

УДК 553.952
 EDN: AORMJD

PACS: 52.58Lq



Работа камер плазменного фокуса в составе субкилоджоульного импульсного нейтронного генератора

Д. И. Юрков, В. А. Лавренин, Б. Д. Лемешко, Ю. В. Михайлов,
И. А. Прокуратов

Рассмотрены особенности генерации нейтронного излучения небольшими камерами плазменного фокуса при работе в составе субкилоджоульного нейтронного генератора с запасаемой энергией от 200 до 1000 Дж. Амплитуда разрядного тока через камеры составляла от 100 до 200 кА, при этом обеспечивается выход нейтронов с энергией 2,5 МэВ на уровне 10^5 – 10^7 нейтр./имп. Приведены экспериментальные исследования оптимальных режимов работы камер в составе субкилоджоульного генератора для обеспечения максимального уровня выхода нейтронов. Изучена стабильность генерации нейтронного излучения, в частности показано, что введение примеси Ar парциальным давлением 0,5–0,8 Торр в объеме камеры приводит к снижению относительного среднего квадратического отклонения выхода нейтронов на камерах плазменного фокуса с дейтериевым наполнением.

Ключевые слова: генератор нейтронов, плазменный фокус, камера плазменного фокуса.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-78-85

Введение

Среди импульсных источников ионизирующего излучения распространённым типом являются установки на базе явления пинчевания высокотемпературной плазмы. Пинчевые установки обеспечивают генерацию импульс-

ных излучений разных типов с характерной длительностью порядка десятка наносекунд и обеспечивают большую импульсную плотность потока излучения за счёт предельных значений плотности и температуры плазмы в пинчах. Пинчевые установки, как правило, разделяются по типу формируемых в них пинчей – z-пинч [1], x-пинч [2], плазменный фокус (ПФ) или нецилиндрический z-пинч [3], микропинчи [4]. Разряд типа ПФ отличается большой интенсивностью ионизирующих излучений по отношению к вкладываемой в разряд энергии и относительной простотой реализацией накопителя энергии. Это позволяет создавать достаточно компактные установки с большим выходом импульсного ионизирующего излучения. Отличительной особенностью разряда ПФ является специальная конструкция газоразрядной камеры для реализации разряда [5]. В отличие от остальных типов пинчевых разрядов, в камере основная энергия от накопителя передается не сразу в область пинчевания, а в близлежащую об-

Юрков Дмитрий Игоревич^{1,2}, зам. директора – первый зам. гл. конструктора, д.т.н.

Лавренин Виктор Анатольевич², аспирант.

Лемешко Борис Дмитриевич^{1,2}, в.н.с., д.т.н.

Михайлов Юрий Владимирович¹, зам. нач. отдела – нач. лаб., к.т.н.

Прокуратов Илья Александрович¹, вед. инженер.

¹ ФГУП ВНИИА им. Н. Л. Духова.

Россия, 127055, Москва, Суцевская ул., 22.

E-mail: AKDulatov@vniia.ru

² НИЯУ «МИФИ».

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31.

Статья поступила в редакцию 21.12.2022

После доработки 12.01.2023

Принята к публикации 15.01.2023

© Юрков Д. И., Лавренин В. А., Лемешко Б. Д., Михайлов Ю. В., Прокуратов И. А., 2023

ласть, для формирования так называемой токоплазменной оболочки (ТПО). Передача энергии от накопителя в разряд синхронизована с движением ТПО, которая сначала движется вдоль электродов и набирает энергию от накопителя, а затем симметрично сжимается на оси камеры в пинч в момент передачи запасенной в емкостном накопителе энергии в разряд. Таким образом происходит формирование пинча (разряда типа ПФ) с большим выходом нейтронного или рентгеновского излучений.

Наибольшее распространение установки ПФ получили как источники импульсного нейтронного излучения. Различные исследовательские установки ПФ обеспечивают уровень выхода нейтронов от 10^4 до 10^{13} нейтр./имп., длительность импульса от 10 до 100 нс, энергию нейтронов 2,5 МэВ либо 14 МэВ [6–8]. Поскольку ПФ обеспечивает высокий выход излучения при компактности и малогабаритности самих установок, разряд типа ПФ находит свое применение в практических задачах. Среди таких задач можно выделить использование малогабаритных генераторов на камерах ПФ для калибровки импульсной измерительной аппаратуры, а также использование малогабаритных генераторов в учебном процессе в научных и учебных центрах. Компактные и малогабаритные генераторы с камерами ПФ, как правило, включают в себя один высоковольтный конденсатор, высоковольтный коммутатор, систему токоподводов и камеру ПФ. Запасаемая энергия в таких генераторах составляет сотни Дж, а уровень разрядного тока $100 \div 200$ кА, поэтому условно такие установки называют субкилоджоульными нейтронными генераторами с камерами ПФ.

