

УДК 533.952 + 533.9.082.79

# Источник с выходом $10^{13}$ ДТ-нейтронов на основе сферической камеры с плазменным фокусом

Н. В. Завьялов, В. В. Маслов,  
В. Г. Румянцев, И. Ю. Дроздов,  
Д. А. Ершов, Д. С. Коркин,  
Д. А. Молодцев, В. И. Смердов,  
А. П. Фалин, А. А. Юхимчук

*Представлены результаты предварительных экспериментальных исследований нейтронного излучения, генерируемого сферической камерой с плазменным фокусом, заполненной равнокомпонентной смесью дейтерия и трития. При максимальной амплитуде тока в газоразрядной камере  $\sim 1,5$  МА зарегистрированы импульсы нейтронного излучения длительностью на полувысоте 75–80 нс и интегральным выходом  $\sim 1,3 \cdot 10^{13}$  ДТ-нейтронов.*

## Введение

Исследования физических явлений и процессов генерации нейтронного и рентгеновского излучений в сферических газоразрядных камерах с плазменным фокусом (ПФ) ведутся в РФЯЦ-ВНИИЭФ с начала 1960-х гг. [1, 2]. С одной стороны, эти работы направлены на решение фундаментальных физических задач, с другой они открывают перспективы применения интенсивных источников нейтронного и рентгеновского излучений в научных исследованиях, промышленности и прикладных направлениях.

В настоящее время во ВНИИЭФ созданы два типа экспериментальных установок на основе сферических камер с ПФ, в которых применяются генераторы импульсов тока (ГИТ) с ёмкостным или индуктивным накопителем энергии. Установки охватывают широкий диапазон начальных энергий в накопителях, от  $10^{-1}$  до  $10^3$  кДж, и обеспечивают протекание в газоразрядных камерах токов от  $\sim 100$  кА до  $\sim 2$  МА. В этих условиях сферические камеры генерируют импульсы нейтронного излучения длительностью  $\sim 10$ – $100$  нс с интегральным выходом от  $7 \cdot 10^5$  до  $3 \cdot 10^{11}$  нейтронов с энергией 2,45 МэВ. В экспериментах при запитке камер, заполненных равнокомпонентной смесью дейтерия с тритием, от взрывамагнитного генератора зарегистрирован максимальный выход  $4 \cdot 10^{12}$  ДТ-нейтронов при разрядном токе  $\sim 1,5$  МА [2].

При относительно простой конструкции импульсные нейтронные источники на базе сферических камер с ПФ обладают рядом достоинств по сравнению с другими типами генераторов нейтронного излучения. Они имеют небольшие размеры излучающей области (порядка нескольких миллиметров) и малую длительность импульса, большую плотность потока (до  $10^{18}$  нейтро-

нов/см<sup>2</sup>·с) и высокую монохроматичность ( $\Delta E/E \sim 10\%$ ). Такие импульсные нейтронные источники применяются для контроля подкритичности реакторных сборок, формирования дефектов в полупроводниках и калибровки детекторов проникающих излучений, в исследованиях в области нейтронной радиографии, для активационного анализа элементного состава веществ и обнаружения делющихся материалов и взрывчатых веществ.

### *Экспериментальная установка*

За последние три года во ВНИИЭФ была создана конденсаторная передвижная установка КПУ-200. Установка представляет собой ГИТ, в котором происходит накопление электрической энергии, формирование импульса тока и передача его в плазменную нейтронную камеру (ПНК). Составные части КПУ-200, кроме пульта управления, расположены в транспортируемом фургоне. Управление установкой осуществляется с удаленного на расстояние до 100 м пульта на основе персонального компьютера. Запуск установки осуществляется от пульта управления или внешнего устройства.

В состав ГИТ входит конденсаторная батарея из 36 модулей, каждый из которых состоит из двух параллельно соединенных конденсаторов КПИМ-50-6 (50 кВ, 6 мкФ), газонаполненного разрядника и устройств для подключения высоковольтных малоиндуктивных кабелей. Общая емкость батареи составляет 432 мкФ, а запас начальной энергии при напряжении 30 кВ равен 195 кДж (максимальный запас энергии  $\sim 0,54$  МДж при напряжении 50 кВ). Разрядники модулей ГИТ запускаются от блока, который одновременно формирует 36 импульсов напряжения положительной полярности амплитудой до 30 кВ, длительностью не менее 0,5 мкс и длительностью фронта 60 нс. Конденсаторы модулей ГИТ при пуске разрядников разряжаются на коллектор с газоразрядной камерой ПФ по кабельной линии, состоящей из 72 высоковольтных малоиндуктивных кабелей типа ФКП длиной  $\sim 5,0$ – $6,5$  м.

