

УДК 533.952

ИМПУЛЬСЫ НЕЙТРОННОГО И ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КАМЕРЫ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА ПРИ РАЗРЯДНЫХ ТОКАХ 100–200 КА

© 2022 Д.И. Юрков^{1,2}, В.А. Лавренин², Б.Д. Лемешко^{1,2}, Ю.В. Михайлов¹, И.А. Прокуратов¹

¹ФГУП ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, 127030, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

e-mail: akdulatov@vniia.ru

Поступила в редакцию: 26.10.2022

После доработки: 07.11.2022

Принята к публикации: 08.11.2022

В работе рассмотрена генерация нейтронного и жесткого рентгеновского излучений (ЖРИ) камерами плазменного фокуса при работе в составе субкилоджоульного нейтронного генератора ИНГ-102Э с емкостью накопителя 4.4 мкФ и амплитудой разрядного тока через электроды камеры в диапазоне от 100 до 200 кА. Использована камера типа Т19-Л316, обеспечивающая выход нейтронов с энергией 2.5 МэВ на уровне 10^5 – 10^7 нейтр./имп. Проведено измерение уровня выхода нейтронов и ЖРИ камеры Т19-Л316, показано наличие режимов работы с генерацией ЖРИ без нейтронного излучения при дейтериевом наполнении камеры. Определена длительность импульсов нейтронов камеры Т19-Л316 и изучена зависимость длительности от уровня выхода нейтронов и от состава рабочего газа в камере ПФ. Экспериментально подтверждена работа камеры ПФ в безнейтронном режиме при заполнении объема камеры водородом и проведено сравнение уровня выхода ЖРИ при работе с водородом, дейтерием и дейтерием с примесью аргона. Также предложен вариант конструкции камеры Т19-Л316 для генерации нейтронов с пониженным до 100 раз выходом ЖРИ, реализуемый за счет изменения конструкции камеры.

Ключевые слова: плазменный фокус, генератор нейтронов, рентгеновское излучение, пинч.

DOI: 10.26583/vestnik.2022.4

ВВЕДЕНИЕ

Установки плазменного фокуса (ПФ) являются источниками проникающих излучений: нейтронов [1, 2] и рентгеновского излучения [3, 4]. Установки ПФ используются в качестве источников нейтронного излучения при наполнении камер ПФ дейтерием (D) или дейтерий-тритиевой (DT) смесью. Генерация нейтронов происходит в результате протекания ядерных реакций в плотной плазме пинча $D(d, n)He^3$, $D(t, n)He^4$, $T(t, 2n)He^4$. Различные установки ПФ обеспечивают выход нейтронов в диапазоне 10^6 – 10^{12} нейтр./имп. [5, 6].

Наряду с генерацией нейтронов в ПФ создаются условия для генерации рентгеновского излучения. Рентгеновское излучение камер ПФ можно разделить на мягкое рентгеновское излучение с энергией квантов 1–10 кэВ и жесткое рентгеновское излучение (ЖРИ) с энергией квантов до сотен кэВ. Мягкое рентгеновское излучение связывают с объемным излучением высокотемпературной плазмы пинча в камере ПФ, ему посвящено много исследований в рамках рентгенографии, рентгеновской литографии и других применений [7, 8].

ЖРИ в основном возникает при торможении на аноде камеры ПФ высокоэнергетического электронного пучка, формирующегося в пинче. Максимум спектра ЖРИ приходится на диапазон энергий 40–80 кэВ [12], энергия рентгеновских квантов достигает 250–300 кэВ. ЖРИ применяется для изучения радиационной стойкости электронных радиоизделий, для изучения дозовых и ионизационных эффектов в КМОП-приборах [9]. В работе были определены выход и длительность импульсов нейтронов и ЖРИ камер типа Т19-Л316. Предполагается использование импульсов нейтронов и ЖРИ камеры Т19-Л316 в ходе учебного процесса и проведения научных исследований.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Камера плазменного фокуса Т19-Л316 представляет собой электровакуумный газонаполненный прибор, изготовленный из бескислородной меди, состоящий из катода и анода, соединенных между собой изолятором из Al_2O_3 . Диаметр внешнего электрода – 40 мм, внутреннего – 20 мм, высота анода – 15 мм. Толщина

ИМПУЛЬСЫ НЕЙТРОННОГО И ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КАМЕРЫ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА ПРИ РАЗРЯДНЫХ ТОКАХ 100-200 КА

стенок анода и катода составляет 2.5 мм. Камера снабжена вакуумным клапаном для заполнения объема камеры рабочим газом заданного состава.

Для регистрации нейтронов применялся прибор СИВН61 производства ВНИИА [14], использующий активационный метод регистрации нейтронов на основе активации нейтронами природной смеси изотопов серебра ^{107}Ag (51.84 %) и ^{109}Ag (48.16 %). Абсолютная погрешность измерения выхода 2.5 МэВ нейтронов составляет не более 20 % (при $P = 0.95$).

Для регистрации ЖРИ использован прибор измерения дозы ДКС-101 [10], который позволяет проводить измерение поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы с относительной погрешностью 2.5 % (при $P = 0.95$). ДКС-101 оснащен рядом ионизационных камер, в экспериментах использовалась камера БМК-500 с диапазоном измерения интеграла мощности поглощенной дозы от 0.06 мкГр до 0.384 Гр.