Небольшие размеры субкилоджоульного генератора делают его переносным лабораторным прибором, но выход нейтронов обычно ограничен уровнем $10^5 \div 10^7$ нейтр./имп. (для нейтронов с энергией 2,5 МэВ). Такой уровень выхода нейтронов достаточен для проведения калибровки широкого ряда импульсной детектирующей аппаратуры, например, на базе сцинтилляционных детекторов. К тому же субкилоджоульный уровень запасаемой энергии позволяет осуществлять срабатывания генератора достаточно часто (десятки секунд) с использованием компактного источника питания мощностью ~ 100 Вт, не подвер-

гая камеру ПФ большим тепловым нагрузкам. Это позволяет осуществлять последовательные серии срабатываний для набора статистики при калибровке аппаратуры.

Однако проблемой таких субкилоджоульных установок является большая нестабильность генерации нейтронного излучения. На лабораторных установках с камерами ПФ при уровне выхода нейтронов $10^5 \div 10^6$ нейтр./имп. и запасаемой энергии до 1000 Дж относительное среднее квадратичное отклонение (ОСКО) выхода нейтронов составляет 75–80 % и более [9], а погрешность среднего выхода нейтронов может составлять от 10 до 50 % значения величины [10–12].

В данной работе описаны проведенные экспериментальные исследования на камере ПФ с точки зрения её использования в составе субкилоджоульного генератора нейтронов, а именно изучена стабильность генерации нейтронов камеры ПФ и эмпирически рассмотрены пути снижения ОСКО выхода нейтронов.

Экспериментальное оборудование

Субкилоджоульный нейтронный генератор состоит из разрядного модуля (РМ), в который устанавливается камера ПФ, блока питания и управления и пульта управления. В РМ входит один высоковольтный конденсатор, емкостью 4 или 2 мкФ. Такая емкость обеспечивает запасаемую энергию от 100 до 1000 Дж в зависимости от зарядного напряжения U (до 25 кВ). При реализации выхода нейтронов на уровне 10^5 нейтр./имп. (2,5 МэВ) используется конденсатор 2 мкФ, а при необходимости выхода 10^6 нейтр./имп. – 4 мкФ. Поэтому для удобства используется два варианта комплектации субкилоджоульного генератора (4 и 2 мкФ). Для коммутации разрядного тока в нагрузку используется псевдоискровой коммутатор безнакального типа [13], позволяющий коммутировать разрядный ток до 270 кА, и имеющий времена срабатывания порядка сотни нс. Передача разрядного тока в камеру ПФ осуществляется через сплошные медные токоподводы для минимизации общей индуктивности РМ. В состав РМ входит встроенный интегрирующий пояс Роговского для регистрации сигнала разрядного тока.

В РМ устанавливается камера ПФ типа Т19-Л316 с электродами из бескислородной меди. Диаметр анода (внутренний электрод) 15 мм, высота анода 20 мм, диаметр катода 40 мм. Electroды камеры разделены изолятором из Al_2O_3 , толщиной 4 мм, для обеспечения электропрочности камеры с учетом импульсных скачков напряжения в момент пинчевания [14]. Для зарядки конденсатора и запуска коммутатора используется блок питания и управления субкилоджоульного генератора мощностью ~ 100 Вт. Блок питания и управления располагается на расстоянии $1\div 2$ м от РМ и подключается к нему высоковольтными кабелями. Пульт управления подключается к блоку питания и управления через управляющий кабель, длиной 30 м.

При использовании в РМ емкости 4 мкФ субкилоджоульный генератор обеспечивает период разряда $T = 2,4$ мкс, амплитуду разрядного тока $I_{\max} = 200$ кА и запасаемую энергию $E = 800$ Дж (при $U = 20$ кВ). Индуктивность разрядного контура составляет $L = 35$ нГн, в которую входит расчетная индуктивность камеры Т19-Л316 $L_{PF} = 5$ нГн [15]. При использовании емкости 2 мкФ: $T = 1,6$ мкс, $I_{\max} = 150$ кА и $E = 400$ Дж (при $U = 20$ кВ).