В экспериментах использовалась разработанная во ВНИИЭФ плазменная нейтронная камера ПНК-13. Электроды камеры имели сферическую геометрию. Стальной катод диаметром 290 мм представлял собой герметичный корпус камеры. Внутри корпуса был помещен изготовленный из бескислородной меди анод диаметром 160 мм, который соединялся с цилиндрическим анодным вводом. Для уменьшения поступления паров меди в область сжатия плазмы разрядным током в полюсе анода было сделано отверстие. Анод с вводом электрически изолировались от катода составным изолятором из полиэтилена и керамики. Во внутреннем объеме камеры полиэтилен экранировался керамикой ВК94-1, стойкой к воздействию высокотемпературной плазмы. Снаружи камеры электроды изолировались полиэтиленом с развитой поверхностью для увеличения электрической прочности конструкции. Камера ПНК-13 имела общую длину 420 мм.

При сборке ПНК-13 уделялось внимание соблюдению условий вакуумной гигиены для уменьшения загрязнения плазмы примесями. После сборки камера проверялась на герметичность с помощью гелиевого течеискателя. Суммарное выделение газа элементами конструкции камеры определялось манометрическим методом. Затем проводилась серия тренировочных электрических разрядов, которые обеспечивали достаточную очистку электродной системы. В дальнейшем при проведении экспериментов камера с ПФ предварительно откачивалась с помощью поста специальной конструкции до остаточного давления воздуха ( $10^{-1}$ – $10^{-2}$  Па) и затем наполнялась дейтерием или равнокомпонентной смесью дейтерия с тритием до рабочего давления  $(1$ – $3) \cdot 10^3$  Па. Пост состоял из системы вакуумной откачки и газового наполнения, блока управления и контроля и пульта управления на основе персонального компьютера. Процедуры по откачке, наполнению и поглощению газа из ПНК выполнялись дистанционно.

Опыты проводились на поле экспериментальной площадки ВНИИЭФ. Во время проведения экспериментов измерялась производная разрядного тока в ПНК-13 с помощью дифференцирующего пояса Роговского, установленного в заземленном корпусе на выходе из камеры. Регистрация сигналов осуществлялась на цифровом осциллографе фирмы «Tektronix». Зависимость разрядного тока от времени определялась численным интегрированием его производной.

Выход и распределение нейтронов плазменного источника по энергии определялись в экспериментах с применением активационных детекторов. Использовался набор детекторов из алюминия, меди, молибдена, индия, тефлона и цинка, которые размещались внутри кадмиевого чехла вблизи поверхности камеры ПНК-13 (рис. 1, 2). Детекторы имели форму дисков диаметром 20 мм и толщиной 1 мм. Характеристики рабочих реакций и их продуктов приведены в табл. 1.