Генерируемое ЖРИ отчасти поглощается медными стенками камеры Т19-Л316 перед тем, как попасть на детектор, при этом происходит ужесточение спектра. В отличие от нейтронного излучения МэВ диапазона, ЖРИ достаточно сильно поглощается медью. Кривая пропускания меди показывает, что 2.5 мм материала (толщина медного корпуса камеры ПФ) пропускают ЖРИ с энергиями 80 кэВ и более [11]. Поэтому регистрируемое с помощью ДКС-101 излучение относится к жесткому рентгеновскому излучению.

Эксперименты проведены на субкилоджоульном генераторе ИНГ-102Э с емкостным накопителем 4.4 мкФ и камерой Т19-Л316 при чистом дейтериевом заполнении камеры. Срабатывания проводились при зарядном напряжении $U = 18 \div 20$ кВ. Амплитуда разрядного тока через камеры достигала 200 кА. В экспериментах ДКС-101 располагался на расстоянии 7 см от центра камеры Т19-Л316. Дополнительно использовался СИВН61 для регистрации уровня выхода нейтронного излучения.

Совместно с изучением уровня выхода ЖРИ и нейтронов проведено изучение формы импульса нейтронного и рентгеновского излучений камеры Т19-Л316. Для регистрации рентгеновского и нейтронного излучений использовались импульсные сцинтилляционные детекторы типа ССДИ8 и ССДИ38. Детектор ССДИ8 обладает большей чувствительностью, но меньшим временным разрешением – 10 нс. Временное разрешение ССДИ38 составляет 2.5 нс. По-

скольку чувствительности быстрого ССДИ38 не достаточно для регистрации выхода нейтронов на уровне 10^5 нейтр./имп., то в таких случаях применялся детектор ССДИ8 с более высокой чувствительностью. Сигналы с ССДИ8 и ССДИ38 регистрировались на цифровом осциллографе.

ИЗУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО И НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЙ

Результаты срабатываний камеры Т19-Л316 приведены в табл. 1. Перед срабатываниями проведено измерение фоновых значений показаний прибора ДКС-101, которые составили 0.84 мкГр. При зарядном напряжении $U = 18$ кВ выход нейтронов отсутствовал, а выход ЖРИ по показаниям ДКС-101 лежал на уровне фона. При увеличении U до 19 кВ нейтронное излучение также не наблюдалось, а выход ЖРИ увеличился вдвое относительно фоновых значений. Это говорит о том, что при срабатываниях камеры происходило пинчевание плазмы и формирование электронного пучка (также это видно по появлению особенности, время t_{oc}). Дальнейшее увеличение напряжения до 20 кВ привело к появлению импульса нейтронов с выходом на уровне нескольких единиц на 10^6 нейтр./имп., а выход ЖРИ не увеличился. Это подтверждает факт, что уровни выхода нейтронного и рентгеновского излучений в камере ПФ напрямую не коррелируют друг с другом, поскольку генерация излучений связана с различными физическими процессами, протекающими в пинче.

Таблица 1. Выход нейтронов и ЖРИ при срабатывании камеры Т19-Л316

$U_{зар}, \text{кВ}$	$t_{oc}, \text{нс}$	$(Y_N) \text{ ср.,}$ $\times 10^6 \text{ нейтр./имп.}$	$(Y_{жри}) \text{ ср.,}$ мкГр
18	–	–	0.83
19	520	–	1.52
20	490	2.94	1.08

Достигаемые на камере Т19-Л316 значения выхода ЖРИ надежно регистрируются измерительной аппаратурой. Поэтому ЖРИ камеры Т19-Л316 может применяться в составе импульсного генератора ЖРИ при его использовании в учебных и практических целях. Совместно с изучением уровня выхода ЖРИ и нейтронов проведено изучение формы импуль-

са нейтронного и рентгеновского излучений камеры Т19-Л316. Характерная осциллограмма, зарегистрированная ССДИЗ8, приведена на рис. 1.

В серии из нескольких десятков срабатываний длительность импульсов ЖРИ лежала в диапазоне от 2 до 10 нс, средняя длительность импульсов ЖРИ составила $\langle t_{\text{ЖРИ}} \rangle = (3 \pm 1)$ нс.

Периодически наблюдалось несколько последовательных импульсов ЖРИ и/или нейтронов за одно срабатывание камеры. Поскольку для регистрации выхода нейтронов на уровне 10^5 нейтр./имп. детекторы располагаются доста-

точно близко к области генерации излучений (~ 10 см), то при формировании нескольких импульсов они могут накладываться друг на друга и сливаться с полезным нейтронным импульсом. Пример такого срабатывания приведен на рис. 2. Для устранения искажающего влияния ЖРИ на форму сцинтилляционного сигнала от нейтронов детекторы закрывались свинцовым экраном толщиной 10 мм. Толщина свинцовой защиты от ЖРИ выбиралась из условия полного поглощения рентгеновских квантов с энергией до 300 кэВ [14].

