

НЕЙТРИННЫЙ ДЕТЕКТОР НА ИМПУЛЬСНОМ РЕАКТОРЕ БИГР

A NEUTRINO DETECTOR AT THE BIGH PULSED REACTOR

А. А. Сушко, А. Н. Бабайкин

A. A. Sushko, A. N. Babaikin

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров Нижегородской обл.

Federal Nuclear Center of Russia – All-Russia Research Institute of Experimental Physics

В статье представлено описание параметров нейтринного детектора при реализации проекта на импульсном реакторе БИГР РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров).

Введение

Еще в середине 60-х годов XX века советские физики предлагали использовать для нейтринных исследований импульсные ядерные реакторы (см. [1] и ссылки к ней).

Использование импульсного реактора дает, по крайней мере, два преимущества:

1. Измерение эффекта и фона можно проводить с незначительным разрывом по времени, что снижает требования к стабильности аппаратуры.

2. Нейтринные измерения будут проводиться при фактически неработающем реакторе, так как нейтронный и нейтринный импульсы будут разнесены по времени. В связи с этим можно получить зависимость β -распадов от времени после акта деления в реакторе.

В то же время ряд авторов высказывали значительный скепсис по поводу целесообразности создания таких детекторов. Так в [2] указано на то, что спектры антинейтрино от реактора при пуске реактора устанавливаются с некоторым запозданием. Время запоздывания отличается для различных энергетических интервалов и составляет от десятков минут до нескольких часов.

При условии уменьшения числа антинейтрино в актах распада продуктов деления U^{235} не находящемся в условиях векового равновесия или смягчения спектра антинейтрино число событий на акт деления уменьшится по сравнению со стационарным спектром.

В настоящей работе проведена оценка параметров нейтринного детектора на базе импульсного реактора БИГР РФЯЦ-ВНИИЭФ.

1. Основные характеристики реактора БИГР

Подробно параметры реактора БИГР представлены в [3].

Реактор БИГР один из наиболее мощных импульсных реакторов в мире максимальное энерговыделение реактора в импульсе составляет 300 МДж ($\sim 1 \cdot 10^{19}$ делений имп.⁻¹). Поэтому если делать нейтринный детектор на импульсном реакторе, то наиболее целесообразно его устанавливать на реакторе БИГР.

Схема активной зоны (АЗ) реактора приведена на рис. 1.

Реактор не имеет отражателя. АЗ в сомкнутом состоянии имеет форму полого цилиндра с внешним диаметром 76 см и внутренним – 18 см, высота цилиндра 67 см, ориентация – вертикальная.

В качестве топливного материала в реакторе используется спрессованная однородная смесь двуокиси урана с графитом. Отношение ядер углерода к ядрам U^{235} составляет ~ 16 . Обогащение урана изотопом U^{235} равно 90 %.

Реактор БИГР может работать в различных режимах. Энерговыделение в импульсе колеблется от 130 до 300 МДж. Форма импульсов делений реактора БИГР для различных режимов работы приведена на рис. 2.

Время охлаждения реактора после импульса с энерговыделением 300 МДж равно 24 часа.

2. Параметры нейтринного детектора на реакторе БИГР

Реактор БИГР расположен в специальном здании, схема которого представлена на рис. 3 [4].

В здании реактора под реакторным залом находится большое практически пустое подвальное помещение размером $10 \times 11,5 \times 3,2$ м, т. е. объемом более 300 м^3 . Учитывая то, что АЗ реактора располагается в 70 см [3] от пола, толщина бетонного пола между реакторным залом и подвальным помещением составляет 1 м, кроме этого, площадь подвала под АЗ размером $\sim 1 \times 1$ м нельзя занимать из-за наличия там технологических приспособлений реактора, поэтому расположение нейтринного детектора ближе 3 м от АЗ невозможно.

Для измерения параметров потоков электронного антинейтрино от реактора наиболее удобно использовать реакцию



Реакция (1) пороговая с порогом $E_{\bar{\nu}_e} = 1,8 \text{ МэВ}$.

