

Создание нейтринной лаборатории для проведения эксперимента по поиску стерильного нейтрино на реакторе СМ-3

© А.П. Серебров,¹ В.Г. Ивочкин,¹ Р.М. Самойлов,¹ А.К. Фомин,¹ В.Г. Зиновьев,¹ П.В. Неустроев,¹ В.Л. Головцов,¹ Н.В. Грузинский,¹ В.А. Соловей,¹ А.В. Чёрный,¹ О.М. Жеребцов,¹ В.П. Мартемьянов,² В.Г. Цинюев,² В.Г. Тарасенков,² В.И. Алёшин,² А.Л. Петелин,³ С.В. Павлов,³ А.Л. Ижутов,³ С.А. Сазонтов,³ Д.К. Рязанов,³ М.О. Громов,³ В.В. Афанасьев,³ Л.Н. Матросов,¹ М.Ю. Матросова¹

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова,
188300 Гатчина, Россия

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
123182 Москва, Россия

³ ОАО «ГНЦ НИИАР»,
433510 Димитровград, Россия
e-mail: serebrov@pnpi.spb.ru

(Поступило в Редакцию 23 апреля 2015 г.)

В связи с вопросом о возможности существования стерильного нейтрино на реакторе СМ-3 создана нейтринная лаборатория для поиска осциллирующих реакторных антинейтрино. Прототип нейтринного детектора с объемом сцинтиллятора 400 л перемещается на расстояниях 6–11 м от активной зоны реактора. Проведены измерения фоновых условий. Показано, что основную проблему эксперимента составляет фон космического излучения. Обсуждены перспективы поиска осциллирующих реакторных антинейтрино на коротких расстояниях.

Введение

В настоящее время активно обсуждается возможность существования стерильного нейтрино, имеющего значительно меньшее сечение взаимодействия с веществом, чем, например, электронные антинейтрино от реактора. Предполагается, что благодаря переходу реакторных антинейтрино в стерильное состояние может наблюдаться эффект осцилляций на коротких расстояниях от реактора и дефицит потока реакторных антинейтрино на больших расстояниях [1,2]. Кроме того, стерильные нейтрино рассматриваются в качестве кандидатов на темную материю.

Отношение наблюдаемого в экспериментах нейтринного потока к предсказанному потоку оценивается как 0.927 ± 0.023 [1]. Данный эффект составляет 3 стандартных отклонения. Этого еще не достаточно, чтобы иметь уверенность в существовании реакторной антинейтринной аномалии. Метод сравнения измеренного потока антинейтрино с ожидаемым потоком от реактора является неудовлетворительным из-за проблем точного вычисления потока антинейтрино из реактора и эффективности детектора антинейтрино.

Идея осцилляций может быть проверена прямыми измерениями эффекта вариации потока и спектра антинейтрино на коротких расстояниях от реактора. Детектор должен перемещаться, а также быть спектрально-чувствительным. В нашем эксперименте ставится задача подтвердить или опровергнуть на определенном уровне точности возможность существования стерильного нейтрино. Для поиска осцилляций, обусловленных переходом в стерильное нейтрино, необходимо зарегистриро-

вать вариацию потока реакторных антинейтрино. Если такой процесс существует, то он может описываться уравнением осцилляций

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m_{14}^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{E_{\bar{\nu}} [\text{MeV}]} \right), \quad (1)$$

где $E_{\bar{\nu}}$ есть энергия антинейтрино, а неизвестными являются параметры осцилляций Δm_{14}^2 и $\sin^2 2\theta_{14}$.

Для осуществления эксперимента необходимо провести измерения потока антинейтрино и спектра на коротких расстояниях, например 6–12 м, от практически точечного источника антинейтрино.

Нами была изучена возможность постановки новых экспериментов на исследовательских реакторах России. Именно исследовательские реакторы необходимы для этих экспериментов, так как они обладают компактной активной зоной и достаточно малым расстоянием до возможного места размещения нейтринного детектора. К сожалению, в зале пучков исследовательского реактора имеется большой фон нейтронов и гамма-квантов, который весьма затрудняет постановку низкофоновых нейтринных экспериментов. Наилучшие условия для проведения эксперимента по поиску нейтринных осцилляций на коротких расстояниях существуют на реакторе СМ-3 в силу некоторых особенностей его конструкции.

1. Реактор СМ-3

Первоначально 100-мегаваттный реактор СМ-3 был разработан для проведения как пучковых, так и петлевых

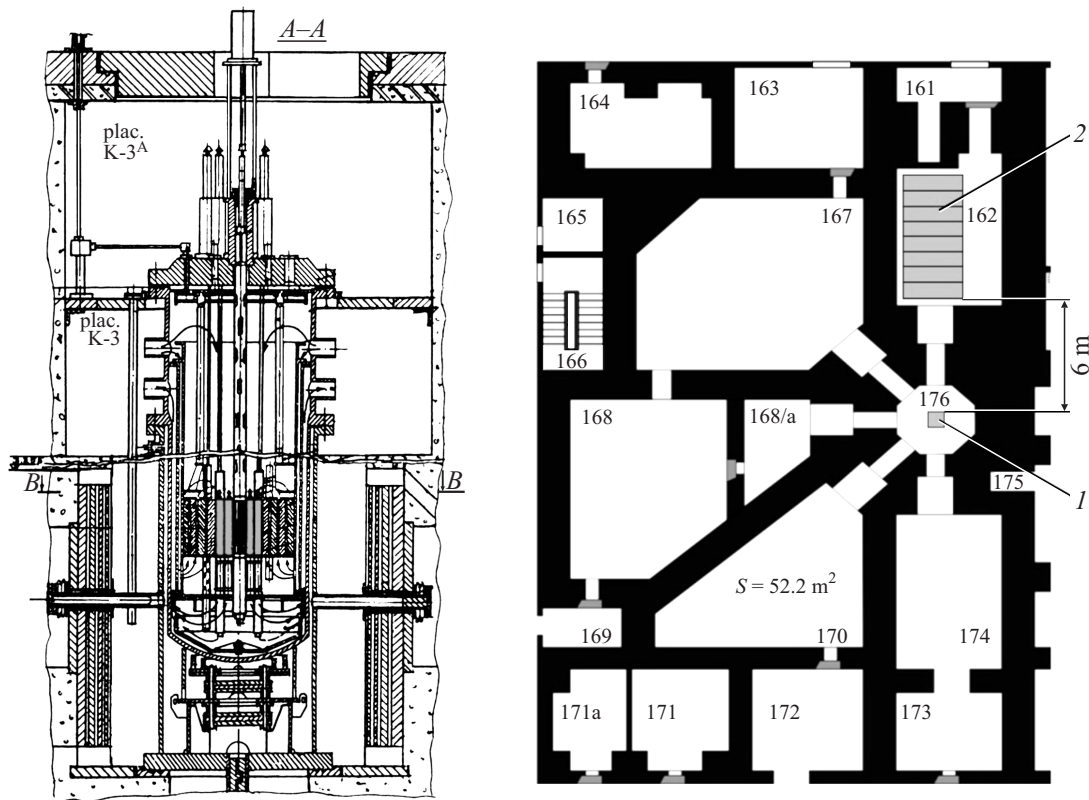


Рис. 1. Расположение детектора на реакторе SM-3: 1 — активная зона реактора, 2 — детектор антинейтрино.