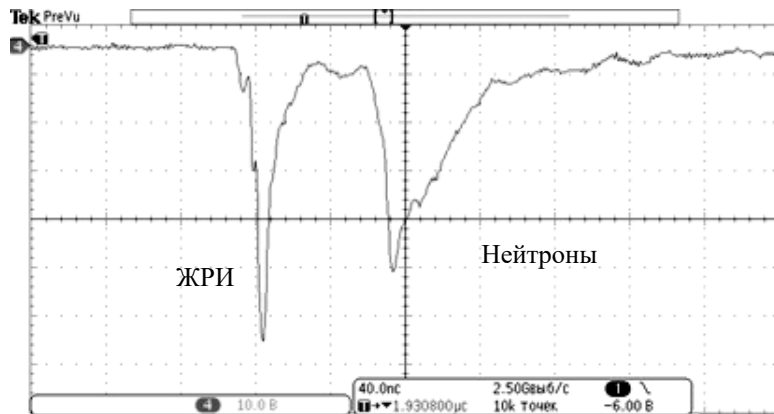


Рис. 1. Характерная осциллограмма сигнала с ССДИЗ8 при срабатывании камеры Т19-Л316 с дейтериевым наполнением: 10 В/дел., 40 нс/дел.

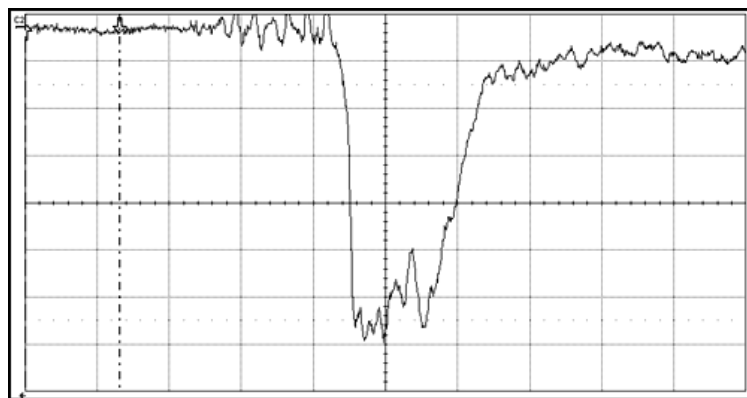


Рис. 2. Осциллограмма сигнала с ССДИЗ8 при наложении импульсов ЖРИ и нейтронов, 5 В/дел., 20 нс/дел.

Характерная осциллограмма нейтронного импульса камеры Т19-Л316 с сцинтилляционных детекторов ССДИ8 и ССДИЗ8, закрытых экранами из Рb, приведена на рис. 3.

Амплитуда сигнала с ССДИ8 составила 25 В, а с ССДИЗ8 – 1.7 В. Для экспериментального определения фактического диапазона длительностей нейтронного импульса камеры Т19-Л316 в составе генератора. Результаты срабатываний обобщены на гистограмме рис. 4. По рис. 4 видно, что по показани-

ям ССДИ8 длительность импульса нейтронов лежит в пределах от 7 до 21 нс, при этом в диапазоне от 10 до 20 нс лежит 97 % импульсов. Средняя длительность импульсов нейтронов по показаниям ССДИЗ8 $\langle \tau_{\text{ССДИЗ8}} \rangle = 13.2 \pm 0.3$ нс при $p = 0.95$. По показаниям с ССДИ8 значительная часть зарегистрированных импульсов имеет длительность больше 20 нс, а среднее значение $\langle \tau_{\text{ССДИ8}} \rangle = 17.4 \pm 0.4$ нс при $p = 0.95$. Это связано с недостаточным временным разрешением детектора ССДИ8, поскольку его временное разрешение

ИМПУЛЬСЫ НЕЙТРОННОГО И ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КАМЕРЫ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА ПРИ РАЗРЯДНЫХ ТОКАХ 100-200 КА

фактически равно длительности регистрируемого нейтронного импульса.

Собственное временное разрешение детектора τ_0 увеличивает истинную длительность импульса $\tau_{\text{ист}}$ до наблюдаемой экспериментально длительности $\tau_{\text{эксп}}$ в соответствии с соотношением

$$(\tau_{\text{эксп}})^2 = (\tau_{\text{ист}})^2 + (\tau_0)^2.$$

Вычислим истинную длительность нейтронного импульса $\tau_{\text{ист}}$, используя значения $\tau_0 = 2.5$ нс для ССДИ38 и 10 нс для ССДИ8. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

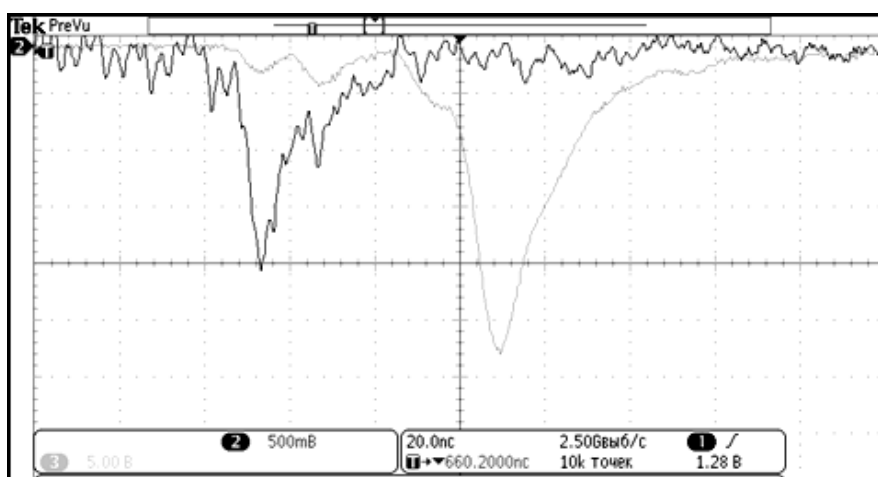


Рис. 3. Характерная осциллограмма нейтронного импульса камеры Т19-Л316: ССДИ38 – слева, ССДИ8 – справа

