

Лабораторная работа №3

Измерение нейтронного выхода генератора типа «плазма-фокус» с использованием метода затянутой регистрации

Цель работы: исследование параметров генерации излучения в импульсном нейтронном генераторе ИНГ-103, освоение метода затянутой регистрации.

Оборудование: импульсный нейтронный генератор ИНГ-103 с дейтериевым (D) наполнением, большеобъемный сцинтилляционный детектор ССДИ15М, блок питания высоковольтный СБПК20, осциллограф цифровой LeCroy 3034R, комплект кабелей, высокочастотные тройники и нагрузки, ПК.

ВВЕДЕНИЕ

Среди современных импульсных устройств значительную нишу занимают установки плазменного фокуса (ПФ). Они являются эффективными источниками нейтронного, тормозного, мягкого и жесткого рентгеновского излучений, электронных и ионных пучков, а также кумулятивных плазменных струй [1]. При этом длительность генерации ионизирующего излучения составляет порядка 10 - 20 нс.

В установках плазменного фокуса (ПФ) происходит формирование нецилиндрического Z-пинча вследствие «схлопывания» движущейся токоплазменной оболочки на оси камеры. Устройства ПФ работают по принципу трансформации электрической энергии, запасенной в конденсаторной батарее, в энергию магнитного поля, сосредоточенную вблизи пинча. Они состоят из генератора импульсных токов, разряжающегося на динамическую индуктивно-резистивную нагрузку в виде камеры плазменного фокуса. Разряд происходит при срабатывании высоковольтного коммутатора, передающего энергию конденсаторной батареи в камеру ПФ. Камера, в свою очередь, состоит из коаксиальной системы электродов, разделенных изолятором, вдоль поверхности которого происходит пробой и образуется токоплазменная оболочка (ТПО). Она начинает свое движение вдоль электродов за счет пондеромоторной силы (FL) и, в

итоге, «схлопывается» в плотное пинчевое образование на оси камеры. Схема и принцип действия приведены на рисунке 1.

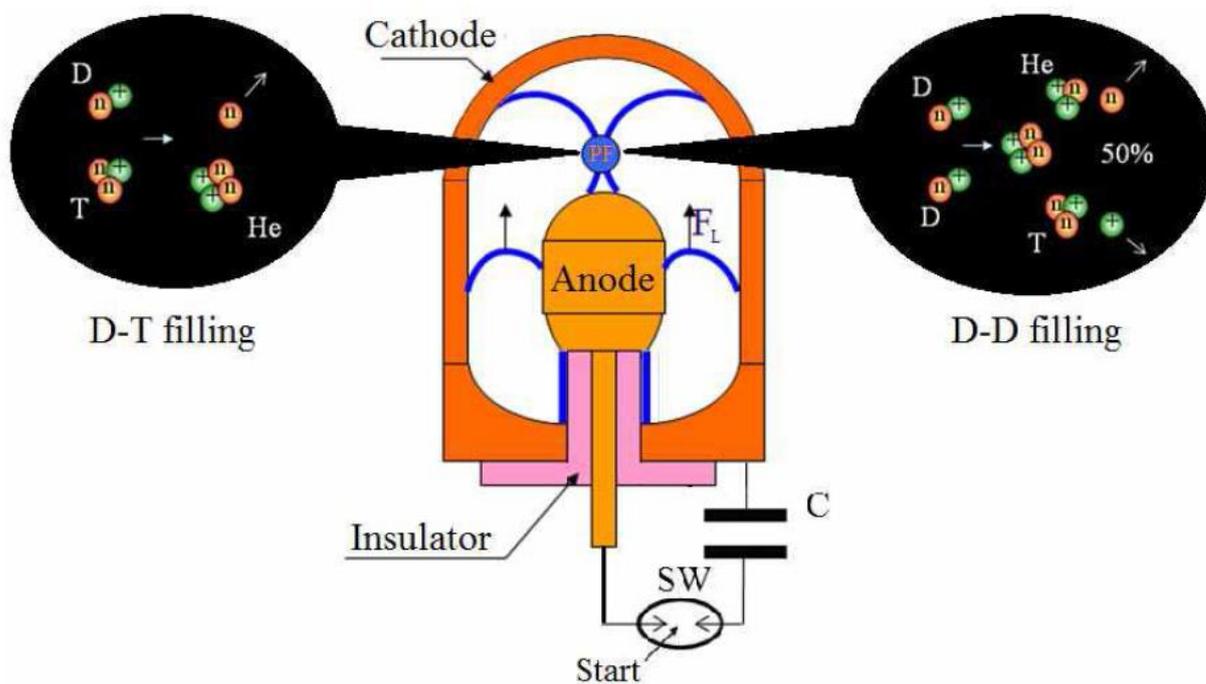
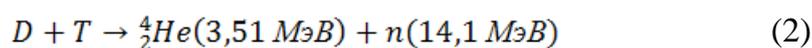
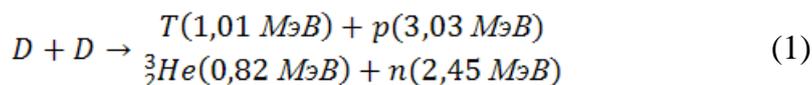


Рисунок 1 – Схема и принцип работы камеры ПФ

Для обеспечения работы ПФ используются камеры со специальной конструкцией электродов, которые наполняют газом низкого давления (десятки торр), содержащим изотопы водорода (D или D-T смесь). В камере ПФ происходит генерация нейтронов с энергией 2,5 МэВ (образовавшихся в результате D-D реакции) и (или) нейтронов с энергией 14,1 МэВ (образовавшихся в результате D-T реакции):



В данной лабораторной работе используется камера ПФ ИНГ-103 [2, 3], разработанная во ВНИИА им. Духова, с дейтериевым (D) наполнением [2].