экспериментов. Было создано 5 пучковых помещений, отделенных друг от друга мощными бетонными стенами толщиной ~ 1 м (рис. 1). Это позволяло проводить эксперименты на нейтронных пучках, не меняя фоновые условия на соседних установках. Впоследствии основная программа экспериментов была сосредоточена на задачах, связанных с облучениями в активной зоне реактора. Через 25 лет был накоплен достаточно высокий флюенс на материалах корпуса реактора, поэтому возникла необходимость его замены. Было принято наиболее простое решение — установить новый корпус реактора в старый реакторный бак. Однако при таком решении активную зону реактора пришлось поднять на 67 см выше прежнего положения. Горизонтальными пучковыми каналами пришлось пожертвовать из-за приоритета петлевых экспериментов. Нейтронный поток в месте расположения бывших пучковых каналов упал на четыре порядка величины. Соответственно упал нейтронный фон в бывших пучковых помещениях, он составил приблизительно $4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (по тепловым нейтронам). Это приблизительно на 4–5 порядков величины ниже, чем типичный нейтронный фон в зале пучков исследовательского реактора. В последнее время с целью подготовки эксперимента по поиску переходов реакторных антинейтрино в стерильное состояние на реакторе SM-3 были проведены работы по модернизации шибера устройства бывшего нейтронного пучка.

В результате фон быстрых нейтронов упал до уровня нескольких единиц на $10^{-3} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, т.е. практически до уровня нейтронных потоков на поверхности Земли, связанных с космическим излучением.

Такие условия являются наиболее предпочтительными для проведения нейтринного эксперимента. Другими преимуществами реактора SM-3 являются компактная зона реактора — $35 \times 42 \times 42$ см при высокой мощности реактора — 100 MW, а также короткое расстояние от центра активной зоны до стенки экспериментального зала — 5 м. Кроме того, исключительно важно, что поток антинейтрино может измеряться в достаточно широком диапазоне расстояний — от 6 до 13 м. При мощности реактора 100 MW, на расстоянии 6 м от активной зоны в объеме 1 м^3 ожидается до $1.8 \cdot 10^3$ нейтринных событий в сутки.

2. Модель нейтринного детектора и ее испытания на реакторе ВВР-М

С целью подготовки к эксперименту „Нейтрино-4“ на реакторе SM-3 мы выполнили экспериментальные исследования на модели детектора „Нейтрино-4“ на реакторе ВВР-М [3–6]. Задачей эксперимента являлась регистрация антинейтрино от реактора в условиях значительного фона космического излучения на поверхности

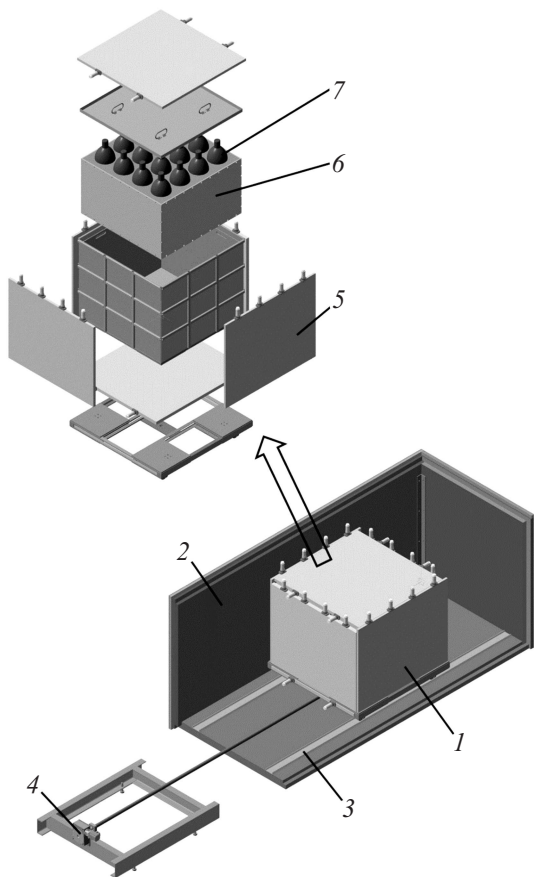


Рис. 2. Схема детектора: 1 — детектор реакторных антинейтрино, 2 — пассивная защита из свинца (6 см) и борированного полиэтилена (16 см), 3 — рельсы, 4 — устройство для перемещения детектора, 5 — пластины активной защиты, 6 — жидкий сцинтиллятор, 7 — ФЭУ.

Земли, а также в условиях нейтронного и гамма-фона в экспериментальном зале исследовательского реактора. Этот эксперимент должен был прояснить принципиальную возможность постановки такого эксперимента на реакторе СМ-3. Эксперимент показал, что основную проблему составляет фон космического излучения, дающий коррелированные события, которые трудно отличить от событий регистрации реакторных антинейтрино. Нейтронный и гамма-фон экспериментального зала может быть подавлен на 4–5 порядков величины пассивной защитой из свинца, борированного полиэтилена и бетона. Важно отметить, что оптимальной последовательностью размещения слоев защиты является: бетон снаружи, далее свинец и затем борированный полиэтилен внутри. Внутренний слой борированного полиэтилена необходим для того, чтобы защититься от нейтронов, рожденных мюонами на свинце, тем более, что этот процесс может давать коррелированные события. После испытаний модель детектора была перенесена на реактор СМ-3.