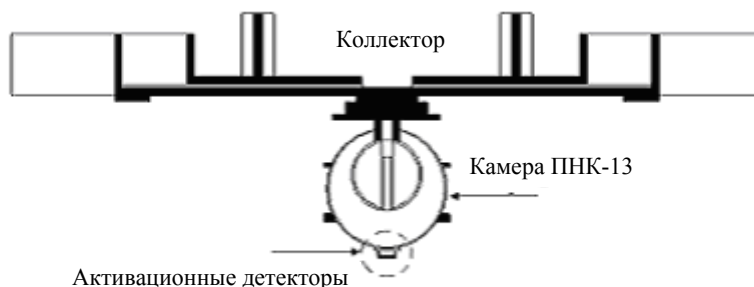


Рис. 1. Расчетная модель кабельного коллектора установки с камерой ПНК-13

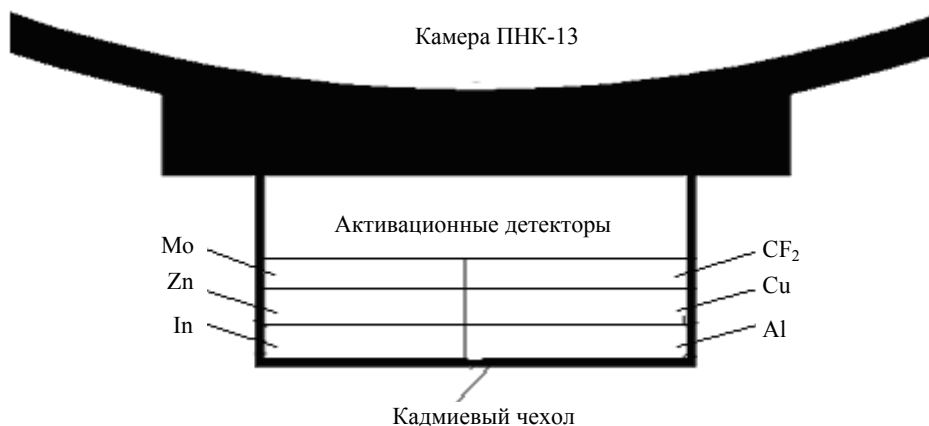


Рис. 2. Расположение активационных детекторов относительно камеры ПНК-13

Регистрация наведенной активности в активационных детекторах осуществлялась с помощью сцинтилляционного детектора с кристаллом NaI(Tl) диаметром 76,2 мм и высотой 76,2 мм. В качестве анализатора импульсов использовался UniSpec производства «Санберга». Предварительно проводилась градуировка регистрирующей аппаратуры по чувствительности к гамма-излучению. Процедура обработки результатов измерений приведена в [3].

Измерение интегрального нейтронного выхода проводилось также методом наведенной радиоактивности с помощью блока газового счетчика, принцип действия которого основан на регистрации  $\beta$ -излучения, возникающего при захвате замедленных в парафине нейтронов изотопами серебра. Блок устанавливался на расстоянии 9,2 м от источника нейтронов под углом  $\sim 20^\circ$  к оси камеры ПНК-13 на высоте  $\sim 1,5$  м от земли.

Таблица 1

Характеристики использованных в экспериментах реакций и их продуктов

| Реакция   | Порог реакции (эффективный порог), МэВ | Период полураспада продукта реакции | Энергия гамма-излучения, кэВ | Квантовый выход, % |
|---|--|-------------------------------------|------------------------------|--------------------|
| $^{63}\text{Cu}(n, 2n)^{62}\text{Cu}$           | 11,03<br>(13,5)                        | 9,76 мин                            | 511                          | 200                |
| $^{64}\text{Zn}(n, 2n)^{63}\text{Zn}$           | 12,05<br>(13,5)                        | 38,3 мин                            | 511                          | 185,5              |
| $^{19}\text{F}(n, 2n)^{18}\text{F}$             | 10,99<br>(13,5)                        | 1,83 ч                              | 511                          | 193,5              |
| $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$       | 3,25<br>(12,0)                         | 14,96 ч                             | 1368,6                       | 100                |
| $^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$ | 0,339<br>(1,0)                         | 4,48 ч                              | 336,4                        | 45,9               |
| $^{92}\text{Mo}(n, 2n)^{91}\text{Mo}$           | 12,83<br>(13,5)                        | 15,49 мин                           | 511                          | 190                |
| $^{100}\text{Mo}(n, 2n)^{99}\text{Mo}$          | 8,37<br>(13,0)                         | 2,79 сут                            | 140,5                        | 92                 |
| $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$            | 1,90<br>(6,8)                          | 9,46 мин                            | 843,8                        | 71,8               |
| $^{64}\text{Zn}(n, p)^{64}\text{Cu}$            | 1,00<br>(3,4)                          | 12,7 ч                              | 511                          | 36,8               |