МЕТОД ЗАТЯНУТОЙ РЕГИСТРАЦИИ

Для регистрации импульсного нейтронного излучения применяются детекторы на основе пластмассового сцинтиллятора и фотоэлектронного

умножителя. При малых нейтронных выходах целесообразно использование большеобъемных детекторов, которые позволяют проводить измерения нейтронного выхода импульсных источников методом затянутой регистрации (МЗР).

В основе МЗР лежит использование эффекта замедления быстрых нейтронов [4, 5] и последующей регистрации сцинтилляционным детектором гамма-квантов, образовавшихся в результате захвата замедлившихся нейтронов. Быстрые нейтроны, попадая в объем водородосодержащего сцинтиллятора (на основе полистирола СН), многократно рассеиваются на ядрах водорода и замедляются до тепловых энергий. Пластмассовый сцинтиллятор, используемый в детекторе, состоит из атомов углерода и водорода, радиационный захват нейтронов [6] с наибольшей вероятностью происходит на ядрах атома водорода (^1H) с последующим испусканием гамма-квантов с энергией 2.2 МэВ (сечение захвата теплового нейтрона на ядрах атома углерода (^{12}C) в ~ 80 раз ниже, при этом происходит испускание гамма-кванта с энергией ~ 4 МэВ). Гамма-кванты регистрируются детектором независимо от места их возникновения, если поглощенная в сцинтилляторе энергия гамма-кванта превышает физический порог регистрации детектора. При регистрации гамма-кванты дают на осциллограмме последовательность индивидуальных сигналов (вспышек сцинтиллятора). Преимущество МЗР заключается в том, что сигналы от захватных гамма-квантов сдвинуты на десятки и сотни микросекунд относительно импульса разряда и связанных с ним быстропротекающих процессов. Таким образом, удается отделить по времени процессы, вызванные воздействием тормозного, гамма- и рентгеновского излучения, которое накладывается на импульс, вызванный нейтронами. Кроме того, за время, уходящее на термализацию нейтронов, успевают затухнуть паразитные токи, обусловленные электромагнитными наводками, приводящими к артефактам на осциллограммах. Время жизни тепловых нейтронов в полистироле ~ 200 мкс, поэтому наблюдение последовательности одиночных вспышек характерной амплитуды в интервале 100 – 500 мкс после пуска генератора служит убедительным доказательством наличия нейтронов в импульсе установки (при таких временах не существует других источников сигнала, за исключением случайных фоновых событий, не коррелированных с разрядом).

Для реализации такого метода требуется специальный измерительный канал, включающий в себя детектор, кабельную линию, источники питания, а также электронику для усиления, формирования и счета импульсов, либо цифровой осциллограф с частотой дискретизации не менее 100 МГц при длительности развертки $1 \cdot 10^5$ точек (1 мс). В последнем варианте существует возможность записи вероятных электромагнитных наводок, формы электрического аналога нейтронного импульса и импульсов захватного гамма-излучения на одной осциллограмме.

Характерная осциллограмма сигнала МЗР детектора представлена на рисунке 2. На первом канале осциллографа наблюдается только импульс от быстрых нейтронов (создаваемых ими ядер отдачи [5]), запаздывающие сцинтилляции при этом не различимы, их величина не превосходит фонового уровня. На четвертом канале осциллографа при установке меньшей амплитуды на клетку становится различимо большое количество запаздывающих сигналов, которые естественно интерпретировать как отклик на гамма-кванты от радиационного захвата. По количеству запаздывающих сцинтилляций можно судить о числе нейтронов, испущенных источником. Счет импульсов захваченного гамма-излучения на осциллограммах осуществлялся при помощи программных средств.



Рисунок 2 – Осциллограмма, записанная с экрана осциллографа (данная осциллограмма получена с помощью осциллографа LeCroy WaveRunner 640Zi)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Особенностью обсуждаемого метода является необходимость предварительной калибровки измерительной аппаратуры эталонным источником в том же окружении и при той же геометрии эксперимента. Возможно проведение предварительной оценки количества зарегистрированных гамма-квантов в геометрии, идентичной условиям проведения опыта, с учетом всей окружающей обстановки с помощью программных средств для моделирования распространения нейтронного и гамма-излучения в веществе (MCNP5, GEANT). Данная процедура позволяет установить однозначную связь (в пределах статистики) между числом нейтронов, испущенных источником, и количеством захватных гамма-квантов в сцинтилляторе (откликом детектора). Таким образом, по количеству

зарегистрированных сцинтилляций рассчитывается нейтронный выход из источника.