Схема модели детектора „Нейтрино-4“ представлена на рис. 2. Объем детектора $0.9 \times 0.9 \times 0.5$ м заполнен жидким сцинтиллятором с добавкой гадолиния. В детекторе используется 16 фотоэлектронных умножителей ФЭУ-49Б, расположенных на верхней поверхности детектора. Детектор сцинтилляционного типа основан на использовании реакции $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$. Сначала детектор регистрирует позитрон, энергия которого определяется энергией антинейтрино, а также регистрирует 2 аннигиляционных гамма-кванта с энергией по 511 кеВ. Возникающий в реакции нейтрон поглощается гадолинием (Gd) с образованием каскада гамма-квантов с суммарной энергией около 8 МеВ. В детекторе регистрируется два последовательных сигнала от позитрона и нейтрона (коррелированные события).

Спектр антинейтрино восстанавливается из спектра позитронов, так как в первом приближении связь между энергией позитрона и антинейтрино линейна: $E_{\bar{\nu}} = E_{e^+} + 1.8 \text{ МеВ}$. Материал сцинтиллятора — минеральное масло с добавкой Gd 1 г/л. Световыход сцинтиллятора BC 525 составляет 10^4 фотонов на 1 МеВ. Детектор окружен 6 сцинтилляционными пластинами $0.9 \times 0.9 \times 0.03$ м с ФЭУ, являющимися активной (антисовпаденческой) защитой от космических мюонов. После проведения пробных экспериментов на реакторе ВВР-М, исследования модели нейтринного детектора были перенесены на реактор СМ-3, где к этому времени были подготовлены помещение нейтринной лаборатории и пассивная защита детектора.

3. Пассивная защита нейтринного детектора на реакторе СМ-3

Общий вид пассивной защиты снаружи и изнутри представлен на рис. 3. Она собрана из элементов на основе стальных пластин 1×2 м толщиной 10 мм, к которым крепятся 6 листов свинца по 10 мм толщиной.



Рис. 3. Общий вид пассивной защиты снаружи и изнутри. Диапазон перемещений детектора в нейтринном канале составляет 6–12 м от активной зоны реактора.

Объем домика составляет $2 \times 2 \times 8$ м. Изнутри домик обшит пластинами борированного полиэтилена полной толщиной 16 см. Полный вес пассивной защиты 60 т, объем борированного полиэтилена 10 м^3 . Внутри пассивной защиты располагается платформа с детектором антинейтрино, которая может перемещаться с помощью шагового двигателя по рельсам в интервале расстояний 6–12 м от центра активной зоны реактора. Вход в нейтринный канал осуществляется по лестнице через крышу при убранном верхнем блоке, как показано на рис. 3. Загрузка самого детектора в нейтринный канал производится из главного зала через люк в потолке помещения. В этом случае используется мостовой кран главного зала.

4. Исследование фоновых условий для проведения эксперимента „Нейтрино-4“ на реакторе СМ-3 с помощью гамма- и нейтронных детекторов

4.1. Фон гамма-лучей в нейтринной лаборатории и внутри пассивной защиты нейтринного детектора

Для измерения спектра гамма-лучей использовался детектор NaI(Tl) 60×400 мм. Он обладает повышенной чувствительностью благодаря длине кристалла 400 мм. Спектр детектора демонстрирует наличие радиоактивных загрязнений ^{60}Co и ^{137}Cs и мюонный пик космического излучения. При включении реактора в спектре появляется счет гамма-квантов железа от захвата нейтрона в железобетонной защите реактора.

При работающем реакторе спектр фона гамма-излучения в интервале энергий от 3 до 8 MeV содержит в своем составе мгновенное гамма-излучение, возникающее при взаимодействии тепловых нейтронов с ядрами железа в конструкционных материалах. В этом энергетическом интервале интенсивность счета детектора в 22 раза больше при работающем реакторе, чем при заглушенном. Именно этот энергетический диапазон является исключительно важным, так как соответствует энергии гамма-квантов при захвате нейтронов гадолинием.

Гамма-излучение изотопов ^{137}Cs , ^{60}Co не зависит от режима работы реактора и связано с радиоактивными загрязнениями пола и стен помещения. Хотя заливка полов бетоном с металлической крошкой и реконструкция шиберного устройства снизили фон гамма-излучения в этом энергетическом интервале в 5–6 раз, фон гамма-излучения остается повышенным, что подтверждает необходимость создания пассивной защиты детектора от гамма-квантов.

Для оценки возможности подавления фона гамма-излучения при работающем реакторе были зарегистрированы спектры гамма-излучения в защите из свинцовых кирпичей при толщине стенки 5 см и без нее. Детектор

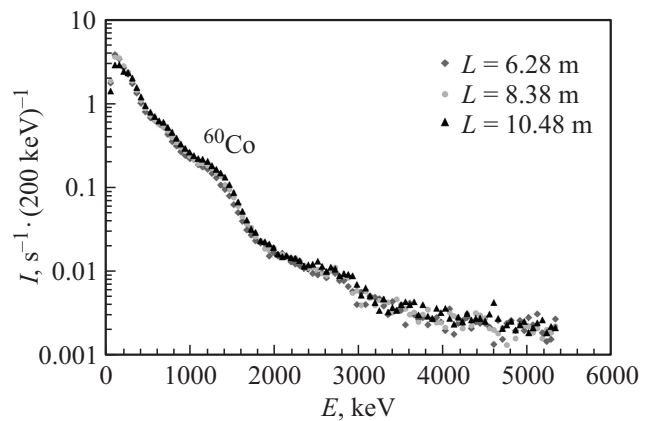


Рис. 4. Спектры гамма-излучения внутри защиты при перемещении детектора. Мощность реактора 90 MW. L — расстояние от центра активной зоны.

NaI (60×400 мм) был расположен на полу площадки для перемещения нейтринного детектора на расстоянии 4 м от шиберного устройства нейтринного канала. В энергетическом диапазоне от 1440–7200 keV (от ^{40}K и выше) 5 см свинца снижает уровень фонового гамма-излучения в 4.5 раза, что подтверждает целесообразность создания пассивной защиты детектора из свинца. Однако надо помнить, что внутри свинцовой защиты увеличивается нейтронный фон из-за взаимодействия космических мюонов с ядрами свинца. Действительно, такая же (5 см) свинцовая защита вокруг нейтринного детектора увеличивала его скорость счета в два раза. Поэтому внутри свинцовой защиты должна располагаться защита из борированного полиэтилена.