Оценим объем детектора, который обеспечит значимую статистическую величину количества реакций (1). Для этого возьмем жидкий сцинтиллятор CH_2 со сцинтиллирующими добавками 2 % политерфенила и 0,5 % РОРОР.

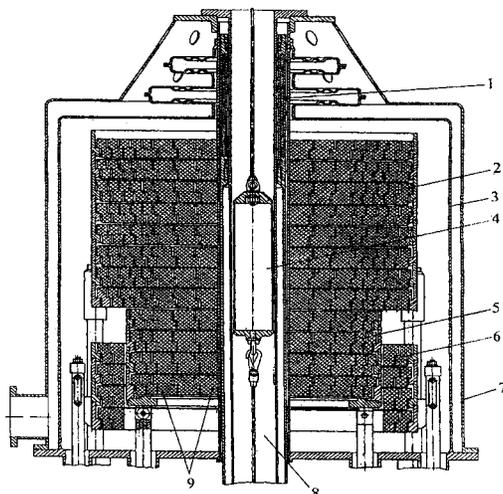


Рис. 1. Активная зона реактора БИГР: 1 – импульсный блок; 2 – неподвижная часть АЗ; 3 – корпус АЗ; 4 – контейнер для облучаемых образцов; 5 – блок грубого регулирования реактивности; 6 – блок точного регулирования реактивности; 7 – кожух охлаждения; 8 – осевая полость; 9 – топливные кольца АЗ

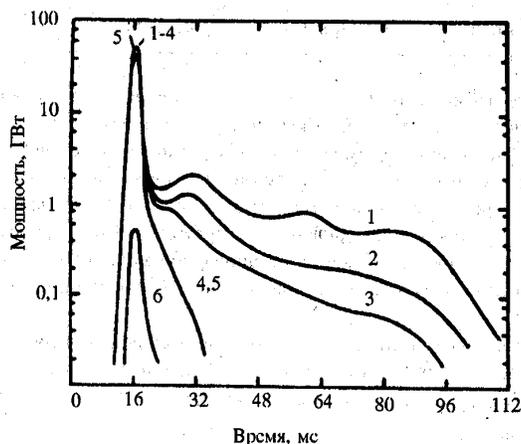


Рис. 2. Форма импульса делений при различных режимах работы реактора БИГР

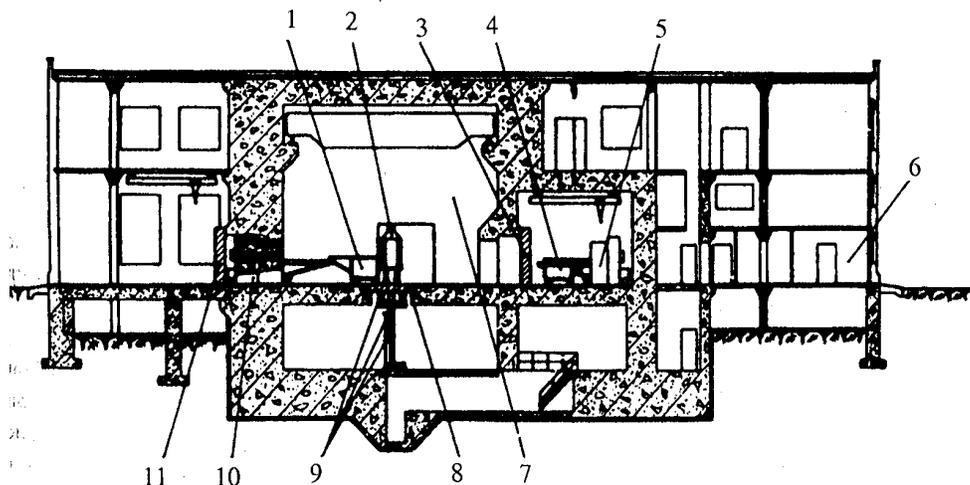


Рис. 3. Схема здания реактора БИГР: 1,4 – тележки для образцов; 2 – АЗ; 3, 11 – откатные железные двери; 5, 10 – подвижная биологическая защита, 6 – лаборатории, 7 – реакторный зал, 8 – опорная плита, 9 – механизмы перемещения блока регулирования реактивности

