

СТРУКТУРА ИМПУЛЬСОВ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КАМЕРАХ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА С ДЕЙТЕРИЙ-ТРИТИЕВЫМ НАПОЛНЕНИЕМ

© 2021 г. Б. Д. Лемешко^а, Ю. В. Михайлов^{а,*}, И. А. Прокуратов^а,
А. К. Дулатов^а, А. А. Кадыргулов^а

^а *Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия*

**e-mail: bogolubov@vniia.ru*

Поступила в редакцию 29.01.2021 г.

После доработки 04.03.2021 г.

Принята к публикации 10.03.2021 г.

Рассматриваются особенности генерации нейтронного и жесткого рентгеновского излучения генераторами на основе камер плазменного фокуса (ПФ). Для генератора с амплитудой тока 300 кА при дейтериевом наполнении показано, что число импульсов жесткого рентгеновского излучения (ЖРИ) варьируется в разных срабатываниях от нуля до двух, при этом время между особенностью (характерный спад на кривой разрядного тока после сжатия токовоплазменной оболочки в пинч) и моментом появления первого импульса рентгеновского излучения постоянно с точностью до нескольких наносекунд. Для генератора с амплитудой тока 600 кА проведен анализ частоты появления нескольких импульсов нейтронного и рентгеновского излучений при работе на камере ПФ с дейтерий-тритиевым наполнением (нейтроны 14 МэВ). Экспериментально показано, что форма импульса нейтронов имеет сложную структуру с несколькими отдельными максимумами.

Ключевые слова: камера плазменного фокуса, плазменный фокус, нейтронный генератор, импульсное нейтронное излучение

DOI: 10.31857/S0367292121070118

1. ВВЕДЕНИЕ

Установки с камерами плазменного фокуса являются высокоинтенсивными источниками импульсного нейтронного и рентгеновского излучения наносекундной длительности. В камерах ПФ при передаче энергии от генератора импульсных токов (как правило, на основе емкостного накопителя) в газовом разряде формируется токовоплазменная оболочка. Она ускоряется вдоль поверхности электродов и сжимается на оси камеры в нецилиндрический z-пинч. Процессы при формировании и сжатии газового пинча (состоящего из дейтерия либо смеси дейтерия с тритием) очень сложны и до сих пор являются предметом изучения. Установлено, что камеры ПФ являются источниками импульсных излучений разных типов – ультрафиолета и света видимого спектра, мягкого и жесткого рентгеновского излучения, нейтронов и гамма-излучения (вплоть до нескольких МэВ при генерации нейтронов 14 МэВ [1]), электронных и ионных пучков, кумулятивных плазменных струй вдоль оси камеры ПФ [2]. Относительная простота электрической схемы емкостного накопителя, большой набор излучений разных типов, сделали плазмофокусные

установки распространенными плазменными устройствами. Они представляют интерес в различных научных исследованиях и в целях обучения студентов в университетах.

За счет возможности генерации нейтронов в широком диапазоне выхода $\sim 10^4$ – 10^{13} нейтр./имп. [3–5], основное применение камеры ПФ нашли в составе генераторов импульсного нейтронного излучения [6]. Основные характеристики нейтронного излучения камер ПФ известны – диапазон выхода, длительность импульса, анизотропия нейтронного излучения [7], область генерации нейтронов [8, 9], связь выхода нейтронов с амплитудой разрядного тока (так называемая скейлинговая зависимость [10]). В литературе проводятся обсуждения механизмов генерации нейтронов (термоядерный [11], пучково-мишенный [12]), стадий развития нецилиндрического z-пинча (например, влияние обратного скин-эффекта [13], приосевой плазмы пинча [14]), развиваются математические модели ускорения и сжатия плазмы в камерах ПФ [15, 16]. Однако многие вопросы, связанные с генерацией нейтронного излучения в настоящее время доступны к изучению в основном экспериментальными методами. Экс-

периментальное наблюдение импульсов рентгеновского и нейтронного излучений камеры ПФ позволяет косвенно получать информацию о процессах, происходящих в плазменном фокусе на этапах сжатия и распада пинча, сопровождающихся генерацией проникающих излучений, и могут помочь в продвижении понимания процессов, протекающих в камерах ПФ.

Применение аппаратуры с высоким временным разрешением позволяет детализировать процессы, происходящие в пинче с соответствующей временной точностью. Для регистрации импульсов нейтронного и рентгеновского излучения в наших экспериментах был использован сцинтилляционный детектор ССДИ [17] с временным разрешением не более 2 нс. Достаточно часто выстрелы сопровождаются несколькими импульсами нейтронов и/или ЖРИ. Появление одного или нескольких импульсов нейтронов и ЖРИ, по сути, является неконтролируемым процессом. Поэтому целью данной работы является экспериментальное изучение вариации числа наблюдающихся импульсов нейтронов и ЖРИ в отдельных выстрелах камер ПФ и анализ структуры импульсов нейтронов.