Для лабораторной работы зависимость количества захватных гамма-квантов в сцинтилляторе от числа нейтронов, испущенных источником, определялась по результатам моделирования в программе MCNP5 (программа предназначена для расчета методом Монте Карло [7, 8] переноса нейтронов, электронов и гамма квантов в веществе). Геометрия расположения генератора ИНГ-103 и детектора ССДИ15М, а также материального окружения приведена на рисунке 3. Источник и детектор размещены внутри объема $4 \times 3,5 \times 3$ м³, заполненного воздухом, и окруженного бетонной оболочкой толщиной 0,2 м, которая имитирует стены, пол и потолок экспериментального зала.

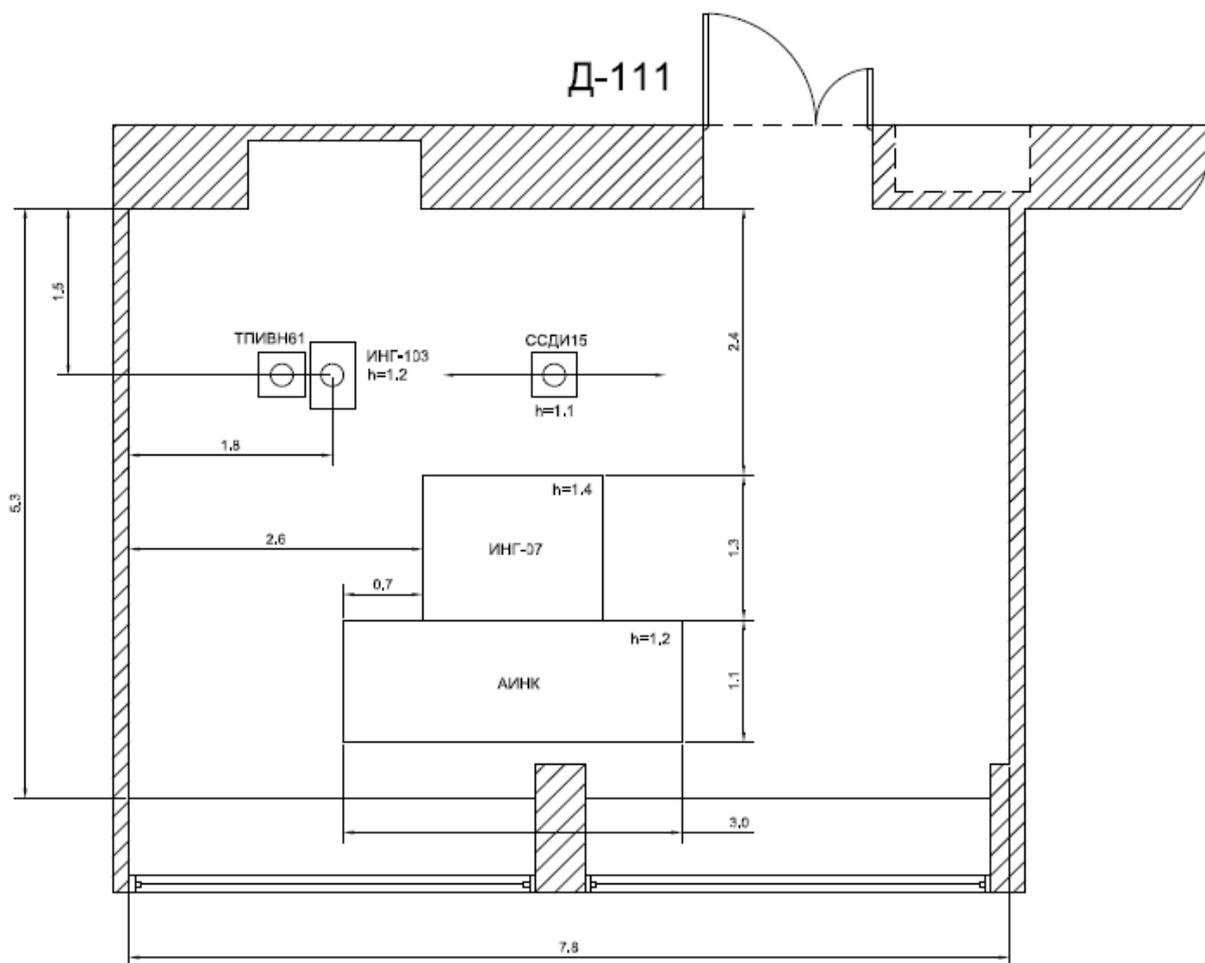


Рисунок 3 – Геометрия расположения нейтронного источника (ИНГ-103), измерительной аппаратуры (детектор ССДИ15) и материального окружения

Результат расчета, проведенного в программе MCNP5 для данной лабораторной работы, представлен на рисунке 4.