В процессе изготовления и высоковольтной тренировки [16] камеры Т19-Л316 подключаются к вакуумному стенду ТС1858 для откачки и перезаполнения рабочим газом. Для регистрации параметров нейтронного излучения в экспериментах использовался измеритель нейтронного потока автоматизированный (ИНПА) [17]. Работа ИНПА основана на методе задержанной регистрации – нейтроны от источника с энергией 2,5 МэВ замедляются в оргстекле с Cd защитой от внешних нейтронов, до тепловых энергий и затем регистрируются He^3 -счетчиками, работающими в пропорциональном режиме. Сигналы со счетчиков поступают на преобразователь для усиления сигналов и преобразования их в импульсы напряжения, последующая обработка которых проводится на блоке измерителя. ИНПА позволяет измерять выход нейтронов с энергией 2,5 МэВ от одиночных импульсов

нейтронов в диапазоне выхода нейтронов от $1,5 \times 10^5$ нейтр./имп. до 1×10^9 нейтр./имп. с относительной погрешностью измерения $\pm 22\%$ (при $P = 0,95$). Преимуществом ИНПА является фактически мгновенное отображение результатов измерения, что позволяет проводить серии срабатываний субкилоджоульного генератора с минимально возможными интервалами между срабатываниями в $15\div 30$ сек. В экспериментах ИНПА располагался на расстояниях от 7 до 80 см от области генерации нейтронов в камере Т19-Л316.

Выход и стабильность генерации нейтронов субкилоджоульного генератора

В первую очередь на субкилоджоульном генераторе с емкостью конденсатора 4 мкФ были сняты зависимости выхода нейтронов Y_N от зарядного напряжения генератора U и давления дейтерия $p - Y_N(U, p)$. Зависимости сняты в диапазоне U от 16 до 23 кВ и давления дейтерия p от 5 до 15 Торр. Полученные зависимости $Y_N(U, p)$ приведены на рис. 1, каждой точке соответствует не менее пяти срабатываний субкилоджоульного генератора. Зависимости показывают, что генерация нейтронного излучения начинается при $U = 17$ кВ на уровне $0,5 \times 10^6$ нейтр./имп. и увеличивается до $(1\div 1,5) \times 10^7$ нейтр./имп. при увеличении напряжения до 22–23 кВ.

Эксперименты аналогичного рода проведены с субкилоджоульным генератором при использовании конденсатора, емкостью 2 мкФ, и той же камеры Т19-Л316. Это позволило определить возможность генерации нейтронов камерой в диапазоне от 10^5 до 10^6 нейтр./имп. Экспериментально получены зависимости $Y_N(U, p)$, аналогичные кривым рис. 1. Рабочий диапазон токов накала сместился на значения от 2 до 7 Торр, для согласования с периодом разряда 1,6 мкс. В экспериментах при варьировании U от 22 до 25 кВ получен выход нейтронов от $1,9 \times 10^5$ нейтр./имп. до $1,7 \times 10^6$ нейтр./имп., при этом амплитуда разрядных токов составляла $165\div 200$ кА. При $U < 22$ кВ генерация нейтронов не наблюдалась.

