

Лабораторная работа № 3

Определение параметров импульса нейтронов и жесткого рентгеновского излучения генератора нейтронов ИНГ-103 на основе камеры плазменного фокуса

Цель работы: Изучение генерации проникающих излучений камерой плазменного фокуса ПФ7-02Д генератора ИНГ-103, определение с использованием времяпролетной методики длительностей импульсов рентгеновского излучения и нейтронов, а также энергии нейтронов в реакции синтеза D+D.

Теоретическая часть

При пинчевании плазмы в разрядной камере плазменного фокуса (ПФ) при дейтериевом или дейтерий-тритиевом наполнении камеры в плазменном фокусе создаются условия для прохождения ядерных реакций D+D или D+T (в зависимости от наполнения) и генерации нейтронов, соответственно, 2,5 или 14,2 МэВ. Процессы в камере ПФ более подробно рассмотрены в Лабораторной работе № 1.

Кумуляция ТПО, и, как следствие, образование плазменного фокуса, начинается со «схлопывания» на оси камеры ударной волны, опережающей ТПО. Ударная волна вызывает ионизацию, сжатие («первое сжатие») и предварительный нагрев газа в приосевой области. Затем этот газ дополнительно сжимается сходящейся ТПО («второе сжатие»). Скорость ее радиального движения достигает значений $\sim (2 - 3) \cdot 10^7$ см/с. Сжатие плазмы происходит до наступления равновесия между внешним давлением со стороны магнитного поля и давления плазмы (Беннетовское равновесие), при этом образуется относительно равновесный пинч, время жизни которого составляет около 20 – 50 нс.

В дальнейшем происходит разрушение пинча с генерацией нейтронов и рентгеновского излучения. При сжатии значительно повышается активное сопротивление плазмы и возникают неустойчивости. Это приводит к обрыву тока проводимости, возникновению сильных электрических полей и, как следствие, появлению потоков ускоренных ионов и электронов. Электроны могут ускоряться

до больших энергий, если напряженность электрического поля в плазме превышает критическое поле Драйзера, равное

$$E_{Dr} = \frac{2e^3 n \ln \Lambda}{4\pi \varepsilon_0^2 m_e v_{cr}^2}$$

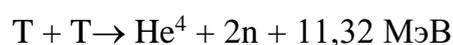
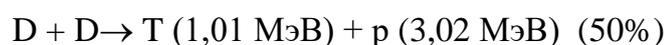
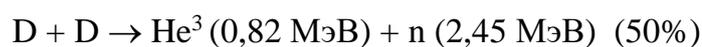
где n – плотность плазмы, $v_{cr} = \sqrt{\frac{kT}{m_e}}$ – критическая скорость электрона (тепловая скорость), e – заряд электрона, m_e – масса электрона, ε_0 – электрическая постоянная, T – абсолютная температура, k – постоянная Больцмана, $\ln \Lambda = 20$ – кулоновский логарифм. Подставив в формулу все константы, можно получить зависимость напряженности поля Драйзера от отношения плотности плазмы к её температуре:

$$E_{Dr} = 1,06 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{n \text{ (см}^{-3}\text{)}}{T \text{ (эВ)}}$$

Электроны при этом входят в режим ускорения, такие электроны называются «убегающими» и их энергия может достигать возникающей в плазме разности потенциалов. Электроны бомбардируют анод, что сопровождается тормозным рентгеновским излучением с энергией квантов до сотен кэВ ($\sim 300 - 350$ кэВ). Все эти процессы происходят за время порядка нескольких десятков наносекунд.

Возникающие в области фокуса электрические поля могут ускорять ионы до энергий, достаточных для генерации нейтронного излучения. Альтернативная теория предполагает наличие достаточно энергичных ионов за счет гидродинамических процессов в плазме. Концентрация их достаточна для протекания интенсивных ядерных реакций синтеза и генерации нейтронов.