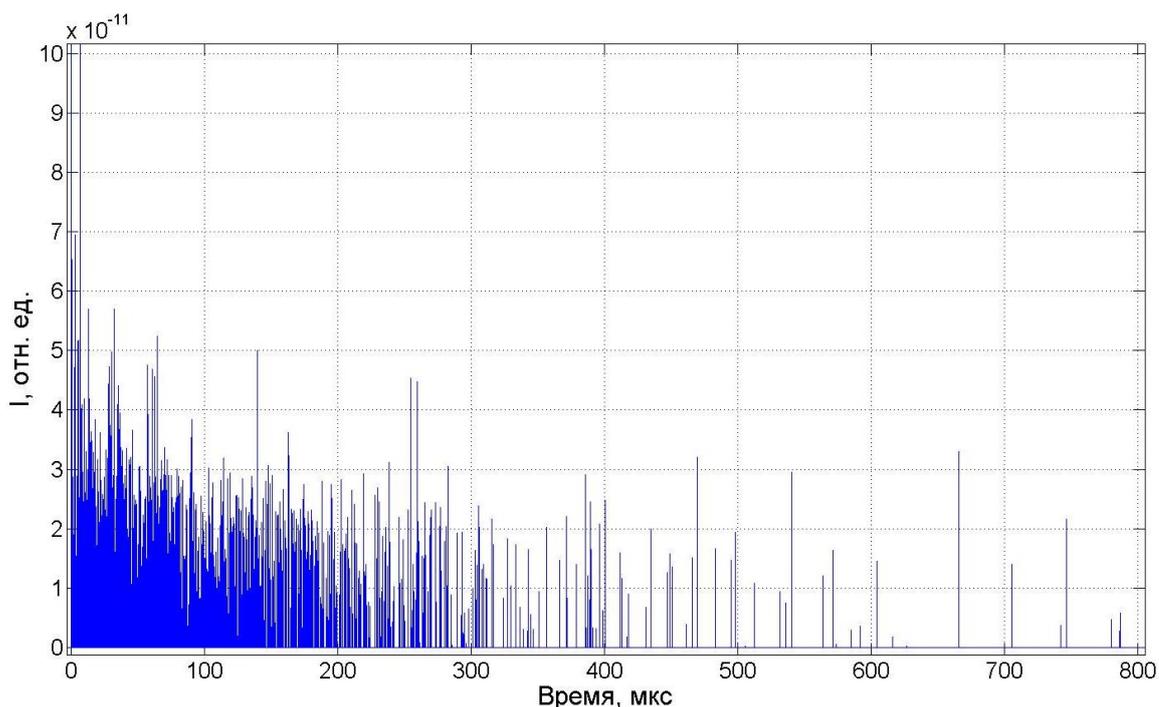


Рисунок 4 – Характерный отклик МЗР детектора на выход нейтронов ПФ $\sim 10^7$.
 Расстояние от источника 1,35 м

Подсчет импульсов, соответствующих взаимодействиям единичных гамма-квантов с материалом сцинтиллятора, на экспериментальной осциллограмме и расчетных зависимостях осуществлялся автоматически во временном диапазоне от 200 до 800 мкс от фронта нейтронного импульса в программной среде MatLab.

Таблица 1

Нейтронный выход ПФ, шт	Расстояние от источника нейтронов до детектора 1,35 м
	Число зарегистрированных гамма квантов во временном интервале 200-800 мкс после нейтронного импульса генератора, шт
5e5	5
1e6	16
5e6	112
1e7	208
5e7	925
1e8	1880

На рисунке 5 представлена расчетная зависимость количества захваченных в сцинтилляторе гамма-квантов от величины нейтронного выхода источника. Как видно из оценки: частота запаздывающих всплеск (число зарегистрированных гамма-квантов) и их общее количество растут с ростом нейтронного потока.