Для каждой частицы вероятность провзаимодействовать с протоном в сцинтиляторе составляет $p = 1 - e^{-l/L}$, где L – пробег, $L = \frac{1}{\sigma n}$, l – размер грани куба, т. е. $p = 1 - e^{-l\sigma n} \approx l\sigma n$.

Число реакций за импульс:

$$N = \frac{1 \cdot 10^{19}}{4\pi R^2} l^2 \cdot p = \frac{1 \cdot 10^{19}}{4\pi R^2} \sigma n l^3. \quad (2)$$

Для сцинтиллятора CH_2 плотностью атомов водорода $n = 9,12 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, сечение реакции (1) $\sigma = 6,1 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2 \cdot \text{дел.}^{-1}$ [1], тогда из (2) при $R = 3 \text{ м}$ получим:

$$N = 4,97 \cdot 10^{-7} l^3$$

Таким образом, для получения 5 реакций (1) в импульсе необходим объем сцинтиллятора $\sim 10 \text{ м}^3$.

В реакции (1) рождается нейтрон с энергией $E_n \sim 10 \text{ кэВ}$ и позитрон с энергией $E_{e^+} = E_{\bar{\nu}_e} - 1,8 \text{ МэВ} - E_n$. Учитывая спектр антинейтрино из [1] для распада U^{235} , легко получить спектр позитронов со средней энергией $\bar{E}_{e^+} \approx 1,2 \text{ МэВ}$.

Регистрация реакции (1) проводится по методу тройных совпадений: сначала регистрируются две вспышки от аннигиляционных гамма-квантов с энергией $0,511 \text{ МэВ}$, затем вспышка от захватных гамма-квантов на гадолинии с общей энергией в несколько МэВ.

Исследуем наиболее оптимального расположения ФЭУ и размеров сцинтиллятора с точки зрения регистрации этих событий.

Количество энергии первичного гамма-кванта, которое переходит в один квант видимого света, падающий на ФЭУ, равно $\sim 130 \text{ эВ}$. Таким образом, от одного гамма-кванта с энергией $0,511 \text{ МэВ}$ рождается ~ 4000 квантов видимого света. Расчет показал, что для того, чтобы каждая вспышка от аннигиляционного гамма-кванта была зарегистрирована по меньшей мере двумя ФЭУ (диаметр ФЭУ был выбран равным 19 см , условие регистрации – попадание по меньшей мере 3 световых квантов на ФЭУ) независимо от места вспышки размер сцинтиллятора должен быть $2 \times 2 \times 2 \text{ м}$, ФЭУ должны располагаться в вершинах данного куба с направлением на центр куба. В подвальном помещении реакторного здания БИГР можно расположить крестообразно 4 таких куба. Т.е. общий объем сцинтиллятора будет равен 32 м^3 , количество реакций (1) за импульс реактора БИГР будет равно 16.

Учитывая тот факт, что в течение года количество пусков реактора БИГР равно 70÷80, получим 1000÷1200 событий (1) за год.

По программе С-95 [5] методом Монте-Карло исследован вопрос о количестве гадолиния, которое необходимо добавить в сцинтиллятор для эффективного поглощения нейтронов, рожденных в реакции (1).

Полученные результаты представлены на рис. 4 и 5.