2. ИМПУЛЬСЫ ЖРИ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В первой серии опытов был использован генератор нейтронов ИНГ-103 [6] с камерой плазменного фокуса типа ПФ7. В данных экспериментах генератор ИНГ-103 рассматривался в качестве источника импульсного ЖРИ. Анализ результатов срабатываний приведен с точки зрения сравнения числа импульсов ЖРИ (детальное сравнение по числу импульсов нейтронов будет приведено в дальнейшем). Генератор обеспечивает выход нейтронов с энергией 2.5 МэВ порядка 10^8 нейтр./имп. при амплитуде разрядного тока порядка 300 кА. Толщина внешнего электрода камеры ПФ (медный катод) составляет 2.5 мм. Поэтому энергия ЖРИ после поглощения медью низкоэнергетичных квантов лежит в диапазоне от 30 кэВ до нескольких сотен кэВ [18]. При этом в данном диапазоне разрядных токов длительность импульса ЖРИ (на половине амплитуды) составляет 2–5 нс [18], а длительность импульса нейтронов 10–15 нс [14]. Временное разрешение сцинтилляционного детектора позволяет достаточно точно отследить форму импульсов излучения. ССДИ располагался на расстоянии 150 см от центра камеры ПФ7 в направлении, перпендикулярном оси камеры. В качестве рабочего газа использовался дейтерий при давлении 10 Торр (амплитуда импульсов ЖРИ и нейтронов сравнима в пределах развертки осциллографа).

На рис. 1 приведены характерные осциллограммы сигналов, зарегистрированные от детек-

тора ССДИ в экспериментах на генераторе ИНГ-103 с камерой ПФ7. По рис. 1 видно, что наряду с включениями с генерацией одного импульса ЖРИ и одного импульса нейтронов (рис. 1б), наблюдались включения с двумя импульсами ЖРИ и соответствующими им двумя импульсами нейтронов (рис. 1в). Также наблюдались выстрелы, при которых импульс ЖРИ отсутствовал, хотя импульс нейтронного излучения наблюдался (рис. 1а). Анализ числа событий с появлением разного числа импульсов ЖРИ показал, что для генератора ИНГ-103 примерно в 60% от всех включений реализуется режим с одним импульсом нейтронов и одним импульсом ЖРИ. В 24% случаев импульс ЖРИ отсутствовал, несмотря на наличие, явно выраженной особенности на кривой тока и импульса нейтронов. Под особенностью понимается характерный спад на кривой разрядного тока после сжатия токооплазменной оболочки в пинч. В 16% случаев наблюдалось два импульса ЖРИ. Всего на камере ПФ7 в этом режиме было сделано 60 включений. Необходимо отметить, что рис. 1 показывает характерные случаи наблюдения импульсов ЖРИ. Однако совместно с нейтронным импульсом вариаций может быть еще больше, например, наличие двух импульсов ЖРИ и только одного явно выраженного импульса нейтронов, или же достаточно редкий, но, тем не менее, наблюдавшийся экспериментально режим с двумя импульсами нейтронов и полным отсутствием импульса ЖРИ на сигнале ССДИ в пределах чувствительности осциллографа.

Также в ходе изучения характеристик ЖРИ на генераторе ИНГ-103 с камерой ПФ7 подтвержден экспериментальный факт [14], что среднее время между максимумом первого наблюдаемого импульса ЖРИ $t_{\gamma 1}$ и особенностью на кривой разрядного тока t_{oc} близко к нулю с точностью до двух наносекунд (с учетом задержки сигналов в токопередающих кабелях и фотоумножителе ССДИ (23.2 нс)). На рис. 2 приведены характерные осциллограммы кривых разрядного тока и производной разрядного тока генератора ИНГ-103, и сигнал с детектора ССДИ с импульсами ЖРИ и нейтронного излучения.

Импульс ЖРИ камер ПФ возникает при торможении анодом [18] электронного пучка, сформированного электрическим полем, возникающим в плазме пинча при его разрушении. Наличие двух импульсов ЖРИ свидетельствует о формировании двух электронных пучков. Причем время между максимумами импульсов ЖРИ составляет 5–10 нс. В случае формирования двух ионных пучков (в результате действия электрического поля плазмы пинча на ионы), совместно с электронными, в рамках пучково-мишенного механизма генерации нейтронов [12] должны фор-