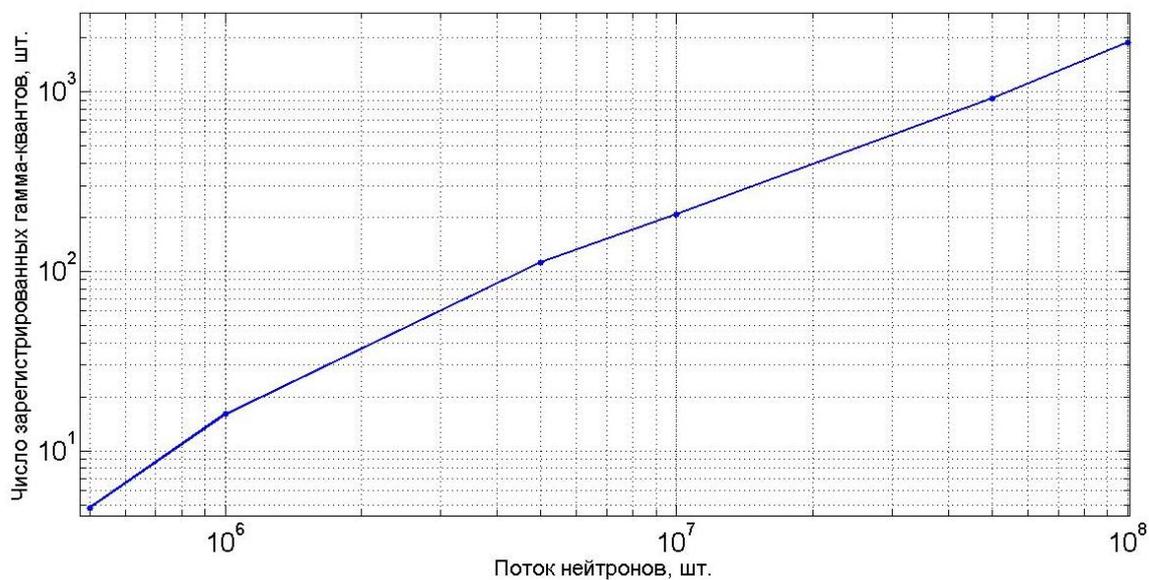


Рисунок 5 – Расчетная зависимость количества импульсов зарегистрированных гамма-квантов от величины нейтронного выхода источника (временной интервал для счета: 200 – 800 мкс от фронта нейтронного импульса). Расстояние: 1,35 м.

На рисунке 6 представлен реальный сигнал детектора ССДИ15М для нейтронного выхода плазма-фокуса $1,3e7$ шт.

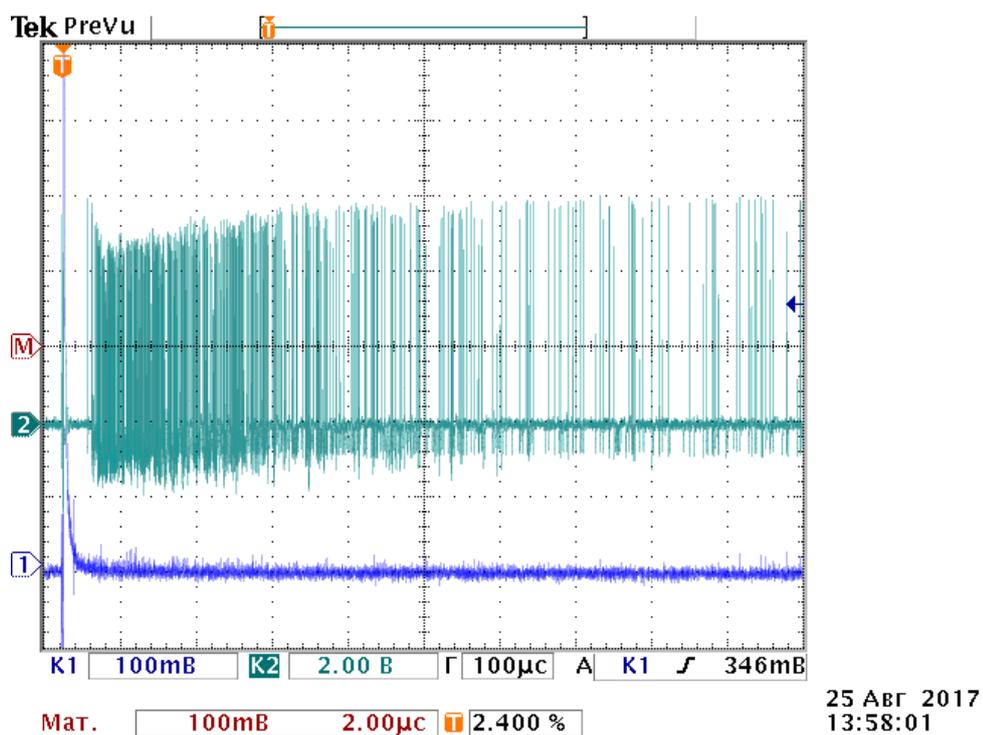
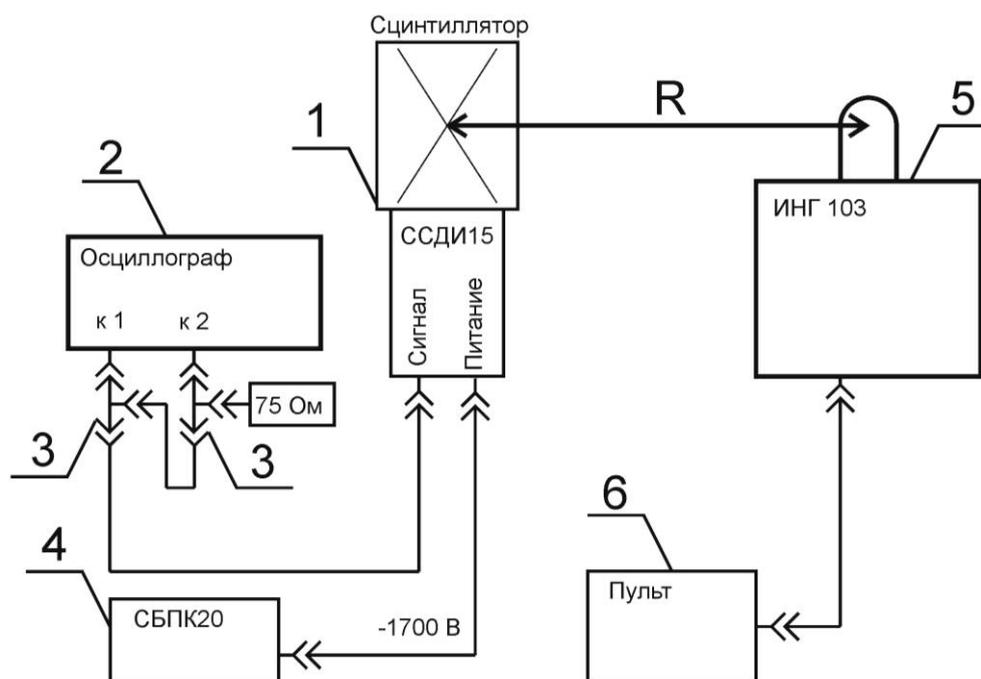