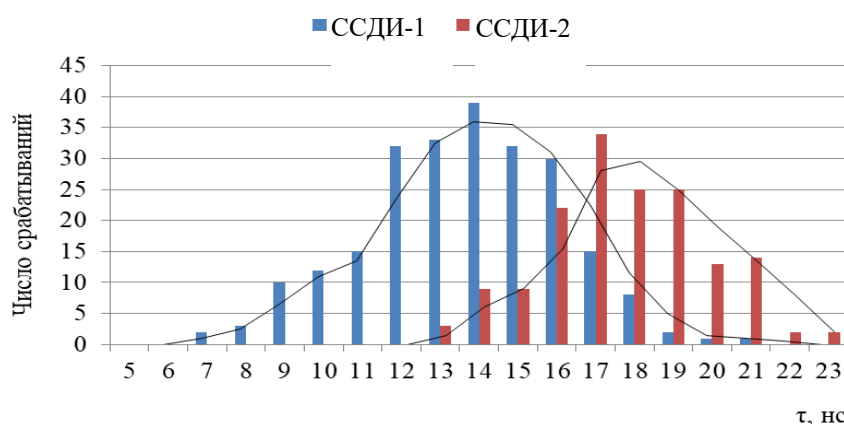


Рис. 4. Гистограмма распределения числа срабатываний по длительности импульса нейтронов (2.5 МэВ) в каждом срабатывании по сигналам с ССДИ8 и ССДИ38

Таблица 2. Длительности нейтронного импульса камеры Т19-Л316

Детектор	τ_0 , нс	$\tau_{\text{эксп}}$, нс	$\tau_{\text{ист}}$, нс
ССДИ8	2.5	13.2	13.0
ССДИ38	10.0	17.4	14.2

Вычисленные значения $\tau_{\text{ист}}$ для применяемых детекторов с различным временным разрешением отличаются всего на 1.2 нс. За истинную длительность $\tau_{\text{ист}}$ импульса нейтронов должно быть принято наименьшее вычисленное значение

для ССДИ38, т.е. $\tau_{\text{ист}} = 13.0$ нс.

Такую же процедуру можно проделать и для коррекции измеренной длительности импульса ЖРИ. В этих экспериментах экспериментально определенная средняя длительность ЖРИ с помощью ССДИ38 $\tau_{\text{эксп_ЖРИ}} = \langle t_{\text{ЖРИ}} \rangle = 3 \pm 1$ нс. Тогда аналогичные вычисления дают $\tau_{\text{ист_ЖРИ}} = 2 \pm 1$ нс.

Поскольку представляющий интерес рабочий диапазон выхода нейтронов составляет от 10^5 до 10^7 нейтр./имп., было проведено изучение зависимости длительности импульса

нейтронов по показаниям сигнала с ССДИЗ8 от уровня выхода нейтронов в каждом срабатывании (рис. 5). Видно, что средняя длительность нейтронного импульса в данных пределах не зависит от уровня выхода нейтронов. Нужно

отметить, что зависимость длительности импульса нейтронов от наличия примесей инертных газов также не обнаружена как для чистого D_2 наполнения камер Т19-Л316, так и для наполнения с добавками аргона D_2+Ar .

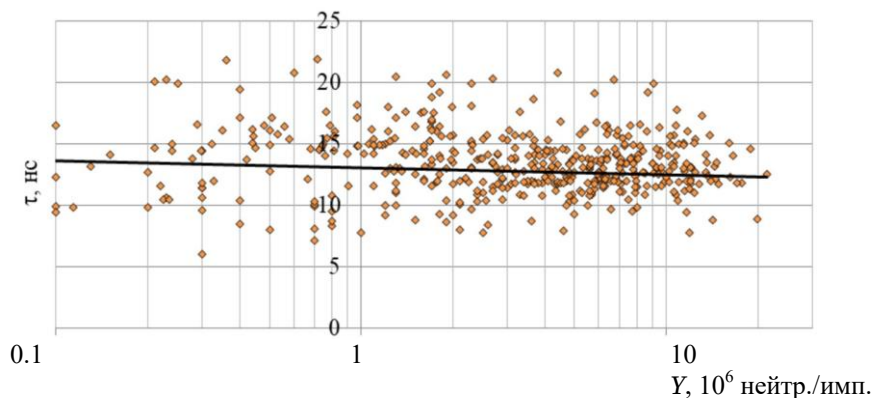


Рис. 5. Зависимость длительности импульса нейтронов по показаниям с сигнала ССДИ8 от уровня выхода нейтронов (2.5 МэВ) в каждом срабатывании

КАМЕРА ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА С ГЕНЕРАЦИЕЙ ТОЛЬКО ЖРИ (БЕЗНЕЙТРОННАЯ КАМЕРА)

Для реализации безнейтронного режима работы камеры Т19-Л316 дейтерий был заменен на водород, при этом выполняются условия для пинчевания рабочего газа (водорода) и формирования электронного пучка с последующей генерацией тормозного рентгеновского излучения (ЖРИ), но отсутствует ядерная реакция генерации нейтронов.