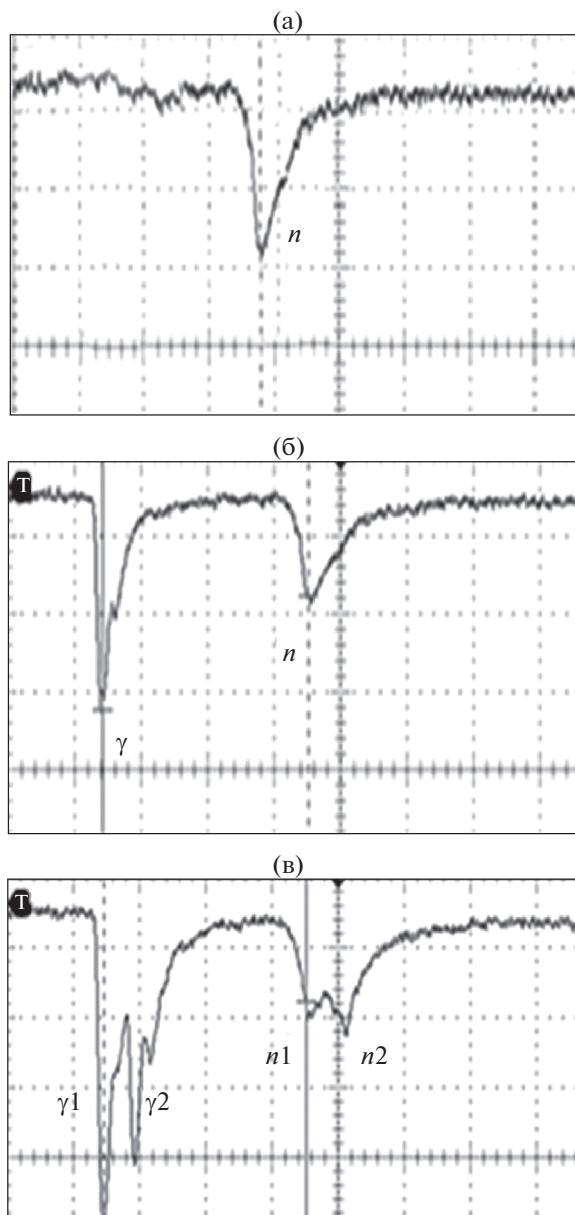


Рис. 1. Формы импульсов ЖРИ (γ) и нейтронов (n) при работе с камерой ПФ7 на генераторе ИНГ-103.

мироваться два импульса нейтронного излучения, что наблюдается в отдельных включениях (рис. 1в). Однако наличие режима генерации нейтронов без импульсов ЖРИ, говорит о том, что электронные пучки с достаточными токами не сформировались, а генерация нейтронов тем не менее присутствует. Это может свидетельствовать о возможности генерации нейтронов и вследствие других механизмов [11]. В целом механизм генерации нейтронов в камерах ПФ не так однозначен, как механизм генерации тормозного ЖРИ. Поэтому экспериментальное изучение вре-

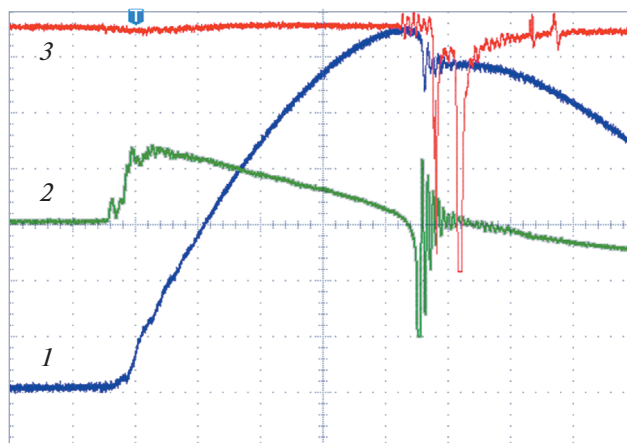


Рис. 2. Характерные осциллограммы кривых разрядного тока I и производной разрядного тока 2 генератора ИНГ-103, и сигнал с детектора ССДИ с импульсами ЖРИ и нейтронного излучения 3 (200 нс/дел.).

менной структуры импульсов проникающего излучения (нейтронов и ЖРИ) установок с камерами ПФ может обеспечить продвижение в понимании процессов, протекающих в нецилиндрическом z -пинче.

3. ИЗУЧЕНИЕ ЧАСТОТЫ ПОЯВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ НЕЙТРОНОВ И ЖРИ

Детальное экспериментальное изучение формы импульсов нейтронов и ЖРИ-камер ПФ проведено на установке ИНГ-104 с амплитудой тока от 500 до 700 кА и сферической [19] камерой типа ПФ9. Наполнение камер ПФ9 осуществлялось как дейтерием, так и дейтерий-тритиевой (D–T) смесью, находящейся в газогенераторе камеры [20]. Авторы посчитали, что экспериментальных данных с D–T-смесью и 14 МэВ-ными нейтронами, генерируемыми камерами ПФ, в литературе описано немного, ввиду сложностей работы с тритием. Поэтому изучение формы импульсов 14 МэВ-ных нейтронов может представлять самостоятельный интерес. Генератор ИНГ-104 с камерой с D–T-наполнением обеспечивает средний выход нейтронов $(0.5–1.0) \times 10^{11}$ нейтр./имп. при длительности импульса 20–40 нс. Как показывает наш опыт, средняя длительность импульсов нейтронов на камере одного типа при D–D- и D–T-наполнениях практически одинакова.