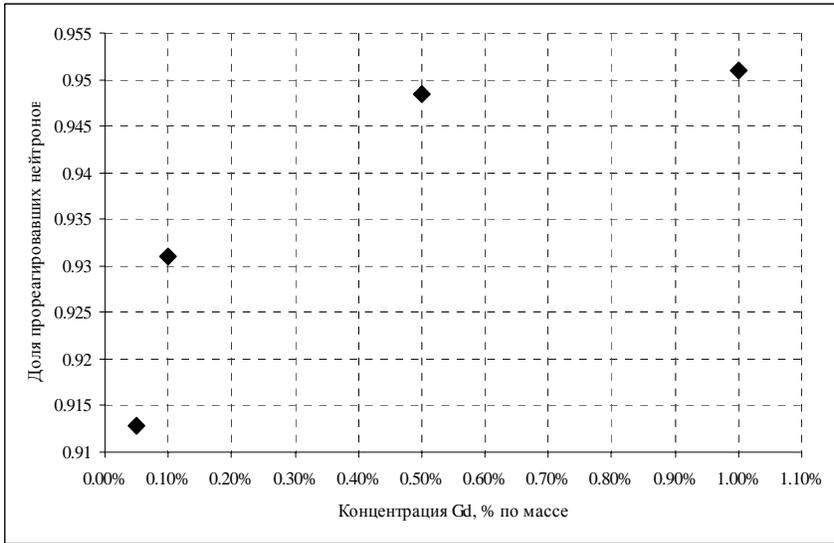


Рис.4. Доля нейтронов, захваченных гадолинием в детекторе

На рис. 4 приведена доля захваченных гадолинием нейтронов, рожденных в реакции (1). Видно, что увеличение доли гадолиния выше 0,5 % по массе не приводит к заметному увеличению доли захваченных нейтронов. Так доля захваченных нейтронов при 0,5 % гадолиния по массе будет равна 0.948, а при 1 % по массе – 0.951.

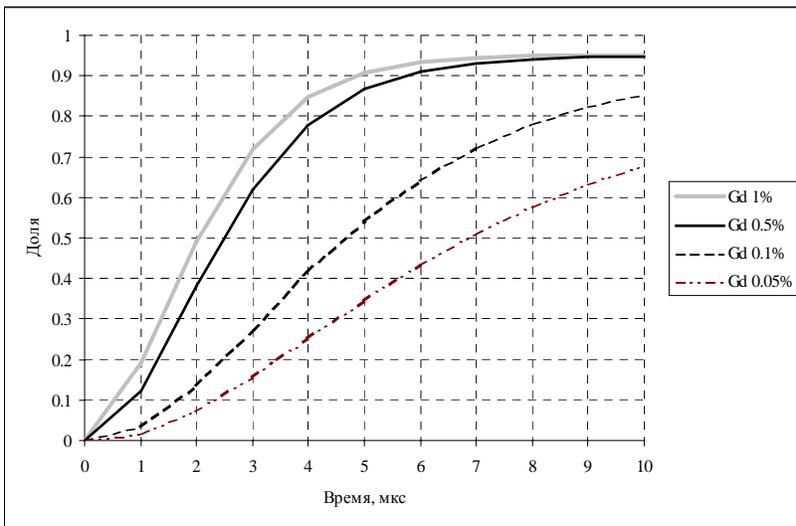


Рис. 5. Время захвата нейтронов от момента их рождения в сцинтилляторе

На рис. 5 приведены данные по захвату нейтронов, рожденных в реакции (1), от момента их рождения. Также видно, что временные зависимости захвата нейтронов для сцинтиллятора с 0,5 % и с 1 % гадолиния по массе отличаются незначительно. Важно отметить, что при 0,5 % гадолиния в течение 6 мкс после реакции (1) захватывается более 90 % нейтронов.

Расчет по программе С-95 показал, что в объеме сцинтиллятора размером $2 \times 2 \times 2$ м аннигилирует 0,9967 родившихся в реакции (1) позитронов. Причем основная их часть (более 90 %) аннигилирует за время несколько нс.

Зависимость числа фотонов в сцинтиляторе от времени от гамма-кванта аннигиляции приведена на рисунке 6. Максимальный поток фотонов равен $315 \text{ фотон} \cdot \text{нс}^{-1}$.