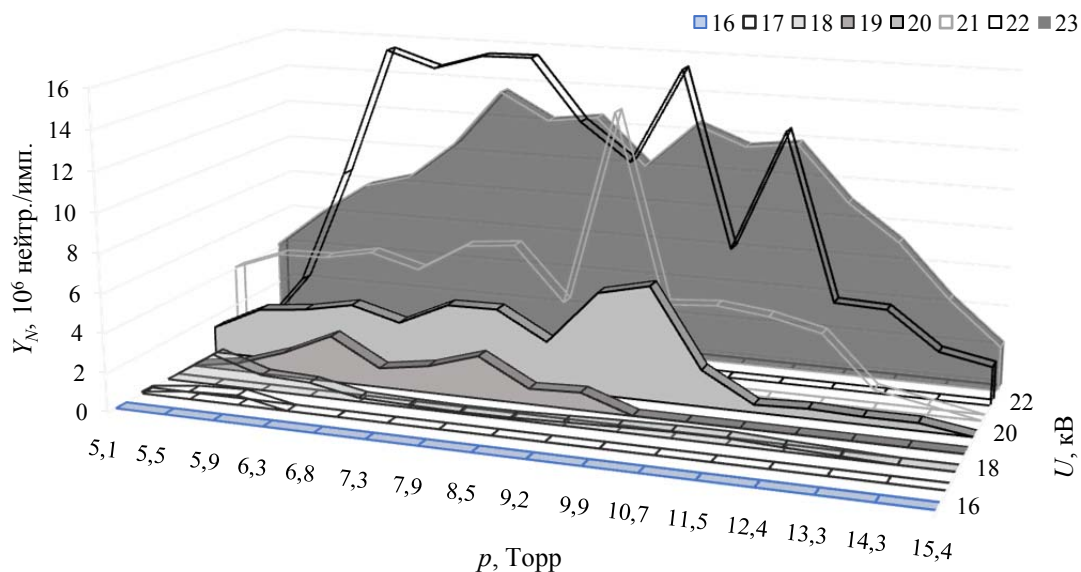


Рис. 1. Зависимости $Y_N(U, p)$

Приведенные зависимости показывают, что выход нейтронов увеличивается фактически на порядок при увеличении разрядного тока ($\sim U$) с 170 до 230 кА. Хотя согласно известному скейлинговому соотношению, $Y_N \sim I^{3,6}$ [18, 19], выход нейтронов должен был увеличиться примерно в три раза при изменении тока в 1,35 раз. Эти результаты являются экспериментальным свидетельством того, что скейлинговая зависимость описывает общий характер соотношения между выходом нейтронов и разрядным током установок с камерами ПФ, но не применима для одной камеры ПФ. В этом случае гораздо более значительными факторами являются оптимальность конструкции камеры ПФ, чистота поверхностей, согласование движения ТПО с периодом разряда и др.

Проблема стабильности генерации нейтронов для генераторов субкилоджоульного типа с камерами ПФ стоит достаточно остро. Анализ экспериментальных данных субкилоджоульного генератора показывает, что ОСКО снижается при увеличении зарядного напряжения генератора. То есть при увеличении вкладываемой в разряд энергии. Данные результаты приведены на рис. 2. На нём показаны значения ОСКО выхода нейтронов из

осуществленных выше срабатываний субкилоджоульного генератора с двумя вариантами конденсаторов (2 и 4 мкФ). По оси абсцисс отложена запасаемая энергия в РМ генератора ($CU^2/2$). Значения запасаемой энергии лежали в диапазоне от 500 до 1150 Дж. Среднее значение ОСКО снижается со 140 до 70–80 % при увеличении вкладываемой в разряд энергии в два раза. Дополнительно белыми точками отмечены минимальные значения ОСКО выхода нейтронов, полученные при фиксированном зарядном напряжении генератора. Эти данные иллюстрируют достигнутые оптимальные режимы работы камер и субкилоджоульного генератора. Минимально достигнутое значение ОСКО составило 35 % в режиме $U = 22$ кВ, $p = 10$ Торр, $Y_N = 4,5 \times 10^6$ нейтр./имп.

Одним из методов снижения ОСКО выхода нейтронов в камерах ПФ является введение примесей тяжелых газов к дейтериевому (D) наполнению камер ПФ. Введение тяжелых примесей, во-первых, способствует увеличению уровня выхода нейтронов камер ПФ, и, во-вторых, снижает разброс выхода нейтронов. Для подтверждения данного факта в экспериментах использована камера Т19-Л316 с D и примесью 0,5 Торр Ag внутри объема камеры.

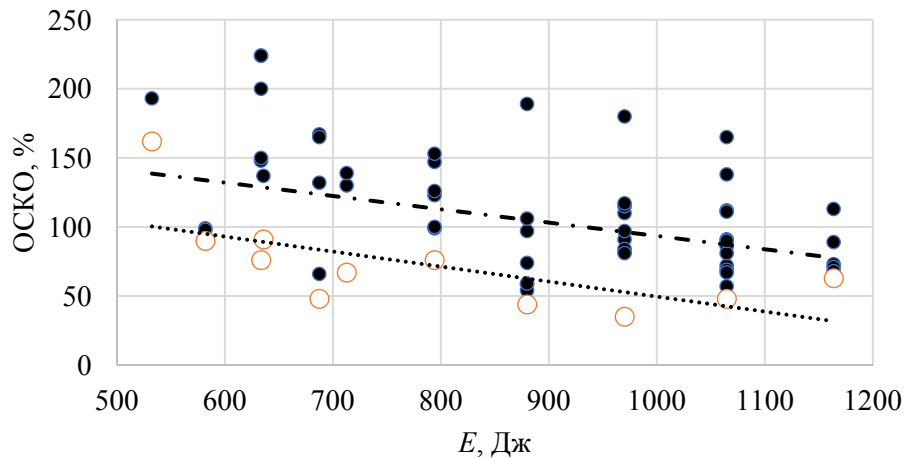


Рис. 2. Зависимость ОСКО среднего выхода нейтронов субкилоджоульного генератора от зарядного напряжения