На рисунке 3 приведена схема экспериментов, включающая внешний вид генератора ИНГ-104 и камеры ПФ9. Использовано два сцинтилляционных детектора ССДИ, расположенных на расстоянии 470 см от центра камеры ПФ, перпендикулярно оси камеры. Один из детекторов закрыт свинцом, толщиной 10 мм, для возможности ре-

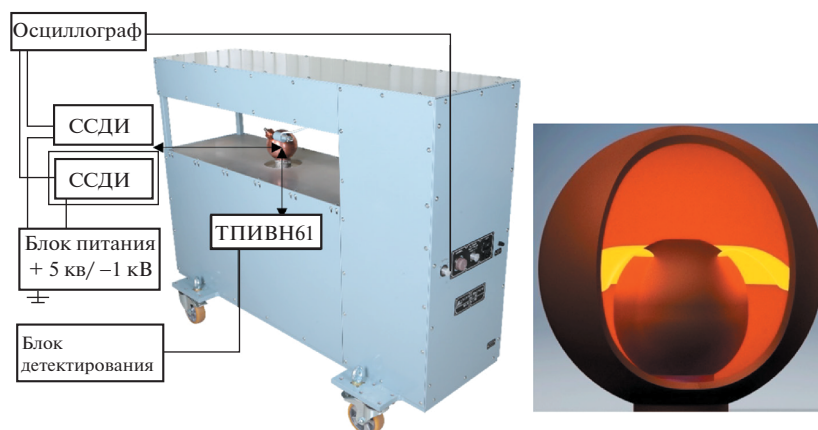


Рис. 3. Схема экспериментов, включающая внешний вид генератора ИНГ-104 и камеры ПФ9 сферической геометрии с моделью движения токовоплазменной оболочки вдоль электродов камеры.

гистрации импульса нейтронов в случае большого импульса ЖРИ, приводящему к насыщению другого сцинтилляционного детектора. На цифровом осциллографе регистрировались сигналы от ССДИ через 30-метровые кабели типа РК75 и сигнал производной разрядного тока от ИНГ-104 (дифференцирующим поясом Роговского). Для регистрации абсолютного выхода нейтронов использован прибор измерения выхода нейтронов ТПИВН61 [15] на основе активационного метода с серебряной фольгой. ТПИВН61 располагался на расстоянии 71 см от оси камеры ПФ. Регистрировать выход нейтронов возможно и с помощью сцинтилляционных детекторов, однако преимуществами ТПИВН61 является точность измерения $\pm 20\%$ и наличие защиты от рассеянного излучения. Коэффициент преобразования числа импульсов в нейтроны определяется с учетом калибровки ТПИВН61 в конкретной геометрии генератора с учетом рассеяния на конструктивных элементах.

На генераторе ИНГ-104 осуществлено порядка ста включений камеры ПФ9 с D–T-наполнением в одной серии экспериментов – $U = 18$ кВ, $\langle t_{oc18} \rangle = (1.82 \pm 0.01)$ мкс, $I_{max} = (560 \pm 30)$ кА. В данной серии наблюдались различные вариации числа импульсов нейтронов и импульсов ЖРИ при одном включении. Обобщение результатов приведено на рис. 4 и 5, на которых показано количество импульсов нейтронов и ЖРИ в относительных единицах и средний выход нейтронов для каждого режима соответственно. На рис. 4 и далее под режимом подразумевается число наблюдавшихся в эксперименте импульсов нейтронного и рентгеновского излучения. Например, режим $n2-\gamma1$ означает, что наблюдались срабатывания с двумя отдельными импульсами нейтронного излучения и одним импульсом ЖРИ. Максимальное число импульсов нейтро-

нов за одно включение составило три отдельных импульса. Появление трех импульсов наблюдалось достаточно часто – суммарно 18% выстрелов. Но только в одном импульсе из всей серии экспериментов наблюдалось три импульса ЖРИ. При этом включении число импульсов нейтронов равнялось двум – режим $n2-\gamma3$. Из рис. 4 видно, что наиболее частым (29% включений) являлся режим $n2-\gamma1$ (с двумя импульсами нейтронов и одним импульсом ЖРИ) $\langle Y_{n2-\gamma1} \rangle = (0.55 \pm 0.12) \times 10^{11}$ нейтр./имп. Пример сигнала с ССДИ при таком включении показан на рис. 6). Однако данный режим не обеспечивает максимальный выход нейтронов при данном зарядном напряжении. “Классический” режим $n1-\gamma1$ появлялся также достаточно часто (17% включений). Средний выход нейтронов при этом $\langle Y_{n1-\gamma1} \rangle = (0.7 \pm 0.15) \times 10^{11}$ нейтр./имп. был даже немного больше выхода предыдущего описанного режима $n2-\gamma1$. Наиболее эффективным режимом для получения максимального среднего выхода оказался режим $n2-\gamma2$ (18% выстрелов). В этом режиме $n2-\gamma2$ при $U = 18$ кВ средний выход составил $\langle Y_{n2-\gamma2} \rangle = (0.8 \pm 0.2) \times 10^{11}$ нейтр./имп. Наблюдались режимы $n1-\gamma0$ и $n2-\gamma3$ (правда при малой статистике, единичные срабатывания), при которых выход нейтронов был $\langle Y_{n1-\gamma0, n2-\gamma3} \rangle = (1.1 \pm 0.2) \times 10^{11}$ нейтр./имп., см. рис. 5. В этих режимах наблюдалось всего по одному импульсу (суммарно по двум режимам $\sim 2\%$ выстрелов).