В области плазменного фокуса в зависимости от наполнения камеры проходят следующие ядерные реакции:



Сечение реакции $T(d,n)He^4$ при энергии дейтронов 107 кэВ имеет максимум 5 барн, сечение реакции $D(d,n)He^3$ примерно в 100 раз меньше (количество рожденных протонов в реакции $D(d,p)T$, примерно равно количеству нейтронов в реакции $D(d,n)He^3$).

При наполнении камеры ПФ дейтерием в реакции $D(d,n)He^3$ генерируются нейтроны с энергией 2,5 МэВ, при наполнении КПФ смесью дейтерия и трития основной является реакция $T(d,n)He^4$ и генерируются нейтроны с энергией 14,2 МэВ. При этом ширина спектра энергий излучаемых нейтронов составляет не более 10 %. При наполнении тритием – проходит реакция $T(t,2n)He^4$ с получением нейтронов широкого спектра энергий (0 – 9,5) МэВ.

Горячая плазма ПФ является также источником электромагнитного излучения широкого спектра от инфракрасного до жесткого ультрафиолета, вакуумного рентгена, а также - характеристического рентгеновского излучения возбужденных атомов плазмы. Наряду с нейтронным и электромагнитным излучениями, генераторы на основе ПФ являются источниками интенсивных электронных, ионных и плазменных пучков.

Измерение выхода нейтронов проводится с использованием активационной методики. Для регистрации 14 МэВ-ных нейтронов можно применять методику активации ядер меди быстрыми нейтронами, имеющую порог около 10 МэВ, а также методику активации серебра быстрыми нейтронами, замедленными до тепловых энергий. Методика на основе активации серебра более универсальна, так как позволяет проводить измерение выхода как 2,5 МэВ-ных, так и 14 МэВ-ных нейтронов. Для проведения измерений выхода нейтронов методом активации серебра используется прибор ТПИВН61, разработанный ВНИИА. ТПИВН61 позволяет измерять выход нейтронов в диапазоне от $5 \cdot 10^5$ до $2 \cdot 10^{12}$ нейтр./имп. при энергии нейтронов от 80 до 2400 фДж (от 0,5 до 15 МэВ) и длительности нейтронного импульса не более 0,1 с. Длительность всего цикла измерения составляет 371,2 с. Подробно работа ТПИВН61 и использование его для измерения выхода нейтронов рассматривается в Лабораторной работе №2 «Изучение работы прибора для определения выхода нейтронов ТПИВН61, основанного на активационной методике».

О процессах внутри ПФ мы можем судить по внешним проявлениям – излучениям из камеры ПФ в результате изменений атомной и ядерной структуры вещества. Регистрацию излучений можно проводить на интегральном уровне, но для более детальных выводов о процессах в ПФ необходимо использовать регистрацию проникающих излучений с разрешением по времени.

Для детектирования импульсов нейтронного, тормозного, жесткого рентгеновского и гамма излучения генератора на основе камеры ПФ при исследовании динамики процессов выхода излучений применяются быстрые сцинтилляционные детекторы с пластмассовыми чувствительными элементами и быстродействующими фотоэлектронными умножителями (ФЭУ).

В настоящей работе используется сцинтилляционный детектор ССДИЗ8 разработки и производства ФГУП ВНИИА с длительностью импульсной характеристики ~ 2 нс. Фотография ССДИЗ8 представлена на рисунке 1 «а», импульсная характеристика – на рисунке 1 «б».