Увеличение выхода нейтронов при наполнении камеры D + Ag для субкилоджоульного генератора не является особенно актуальной задачей, поскольку относительно небольшой уровень выхода как раз позволяет его эффективно использовать в задачах калибровки и в учебном процессе. Поэтому эффект увеличения выхода нейтронов при введении примесей можно использовать в обратную сторону – снижать зарядное напряжение для обеспечения выхода $10^5 \div 10^6$ нейтр./имп. Это позволяет значительно увеличивать ресурс работы камеры и генератора за счёт снижения электрических нагрузок на элементы РМ. В экспериментах с камерой Т19-Л316 на субкилоджоульном генераторе (2 и 4 мкФ) удалось снизить зарядное напряжение с 22–25 кВ до 17–18 кВ при работе с камерой D + Ag. Результаты серии последовательных срабатываний приведены на рис. 3. Серия рис. 3а проведена в комплектации генератора с 2 мкФ в режиме $U = 17$ кВ, $p = 3$ Торр. Средний выход нейтронов составил $\langle Y_N \rangle = (6,5 \pm 1,6) \times 10^5$ нейтр./имп. с ОСКО 100 %, при этом запасаемая энергия составляла всего $E = 320$ Дж. Сравнивая данные результаты с рис. 2 для камер Т19-Л316 с чистым D наполнением, стабильность генерации нейтронов значительно выше для данной за-

пасаемой энергии. Вторая серия, рис. 3б, проведена в комплектации субкилоджоульного генератора емкостью 4 мкФ для увеличения выхода нейтронов, в режиме $U = 17,5$ кВ, $p = 8$ Торр получены $\langle Y_N \rangle = (6,1 \pm 1,0) \times 10^6$ нейтр./имп. и ОСКО 78 %. При этом запасаемая энергия составляла $E = 670$ Дж. Эти результаты соответствуют данным рис. 2 для Т19-Л316 с чистым D наполнением. В завершении проведена третья серия срабатываний при 4 мкФ и зарядном напряжении 23 кВ – рис. 3в. Серия позволила определить максимальный достигаемый выход на камере Т19-Л316 с примесью Ag и стабильность генерации нейтронов при переходе в килоджоульный диапазон запасаемых энергий. Средний выход нейтронов составил $\langle Y_N \rangle = (3,5 \pm 0,4) \times 10^7$ нейтр./имп. и ОСКО 29 % при $E = 1160$ Дж. Обращаясь к линейному тренду зависимости рис. 2, при таком уровне E , ОСКО выхода нейтронов лежит в районе 40–50 %.

В целом экспериментально показано, что камеры Т19-Л316 с примесью Ag позволяют увеличить средний выход нейтронов в несколько раз по сравнению с чистым D наполнением, либо снизить рабочее напряжения РМ на 5–6 кВ и более, а также повышают стабильность генерации нейтронного излучения на камере с примесью Ag.