3. Фоновый сигнал

Рассмотрим параметры фонового сигнала в нейтринном детекторе от нейтронов деления реактора. Причем отметим, что необходимо рассматривать как фоновый сигнал от мгновенных нейтронов, так и фоновый сигнал от запаздывающих нейтронов, которых приблизительно на два порядка меньше, чем мгновенных, но которые будут выделяться из реактора после импульса в течение минут.

Для защиты от нейтронов реактора нейтринный детектор был окружен со всех сторон защитой в 20 см свинца и 40 см полиэтилена.

Расчет параметров нейтронного и гамма-фонов в сцинтиляторе проводился по программе С-95 методом Монте-Карло.

После импульса реактора нейтроны от мгновенных делений в сцинтиляторе исчезают в течении 1 мкс.

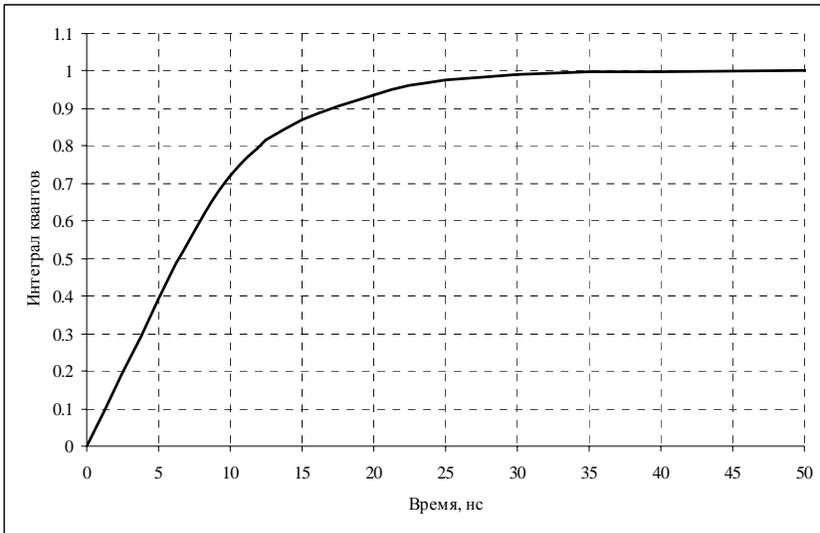


Рис. 6. Число фотонов в сцинтиляторе, излучаемое гамма-квантом аннигиляции (относительная величина)

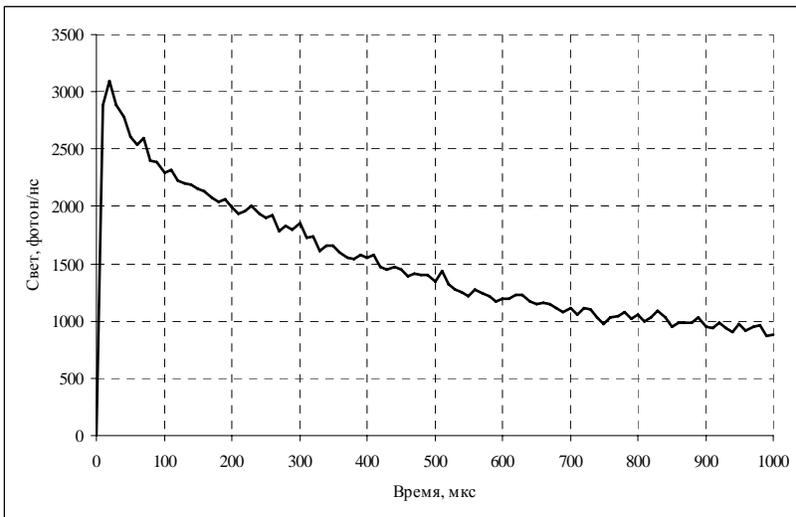


Рис. 7. Число фотонов в сцинтиляторе от мгновенных нейтронов деления в реакторе

На рис. 7 представлена зависимость потока фотонов видимого света в сцинтиляторе детектора, рожденных в актах взаимодействия гамма-квантов с материалом сцинтилятора. Максимальное значение потока фотонов от мгновенных нейтронов составляет $3100 \text{ фотон}\cdot\text{нс}^{-1}$.