Проведены эксперименты по замене рабочего газа с дейтерия на водород. По сравнению с дейтерием, при использовании водорода, скорости движения фронта плазмы в ТПО меняются незначительно (15–25 %) [15]. Время сжатия ТПО в пинч остается согласованным с четвертью периода разряда. Для проверки сделанных предположений проведены серии срабатываний с камерой Т19-Л316 [13], заполненной водородом.

дом. Зарядное напряжение составляло 20 кВ. На рис. 6 представлены результаты измерения выхода ЖРИ при разных давлениях водорода.

Как видно из представленных результатов, оптимум давления водорода для генерации ЖРИ составляет примерно 10 торр. Сравнение выхода ЖРИ при наполнении камеры Т19-Л316 дейтерием и водородом показало, что выход ЖРИ в тех же режимах работы при наполнении дейтерием составил 0.18 отн.ед. и 0.3 отн.ед. при наполнении камеры водородом, т.е. разница примерно в два раза.

Дополнительно были проведены эксперименты по генерации ЖРИ в камере ПФ, в которых к водороду в камере при давлении 10 торр был добавлен аргон в количестве 0.5 торр. Выход ЖРИ в этих экспериментах увеличился в три раза по сравнению с чистым водородом, длительность импульсов ЖРИ при этом не изменилась.

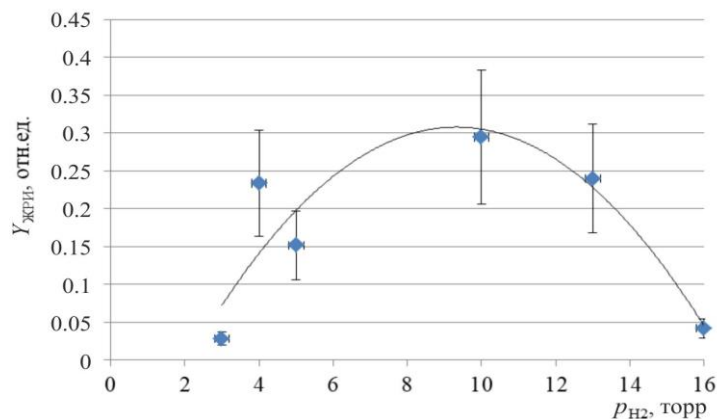


Рис. 6. Зависимость среднего нормированного выхода $Y_{ЖРИ}$ от давления водорода в камере ПФ

КАМЕРА ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА С ПОНИЖЕННЫМ ВЫХОДОМ ЖРИ

В задачах по генерации импульса нейтронов ЖРИ камер ПФ является паразитным фактором, и желательно, чтобы детекторы для регистрации параметров нейтронов были либо нечувствительны к ЖРИ, как СИВН61, либо защищены от ЖРИ, например свинцом, как ССДИ в экспериментах выше. Однако в случае использования большого набора детекторов разных типов защищать материалом поглотителя каждый детектор может быть затруднительно. Поэтому была разработана конструкция камеры Т19-Л316 с уменьшенным уровнем ЖРИ снаружи камеры. В конструкции разработанной камеры Т19-Л316 низкий уровень ЖРИ достигается за счет минимизации генерации рентгена на мишени из Ве и поглощения рентгеновского излучения в материалах: экрана из W, медного анода и медного катода. На рис. 7 приведен пример конструкции камеры со встроенным поглотителем ЖРИ.

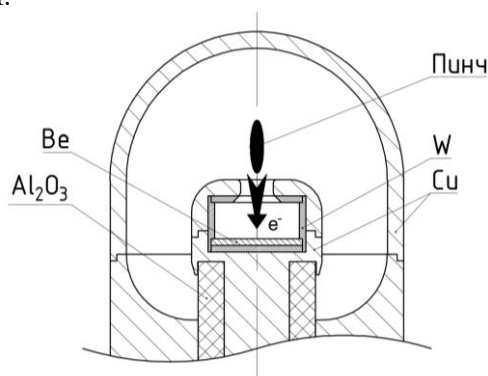


Рис. 7. Камера типа Т19-Л316 с пониженным выходом ЖРИ

Радиационные потери для тонкой мишени пропорциональны квадрату заряда ядер вещества Z (формула Бете-Блоха) и увеличиваются с ростом энергии почти линейно. Для толстой мишени в результате торможения электронов интенсивность рентгеновского излучения пропорциональна заряду ядра Z . Поэтому для получения наименьшего интегрального выхода ЖРИ камеры ПФ выбирается материал мишени с небольшим атомным номером ядра $Z_{\text{мин}}$, что позволяет ослабить исходную максимальную генерацию ЖРИ при $Z_{\text{макс}}$ в отношении $Z_{\text{макс}}/Z_{\text{мин}}$ практически на порядок.