При работающем реакторе в спектре фонового гамма-излучения на крыше пассивной защиты присутствует повышенный фон от мгновенного гамма-излучения железа при захвате нейтрона. Счет гамма-квантов железа спадает при удалении от реактора. Измерения проводились на крыше пассивной защиты нейтринного детектора, на расстояниях 1, 4, 7 м, соответственно скорость счета по области энергий гамма-квантов от реакции (n, γ) на железе составляла 35.7, 13.7, 6.7 s^{-1} . Однако внутри пассивной защиты на расстоянии 0.5 м от стены реактора скорость счета в том же энергетическом диапазоне составила 1.1 s^{-1} . Форма гамма-спектра внутри пассивной защиты представлена на рис. 4 для разных расстояний вдоль пути нейтринного детектора: 6.28, 8.38, 10.48 м. Значимых изменений формы спектра не наблюдалось. Кроме того, для сравнения были измерены гамма-спектры при включенном и выключенном реакторе внутри пассивной защиты в точке, ближайшей к реактору. Значительной разницы в спектрах не было обнаружено.

Одинаковые фоновые условия вдоль пути передвижения нейтринного детектора внутри пассивной защиты исключительно важны для эксперимента по поиску нейтринных осцилляций.

4.2. Измерения потоков быстрых и тепловых нейтронов в помещении нейтринной лаборатории и внутри пассивной защиты нейтринного детектора

В течение 2013 г. на реакторе СМ-3 было подготовлено помещение для нейтринной лаборатории, смонтировано подъемно-транспортное оборудование для монтажа пассивной защиты нейтринного детектора. Шиберное устройство бывшего нейтронного канала было тщательно заглушено. В результате поток тепловых нейтронов в помещении нейтринной лаборатории уменьшился в 29 раз до уровня $(1-2) \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Этот уровень определяется нейтронами от космического излучения и практически не зависит от работы реактора. Измерения потока тепловых нейтронов производились ^3He -детектором, представляющим собой пропорциональный счетчик длиной 1 м и диаметром 30 см. Для регистрации быстрых нейтронов был использован такой же пропорциональный ^3He -детектор, но помещенный в защиту из полиэтилена (толщина слоя 5 см), который в свою очередь завернут в слой борированной резины (толщина 3 мм, содержание бора 50%). Таким образом, все фоновые тепловые нейтроны до попадания на ^3He -счетчик поглощаются борированной резиной, а быстрые нейтроны, проходящие через резину, термализуются полиэтиленом до энергии $E = 0.025 \text{ eV}$ и регистрируются ^3He -счетчиком. Коэффициент ослабления тепловых нейтронов борированной резиной составлял приблизительно 400 раз, надежно отделяя быстрые нейтроны от тепловых нейтронов. Для перевода скорости счета (с^{-1}) пропорционального ^3He -детектора в единицы плотности потока быстрых нейтронов ($\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) была проведена калибровка вновь созданного детектора быстрых нейтронов по показаниям стандартного детектора быстрых нейтронов МКС-АТ6102. Для этого оба детектора располагались рядом на расстоянии 3 м от нейтронного (Pu-Be) источника без термализатора. В результате был получен коэффициент связи скорости счета детектора и потока быстрых нейтронов $F^{\text{fast}}(\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}) = 0.033N^{\text{fast}}(\text{с}^{-1})$. Для калибровки ^3He -счетчика тепловых нейтронов использовали аналогичную методику со стандартным детектором тепловых нейтронов МКС-АТ6102 и нейтронным (Pu-Be) источником с водным замедлителем. Коэффициент связи между потоком тепловых нейтронов и скоростью счета детектора дается следующим соотношением $F^{\text{th}}(\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}) = 0.013N^{\text{th}}(\text{с}^{-1})$. Изготовленные таким образом детекторы тепловых и быстрых нейтронов обладают чувствительностью почти на два порядка величины выше, чем стандартные приборы. Они были использованы для проведения низкофоновых измерений в нейтринной лаборатории. Измерения нейтронного фона были сделаны до модернизации шибера бывшего нейтронного пучка, затем после его модернизации, и наконец, после установки пассивной защиты нейтринного детектора. Детектор быстрых нейтронов располагался на крыше пассивной защиты и непосредственно на

Распределение потока тепловых и быстрых нейтронов на крыше и внутри домика пассивной защиты, мощность реактора 90 MW

Поток тепловых нейтронов, $\text{с}^{-1}\text{см}^{-2}$	Поток быстрых нейтронов, $\text{с}^{-1}\text{см}^{-2}$	Место измерения
$(0.34 \pm 0.07) \cdot 10^{-5}$ $(17.7 \pm 1.2) \cdot 10^{-5}$ Фактор защиты $K_{\text{th}} = 53$	$(5.5 \pm 0.1) \cdot 10^{-5}$ $(69 \pm 2) \cdot 10^{-5}$ Фактор защиты $K_{\text{fast}} = 12$	В домике На крыше домика

реакторной стене, т.е. на расстоянии 5.1 м от активной зоны реактора. Фон быстрых нейтронов практически не зависит от мощности реактора. Он определяется нейтронами, возникающими от взаимодействия мюонов с ядрами окружающих материалов, в частности с ядрами свинца пассивной защиты. Однако внутренняя облицовка пассивной защиты (16 см борированного полиэтилена) подавляет этот поток в 12 раз. В таблице представлены значения потоков тепловых и быстрых нейтронов, измеренные внутри пассивной защиты и на крыше пассивной защиты, а также факторы подавления нейтронного фона благодаря пассивной защите.

Следующий важнейший вопрос — влияние реактора на поток быстрых нейтронов внутри пассивной защиты. С этой целью были проведены измерения потока быстрых нейтронов внутри пассивной защиты на ближней к реактору стене в течение приблизительно 10 дней при работающем реакторе и такого же времени после выключения реактора. Для включенного реактора поток быстрых нейтронов составил $(5.54 \pm 0.13) \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}\text{см}^{-2}$, а для выключенного реактора — $(5.38 \pm 0.13) \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}\text{см}^{-2}$, т.е. в пределах точности 2.5% не обнаружено разницы.

Еще более детальные измерения были проведены с детектором быстрых нейтронов, расположенным на крышке нейтринного детектора, который при этих измерениях перемещался вдоль нейтринного канала в диапазоне от 6.25 до 10.5 м. Результаты этих измерений при включенном и выключенном реакторе представлены на рис. 5.

В пределах статистической точности измерений не было обнаружено разницы в результатах между случаями, когда реактор включен или реактор выключен. Данный фон определяется космическим излучением. В этих измерениях уровень фона оказался равным $(8.5 \pm 0.1) \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}\text{см}^{-2}$, что несколько выше, чем у реакторной стены. Эта разница может объясняться положением детектора по отношению к направлению нейтронного потока — вертикальное положение у реакторной стены и горизонтальное положение на крышке нейтринного детектора.