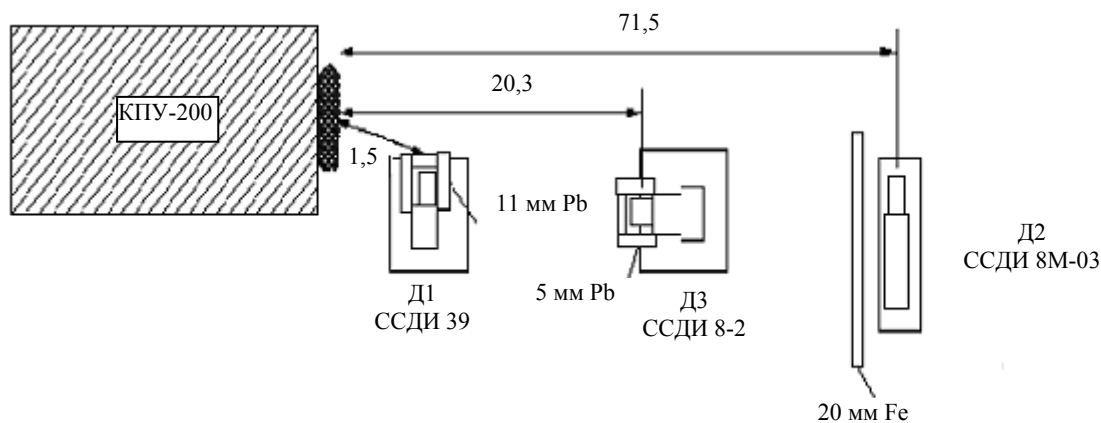


Рис. 3. Геометрия измерений ДТ-нейтронов сцинтиляционными детекторами (расстояния от камеры ПНК-13 до детекторов даны в метрах)

Для измерений флюенсов, длительности импульсов и выхода нейтронного излучения применялся аппаратный комплекс со сцинтиляционными детекторами типа ССДИ [4]. На рис. 3 схематично показана геометрия измерений в экспериментах с ДТ-нейтронами. Чувствительность детекторов к гамма-излучению источника из радионуклида  $^{60}\text{Co}$  определялась с погрешностью 10 %. Сигналы с детекторов по кабелям РК75-9-13 длиной  $\sim 100$  м подавались через многоканальный блок защиты на цифровые осциллографы фирмы «Tektronix». Блок защиты ограничивал выходные сигналы по амплитуде на уровне 200 В.

### Результаты экспериментов

Измерения нейтронного излучения первоначально проводились при разряде ГИТ установки КПУ-200 на камеру, заполненную дейтерием. Регистрация гамма-нейтронных импульсов осуществлялась сцинтилляционным детектором ССДИ8-2, установленным на расстоянии 4,6 м от камеры ПНК-13. Детектор закрывался фильтром из свинца толщиной 10 мм. При начальном напряжении на конденсаторной батарее  $U_0 = 25$  кВ и рабочем давлении дейтерия  $P_0 = 1,6 \cdot 10^3$  Па в камере ПНК-13 протекал разрядный ток с максимальной амплитудой  $I = 1,4$  МА. В этих опытах был зарегистрирован выход, равный  $(7,5-8,0) \cdot 10^{10}$  ДД-нейтронов за импульс, длительность которого на полувысоте составляла  $\sim 110$  нс.

Затем газоразрядная камера откачивалась до давления  $\sim 10^{-2}$  Па и наполнялась равнокомпонентной смесью дейтерия с тритием до давления  $1,9 \cdot 10^3$  Па. При начальном напряжении  $U_0 = 25$  кВ и производной тока  $dI_0/dt_0 = 0,8 \cdot 10^{12}$  А/с в камере протекал разрядный ток с максимальной амплитудой  $I = 1,5$  МА. Осциллограмма производной разрядного тока и зависимость разрядного тока от времени приведены на рис. 4,а и 4,б, соответственно. Пинчевание тока на оси камеры происходило к моменту времени 5,4 мкс от начала разряда.