Поглощение генерируемого в мишени рентгеновского излучения происходит цилиндрическим экраном. Экран, изготовленный из

материала толщиной x с большим атомным номером Z , например, из W или Та, поглощает рентгеновское излучение всех энергий по закону $I(E, x) = I_0(E) \cdot \exp(-\mu(E) \cdot x)$ [16], где $\mu(E)$ – полный массовый коэффициент ослабления данным материалом гамма-квантов энергии E , $I_0(E)$ – количество рентгеновских квантов энергии E , попадающих на поверхность материала, $I(E, x)$ – количество квантов энергии E после прохождения материала толщиной x . Так, при использовании Ве с зарядом ядра $Z = 4$ при энергии рентгеновских квантов 150 кэВ массовый коэффициент ослабления $\mu(E) = 0.0215$, а для W с $Z = 74$ для той же энергии рентгеновских квантов $\mu(E) = 1.99$ [16]. Это означает, что для одинакового поглощения рентгена с энергией квантов 150 кэВ достаточно иметь толщину вольфрама в 92 раза меньше толщины бериллия. На рис. 8 приведен график, иллюстрирующий изменение спектра ЖРИ камеры ПФ после прохождения поглотителей из разных материалов (в качестве исходного спектра использован характерный спектр ЖРИ камер ПФ). Видно, что достаточно толщины экрана 1 мм W для практически полного поглощения рентгена с энергией рентгеновских квантов вплоть до 250 кэВ.

В конструкции камеры Т19-Л316 имеется отверстие на верхушке анода (вблизи области пинчевания). Электронный пучок, образующийся в области над анодом, ускоряется в сторону отверстия и потом тормозится на материале мишени внутри анода. Поэтому в конструкции разработанной камеры Т19-Л316 ослабление ЖРИ происходит за счет поглощения рентгеновского излучения в материале экрана с большим Z , внутреннего медного электрода-анода и затем внешнего медного электрода-катода.

Экспериментальные работы на макетной камере Т19-Л316 с пониженным выходом ЖРИ проводились с использованием ССДИ8. На характерной осциллограмме, приведенной на рис. 9, видно, что импульс ЖРИ отсутствует.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований сделаны следующие выводы:

- длительность импульса нейтронного излучения камеры Т19-Л316 лежит в диапазоне от 5 до 20 нс, в среднем 13.0 нс, и не зависит от уровня выхода нейтронов, и от наличия примеси тяжелых газов (Ar);

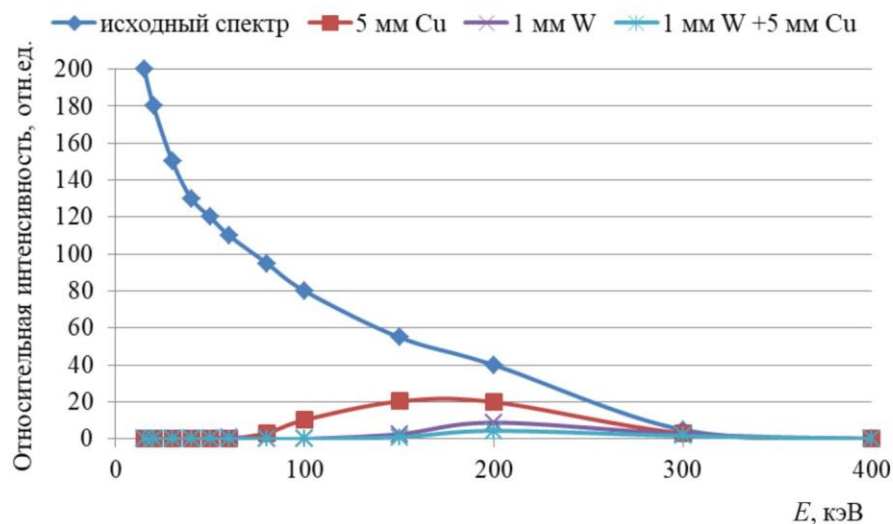


Рис. 8. Спектры рентгеновского излучения после прохождения поглотителей различных толщин

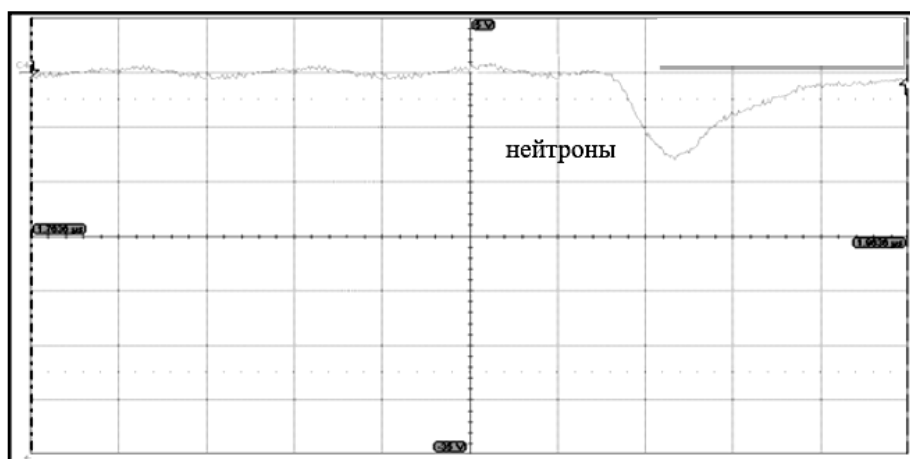


Рис. 9. Осциллограмма сигнала с ССДИЗ8 камеры с пониженным выходом ЖРИ, 5 В/дел., 20 нс/дел