Одинаковые условия нейтронного фона вдоль пути передвижения нейтринного детектора внутри пассивной защиты исключительно важны для эксперимента по по-

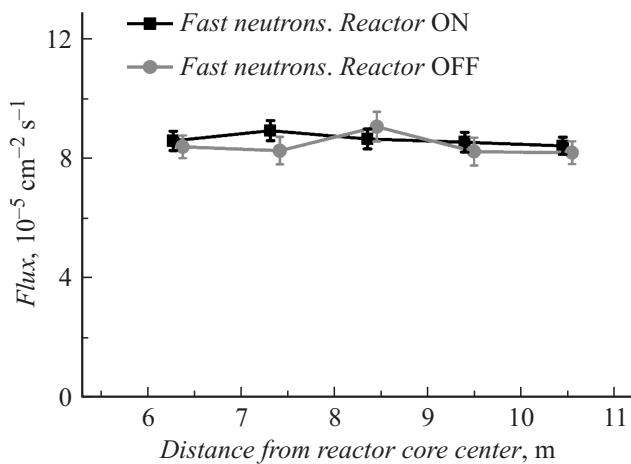


Рис. 5. Фон быстрых нейтронов на различных расстояниях от активной зоны реактора, измеренный с помощью детектора быстрых нейтронов внутри пассивной защиты. Детектор быстрых нейтронов находился на крышке нейтринного детектора и перемещался вместе с ним.

иску нейтринных осцилляций. Более точные измерения фоновых условий вдоль пути передвижения нейтринного детектора были сделаны с помощью самого нейтринного детектора, обладающего высокой эффективностью для различного рода излучений благодаря большому объему сцинтиллятора — 400 литров.

5. Исследование фоновых условий с помощью модели нейтринного детектора

5.1. Энергетическая калибровка детектора и калибровка его эффективности к регистрации нейтринных событий

Модель нейтринного детектора представляет собой 4001 жидкого сцинтиллятора BC-525 с концентрацией гадолиния 1 г/л. Описание его конструкции представлено в разд. 2. Энергетическая калибровка детектора была сделана с помощью гамма-источника ^{60}Co и нейтронного источника ^{252}Cf . Активность гамма-источника ^{60}Co составляла $557 \pm 55 \text{ s}^{-1}$. На каждый акт распада вылетает два гамма-кванта с энергией 1.17 и 1.33 MeV. При полном поглощении обоих гамма-квантов в детекторе выделяется энергия 2.5 MeV. При поглощении нейтрона гадолинием вылетает несколько гамма-квантов с полной энергией 8 MeV. В качестве нейтронного источника использовался ^{252}Cf с полным потоком нейтронов $(648 \pm 65) \text{ s}^{-1}$.

На рис. 6 представлены спектры от обоих источников, которые были получены как разность измерений с источником и без источника. В этом случае источники располагались в центре детектора. Они могли быть перемещены вдоль вертикального канала.

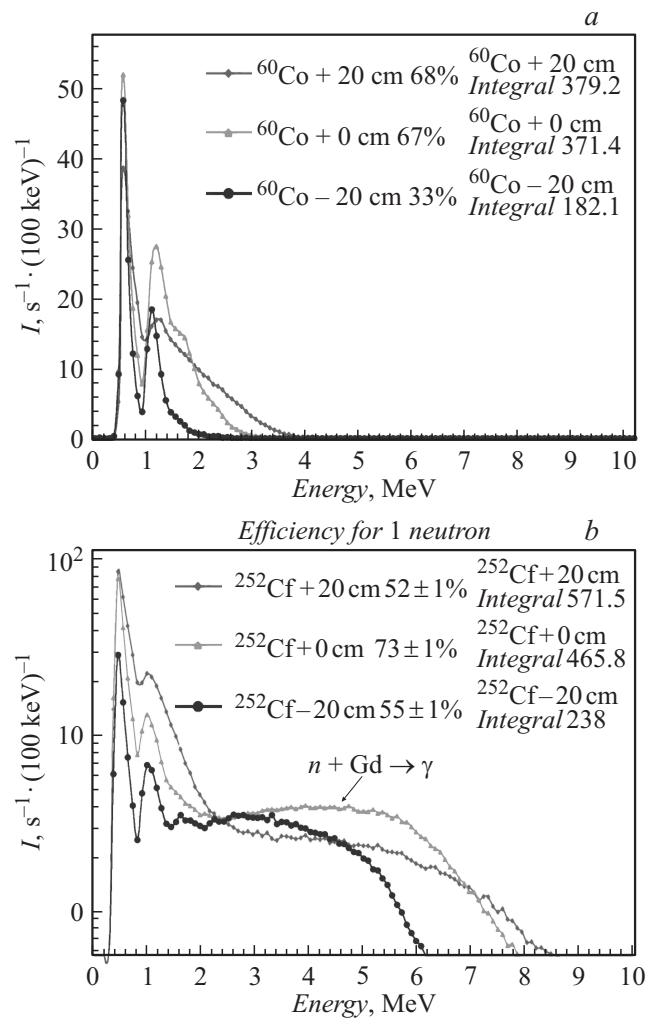


Рис. 6. Калибровка модели нейтринного детектора с помощью источника гамма-излучения (^{60}Co) и источника нейтронов (^{252}Cf). *a* — спектр излучений ^{60}Co для разных положений источника по высоте относительно центра, *b* — спектр излучений ^{252}Cf для разных положений источника по высоте относительно центра.

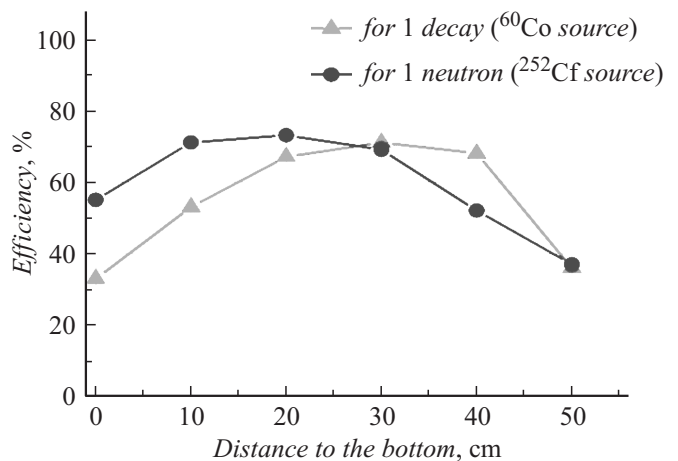


Рис. 7. Эффективность регистрации нейтронов и гамма-квантов от источников (^{252}Cf и ^{60}Co соответственно) в зависимости от их положения.

