- 11 A.K. Dulatov, B.D. Lemeshko, et.al., VANT. Ser. Thermonuclear fusion, 39 (3), 66-72 (2016). (in Russ).
- 12 I.V. Volobuev, A.E. Gurei, et.al., Plasma Physics, 36 (12), 1075-1084 (2010). (in Russ).
- 13 E.J. Lerner, S.K. Murali, A. Napoub, Preliminary experimental results from a new megamp dense plasma focus, IEEE 37th International Conference on Plasma Sciences, 211-215 (2010).

- 14 A.N. Mayorov, V.Ya. Nikulin, et.al., Brief communications on physics FIAN, 7, 3-13 (2015). (in Russ).
- 15 V.Ya. Nikulin, S.A. Startsev and S.P. Tsybenko, Brief communications on physics of the Physics Institute. P.N. Lebedev of the Russian Academy of Sciences, 5, 21-26 (2015). (in Russ).
- 16 A.K. Dulatov, B.D. Lemeshko, et.al., Advances in Applied Physics, 1 (4), 559-563 (2013). (in Russ).
- 17 M. Scholz, Habilitation dissertation, (Kraków: Institute of Nuclear Physics PAN, 2014), 146 p.
- 18 A.S. Savelov, G.Kh. Salakhutdinov, et.al., Applied Physics, 4, 52-55 (2010). (in Russ).
- 19 S.N. Polukhin, A.M. Dzhamankulov, et.al., Plasma Physics, 42 (12), 54-60 (2016). (in Russ).
- 20 R.I. Morad, M.K. Jassim and R.H. Majeed, Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences, 4 (3), 576-587 (2014).
- 21 D.I. Yurkov, A.K. Dulatov, et.al., Advances in Applied Physics, 5 (1), 45-53 (2017). (in Russ).
- 22 V.A. Gribkov, I.V. Borovitskaya, et.al., Industrial laboratory. Diagnostics of materials, 85 (8), 29-36 (2019). (in Russ).
- 23 Yu.V. Mikhailov, B.D. Lemeshko and I.A. Prokuratov, Plasma physics, 45 (4), 323-334 (2019). (in Russ).
- 24 N.A. Epifanov, G.G. Bondarenko, et.al., Procedia Manufacturing, 37, 500-507 (2019).
- 25 I.V. Borovickaya, V.A. Gribkov and A.S. Demin, Advanced Materials, 5, 23-36 (2020). (in Russ).