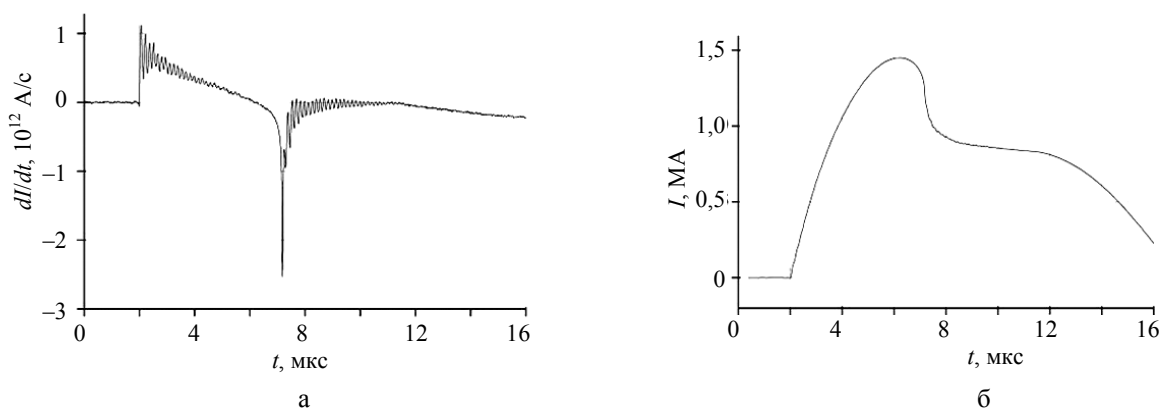


Рис. 4. Осциллограмма производной разрядного тока (а) и зависимость тока от времени (б)

По измеренной в опыте наведенной активности в активационных детекторах для каждой рабочей реакции были определены активационные интегралы ( $Q$ ). Выход нейтронов из источника определялся двумя независимыми методами. Первый основывался на расчете значений  $Q$  для каждой рабочей реакции с нормировкой на 1 нейтрон источника. Расчеты проводились по методу Монте-Карло. Выход нейтронов определялся по соотношению  $Q_{\text{эксперимент}}/Q_{\text{расчет}}$ . Расчетные и экспериментальные значения активационных интегралов для использовавшихся в опыте реакций приведены в табл. 2. Экспериментальные величины активационных интегралов получены с погрешностью не хуже 5 % при  $P = 0,95$ . Среднее значение выхода нейтронов составило  $Y = 1,26 \cdot 10^{13}$  при среднем квадратичном отклонении, равном 5,5 %.

В основе второго метода лежит восстановление нейтронного спектра в месте размещения активационных детекторов. Процедура определения спектра описана в работе [3]. В качестве нулевого приближения использовался спектр, рассчитанный в групповом приближении по методу Монте-Карло. Результаты восстановления спектра нейтронов приведены на рис. 5. Средняя квадратичная невязка экспериментальных значений активационных интегралов и значений, рассчитанных на восстановленном спектре, составила 4,8 %. Флюенс нейтронов с энергиями в интервале

0,3–14,5 МэВ равен  $8,8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \pm 10\%$  ( $P = 0,95$ ). Средняя энергия нейтронов в указанной части спектра равна 11,9 МэВ. Из общего спектра выделялись нейтроны с энергиями от 13,5 до 14,5 МэВ. Их доля составляет 78,4 % от полного спектра или  $6,96 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \pm 12\%$  ( $P = 0,95$ ). Для нейтронов указанного диапазона энергий проводился пересчет от местного флюенса к выходу нейтронов точечного источника. Проводилась корректировка полученного значения выхода нейтронов на рассеяние и поглощение нейтронов в материалах стенки камеры. Интегральный выход, полученный по второму методу, составляет  $1,25 \cdot 10^{13} \pm 14\%$  ( $P = 0,95$ ). Погрешность восстановления флюенса нейтронов определялась методом рандомизации [3].