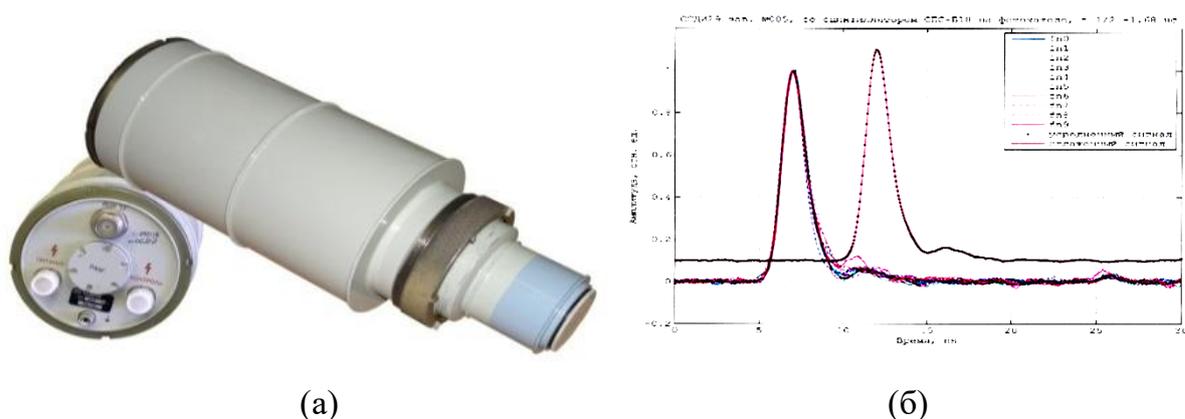


Рисунок 1 – детектор ССДИЗ8 (а), импульсная характеристика ССДИЗ8 (б)

Основные достоинства детектора – использование скоростного органического сцинтиллятора с временем высвечивания меньше нс, а также быстродействующего ФЭУ СНФТ18 с большим рабочим током, обеспечивающим широкий динамический диапазон регистрации. Детекторы работают в токовом режиме, линейный токовый диапазон ФЭУ, примененных в детекторах, составляет не менее 0,5А (в зависимости от конкретного экземпляра ФЭУ), что дает сигнал не менее 37 Вольт на нагрузке 75 Ом. Расстояние между ПФ и ССДИ следует выбирать таким, чтобы интенсивность излучения на детекторе была в пределах

линейности тока ФЭУ, в случае превышения предельного тока ФЭУ происходит накопление заряда на конечных диодах ФЭУ и затяжка длительности регистрируемого нейтронного импульса. Конструкция ССДИ позволяет регулировать амплитуду импульса напряжения на выходе ССДИ путем установки дырчатых светофильтров между сцинтиллятором и ФЭУ, уменьшающих интенсивность вспышки до 5-ти раз, а также введением рангов на ФЭУ, уменьшающих усиление ФЭУ до 10-ти раз.

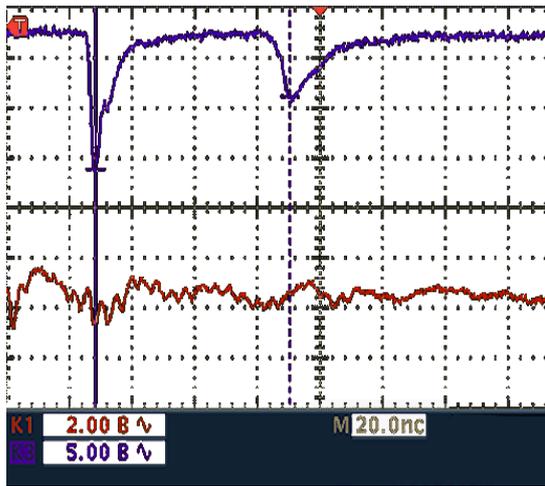
Наряду с импульсом нейтронов плазменный фокус генерирует импульс жесткого рентгеновского излучения (ЖРИ). Для уверенного разделения импульсов на экране осциллографа, расстояние L между ПФ и детектором выбирается из условия, что разница времен пролета нейтронов и РИ до детектора, должна быть заведомо больше длительности РИ ($t_{РИ}$):