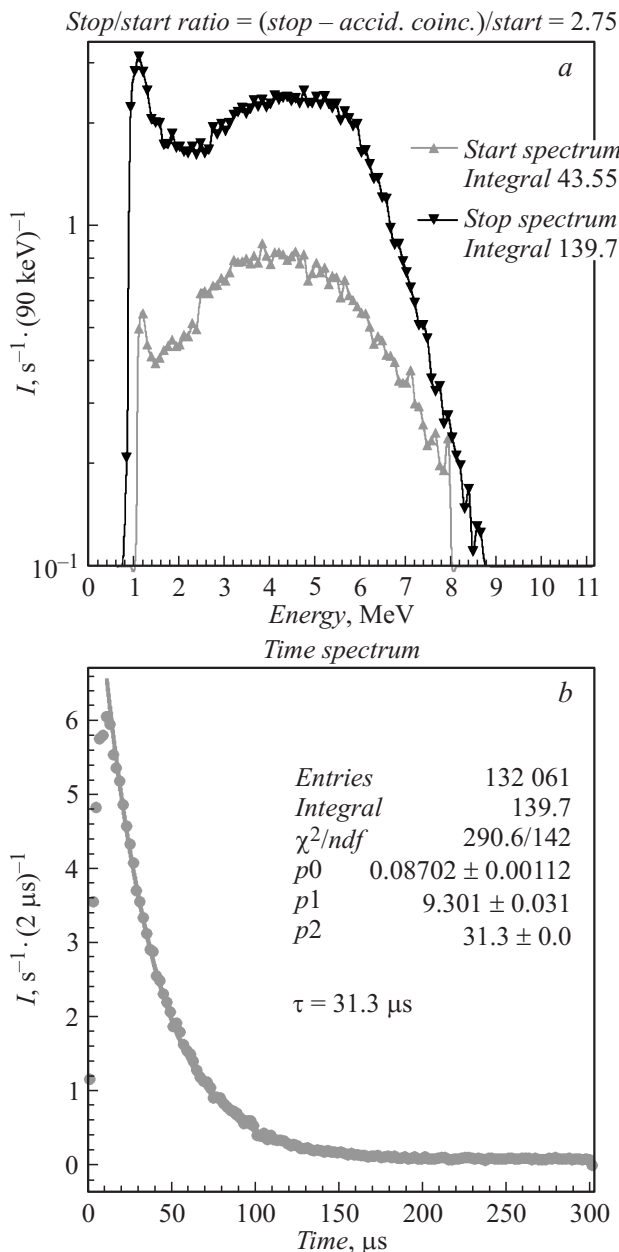


Рис. 8. *a* — энергетические спектры стартовых и стоповых сигналов в эксперименте с калифорниевым источником. *b* — временной спектр регистрации нейтронов, процесс термализации нейтронов до тепловой скорости составляет $5\text{--}7\mu\text{s}$, а время жизни теплового нейтрона в сцинтилляторе с гадолинием составляет $31.3\mu\text{s}$.

Измерения эффективности детектора проводились в шести положениях по высоте: 1) на дне детектора, 2) в 10 см от дна, 3) в 20 см от дна, 4) в 30 см от дна, 5) в 40 см от дна, 6) в 50 см от дна или на поверхности детектора. Значения эффективности регистрации в зависимости от положения источника приведены на рис. 7 для кобальтового и калифорниевого источников с порогом регистрации 0.5 MeV. Из этих измерений может быть сделана всего лишь оценка средней эффективности

регистрации нейтринных событий. Для порога регистрации 0.5 MeV она составляет приблизительно 50%, а для порога регистрации 3 MeV приблизительно 15%. Расчеты Монте-Карло дают сходную эффективность регистрации нейтринных событий не ставилась, так как мы планируем проводить относительные измерения на разных расстояниях.

Для определения эффективности регистрации нейтрона детектором использовались данные нейтронной активности источника ^{252}Cf , а также хорошо известный факт, что на один акт деления ^{252}Cf испускает 3.767(4) нейтрона. Регистрация нейтронов производилась выделением коррелированных совпадений, где стартом служил сигнал в момент деления ядра от гамма-квантов и протонов отдачи от быстрых нейтронов. Стоповым сигналом являлась регистрация гамма-квантов при захвате нейтрона гадолинием. Электроника установки позволяла регистрировать множественные стопы при одном старте. Таким образом, отношение среднего числа зарегистрированных нейтронов к среднему числу испущенных нейтронов (3.767) соответствует эффективности регистрации одного нейтрона. Подобный метод определения эффективности регистрации нейтрона использовался в эксперименте на реакторе ВВР-М, но в качестве стартового сигнала использовался сигнал от осколков деления, регистрируемый полупроводниковым детектором. На рис. 8, *a* показаны энергетические спектры стартовых и стоповых сигналов в эксперименте с калифорниевым источником. Интеграл под кривой стоповых сигналов больше, чем интеграл под кривой стартовых сигналов в 2.75 раза, что соответствует эффективности регистрации одного нейтрона 73%.

На рис. 8, *b* показан временной спектр регистрации нейтронов. Можно видеть, что процесс термализации нейтронов до тепловой скорости составляет $5\text{--}7\mu\text{s}$, а время жизни теплового нейтрона в сцинтилляторе с гадолинием составляет $31.3\mu\text{s}$.

5.2. Исследование фона космических лучей

Данная модель нейтринного детектора может быть использована для регистрации космических лучей, а также нейтронов и гамма-квантов от радиоактивных загрязнений. На рис. 9 представлен спектр модели нейтринного детектора, который можно условно разбить на 4 части.

Первый участок до 2 MeV относится к фону радиоактивных загрязнений, второй участок от 2 до 10 MeV покрывает область регистрации нейтронов, так как соответствует энергии гамма-квантов при захвате нейтрона гадолинием. Диапазон 10–60 MeV относится к мягкой компоненте космического излучения, связанной с распадом мюонов и захватом мюонов в веществе. И наконец, область от 60–120 MeV относится к мюонной компоненте, проходящей через детектор. Здесь же показаны малые изменения формы спектра для различных положений детектора.