Рисунок 6 – Сигнал детектора ССДИ15М. Выход нейтронов плазма-фокуса $1,3 \times 10^7$ шт. Число зарегистрированных гамма квантов во временном интервале 200-800 мкс равно 259 шт.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На рисунке 7 представлена общая схема подключения измерительной аппаратуры для определения потока нейтронов от генератора ИНГ-103 методом затянутой регистрации.



1 – Детектор ССДИ15М; 2 – Осциллограф LeCroy 3034R; 3 – тройник BNC-T; 4 – источник питания СБПК20; 5 – генератор нейтронов ИНГ-103; 6 – пульт управления генератора нейтронов ИНГ-103.

Рисунок 7 – Схема подключения

Сцинтилляционный детектор ССДИ15М (поз. 1) расположен на расстоянии R (0,25-1,5 м) от камеры взаимодействия нейтронного генератора ИНГ-103 (поз. 5), ось детектора параллельна оси камеры взаимодействия, центр сцинтиллятора детектора находится на одном уровне с центром камеры взаимодействия. Питание детектора осуществляется при помощи блока питания СБПК20 (поз. 4). Сигнал детектора регистрируется при помощи цифрового осциллографа LeCroy 3034R (или функционального аналога) (поз. 2), сигнал передается по коаксиальному кабелю с волновым сопротивлением 75Ω и регистрируется на два канала осциллографа с разной чувствительностью*. Осциллограф и пульт управления нейтронным генератором (поз. 6) располагаются вне помещения нейтронного генератора.

* **Примечание:** на входах осциллографа должно быть установлено входное сопротивление – $1 \text{ M}\Omega$, и должна быть подключена внешняя нагрузка номиналом 75Ω через тройник BNC-T (поз. 3).

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Номинальное высоковольтное напряжение питания детектора ССДИ15М превышает 1000 В – опасно для жизни. Поражение электрическим током может возникнуть: при нарушении изоляции высоковольтного кабеля питания детектора, при прикосновении к гнездам разъемов "ВЫХОД", "КОНТРОЛЬ", к корпусу детектора в случае, если он не заземлен и на него произошел пробой высокого напряжения.

Перед включением детектора соединить клемму " \perp " с шиной заземления, убедиться в отсутствии повреждений высоковольтного кабеля питания. Величина сопротивления заземления должна быть не более 15 Ом.

Подключение или отключение сигнальных кабелей и высоковольтного кабеля питания должно производиться только при отключенном высоковольтном напряжении питания детектора. Запрещается разбирать детектор при включенном высоковольтном напряжении питания.

Запрещается подавать на детектор ССДИ15М напряжения питания, превышающие указанные в документации на детектор.

Категорически запрещается проводить сборку измерительной схемы, подключение кабелей питания и сигнальных кабелей, установку световых фильтров, т.е. любые действия с детектором при включенном высоковольтном напряжении питания.

Перед проведением работ необходимо ознакомиться эксплуатационной документацией на используемое оборудование.

Для работы с детектором допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности по работе с напряжением свыше 1000 В.

Вся аппаратура, используемая при измерениях, должна быть надежно заземлена.

При работе генератора ИНГ-103 требуется строго соблюдать правила РТБ.

ЗАДАНИЯ

Внимание! Все работы, связанные с приведением установки в рабочее состояние перед началом выполнения лабораторной работы, а также с пусками нейтронного генератора осуществляются только под наблюдением преподавателя!

- 1.1. Собрать схему измерений в соответствии с рисунком 3. Установить расстояние от детектора до генератора ИНГ-103 равное 1 м.
- 1.2. Установить нулевое значение напряжения питания детектора ССДИ15М путем вращения ручек регулировки выходного напряжения СБПК20 до упора влево.
- 1.3. Включить высоковольтный источник питания СБПК20 при помощи тумблера СЕТЬ на правой стороне лицевой панели прибора (выходное напряжение отрицательной полярности), постепенно вращая ручки регулировки напряжения вправо установить величину выходного напряжения ~ 1800 В. Подать питание на предусилитель детектора, включив в сеть адаптер 24 В. Дать детектору прогреться во включенном состоянии в течение 10 минут.
- 1.4. Включить осциллограф. Установить следующие параметры осциллографа:
 - для первого канала: входное сопротивление – 1 М Ω , масштаб шкалы – 200 мВ/дел; для второго канала: входное сопротивление – 1 М Ω , масштаб шкалы – 2 В/дел;
 - временная развертка – 100 мкс/ дел;
 - не менее 1 тысячи точек на 100 мкс;
 - режим работы – однократный запуск.