- уровень выхода ЖРИ камеры Т19-Л316 лежит на уровне единиц мкГр и не зависит от уровня выхода нейтронного излучения, длительность импульса ЖРИ составляет в среднем 2.0 нс;

- показано, что возможен безнейтронный режим работы камер Т19-Л316. При заполнении камеры водородом возможна генерация ЖРИ без генерации нейтронов, добавка аргона в количестве 5 % от давления водорода позволяет увеличивать выход ЖРИ в несколько раз;

- разработана конструкция камеры ПФ генератора, с малым выходом ЖРИ, за счет использования внутри анода диска-мишени из материала с низким Z и цилиндрического экрана из материала с большим Z вокруг диска-мишени. Предложенное решение может быть распространено на все типы камер ПФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Т. IX-3. Радиационная плазмодинамика / Отв. ред. В.А. Грибков. М.: Янус-К, 2007.
2. 1960–2010. 50 Anni di Ricerca sulla Fusione in Italia. 50 years of Fusion Research in Italy. Edited by Paola Batistoni. Associazione Euratom-ENEA sulla Fusione, 2010.
3. Gullickson R.L., Barlett R.H. Advances in X-ray Analysis. 1974. V. 18. P. 186.
4. Filippov N.V., Filippova T.I., Karakin M.A., et al. Filippov type plasma focus as intense source of hard x-rays ($E_x \approx 50$ keV) // IEEE Transactions on Plasma Science. 1996. Vol. 24. № 4. P. 1215–1220.
5. Lee S., Dugu S., Shrestha R., et al. Numerical experiments on PF1000 neutron yield // J. Fusion Energ. 2014. V. 33. P. 684–688, doi: 10.1007/s10894-014-9731-4.
6. Вухрев В.В., Королев В.Д. Генерация нейтронов в z-пинчах // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 5. С. 397–423. doi: 10.1134/s1063780x07050029.

7. Bogolyubov E.P., Bochkov V.D., Veretennikov V.A., et al. A powerful soft x-ray source for x-ray lithography based on plasma focusing // *Physica Scripta*. 1988. Vol. 5–7. P. 488–494.

8. Kalaiselvi S.M.P., Tan T.L., Talebitaher A., et al. Optimization of neon soft x-ray emission from 200 J plasma focus device for application in soft x-ray lithography. *Intern // J. of Modern Physics: Conference Series*. 2014. Vol. 32. P. 8, doi: 10.1142/s2010194514603238.

9. ВАНТ. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру / Отв. ред. В.В. Чернов. 1994. Вып. 1–2.

10. Универсальный дозиметр ДКС-101. ООО НПП «Доза». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.doza.ru/catalog/dosimeters/196/> [дата обращения 20.09.2022].

11. Ляпидевский В.К., Самойлова Л.Б. Экспериментальные и теоретические исследования импульсных процессов // *Сб. научн. тр. / Ред. Л.П. Феоктистова*. М.: МИФИ, Энергоатомиздат. 1991. С. 22.

12. Дулатов А.К., Крапива П.С., Лемешко Б.Д., Михайлов Ю.В., Москаленко И.Н., Прокураторов И.А., Селифанов А.Н. Метод разностных фильтров для исследования спектра жесткого рентгеновского излучения установки плазменного фокуса // *Приборы и техника эксперимента*. 2015. № 6. С. 71–77, doi: 10.1134/S002044121505005X.

13. Официальный сайт ФГУП «ВНИИА». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vniia.ru/> [дата обращения: 20.09.2022].

14. Дулатов А.К., Крапива П.С., Лемешко Б.Д., Михайлов Ю.В., Москаленко И.Н., Прокураторов И.А., Селифанов А.Н. Особенности генерации рентгеновского излучения камерами плазменного фокуса с дейтериевым и дейтерий-третиевым наполнениями // *Физика плазмы*. 2016. Т. 42. № 1. С. 43–49, doi: 10.1134/S1063780X16010050.

15. Арцимович Л.А. Плазменные ускорители. М.: Машиностроение, 1973. С. 191–195.

16. Сторм Э. Израэль Х. Сечения взаимодействия гамма-излучения. М.: Атомиздат, 1973. 253 с.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI», 2022, vol. 11, no 4, pp. 296–304

NEUTRON AND HARD X-RAY PULSES OF THE PLASMA FOCUS CHAMBER AT DISCHARGE CURRENTS OF 100-200 KA

D.I. Yurkov^{1,2}, V.A. Lavrenin², B.D. Lemesko^{1,2}, Yu.V. Mikhailov^{1*}, I.A. Prokuratov^{1*}

¹Duknov All-Russia Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow, 127030, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
Moscow, 115409 Russia