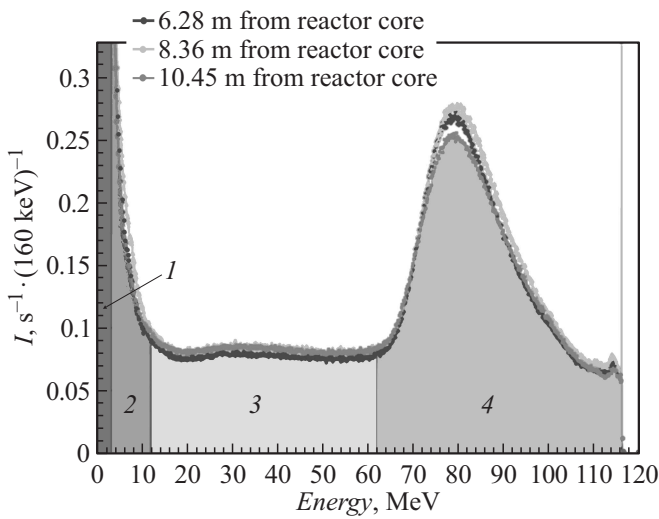


Рис. 9. Энергетический спектр детектора на различных расстояниях от активной зоны реактора и условное разбиение спектра на зоны: 1 — фон радиоактивных загрязнений, 2 — нейтроны, 3 — мягкая компонента космического излучения, 4 — мюоны.

На рис. 10 представлена в увеличенном масштабе зависимость интенсивности для различных участков спектра от расстояния вдоль базы эксперимента. Зависимость от расстояния для участка спектра, связанного с радиоактивными загрязнениями, может быть объяснена предысторией эксплуатации данного помещения. Активность больше около шибера и на полу вдоль рельс. Следует заметить, что в измерениях с детектором NaJ подобная зависимость не была обнаружена, так как детектор NaJ находился на расстоянии 1.4 м от пола и был экранирован массой самого детектора. Нейтринный детектор регистрирует радиоактивные загрязнения на полу, двигаясь вдоль рельс. Для других участков спектра космического фона также наблюдаются зависимости от расстояния в пределах изменений приблизительно 10%. Такие зависимости, по-видимому, могут быть объяснены структурой распределения бетонных масс здания.

В ходе долговременных измерений были обнаружены временные вариации интенсивности космического излучения. Они вызваны колебаниями атмосферного давления и дрейфом температуры в ходе сезонных изменений. Это хорошо известный барометрический и температурный эффекты космических лучей [7–9]. Мюоны образуются в верхних слоях атмосферы. При увеличении давления увеличивается количество вещества над детектором и происходит ослабление интенсивности космических лучей.

На рис. 11 показан эффект антикорреляции между давлением атмосферы и суммарной интенсивностью жесткой и мягкой компонент космического излучения, т.е. в энергетическом диапазоне от 10 до 120 MeV. Это барометрический эффект. Поведение жесткой и мягкой компонент космического излучения отличается наличием дополнительного долговременного дрейфа.

Причем знак дрейфа противоположен для жесткой и мягкой составляющих. Это так называемый температурный эффект, который интерпретируется следующим образом. При повышении температуры нижних слоев атмосферы из-за их расширения увеличивается высота, где формируются потоки мюонов. Из-за увеличения пути до Земли доля распавшихся мюонов увеличивается.

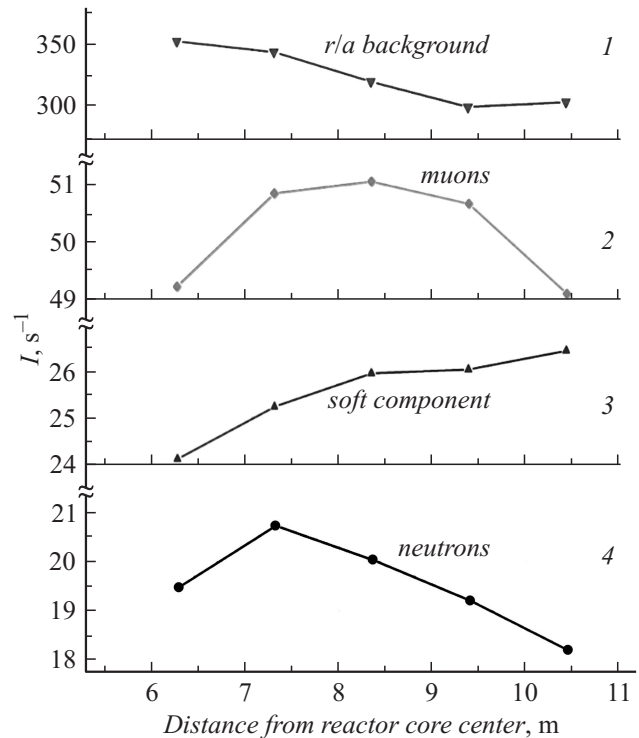


Рис. 10. Зависимость скорости счета детектора в различных диапазонах энергетического спектра модели нейтринного детектора (увеличенный масштаб с разрывами). 1 — фон радиоактивных загрязнений, 2 — нейтроны, 3 — мягкая компонента космического излучения, 4 — мюоны.

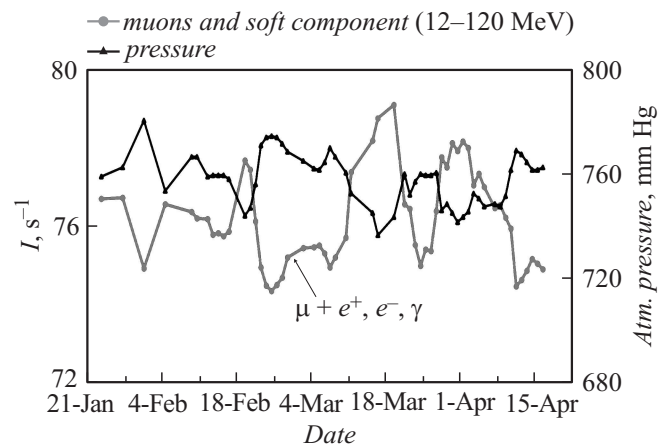


Рис. 11. Барометрический эффект космических лучей. По левой оси суммарная скорость счета детектора в области 3 и 4, по правой оси атмосферное давление, по горизонтальной оси время измерений с 23 января по 15 апреля 2014 г.