$$L/u_n - L/c > (3 - 4) \cdot t_{РИ}$$

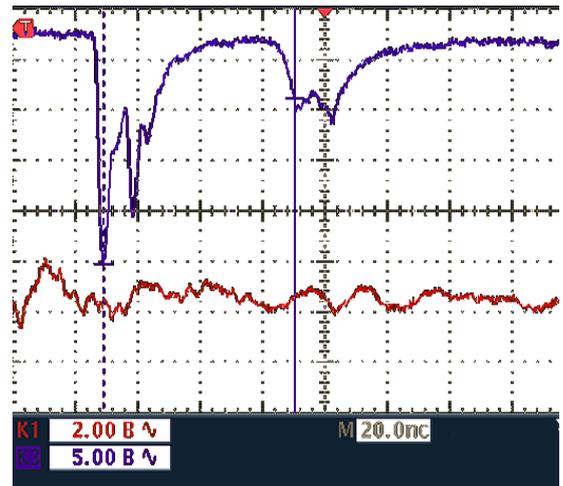
где u_n – скорость нейтронов, c – скорость света. Разница времен пролета 1 метра для 14 МэВ-ных нейтронов и РИ составляет 16,6 нс, а для 2,5 МэВ-ных нейтронов около 45 нс. Надо отметить, что 14 МэВ-ные нейтроны регистрируются уверенно, в то время как 2,5 МэВ-ные нейтроны регистрируются зачастую с трудностями, так как их генерируется в 100 раз меньше.

Явления, происходящие в ПФ сложны и неоднозначны, достаточно напомнить, что генерация жестких излучений происходит в результате разрушения неустойчивости пинчевой плазменной структуры, что является результатом ряда случайных процессов. Все это сказывается на временных особенностях генерации жестких излучений плазменного фокуса.

При использовании детекторов типа ССДИ38 с разрешением ≈ 1 нс мы можем наблюдать временные структуры как РИ, так и нейтронного импульса. Действительно, при генерации нейтронов наблюдаются случаи образования двойных, а иногда и тройных импульсов нейтронов и РИ. Для иллюстрации сказанного приведем осциллограммы одиночных и двойных импульсов нейтронов для камеры ПФ7-02 (D-T наполнение) при токе 350 кА (рисунок 2) и для камеры ТПФ192 (одиночных, двойных и даже тройных импульсов) при токе 650 кА (рисунок 3).

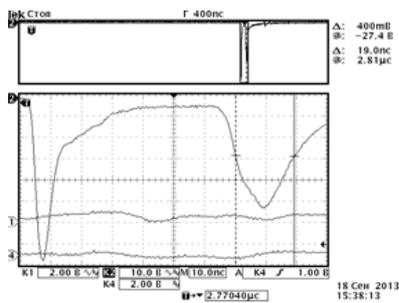


(a)

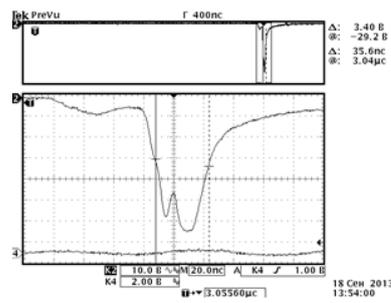


(б)

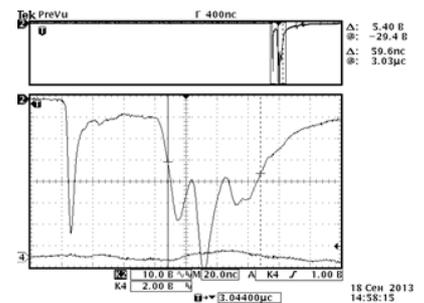
Рисунок 2 – Импульсы нейтронов и ЖРИ камеры ПФ7-02 (D-T): одиночный импульс (а), двойной импульс (б)



(a)



(б)



(в)

Рисунок 3 – Импульсы нейтронов и ЖРИ камеры ТПФ192 (D-D): одиночный импульс нейтронов (а), двойной импульс нейтронов (б), тройной импульс нейтронов (в)

Как следует из осциллограммы на рисунке 2 «а», длительность одиночного импульса нейтронов $t_{0,5}$ равна 10-12 нс, генерация нейтронов сопровождается генерацией ЖРИ длительностью 3 – 4 нс на полувысоте. Импульс РИ проходит через стенку камеры ПФ толщиной 2,5 мм и стенку анода 2,5 мм, т.е. практически отфильтровывается РИ с энергией квантов меньше 70-80 кэВ и проходит только жесткое рентгеновское излучение (ЖРИ).