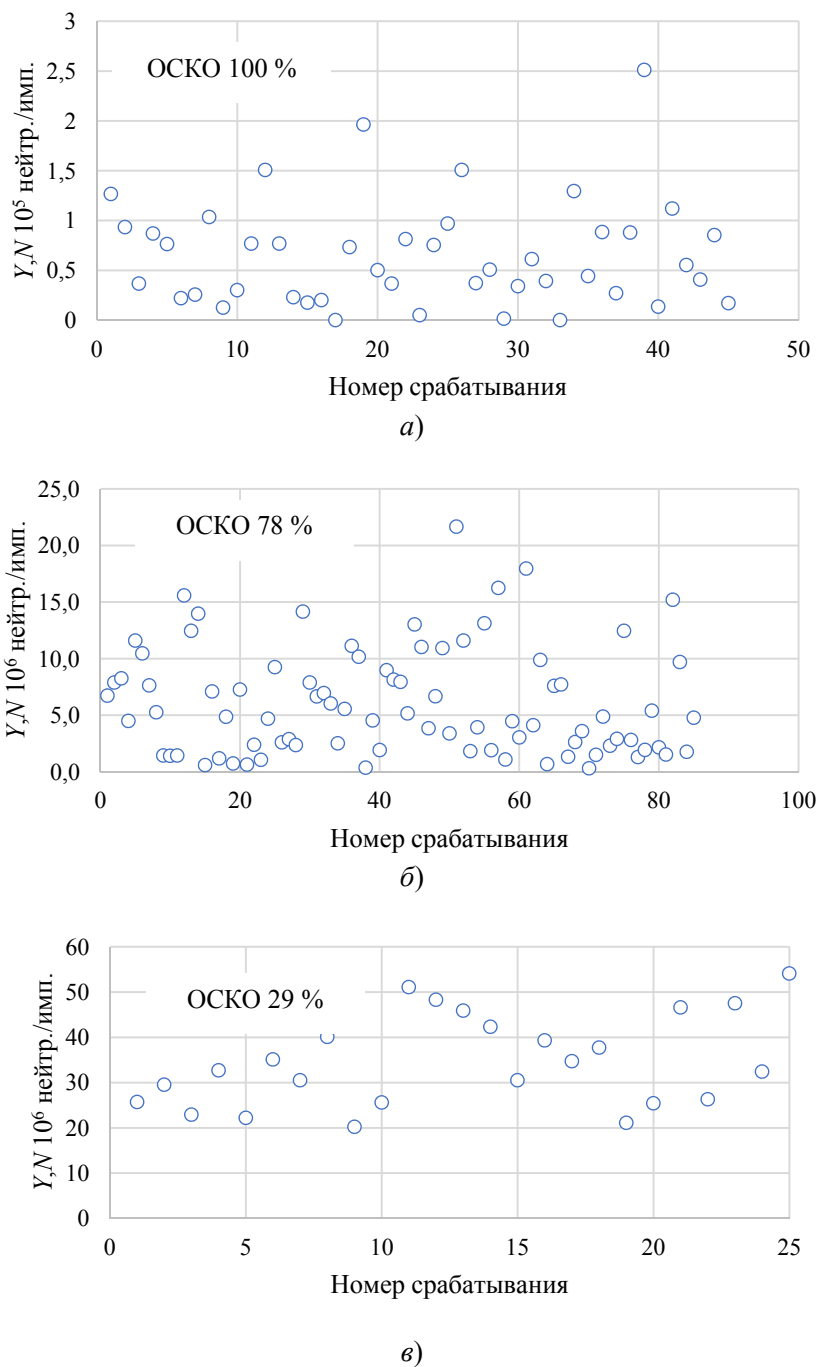


Рис. 3. Серии срабатываний камеры T19-Л316 (D + Ar) в составе субкилоджоульного генератора: а) 2 мкФ, 17 кВ, 3 Торр; б) 4 мкФ, 17,5 кВ, 8 Торр; в) 4 мкФ, 23 кВ, 10 Торр D + 0,5 Торр Ar

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования работы камер ПФ типа T19-Л316 в составе субкилоджоульного генератора позволили определить достижимый диапазон выхода нейтронов ($10^5 \div 10^7$ нейтр./имп.) при запасаемой энергии генератора от 200 до 1000 Дж. Определены оптимальные режимы работы камер T19-Л316 при чистом D наполнении по

зарядному напряжению и давлению рабочего газа. Эмпирически показано, что ОСКО выхода нейтронов зависит от вкладываемой в разряд энергии от накопителя и в диапазоне от 500 до 1100 Дж уменьшается в 2–3 раза до значений 40÷50 %. Также экспериментально показано снижение ОСКО выхода нейтронов при введении примеси Ar в наполнение камер. Минимально достигнутое ОСКО составило