*e-mail: akdulatov@vniia.ru

Received October 26, 2022; revised November 7, 2022; accepted November 8, 2022

The paper considers the neutron and hard X-ray (HXR) generation by plasma focus chambers operating as part of the ING-102Э subkilojoule neutron generator with a storage capacity of 4.4 μF and an amplitude of the discharge current through the chamber electrodes in the range from 100 to 200 kA. T19-L316 type chamber was used, which ensures the neutron yield with an energy of 2.5 MeV at a level of 10⁵–10⁷ neutrons/pulse. Measurement of the neutron level yield and HXR of the T19-L316 chamber was carried out, the presence of operating modes with the generation of HXR without neutron radiation with deuterium filling of the chamber is shown. The neutron pulses duration of the T19-L316 chamber was determined, and the dependence of the duration on the neutron yield level and on the composition of the working gas in the PF chamber was studied. The PF chamber operation in the regime without neutrons was experimentally confirmed when the chamber volume was filled with hydrogen, and a comparison was made of the level of the HXR yield when working with hydrogen, deuterium, and deuterium with an admixture of argon. Also, a T19-L316 chamber design for neutron generation with a 100-fold reduced HXR yield, implemented is proposed.

Keywords: plasma focus, neutron generator, hard x-ray emission, pinch.

REFERENCES

1. Encyclopedia of Low Temperature Plasma / Ed. by V.E. Fortov, Ser. B, Vol. IX3: Radiative Plasma Dynamics: Physics, Experimental Technologies, and Applications. Ed. by V. A. Gribov. M.: YanusK Publ., 2007.

2. 1960–2010. 50 Anni di Ricerca sulla Fusione in Italia. 50 years of Fusion Research in Italy. Edited by

Paola Batistoni. Associazione Euratom-ENEA sulla Fusione, 2010.

3. Gullickson R.L., Barlett R.H. Advances in X-ray Analysis. 1974. Vol. 18. P. 186.

4. Filippov N.V., Filippova T.I., Karakin M.A., et al. Filippov type plasma focus as intense source of hard x-rays (E_x ≈ 50 keV). IEEE Transactions on Plasma Science. 1996. Vol. 24. № 4. P. 1215–1220.

5. Lee S., Dugu S., Shrestha R., et al. Numerical experiments on PF1000 neutron yield // J. Fusion Energ. 2014. Vol. 33. P. 684–688, doi: 10.1007/s10894-014-9731-4.
6. Vikhrev V.V., Korolev V.D. Neutron generation from z-pinches. Plasma Physics Reports. 2007. Vol. 33. № 5. P. 356–380, doi: 10.1134/S1063780X07050029 (in Russian).
7. Bogolyubov E.P., Bochkov V.D., Veretennikov V.A., et al. A powerful soft x-ray source for x-ray lithography based on plasma focusing // Physica Scripta. 1988. Vol. 5–7. P. 488–494.
8. Kalaiselvi S.M.P., Tan T.L., Talebitaher A., et al. Optimization of neon soft x-ray emission from 200 J plasma focus device for application in soft x-ray lithography. Intern // J. of Modern Physics: Conference Series, 2014. Vol. 32. P. 8, doi: 10.1142/s2010194514603238.
9. Questions of atomic science and technics. Series: Physics of radiation effects on radio-electronic equipment / Edited by V.V. Charnov. 1994. № 1–2.
10. Universal'nyj dozimetr DKS-101. ООО NPP «Doza». [Universal dosimeter DKS-101. LLC NPP Doza]. Available at: <http://www.doza.ru/catalog/dosimeters/196/> (accessed 20.09.2022).
11. Lyapidevsky V.K., Samoilova L.B. Eksperimental'nye i teoreticheskie issledovaniya impul'snyh processov. Sb. nauchn. Tr. Red. Feoktistova. [Experimental and theoretical studies of impulse processes. Scientific Tr. Ed. by Feoktistova L.P.]. M.: MEPhI, Energoatomizdat Publ., 1991. P. 22.
12. Dulatov A.K., Krapiva P.S., Lemesko B.D., Mikhailov Yu.V., Moskalenko I.N., Prokuratov I.A., Selifanov A.N. The Balanced Filter Method for Studying the Hard X-ray Spectrum of the Plasma Focus Device // Instruments and Experimental Techniques. 2015. Vol. 58. № 6. P. 774–780. 10.1134/S1063780X07050029 (in Russian), doi: 10.1134/S002044121505005X 10.1134/S1063780X07050029.
13. Oficial'nyj sajt FGUP «VNIIA». [Official site of FSUE «VNIIA»]. Available at: <http://www.vniia.ru/> (accessed 20.09.2022).
14. Dulatov A.K., Krapiva P.S., Lemesko B.D., Mikhailov Yu.V., Moskalenko I.N., Prokuratov I.A., Selifanov A.N. Specific Features of X-Ray Generation by Plasma Focus Chambers with Deuterium and Deuterium–Tritium Fillings. Plasma Physics Reports. 2016. Vol. 42. № 1. P. 38–44 (in Russian), doi: 10.1134/S1063780X16010050.
15. Artsimovich L.A. Plazmennye uskoriteli [Plasma accelerators]. M.: Mashinostroenie Publ., 1973. P. 191–195.
16. Storm E. Secheniya vzaimodejstviya gamma-izlucheniya [Interaction cross sections of gamma radiation]. M.: Atomizdat Publ., 1973. 253 p.