Запуск осциллографа следует осуществлять по первому каналу осциллографа по фронту сигнала детектора. Установите порог запуска 1 В от нулевой линии. Установите время запуска на 1/2 деления от начала развертки.

Переведите осциллограф в режим ожидания однократного запуска.

- 1.5. Подготовить к работе генератор нейтронов ИНГ-103:
 - 1.5.1 На низковольтном блоке питания камеры ПФ повернуть ручку выходного напряжения до упора влево. Включить ИП и, плавно повышая выходное напряжение (ступеньками по 1 В, выдерживая на каждом напряжении 5-

10 с), довести ток потребления до 0,52 А (при этом напряжение д.б. в диапазоне 8-10 В).

- 1.5.2 На лицевой панели блока сигнализации ИНГ-103 установить переключатель автомата ЗАЩИТА СЕТИ в положение ВКЛ. Включить тумблеры 1-2-3.
- 1.5.3 Выдержать генератор в таком состоянии 3 минуты.
- 1.5.4 Включить контрольный вольтметр. При необходимости установить диапазон измерения напряжения (рабочий диапазон 0 - 30 В).
- 1.5.5 Включить контрольный осциллограф стенда ИНГ-103. Установить масштаб шкалы напряжения 5В/дел, шкалы времени – 2,5 мкс/дел. Множитель пробника должен быть $\times 1$, входное сопротивление канала 1 МОм, ограничение полосы пропускания отключено.
- 1.5.6 Запуск развертки установить по растущему фронту сигнала на уровне ~ 1 В, начало развертки сместить на 3 клетки влево от середины экрана осциллографа.
- 1.5.7 Перевести осциллограф в режим одиночного запуска (ждущий режим для регистрации однократных процессов) нажав кнопку «Single» на лицевой панели прибора.
- 1.5.8 Включить зарядку высокого напряжения емкостного накопителя переключив тумблер ПИТАНИЕ (SUPPLY) на пульте управления в положение ВКЛ (ON) и зарядить накопитель до напряжения 10 кВ.

Контролировать значение зарядного напряжения по показаниям вольтметра.

Внимание! Коэффициент преобразования показаний вольтметра - 1,2К, т.е. зарядное напряжение на конденсаторах емкостного накопителя генератора $U_{зар} [кВ] = U_{мультимер} [В] / 1,2$. Пример: 6 вольт на мультиметре соответствует $U_{зар} = 5$ кВ.

- 1.5.9 При достижении требуемого значения зарядного напряжения перевести переключатель ПИТАНИЕ устройства управления в положение ОТКЛ (OFF), нажать и отпустить кнопку ПУСК (START) – генератор выдаст одиночный импульс нейтронов.

На экране осциллографа наблюдать кривую разрядного тока.

Повторное срабатывание импульсного нейтронного излучателя допускается производить не ранее чем через 5 мин.

1.6. Для контроля выхода нейтронов генератора ИНГ-103 используется детектор ТПИВН. Блок детектирования располагается в непосредственной близости от камеры ПФ (на расстоянии ~17 см), блок регистрации и питания размещен на рабочем месте ИНГ-103 в Д-116.

1.7. Подготовить к работе детектор ТПИВН, для чего:

1.7.1 Включить БРП ТПИВН, нажав кнопку ВКЛ на лицевой панели прибора. После выдачи на ЖКИ номера версии необходимо, используя стрелки для выбора ответа, квадрат для подтверждения:

- выбрать язык сообщений («РУС»);
- установить тип подключенного БД («500»);
- проверить прохождение режима самоконтроля (через 40 с напряжение на счетчиках должно быть (400 ± 4) В).

1.7.2 После успешного прохождения самоконтроля ТПИВН переходит в режим МЕНЮ.

1.7.3 Перевести прибор в режим измерения выхода нейтронов:

1.7.3.1 Переместить курсор в позицию «УСТ» в строке «NBЫX» и нажать кнопку \square .

1.7.3.2 Установить величину, обратную коэффициенту преобразования выхода нейтронов: 3,937E3 (именно в таком формате).

1.7.3.3 Вернуться в меню (символ «M»).

1.7.3.4 Переместить курсор в позицию «РАБ» в строке «NBЫX» и нажать кнопку \square .

Запуск ТПИВН на измерение наведенной активности должен производиться после завершения первоначальной оценки фона (400 с).

1.8. Зарядить емкостный накопитель ИНГ-103 до 21 кВ и выполнить рабочее срабатывание генератора п.п. 1.5.8 – 1.5.9.

Записать величину нейтронного выхода по показаниям прибора ТПИВН.

На экране контрольного осциллографа ИНГ-103 наблюдать разрядную кривую и «особенность» (момент генерации нейтронов).

На экране цифрового осциллографа LeCroy 3034R наблюдать осциллограмму, подобную представленной на рисунке 6.