Из рис. 7 легко установить, что количество фотонов уменьшается на $\sim 10\%$ за каждые 100 мкс. Таким образом, нетрудно установить, что поток фотонов от мгновенного деления в реакторе станет ниже $315 \text{ фотон}\cdot\text{нс}^{-1}$ через 2–3 мс после импульса реактора.

Рассмотрим фоновые характеристики от запаздывающих нейтронов.

Для реактора БИГР $\beta_{\text{эфф}} = 0,0078$ [3], количество запаздывающих нейтронов на одно деление для U^{235} равно $1,712 \cdot 10^{-2}$ [6].

Спектры запаздывающих нейтронов взяты из библиотеки констант В-VI и приведены на рис. 8. Значения λ_i и a_i для шести групп запаздывающих нейтронов U^{235} приведены в таблице [7].

Зависимости потоков фотонов от запаздывающих нейтронов в объеме сцинтилятора от времени приведены на рис. 9.

Максимальное значение потока фотонов от запаздывающих нейтронов в сцинтиляторе составляет $285 \text{ фотон}\cdot\text{нс}^{-1}$, а через 5 с после импульса это значение становится $\sim 20 \text{ фотон}\cdot\text{нс}^{-1}$.

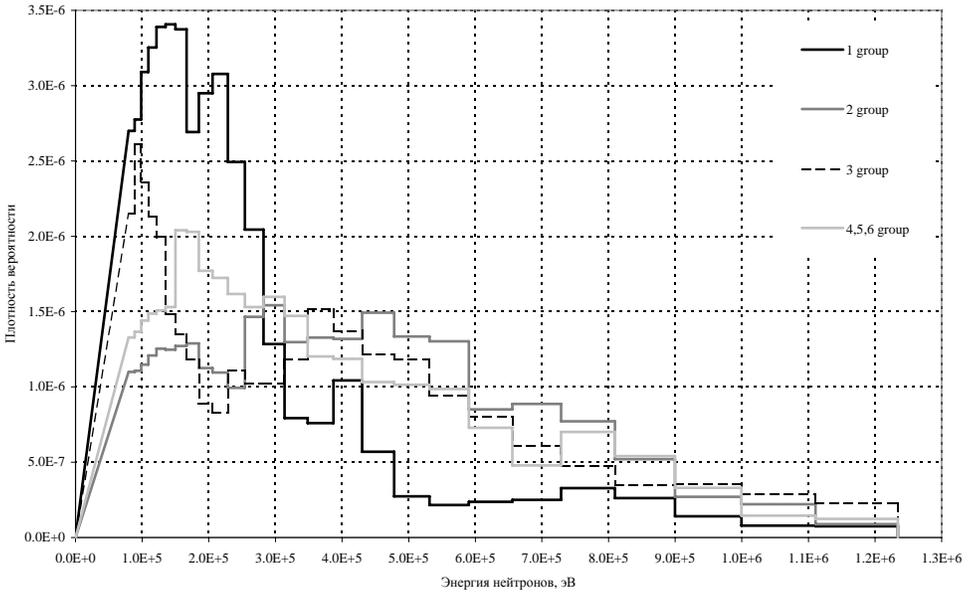


Рис. 8. Спектр запаздывающих нейтронов (библиотека В-VI)