В случае, изображенном на рисунке 2 «б», происходит генерация двух импульсов нейтронов с промежутком между ними 12 – 13 нс, амплитудой и длительностью каждого импульса, близкими к случаю «а». Каждый импульс

нейтронов сопровождается генерацией импульса ЖРИ длительностью 3 – 4 нс. Генерация двух импульсов ЖРИ и двух импульсов нейтронов означает, что плазма пинча совершает два последовательных сжатия, каждое из которых сопровождается генерацией ЖРИ и нейтронов. В основном (85% случаев) генерируется один импульс нейтронов, количество двойных импульсов нейтронов составляет (15 – 20)% от общего количества включений. Иногда, достаточно редко (2 – 5%), включения сопровождаются появлением трех импульсов нейтронов и ЖРИ с промежутком между ними (10 – 15) нс. Эти факты свидетельствуют, что при пинчевании плазмы действительно могут происходить последовательные сжатия с периодом 10 – 15 нс (для камеры ПФ7-02 при токе 350 кА), сопровождающиеся генерацией ЖРИ и нейтронов.

Сцинтилляционная методика с использованием скоростных детекторов ССДИЗ8 применяется в вариантах:

- в виде времяпролетной методики для измерения временных интервалов при определении энергии сгенерированных нейтронов;
- для определения амплитудно-временных соотношений генерации ЖРИ и нейтронного излучения при работе камеры ПФ;
- для изучения амплитудно-временных спектров ЖРИ в различных энергетических диапазонах с использованием метода поглощающих фильтров.

Времяпролетный метод основан на разделении частиц разного типа по времени их пролета между источником и детектором излучения за счет разных скоростей распространения в среде. Электромагнитные излучения, к которым относятся и тормозное, и рентгеновское, и гамма-излучения, распространяются в пространстве со скоростью света. Скорость движения нейтронов зависит от их кинетической энергии.

ПФ генерирует рентгеновский и нейтронный импульсы. Считая, что они формируются практически одновременно и зная расстояние L от камеры ПФ до сцинтиллятора и скорость распространения рентгеновских квантов в воздухе ($c \approx 300000$ км/с), можно определить скорость нейтронов v_n , (как сказано выше, при условии одновременности генерации РИ и нейтронов):

$$v_n = \frac{L}{\Delta t_{n\gamma} + L/c} , \quad (1)$$

где $\Delta t_{n\gamma} = t_n - t_\gamma$ – интервал времени между появлением гамма- и нейтронного импульсов. При выполнении лабораторной работы для определенности при обработке осциллограмм берем интервал времени между максимумами импульсов. Зная скорость нейтронов, рассчитывается их энергия ($v_n \ll c$):

$$E_n = \frac{m \cdot v_n^2}{2} , \quad (2)$$

где m – масса нейтрона ($1,675 \cdot 10^{-27}$ кг).

1 Дж $\approx 6,24151 \cdot 10^{18}$ эВ

Экспериментальная часть

Описание лабораторной установки

На рисунке 4 представлена схема экспериментальной установки. Источником нейтронного излучения служит генератор ИНГ-103 (поз. 5), размещенный в помещении Д-111. Детектор импульсных излучений ССДИ38-01 (поз. 1) располагается на расстоянии порядка 1,5 м от плазменной камеры генератора ИНГ-103. Питание детектора осуществляется при помощи двухканального блока питания СБПК20 (поз. 4). Детектор имеет отдельное питание делителя ФЭУ и анода. Подача напряжения на анод и снятие импульсного сигнала с детектора по одной кабельной линии осуществляется при помощи разделительного конденсаторного блока (поз. 3). Сигнал детектора передается по коаксиальному кабелю с волновым сопротивлением 50 Ом и регистрируется при помощи цифрового осциллографа Tektronix TDS2024 (поз. 2). При необходимости, сигнал детектора ослабляется аттенуатором. Осциллограф, блок питания СБПК20 и пульт управления нейтронным генератором (поз. 6) располагаются вне помещения нейтронного генератора, на рабочем месте в Д-116.

К разъему генератора «ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ U1» подключен контрольный вольтметр АКТАКОМ АВМ-4084, предназначенный для измерения зарядного напряжения на емкостном накопителе. Коэффициент преобразования показаний вольтметра - 1,2, 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.