29 % при запасаемой энергии 1160 Дж и среднем выходе нейтронов $3,5 \times 10^7$ нейтр./имп. Введение примеси Ag в камеры Т19-Л316 давление $0,5 \div 1,0$ Торр показало возможность снижения зарядного напряжения РМ субкилоджоульного генератора на 5–6 кВ при сохранении такого же уровня выхода нейтронов, как на камерах Т19-Л316 с наполнением чистым D.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Pereira N. R., Davis J.* / J. Appl. Phys. 1988. Vol. 64. № 3. P. R1–R27.
2. *Pikuz S. A., Shelkovenko T. A., Hammer D. A.* / Plasma Physics Reports. 2015. Vol. 41. № 4. P. 291–342. doi: 10.1134/S1063780X15040054
3. *Auluck S., Kubes P., Paduch M., Sadowski M. J., Krauz V. I., Lee S., Soto L., Scholz M., Miklaszewski R., Schmidt H., BorissovBlagoev A., Samuelli M., Seng Y. S., Springham S. V., Talebitaher A., Pavez C., Akel M., Ling Y. S., Verma R., Kolacek K., Keat P. L. C., Rawat R. S., Abdou A., Zhang G., Laas T.* / Plasma. 2021. Vol. 4. № 3. P. 450–669. doi: 10.3390/plasma4030033
4. *Ivanov V. V., Papp D., Anderson A. A., Talbot B. R., Astanovitskiy A. L., Nalajala V., Dmitriev O., Chittenden J. P., Niase N., Pikuz S. A., Shelkovenko T. A.* / Physics of Plasmas. 2013. Vol. 20. № 11. P. 112703. doi: 10.1063/1.4831778
5. *Decker G., Wienecke R.* / Physica. 1976. Vol. 82C. P. 155–164.
6. *Zav'yalov N. V., Maslov V. V., Rumyantsev V. G., Drozdov I. Yu., Ershov D. A., Korkin D. S., Molodtsev D. A., Smerdov V. I., Falin A. P., Yukhimchuk A. A.* / Plasma Phys. Rep. 2013. Vol. 39. P. 243.
7. *Babazadeh A. R., Roshan M. V., Habibi H., Nasiry A., Memarzadeh M., Banoushi A., Lamahi M., Sادات Kiai S. M.* / Braz. J. Phys. 2002. Vol. 32. № 1. P. 89. <https://doi.org/10.1590/S0103-97332002000100017>
8. *Verma R., Roshan M. V., Malik F., Lee P., Lee S., Springham S. V., Tan T. L., Krishnan M., Rawat R. S.* / Plasma Sources Sci. Technol. 2008. Vol. 17. P. 045020.
9. *Moreno J., Veloso F., Pavez C., Tarifeno-Saldivia A., Klir D., Soto L.* / Plasma Phys. Control. Fusion. 2015. Vol. 57. P. 035008. doi: 10.1088/0741-3335/57/3/035008
10. *Niranjian R., Rout R. K., Mishra P., Srivastava E., Rawool A. M., Kaushik T. C., Gupta S.* / Review of scientific instruments. 2011. Vol. 82. № 2. P. 026104. doi: 10.1063/1.3534827
11. *Zakaullah M., Waheed A., Ahmad S., Zeb S., Hussaion S.* / Plasma Sources Sci. Technol. 2003 Vol. 12. P. 443–448.
12. *Milanese M. M., Moroso R., Pouzo J.* / Eur. Phys. J. D. 2003. Vol. 27. P. 77–81. doi: 10.1140/epjd/e2003-00247-9
13. *Bochkov V. D., Bochkov D. V., Salynov I. A., Nikolaev V. N., Krestianinov A. S., Sokovnin S. Yu., Balezin M. E., Ponizovsky A. P.* / Physics of Particles and Nuclei Letters. 2018. Vol. 15. № 7. P. 894–897. doi: 10.1134/S154747711807018X
14. *Aghamir F. M., Behbahani R. A.* / Journal of Applied Physics. 2011. Vol. 109. № 4. P. 043301. doi: 10.1063/1.3549017
15. *Vikhrev V. V., Baronova E. O.* / Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1556. P. 012084. doi: 10.1088/1742-6596/1556/1/012084
16. *Mikhailov Yu. V., Prokuratov I. A., Lemeshko B. D., Morozov V. M., Dulatov A. K., Charaev O. A., Rukoliansky A. O., Andreev V. G., Litvinov I. N.* / Current Applied Physics. 2022. Vol. 39. P. 8–17. doi: 10.1016/j.cap.2022.03.015
17. <http://vniia.ru/production/neutronnie-generatory/neutronnye-generatory.php>
18. *Mikhailov Yu. V., Prokuratov I. A., Lemeshko B. D.* / Plasma Physics Reports. 2019. Vol. 45. № 4. P. 334–344. doi: 10.1134/S1063780X19030073
19. *Saw S. H., Lee S.* / Energy and Power Engineering. 2010. Vol. 2. № 1. P. 65. doi: 10.4236/epe.2010.21010

PACS: 52.58Lq

Plasma focus chamber operation as a part of subkilojoule pulsed neutron generator

D. I. Yurkov^{1,2}, V. A. Lavrenin², B. D. Lemeshko^{1,2}, Yu. V. Mikhailov¹ and I. A. Prokuratov¹

¹ Dukhov All-Russia research Institute of Automatics
22, ul. Sushchevskaya, Moscow, 127055, Russia
E-mail: AKDulatov@vniia.ru

² National Research Nuclear University MEPhI
31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia

Received 21.12.2022; revised 12.01.2023; accepted 15.01.2023

The paper considers the features of neutron radiation generation by small plasma focus chambers when operating as part of a subkilojoule neutron generator with a stored energy of 200 to

1000 J. The discharge current amplitude through chambers ranged from 100 to 200 kA, which ensures the yield of neutrons with an energy of 2.5 MeV at a level of 10^5 – 10^7 neutrons/pulse. Experimental studies of the chambers operation optimal modes as part of a subkilojoule generator to ensure the maximum level of neutron yield are presented. The neutron yield stability has been studied, in particular, it has been shown that an Ar impurity with a partial pressure of 0.5 ± 0.8 Torr in the chamber volume leads to a decrease in the relative standard deviation of the neutron yield in deuterium-filled plasma focus chambers.