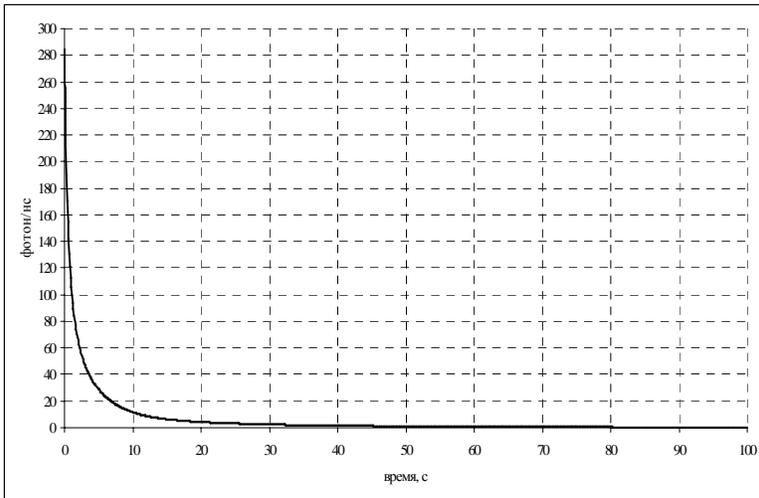


Рис. 9. Число фотонов от запаздывающих нейтронов в объеме сцинтилятора

Параметры λ_i и a_i для шести групп запаздывающих нейтронов от осколков деления U^{235}

Параметр	Номера групп					
	1	2	3	4	5	6
λ_i, c^{-1}	0,01245	0,0305	0,111	0,301	1,14	3,01
$10^2 a_i$	0,053	0,322	0,337	0,632	0,255	0,105

Как показывают антинейтринные эксперименты на реакторах [1, 2] надежная регистрация антинейтринно возможна при отношении полезный сигнал / фон $\geq 0,1$. Таким образом, можно сделать вывод, что при выбранной защите и расположении сцинтиллятора возможен на регистрация события (1) в любой момент времени, в том числе и во время основного импульса реактора БИГР.

Заключение

Рассмотрена возможность создания нейтринного детектора на базе импульсного реактора БИГР (г. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ).

Показано, что при использовании четырех секционного детектора с объемом каждой секции $2 \times 2 \times 2$ м и защитой 20 см свинца и 40 см полиэтилена при существующем режиме работы реактора в объеме сцинтиллятора будет происходить 1000–1200 нейтринных реакций в год.

Для регистрации нейтринного события в объем сцинтиллятора необходимо добавить 0,5 % гадолиния по массе.

Фон фотонов от мгновенных нейтронов в объеме сцинтиллятора в максимуме составляет 3100 фотон \cdot нс $^{-1}$ и спадает до уровня 315 фотон \cdot нс $^{-1}$ через 2–3 мс после импульса. Фон от запаздывающих нейтронов составляет в максимуме 285 фотон \cdot нс $^{-1}$. Учитывая, что максимальный поток фотонов от гамма-кванта аннигиляции равен 315 фотон \cdot нс $^{-1}$, можно сделать вывод, что регистрация нейтринного события возможна в любой момент времени, в том числе и в момент выдачи импульса реактором БИГР.

Список литературы

1. Боровой А. А., Хакимов С. Х. Нейтринные эксперименты на ядерных реакторах. М., Энергоатомиздат, 1990. С. 15–19, 35–36, 46–47.
2. Боровой А. А. // ЭЧАЯ, т. 11, в. 1, 1980. С. 92–131.
3. Колесов В. Ф. Аперiodические импульсные реакторы. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1999. С. 60–66.
4. Кувшинов М. И., Колесов В. Ф., Воинов А. В., Смирнов И. Г. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки. 1988, вып. 1, с. 3–12.
5. Кочубей Ю. К., Житник А. К., Артемьева Е. В., Донской Е. Н., Ельцов В. А. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Методики и программы численного решения задач математической физики. 2000. В. 2. С. 49.
6. Маневич Л. Г., Немировский П. Э., Юдкевич М. С. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1988, № 2, с. 3–12.
7. Маневич Л. Г., Немировский П. Э., Юдкевич М. С. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1988, № 2, с. 13–22.