Для измерения 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. Детектор ТПИВН должен быть включен в соответствии с ТПИВН61РЭ, пройден самоконтроль, проведено накопление фоновых данных в течение 400 с. Срабатывание генератора формирует синхросигнал на антенне входа синхронизации БД ТПИВН и автоматически запускает программу расчета выхода нейтронов.

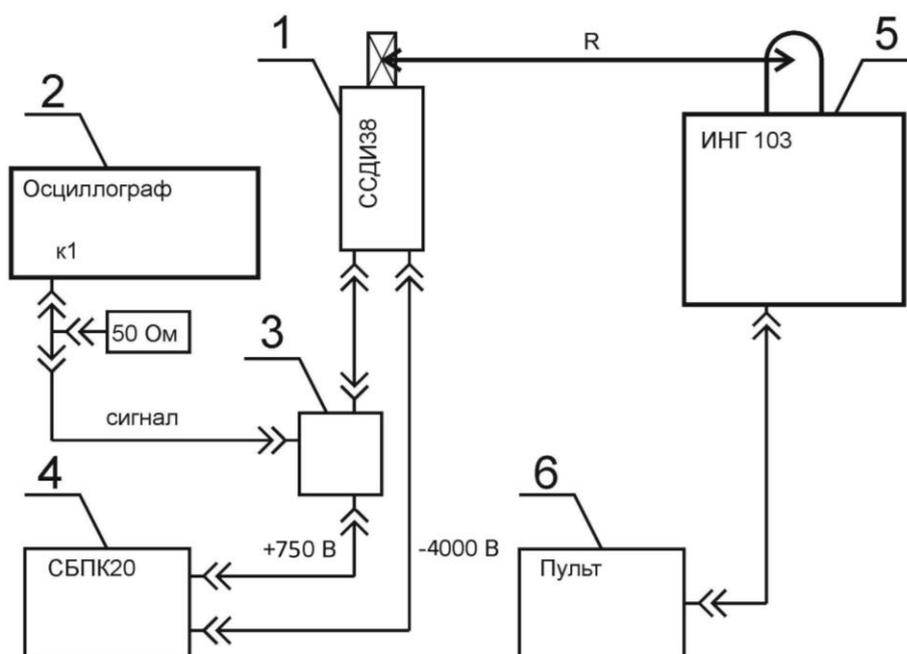


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

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. 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).
2. После успешного прохождения самоконтроля ТПИВН переходит в режим МЕНЮ.
3. Перевести прибор в режим измерения выхода нейтронов:
 - 3.1 Переместить курсор в позицию «УСТ» в строке «NBЫX» и нажать кнопку \square .
 - 3.2 Установить величину, обратную коэффициенту преобразования выхода нейтронов: 3,937E3 (именно в таком формате).
 - 3.3 Вернуться в меню (символ «M»).
 - 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).
4. Подготовить к работе генератор нейтронов ИНГ-103:
 - 4.1 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).
 - 4.2 На лицевой панели блока сигнализации ИНГ-103 установить переключатель автомата ЗАЩИТА СЕТИ в положение ВКЛ. Включить тумблеры 1-2-3.

- 4.3 Выдержать генератор в таком состоянии 3 минуты.
- 4.4 Включить контрольный вольтметр. При необходимости установить диапазон измерения напряжения (рабочий диапазон 0 - 30 В).
- 4.5 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.
- 4.6 Запуск развертки установить по растущему фронту сигнала на уровне ~ 1 В, начало развертки сместить на 3 клетки влево от середины экрана осциллографа.
- 4.7 Перевести осциллограф в режим одиночного запуска (ждущий режим для регистрации однократных процессов) нажав кнопку «Single» на лицевой панели прибора.
- 4.8 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! Помните о коэффициенте преобразования показаний вольтметра!
- 4.9 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.
5. Установить нулевые значения напряжений питания делителя и анода детектора ССДИ38-01 путем вращения ручек регулировки напряжения СБПК20 до упора влево.
6. Включить питание СБПК20 при помощи тумблеров СЕТЬ на лицевой панели прибора. Постепенно вращая ручки СБПК20 вправо, установить значения

напряжения делителя ССДИЗ8 минус 4 кВ, напряжение анода – плюс 750 В. Напряжения контролировать по шкале СБПК20, переключаясь между выходами положительной и отрицательной полярности при помощи тумблера, расположенного под индикатором.