Таблица 2

Результаты определения выхода ДТ-нейтронов по первому методу

| Реакция   | $Q_{\text{расчет}},$<br>реакций·ядро <sup>-1</sup> ·нейтрон <sup>-1</sup> | $Q_{\text{эксперимент}},$<br>реакций·ядро <sup>-1</sup> | Выход<br>нейтронов   |
|---|---|---|----------------------|
| $^{63}\text{Cu}(n, 2n)^{62}\text{Cu}$           | $2,644 \cdot 10^{-28}$  | $3,14 \cdot 10^{-15}$                                   | $1,19 \cdot 10^{13}$ |
| $^{64}\text{Zn}(n, 2n)^{63}\text{Zn}$           | $8,527 \cdot 10^{-29}$  | $9,96 \cdot 10^{-16}$                                   | $1,17 \cdot 10^{13}$ |
| $^{19}\text{F}(n, 2n)^{18}\text{F}$             | $2,906 \cdot 10^{-29}$  | $3,89 \cdot 10^{-16}$                                   | $1,34 \cdot 10^{13}$ |
| $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$       | $6,759 \cdot 10^{-29}$  | $8,89 \cdot 10^{-16}$                                   | $1,32 \cdot 10^{13}$ |
| $^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$ | $6,041 \cdot 10^{-29}$  | $7,71 \cdot 10^{-16}$                                   | $1,28 \cdot 10^{13}$ |
| $^{92}\text{Mo}(n, 2n)^{91}\text{Mo}$           | $1,015 \cdot 10^{-28}$  | $1,24 \cdot 10^{-15}$                                   | $1,22 \cdot 10^{13}$ |
| $^{100}\text{Mo}(n, 2n)^{99}\text{Mo}$          | $8,825 \cdot 10^{-28}$  | $1,18 \cdot 10^{-14}$                                   | $1,33 \cdot 10^{13}$ |
| $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$            | $4,230 \cdot 10^{-29}$  | $5,53 \cdot 10^{-16}$                                   | $1,31 \cdot 10^{13}$ |
| $^{64}\text{Zn}(n, p)^{64}\text{Cu}$            | $1,210 \cdot 10^{-28}$  | $1,43 \cdot 10^{-15}$                                   | $1,18 \cdot 10^{13}$ |

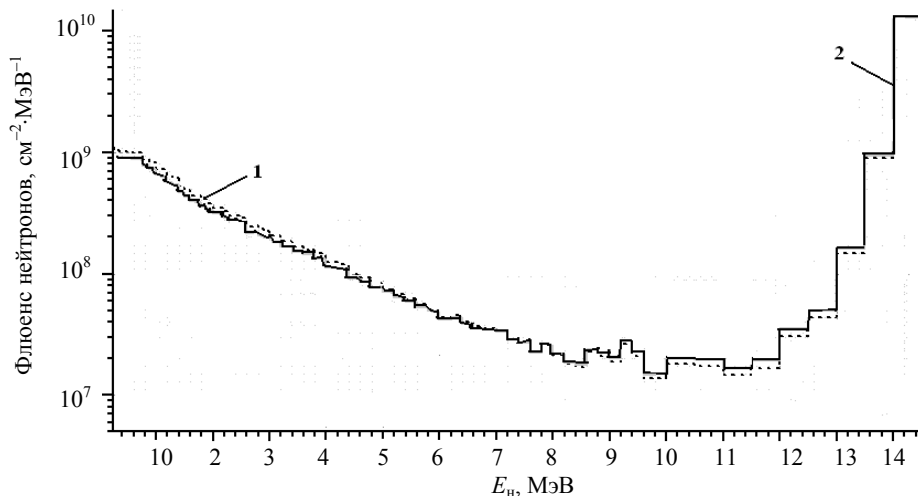


Рис. 5. Расчетный спектр нейтронов в месте размещения активационных детекторов: 1 – нулевое приближение, 2 – результат восстановления

Величина интегрального выхода, измеренная в опыте с помощью блока газового счетчика, составила  $(1,3 \pm 0,4) \cdot 10^{13}$  нейтронов/импульс при  $P = 0,95$ .

Зарегистрированная сцинтилляционным детектором ДЗ осциллограмма импульсов гамма-нейтронного излучения показана на рис. 6. Для восстановления сигналов, искаженных измерительными каналами, были экспериментально получены импульсные характеристики трактов регистрации. Для этой цели использовался переносной рентгеновский аппарат с длительностью импульса 1,5 нс. Сравнение исходного и восстановленного сигнала с детектора ДЗ приведено для иллюстрации на рис. 6. В эксперименте была зарегистрирована двухпиковая структура импульса нейтронного излучения. Измеренный по трем детекторам интегральный выход с учетом ослабления излучения в атмосфере и защите составил  $(1,1-1,3) \cdot 10^{13}$  ДТ-нейтронов с длительностью импульса на полувысоте 75–80 нс. Вклад второго пика в интегральный выход составляет ~20–30 %, а интервал времени между пиками – 150 нс.