- 1.9. В случае, если осциллограф не запустился, уменьшите вдвое порог запуска (500 мВ) и цену деления для первого канала осциллографа (100 мВ/дел). Отрегулировать чувствительность второго канала, таким образом, чтобы амплитуда отдельных импульсов была больше двух делений по шкале осциллографа.
- 1.10. При получении на экране осциллографа картины, подобной рисунку 6, сохранить осциллограмму в формате изображения, а также в формате таблицы «время - амплитуда», например, в формате *.csv или *.dat.
- 1.11. Повторить измерения пп. 1.8 – 1.10 не менее 3 раз.
- 1.12. После окончания измерений выключить установку:
 - 1.12.1. Для выключения генератора:
 - нажать и отпустить кнопку ПУСК (START) устройства управления и убедиться по показаниям вольтметра, что на контрольных выходах зарядное напряжение отсутствует;
 - отключить тумблеры 3-2-1 на лицевой панели блока сигнализации ИНГ-103, установить переключатель автомата ЗАЩИТА СЕТИ в положение ВЫКЛ;
 - выключить низковольтный источник питания камеры ПФ.
 - 1.12.2. Выключить контрольный вольтметр и осциллограф стенда ИНГ-103.
 - 1.12.3. Выключить ТПИВН, нажав кнопку ВЫКЛ на панели БРП.
 - 1.12.4. Выключить питание детектора ССДИ15М путем вращения ручек регулировки напряжения СБПК20 до упора влево.
 - 1.12.5. Выключить СБПК20 при помощи тумблеров СЕТЬ.
 - 1.12.6. Отсоединить адаптер 24 В от сети.
 - 1.12.7. Выключить осциллограф.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Обработку результатов измерений производить при помощи MatLab, Python-пипру, Origin или любого другого инструмента работы с массивами данных с возможностью программирования.

Провести анализ зарегистрированных осциллограмм. Для сохраненных осциллограмм провести оценку количества импульсов* детектора от захваченных в сцинтилляторе гамма-квантов во временном интервале от 200 – 800 мкс после

прохождения нейтронного импульса ПФ. При обработке данных необходимо задать порог счета импульсов на осциллограмме равный **50 мВ**.

По графику, представленному на рисунке 5 и таблице 1, определить поток нейтронов генератора ИНГ-103 для каждой полученной осциллограммы.

Сравнить полученные значения нейтронных выходов с нейтронным выходом, определенным по ТПИВН.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается принцип генерации нейтронов «плазменным фокусом»?
2. Почему для детектирования импульсного нейтронного излучения используются пластмассовые сцинтилляторы?
3. Каким процессом обусловлен первый импульс детектора, осциллограмма сигнала которого приведена на рисунке 2?
4. Какими процессами обусловлен временной сдвиг запаздывающих сцинтилляций от момента попадания быстрых нейтронов в объем сцинтиллятора (осциллограмма сигнала приведена на рисунке 2)?
5. Напишите реакции захвата нейтрона водородом и углеродом? Чему примерно равно сечение реакции для термализованных нейтронов?
6. Почему количество импульсов МЗР детектора зависит от окружающей обстановки (пол, стены и т.п.)?
7. Как может повлиять длина кабеля на показания и счет импульсов МЗР детектора?
8. Как может повлиять нагрузка на входе в осциллограф на счет импульсов МЗР детектора?

ЛИТЕРАТУРА

- [1] А. К. Дулатов, Б. Д. Лемешко, Ю. В. Михайлов, И. А. Прокуратов, А. Н. Селифанов, «Измерение динамической индуктивности камер,» *Успехи прикладной физики*, т. 1, № 4, pp. 559-563, 2013.
- [2] А. К. Дулатов, П. С. Крапива, Б. Д. Лемешко, Ю. В. Михайлов, И. Н. Москаленко, И. А. Прокуратов, А. Н. Селифанов, «ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КАМЕРАМИ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА С ДЕЙТЕРИЕВЫМ И ДЕЙТЕРИЙ-ТРИТИЕВЫМ НАПОЛНЕНИЯМИ,» *ФИЗИКА ПЛАЗМЫ*, т. 42, № 1, pp. 43-49, 2016.
- [3] А. К. Дулатов, П. С. Крапива, Б. Д. Лемешко, Ю. В. Михайлов, И. Н. Москаленко, И. А. Прокуратов, А. Н. Селифанов, «МЕТОД РАЗНОСТНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРА ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УСТАНОВКИ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА,» *ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА*, № 6, pp. 71-77, 2015.
- [4] А.И. Абрамов, Ю.А. Казанский, Е.С. Матусевич, Основы экспериментальных методов ядерной физики, Москва: Атомиздат, 1970.
- [5] В.И. Калашников, М.С. Козодаев, Детекторы элементарных частиц, Москва: "Наука", 1966.
- [6] M.G. Sowerby/R.A. Forrest, «Neutron cross-sections 4.7.2,» National Physical Laboratory, 2015. [В Интернете]. Available: http://www.kayelaby.npl.co.uk/atomic_and_nuclear_physics/4_7/4_7_2.html. [Дата обращения: 23 мар 2017].
- [7] И.М. Соболев, Метод Монте Карло, Москва: "Наука", 1985.
- [8] И.М. Соболев, Численные методы Монте-Карло, Москва: "Наука", 1973.