Аналогичные серии выстрелов проведены на камере ПФ9 (D–T) при зарядных напряжениях 20 кВ (620 кА) и 22 кВ (680 кА). При напряжении 18 кВ средний выход нейтронов по всем режимам составил $\langle Y_{18} \rangle = (0.67 \pm 0.05) \times 10^{11}$ нейтр./имп. При увеличении зарядного напряжения до 20 и 22 кВ средний выход нейтронов увеличился до значений $\langle Y_{20} \rangle = (0.73 \pm 0.07) \times 10^{11}$ нейтр./имп. и

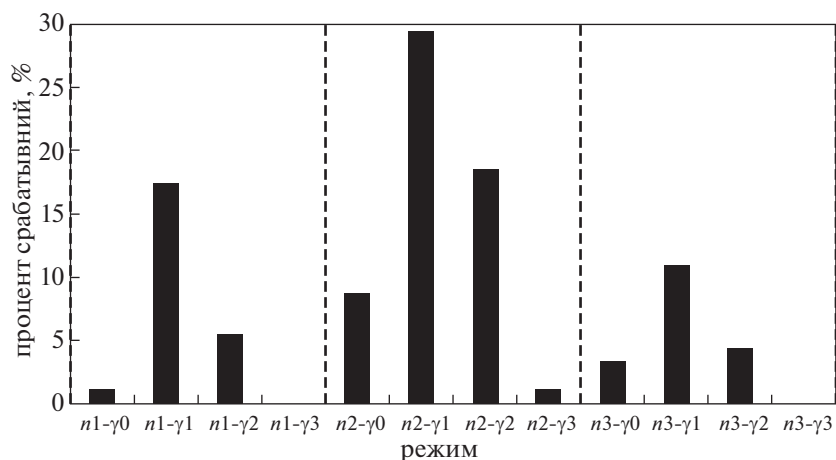


Рис. 4. Процент срабатываний для разных режимов работы камеры ПФ9 (D–T) при $U = 18$ кВ.

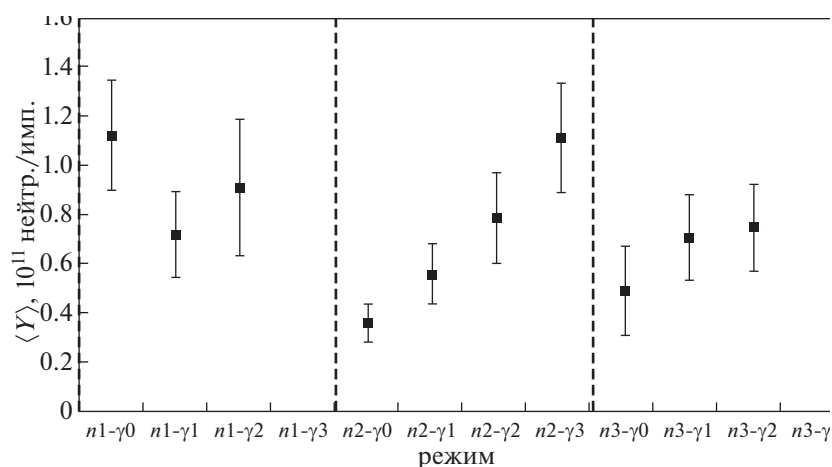


Рис. 5. Средний выход нейтронов для разных режимов работы камеры ПФ9 (D–T) при $U = 18$ кВ.

$\langle Y_{22} \rangle = (0.87 \pm 0.09) \times 10^{11}$ нейтр./имп. соответственно. Среднее время особенности ожидаемо снизилось с $\langle t_{oc18} \rangle = (1.82 \pm 0.01)$ мкс до $\langle t_{oc20} \rangle = (1.62 \pm 0.01)$ мкс и $\langle t_{oc22} \rangle = (1.53 \pm 0.02)$ мкс. При этом частота появления двойных и тройных импульсов как нейтронов, так и ЖРИ, увеличилась. Процент срабатываний для разных режимов работы камеры ПФ9 для напряжения 20 и 22 кВ приведен на рис. 7, а средний выход для 20 и 22 кВ на рис. 8.

При напряжении 20 кВ только в шести процентах срабатываний наблюдался один импульс нейтронов. Доля двойных импульсов нейтронов составила 44%, а тройных импульсов нейтронов – 50%. Режим с наибольшим средним выходом – это два импульса нейтронов и два импульса ЖРИ $n2-\gamma2$, $\langle Y_{n2-\gamma2} \rangle = (1.3 \pm 0.3) \times 10^{11}$ нейтр./имп. при

20 кВ. При дальнейшем повышении напряжения до 22 кВ (амплитуда тока 680 кА) средний выход нейтронов вносили именно срабатывания с тремя импульсами нейтронов. В течение серии экспериментов при 22 кВ срабатывания с одним импульсом нейтронов не наблюдались, число срабатываний с двумя импульсами нейтронов составило 27%, а с тремя – 73%. Т.е. основной вклад в интегральный выход нейтронов серии внесли срабатывания с тремя нейтронными импульсами. Три импульса нейтронов сопровождалось одним (27%), двумя (37%) и тремя (27%) импульсами ЖРИ, в 9% случаев ЖРИ отсутствовало.