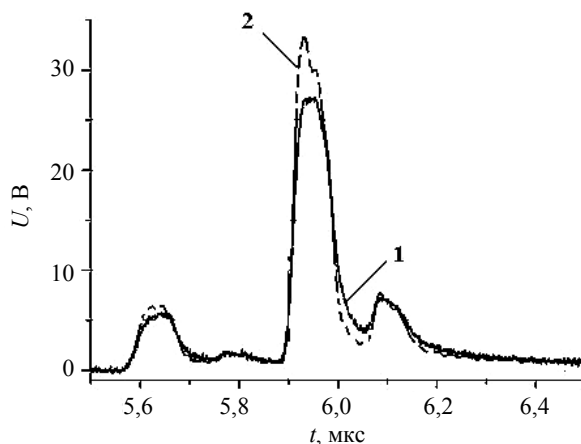


Рис. 6. Осциллограмма импульсов гамма-нейтронного излучения (1) и восстановленный сигнал (2) с детектора ДЗ

Результаты наших исследований подтверждают, степенную зависимость нейтронного выхода от амплитуды разрядного тока в камере  $Y \sim I^{3-5}$ , определенную экспериментально в различных лабораториях [5–8]. Из полученных результатов можно ожидать, что достижение в сферической камере с ПФ-выхода  $\sim 10^{14}$  ДТ-нейтронов за импульс возможно при токах  $\sim 3$  МА.

### Заключение

В работе представлены предварительные результаты экспериментальных исследований нейтронного излучения, генерируемого сферической камерой с плазменным фокусом, заполненной дейтерием или равнокомпонентной смесью дейтерия и трития.

При разрядном токе  $\sim 1,5$  МА камера генерирует импульсы нейтронного излучения длительностью на полувысоте 75–80 нс и интегральным выходом  $\sim 1,3 \cdot 10^{13}$  ДТ-нейтронов.

В эксперименте зарегистрирована двухпиковая структура импульса нейтронного излучения. Вклад второго пика в интегральный выход составляет ~20–30 %, а интервал времени между пиками – 150 нс.

В спектральном интервале 0,3–14,5 МэВ флюенс нейтронов на корпусе камеры по ее оси равен  $\sim 9 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup>. Средняя энергия нейтронов в указанной части спектра равна 11,9 МэВ. Доля нейтронов в диапазоне энергий 13,5–14,5 МэВ составляет 78,4 % от общего спектра

### Список литературы

1. Макеев Н. Г., Румянцев В. Г., Черемухин Г. Н. Физика и техника импульсных источников ионизирующих излучений для исследования быстропротекающих процессов // Труды ученых ядерных центров России. Вып. 5 / Под ред. Н. Г. Макеева. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1996. С. 281–291.
2. Макеев Н. Г., Румянцев В. Г., Маслов В. В. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Справочные приложения, базы и банки данных. Т. IX-3 «Радиационная плазмотермика» / Под ред. В. Е. Фортова. – М.: ЯНУС-К, 2007. С. 176.
3. Маслов Г. Н., Севастьянов В. Д., Кошелев А. С. // Измерительная техника. 2003. № 5. С. 62–68.
4. Альбикиов З. А., Веретенников А. И. Средства диагностики однократного импульсного излучения. Сб. трудов НИИИТ / Под ред. А. И. Веретенникова. – М.: ИздАТ, 1999. С. 39–58.
5. Крауз В. И., Митрофанов К. Н., Мялтон В. В. и др. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. С. 797.
6. Вихрев В. В., Королев В. Д. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. С. 397.
7. Freeman B., Boydston J., Ferguson J. et al. // Proc. of the 13<sup>th</sup> Int. conf. on Pulsed Power Plasma Science. Las Vegas, Nevada, 2001. Vol. 1. P. 682.
8. Scholz M., Miclaszewski R., Paduch M. et al. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2002. Vol. 30. P. 476.

### A Source with a $10^{13}$ DT Neutron Yield on the Basis of a Spherical Plasma Focus Chamber

N. V. Zavyalov, V. V. Maslov, V. G. Rumyantsev, I. Yu. Drozdov, D. A. Ershov, D. S. Korkin, D. A. Molodtsev, V. I. Smerdov, A. P. Falin, A. A. Yukhimchuk

*Results from preliminary experimental researches of neutron emission generated by a spherical plasma focus chamber filled with an equal component deuterium-tritium mixture are presented. At a maximum current amplitude in the discharge chamber of  $\sim 1,5$  MA, neutron pulses with a full width at half maximum of 75–80 ns and an integral yield of  $\sim 1,3 \cdot 10^{13}$  DT neutrons have been recorded.*