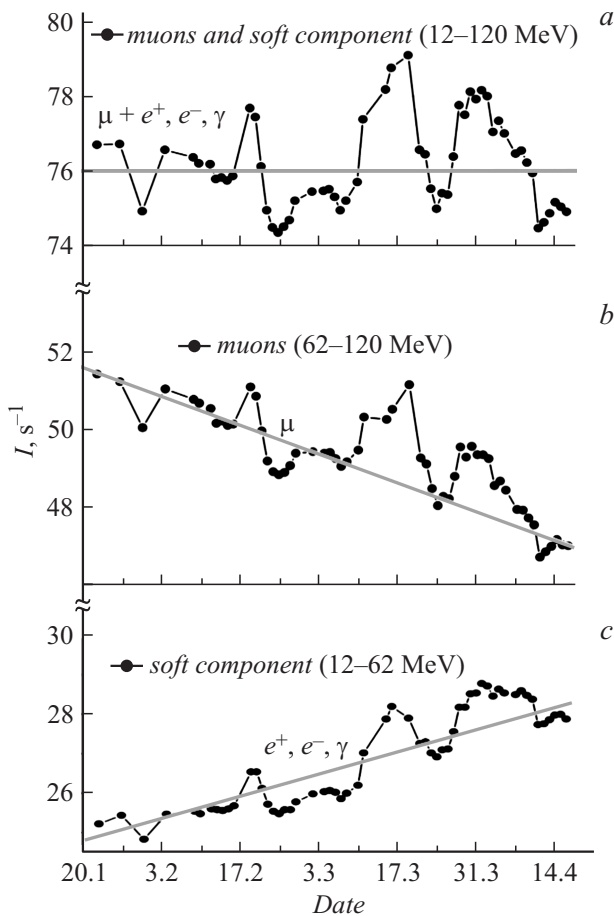


Рис. 12. Барометрический и температурный эффекты космических лучей. *a* — суммарная скорость счета детектора в области 3 и 4, *b* — скорость счета детектора в области 4, *c* — скорость счета детектора в области 3. По горизонтальной оси время измерений с 23 января по 15 апреля 2014 г.

Таким образом, уменьшается интенсивность жесткой компоненты (мюоны) и увеличивается интенсивность мягкой компоненты (продукты распада: электроны, позитроны, гамма-кванты). На рис. 12 показан эффект дрейфа с противоположными знаками для жесткой и мягкой компонент космического излучения при повышении температуры нижних слоев атмосферы с -30 по $+10^\circ\text{C}$ вблизи поверхности Земли с января по апрель 2014 г.

В результате изучения фоновых условий для проведения эксперимента по поиску нейтринных осцилляций на коротких расстояниях было выяснено, что фоновые условия являются крайне неблагоприятными. Космический фон зависит от расстояния от активной зоны реактора из-за структуры распределения бетонных масс здания. Кроме того, космический фон изменяется со временем из-за колебания атмосферного давления и температуры нижних слоев атмосферы. Для борьбы с этими проблемами могут быть предложены следующие методы. Во-первых, может осуществляться мониторинг интенсивности космических лучей по высокоэнергетической части спектра детектора, начиная

с 10 MeV. Используя мониторинговые данные, можно вводить поправки на фон космических лучей. Во-вторых, измерения зависимости от расстояния следует производить методом сканирования по расстоянию в режиме перемещения от точки к точке через каждые 45–60 мин. Таким образом, весь диапазон расстояний измеряется за 4–5 h, что меньше, чем время вариаций атмосферного давления. Это позволяет значительно усреднить эффект временных вариаций космических лучей.

Выводы

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. На реакторе СМ-3 создана нейтринная лаборатория для поиска нейтринных осцилляций на расстоянии 6–12 m от активной зоны реактора. Внутри пассивной защиты нейтринного канала получен уровень фона быстрых нейтронов $(8.5 \pm 0.1) \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, который определяется космическим излучением и не зависит от работы реактора.

2. Основную проблему данного эксперимента представляет коррелированный фон, связанный с космическим излучением. Космический фон зависит от расстояния от активной зоны реактора из-за структуры распределения бетонных масс здания. Кроме того, космический фон изменяется со временем из-за колебания атмосферного давления и температуры нижних слоев атмосферы. Для борьбы с этими проблемами могут быть предложены следующие методы. Во-первых, может осуществляться мониторинг интенсивности космических лучей по высокоэнергетической части спектра детектора, начиная с 10 MeV. Во-вторых, измерения зависимости от расстояния следует производить методом сканирования по расстоянию. Это позволяет значительно усреднить эффект временных вариаций космических лучей.

3. Использование активной защиты позволяет подавить коррелированный фон космического излучения только на 66%. По-видимому, это часть космического фона, связанная с мюонами. Она может контролироваться активной защитой. Нейтронная компонента практически не контролируется активной защитой, поэтому требуется использовать метод разделения сигналов от протонов отдачи и позитронов по форме импульса.

Проведенная работа дала достаточно информации для разработки полномасштабного детектора. В настоящий момент проект полномасштабного детектора полным объемом 3 m^3 разработан. Мы предполагаем, что реализация проекта и метода разделения сигналов от протонов отдачи и позитронов по форме импульса приблизит соотношение эффект-фон к единице и значительно увеличит статистическую точность эксперимента. Это позволит перейти к исследованиям, связанным с поиском осцилляций на коротких расстояниях.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 14-22-03055-офи_м.

Список литературы

- [1] *Mention G., Fechner M., Lasserre Th. et al.* // Phys. Rev. D. 2011. Vol. 83. P. 073 006.
- [2] *Mueller T., Lhuillier D., Fallot M. et al.* // Phys. Rev. C. 2011. Vol. 83. P. 054 615.
- [3] *Серебров А.П., Фомин А.К., Онегин М.С. и др.* // Препринт ПИЯФ. 2012. Vol. 2892. 10 с.
- [4] *Серебров А.П., Зиновьев В.Г., Фомин А.К. и др.* // Препринт ПИЯФ. 2012. Vol. 2900. 19 с.
- [5] *Серебров А.П., Фомин А.К., Зиновьев В.Г. и др.* // Письма в ЖТФ. 2013. Vol. 39 (14). P. 25–33.
- [6] *Серебров А.П., Фомин А.К., Зиновьев В.Г. и др.* // Письма в ЖТФ. 2014. Vol. 40 (11). P. 8–16.
- [7] *Мысовский Л.В., Тувим Л.* // Zeits. f. Phys. 1926. Vol. 39. P. 146.
- [8] *Blackett P.M.S.* // Phys. Rev. 1938. Vol. 54. P. 973.
- [9] *Дорман Л.И., Фейнберг Е.Л.* // УФН. 1956. Vol. 59. P. 189.