Поскольку распространенным применением установок с камерами ПФ являются генераторы импульсного нейтронного излучения, то практический интерес представляет изучение зависимо-

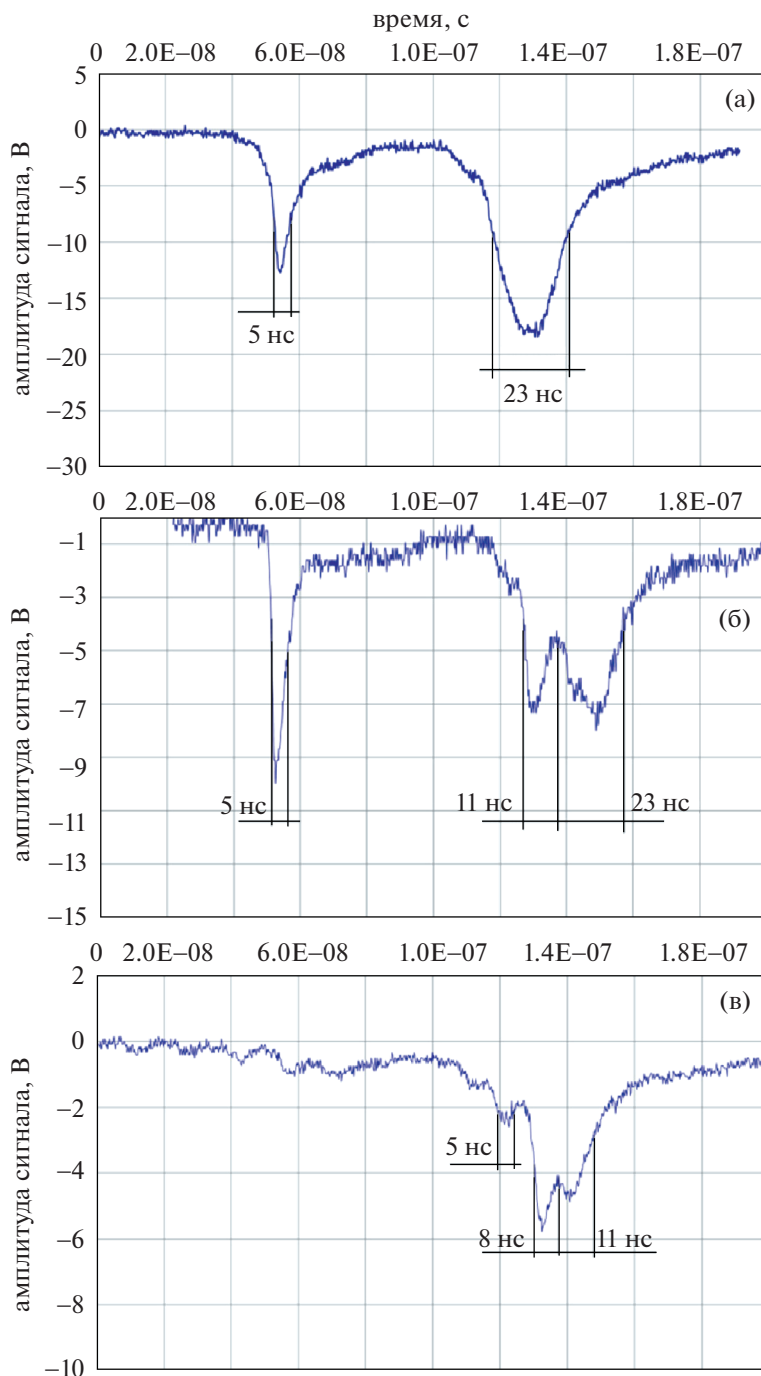


Рис. 6. Характерные осциллограммы сигналов детектора ССДИ при работе камеры ПФ9 (D–Т) при $U = 18$ кВ. а) режим $n1-\gamma1$, б) режим $n2-\gamma1$, в) режим $n3-\gamma0$.

сти выхода нейтронов именно от числа импульсов нейтронов, безотносительно числа импульсов ЖРИ. Зависимости среднего выхода нейтронов от числа импульсов нейтронного излучения усредненная по всем включениям камеры ПФ9 при разных зарядных напряжениях 18, 20, 22 кВ приведены на рис. 9 (проведено усреднение выхода по

включениям с фиксированным количеством импульсов нейтронов $n1, n2, n3$, но разным количеством импульсов ЖРИ). Наибольший средний выход нейтронов $(1.0 \pm 0.1) \times 10^{11}$ нейтр./имп. обеспечивается при зарядном напряжении 22 кВ и наличии одновременно трех импульсов нейтронов в одном срабатывании камеры ПФ9.