Keywords: neutron generator, plasma focus, plasma focus chamber.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-78-85

REFERENCES

1. Pereira N. R. and Davis J., J. Appl. Phys. **64** (3), R1–R27 (1988).
2. Pikuz S. A., Shelkovenko T. A. and Hammer D. A., Plasma Physics Reports **41** (4), 291–342 (2015). doi: 10.1134/S1063780X15040054
3. Auluck S., Kubes P., Paduch M., Sadowski M. J., Krauz V. I., Lee S., Soto L., Scholz M., Miklaszewski R., Schmidt H., BorissovBlagoev A., Samuelli M., Seng Y. S., Springham S. V., Talebitaheer A., Pavez C., Akel M., Ling Y. S., Verma R., Kolacek K., Keat P. L. C., Rawat R. S., Abdou A., Zhang G. and Laas T., Plasma **4** (3), 450–669 (2021). doi: 10.3390/plasma4030033
4. Ivanov V. V., Papp D., Anderson A. A., Talbot B. R., Astanovitskiy A. L., Nalajala V., Dmitriev O., Chittenden J. P., Niasse N., Pikuz S. A. and Shelkovenko T. A., Physics of Plasmas **20** (11), 112703 (2013). doi: 10.1063/1.4831778
5. Decker G. and Wienecke R., Physica **82C**, 155–164 (1976).
6. Zav'yalov N. V., Maslov V. V., Rumyantsev V. G., Drozdov I. Yu., Ershov D. A., Korkin D. S., Molodtsev D. A., Smerdov V. I., Falin A. P. and Yukhimchuk A. A., Plasma Phys. Rep. **39**, 243 (2013).
7. Babazadeh A. R., Roshan M. V., Habibi H., Nasiry A., Memarzadeh M., Banoushi A., Lamehi M. and Sadat Kiai S. M., Braz. J. Phys. **32** (1), 89 (2002). <https://doi.org/10.1590/S0103-97332002000100017>
8. Verma R., Roshan M. V., Malik F., Lee P., Lee S., Springham S. V., Tan T. L., Krishnan M. and Rawat R. S., Plasma Sources Sci. Technol. **17**, 045020 (2008).
9. Moreno J., Veloso F., Pavez C., Tarifeno-Saldivia A., Klir D. and Soto L., Plasma Phys. Control. Fusion. **57**, 035008 (2015). doi: 10.1088/0741-3335/57/3/035008
10. Niranjian R., Rout R. K., Mishra P., Srivastava E., Rawool A. M., Kaushik T. C. and Gupta S., Review of scientific instruments **82** (2), 026104 (2011). doi: 10.1063/1.3534827
11. Zakaullah M., Waheed A., Ahmad S., Zeb S. and Hussaion S., Plasma Sources Sci. Technol. **12**, 443–448 (2003).
12. Milanese M. M., Moroso R. and Pouzo J., Eur. Phys. J. D. **27**, 77–81 (2003). doi: 10.1140/epjd/e2003-00247-9
13. Bochkov V. D., Bochkov D. V., Salynov I. A., Nikolaev V. N., Krestianinov A. S., Sokovnin S. Yu., Balezin M. E. and Ponizovsky A. P., Physics of Particles and Nuclei Letters **15** (7), 894–897 (2018). doi: 10.1134/S154747711807018X
14. Aghamir F. M. and Behbahani R. A., Journal of Applied Physics **109** (4), 043301 (2011). doi: 10.1063/1.3549017
15. Vikhrev V. V. and Baronova E. O., Journal of Physics: Conference Series. **1556**, 012084 (2020). doi: 10.1088/1742-6596/1556/1/012084
16. Mikhailov Yu. V., Prokuratov I. A., Lemeshko B. D., Morozov V. M., Dulatov A. K., Charaev O. A., Rukoliansky A. O., Andreev V. G. and Litvinov I. N., Current Applied Physics **39**, 8–17 (2022). doi: 10.1016/j.cap.2022.03.015
17. <http://vniia.ru/production/neitronnie-generatory/neytronnye-generatory.php>
18. Mikhailov Yu. V., Prokuratov I. A. and Lemeshko B. D., Plasma Physics Reports **45** (4), 334–344 (2019). doi: 10.1134/S1063780X19030073
19. Saw S. H. and Lee S., Energy and Power Engineering **2** (1), 65 (2010). doi: 10.4236/epe.2010.21010