7. Включить осциллограф. Установить следующие параметры осциллографа: масштаб шкалы напряжения 2 В/ дел, шкалы времени – 10 нс/ дел. Множитель пробника должен быть x1, входное сопротивление канала 1 МОм, ограничение полосы пропускания отключено. При установке уровня нулевой линии, учитывайте, что сигнал детектора имеет отрицательную полярность.

Запуск осциллографа следует осуществлять по падающему фронту сигнала с порогом запуска минус 2-3 В от нулевой линии. Установите время запуска на 1-2 деления от начала развертки.

Переведите осциллограф в режим ожидания однократного запуска.

8. Зарядить емкостный накопитель ИНГ-103 до 21 кВ и выполнить рабочее срабатывание генератора п.п. 4.8 – 4.9. Зарегистрировать импульсы рентгеновского излучения и нейтронов на экране цифрового осциллографа.

Записать величину нейтронного выхода по показаниям прибора ТПИВН.

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

В случае, если на экране осциллографа наблюдаются два импульса отрицательной полярности с амплитудой не менее 2 делений, разнесенные во времени не менее, чем на 50 нс, сохраните результат в формате изображения, а также в формате таблицы данных «время - амплитуда», например, в формате *.csv. Если наблюдается двойной или тройной импульс, повторно выполните п. 8.

В случае, если осциллограф не запустился, уменьшите вдвое порог запуска и цену деления В/дел. В случае, если сигнал детектора превышает предел измерений осциллографа, установите аттенюатор или увеличьте цену деления В/дел.

9. В любой программе математической обработки данных по сохраненной осциллограмме измерить и записать длительности импульсов рентгеновского

излучения и нейтронов на половине высоты и интервал времени между импульсами.

10. По формулам (1), (2) определить скорость нейтронов и вычислить их энергию (с погрешностью). Сравнить полученный результат с табличным значением для D-D реакции. Объяснить различие, если оно наблюдается.
11. После окончания измерений выключить установку:
 - 11.1 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.
 - 11.2 Выключить контрольный вольтметр и осциллограф стенда ИНГ-103.
 - 11.3 Выключить ТПИВН, нажав кнопку ВЫКЛ на панели БРП.
 - 11.4 Выключить питание детектора ССДИ38 путем вращения ручек регулировки напряжения СБПК20 до упора влево.
 - 11.5 Выключить СБПК20 при помощи тумблеров СЕТЬ.
 - 11.6 Выключить осциллограф.

Контрольные вопросы

1. Какие реакции используются в камерах ПФ для генерации нейтронов? Какие энергии при этом имеют сгенерированные нейтроны?
2. В чем причина разновременности прихода на детектор импульса нейтронного излучения и гамма-излучения?
3. Из источника одновременно в одном направлении вылетели два гамма кванта с энергиями 1 и 2 МэВ. Насколько быстрее гамма квант с энергией 2 МэВ долетит до детектора, расположенного на расстоянии 1 метр от источника?
4. Какую скорость имеют 14,1 МэВ-ные нейтроны?
5. Какие энергии имеют нейтроны при дейтерий-третиевом наполнении камер ПФ?

6. Какие могут быть причины увеличения длительности импульса нейтронного излучения по сравнению с импульсом гамма-излучения?
7. Почему для детектирования импульсного нейтронного излучения используются пластмассовые сцинтилляторы?
8. Нарисовать форму осциллограммы импульса нейтронов при дейтериевом и дейтерий-тритиевом наполнении камер ПФ.
9. Вычислить "длину" импульса нейтронов (генератора ИНГ-103) в пространстве при дейтериевом и дейтерий-тритиевом наполнении камеры ПФ.