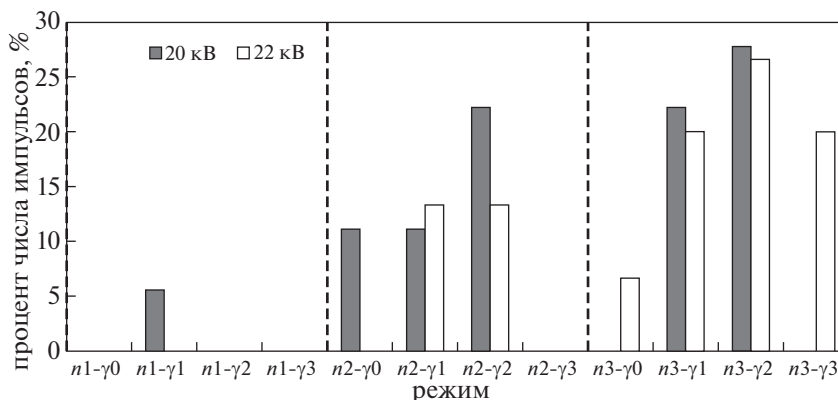


Рис. 7. Процент срабатываний для разных режимов камеры ПФ9 (DT) при напряжениях 20 и 22 кВ.

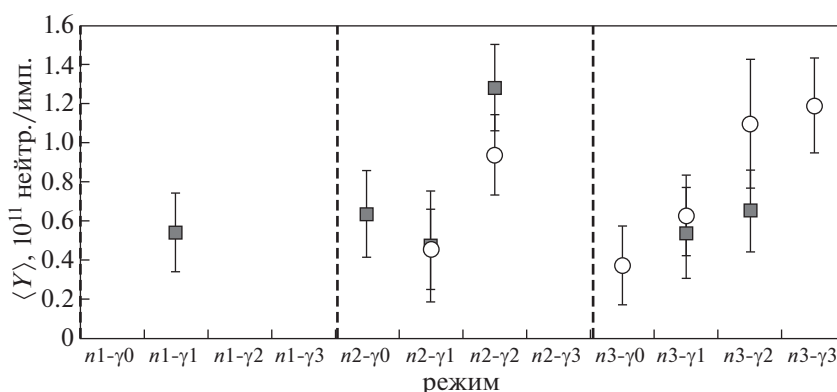


Рис. 8. Средний выход нейтронов для разных режимов работы камеры ПФ9 (DT) при напряжениях 20 и 22 кВ.

Аналогичные эксперименты были проведены и при дейтериевом наполнении камеры ПФ9. Также как и при D–T-наполнении камеры наблюдались импульсы нейтронов с одним, двумя и тремя импульсами с таким же характерным временем между импульсами. На рис. 10 представле-

на характерная осциллограмма с детектора ССДИ при срабатывании камеры ПФ9 при D₂-наполнении с тройным импульсом нейтронов.

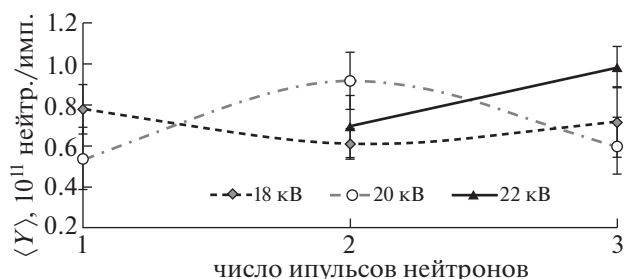


Рис. 9. Зависимость среднего выхода от числа импульсов нейтронов камеры ПФ9 (DT) для обобщенных режимов: $n1-\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$, $n2-\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$, $n3-\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ для зарядных напряжений 18, 20 и 22 кВ.

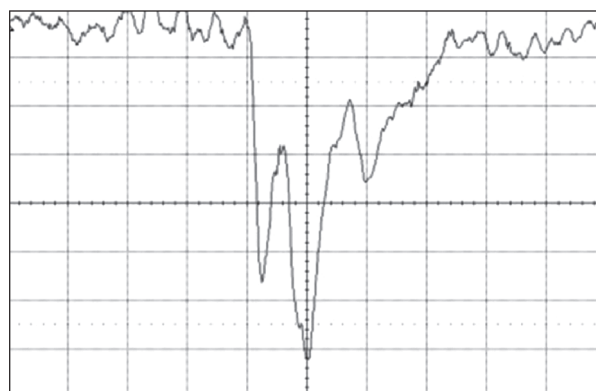


Рис. 10. Осциллограмма с детектора ССДИ при срабатывании камеры ПФ9 при D₂ наполнении с тройным импульсом нейтронов (10 В/дел., 10 нс/дел.).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье показано, что при работе камер ПФ в составе установок с амплитудой разрядного тока 300 и 600 кА наблюдаются одновременно от одного до трех импульсов ЖРИ и независимо до трех импульсов нейтронного излучения. Момент появления первого импульса ЖРИ совпадает с временем момента особенности на кривой разрядного тока с точностью до 2 нс. Анализ частоты появления импульсов нейтронов и ЖРИ на сферической камере типа ПФ9 с D–T-наполнением (нейтроны 14 МэВ) при работе в составе генератора ИНГ-104 показал, что в большей части срабатываний камеры наблюдаются двойные или тройные импульсы нейтронного излучения. При этом с увеличением зарядного напряжения с 18 кВ до 22 кВ частота появления тройных импульсов увеличивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дулатов А.К., Крапива П.С., Лемешко Б.Д., Михайлов Ю.В., Москаленко И.Н., Прокуратов И.А., Селифанов А.Н. // *Физика плазмы*. 2016. Т. 42. № 1. С. 43–49. <https://doi.org/10.7868/S0367292116010054>
2. Ананьев С.С., Велихов Е.П., Даныко С.А., Жужунашвили А.И., Калинин Ю.Г., Крауз В.И., Мятон В.В. // *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*. 2016. Т. 39. Вып. 2. С. 58–68. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2016-39-2-58-68>
3. 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. V. 17. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/17/4/045020>
4. Babazadeh A.R., Roshan M.V., Habibi H., Nasiry A., Memarzadeh M., Banoushi A., Lamahi M., Sadat Kiai S.M. // *Braz. J. Phys.* 2002. V. 32. № 1. P. 89. <https://doi.org/10.1590/S0103-97332002000100017>
5. Завьялов Н.В., Маслов В.В., Румянцев В.Г., Дроздов И.Ю., Ершов Д.А., Коркин Д.С., Молодцев Д.А., Смердов В.И., Фалин А.П., Юхимчук А.А. // *Физика плазмы*. 2013. Т. 39. С. 368. <https://doi.org/10.7868/S0367292112120074>
6. Yurkov D.I., Dulatov A.K., Lemeshko B.D., Golikov A.V., Andreev D.A., Mikhailov Yu.V., Prokuratov I.A., Selifanov A.N. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. V. 653. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/653/1/012019>
7. Moreno J., Veloso F., Pavez C., Tarifeco-Saldivia A., Klir D., Soto L. // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2015. V. 57. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/57/3/035008>
8. Kubes P., Paduch M., Chikhardt J., Cikhartova B., Klir D., Kravarik J., Rezac K., Zielinska E., Sadowski M.J., Szymaszek A., Tomaszewski K., Zaloga D. // *Physics of Plasmas*. 2017. V. 24. № 9. <https://doi.org/10.1063/1.4994097>
9. Трусилло С.С., Грузовский Б.Я., Макеев Н.Г., Цукерман В.А. в сб. “Физика и техника импульсных источников ионизирующих излучений для исследования быстропротекающих процессов” под ред. Н.Г. Макеева, Саров, 1996. С. 292–296 // *Письма в ЖЭТФ*. Т. 33. В. 3. 1981.
10. Лемешко Б.Д., Михайлов Ю.В., Прокуратов И.А. // *Физика плазмы*. 2019. Т. 45. № 4. С. 323–334. <https://doi.org/10.1134/S036729213503007X>
11. Appelbe V., Chittenden J. // *AIP Conf. Proc.* 2014. V. 1639. № 9. <https://doi.org/10.1063/1.4904765>
12. Кирьянов Г.И. *Генераторы быстрых нейтронов*. М.: Энергоатомиздат, 1990.
13. Усенко П.Л., Гаганов В.В. // *Физика плазмы*. 2016. Т. 42. № 8. С. 754–767. <https://doi.org/10.7868/S0367292116080102>
14. Дулатов А.К., Лемешко Б.Д., Михайлов Ю.В., Прокуратов И.А., Селифанов А.Н. // *Физика плазмы*. 2014. Т. 40. № 11. С. 1016–1024. <https://doi.org/10.7868/S0367292114100035>
15. *Энциклопедия низкотемпературной плазмы*. Сер. Б. Т. IX_3. Радиационная плазмодинамика / Отв. ред. В.А. Грибков. М.: Янус_К, 2007.
16. Гаранин С.Ф., Долинский В.Ю., Макеев Н.Г., Мамышев В.И., Маслов В.В. // *Физика плазмы*. 2020. Т. 46. № 10. С. 890–903. <https://doi.org/10.31857/S0367292120100030>
17. http://внииа.рф/about/about_research_facilities.php (официальный сайт ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова).
18. Дулатов А.К., Лемешко Б.Д., Михайлов Ю.В., Прокуратов И.А., Селифанов А.Н. // *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*. 2016. Т. 39. № 3. С. 66–72. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2016-39-3-66-72>
19. Макеев Н.Г., Румянцев В.Г., Черемухин Г.Н. *Физика и техника импульсных источников ионизирующих излучений для исследования быстропротекающих процессов* / Под ред. Макеева Н.Г. Саров: РФЯЦ ВНИИЭФ, 1996. С. 281.
20. Lemeshko B.D., Dulatov A.K., Mikhailov Yu.V., Prokuratov I.A., Selifanov A.N., Fatiev T.S., Andreev V.G. // *Matter and Radiation at Extremes*. 2017. V. 2. № 6. P. 301. <https://doi.org/10.1016/j.mre.2017.08.001>