

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

95-243

Д13-95-243

В.М.Быстрицкий, Н.И.Журавлев,
С.И.Мерзляков, В.Т.Сидоров, В.А.Столупин,
А.В.Стрелков, В.Н.Швецов

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
РЕДКИХ ПРОЦЕССОВ
С ОБРАЗОВАНИЕМ НЕЙТРОНОВ

Направлено в журнал «Nuclear Instruments and Methods A»

1995

Исследование редких процессов с образованием нейтронов либо определение характеристик малоинтенсивных источников нейтронов — весьма деликатная задача, решение которой во многом обусловлено идеологией построения системы регистрации нейтронов, а также ее характеристиками. Система регистрации включает в себя как детекторы нейтронов, так и регистрирующую электронику.

Система регистрации нейтронов в этом случае должна удовлетворять целому ряду требований:

- 1) Позволять с высокой надежностью производить дискриминацию истинных и фоновых событий, зарегистрированных нейтронными детекторами;
- 2) Обладать достаточно высокой эффективностью по отношению к регистрации нейтронов в интересующем диапазоне энергий;
- 3) Обладать низким уровнем фона;
- 4) Иметь достаточно высокую помехозащищенность в плане электромагнитных наводок;
- 5) Позволять получать временную и амплитудную информацию о каждом зарегистрированном событии.

Для регистрации быстрых нейтронов, как правило, используются как сцинтилляционные детекторы на основе органических сцинтилляторов (пластик, NE-213, стильбен и др.), так и детекторы тепловых нейтронов (пропорциональные счетчики, заполненные BF_3 или ^3He), помещаемые в замедлитель (парафин, полиэтилен). Для регистрации же медленных нейтронов используются, как правило, указанные выше BF_3 - и ^3He -счетчики. Измерение временных и амплитудных распределений зарегистрированных событий позволяет получать информацию о характеристиках исследуемых процессов (таких как скорость процесса, сечение процесса), а также о характеристиках малоинтенсивных источников нейтронов (интенсивность источника, длительность и форма нейтронной вспышки в случае импульсного источника нейтронов).

Измеряя распределение интервалов между двумя последовательно зарегистрированными событиями по длительности и аппроксимируя данные распределения функцией вида $e^{-n(t)/\epsilon_n}$ ($n(t)$ — интенсивность нейтронного источника, которая в общем случае может являться функцией времени; ϵ_n — эффективность регистрации нейтронов экспериментальной установки; t — время между двумя последовательно зарегистрированными событиями), можно определить интенсивность

нейтронного источника. Отметим, что для этого необходимо знать эффективность регистрации нейтронов с детектирующей системой, которая, в свою очередь, может быть найдена экспериментально с использованием калибровочных источников нейтронов (если это возможно) либо путем численного моделирования с использованием метода Монте-Карло. Эти рассуждения относятся к системе регистрации нейтронов на основе сцинтилляционных детекторов. В случае использования детекторов тепловых нейтронов исследуемые характеристики процессов либо малоинтенсивных источников нейтронов определяются также из анализа распределений временных интервалов между последовательно зарегистрированными событиями, но с учетом распределений нейтронов по времени замедления и диффузии их в замедлителе (в этом случае задача извлечения информации об искомым параметрах изучаемых процессов наилучшим образом решается методом наименьших квадратов путем сравнения экспериментальных распределений временных интервалов с распределениями, полученными в результате численного моделирования процессов взаимодействия нейтронов с веществом замедлителя и нейтронного детектора (BF_3 , ^3He). Так как система регистрации должна гарантировать надежное измерение выхода нейтронов (даже в случае, когда величина его сравнима с уровнем фона), необходимо, чтобы она была секционированной. Т.е. система должна включать в себя по крайней мере не менее двух независимых каналов регистрации нейтронов. Это требование связано с тем, что в случае регистрации нейтронов (образующихся в результате протекания исследуемых процессов либо испускаемых исследуемым источником нейтронов) распределения временных интервалов между последовательно зарегистрированными событиями, полученные для каждой из секций системы регистрации, должны иметь одну и ту же форму. В случае же регистрации фоновых процессов, носящих спорадический характер (пробой междоузельного промежутка в ФЭУ или в высоковольтном делителе ФЭУ; электромагнитные наводки в спектрометрическом тракте, включающем в себя зарядочувствительный предусилитель, а также высоковольтный пробой по входному изолятору BF_3 - и ^3He -счетчиков), временная картина событий, зарегистрированных детекторами каждой из секций, носит неодинаковый характер, что, в свою очередь, позволяет в процессе "off-line" анализа экспериментальных данных исключить такие события из дальнейшего рассмотрения.

Такая идеология отбора событий при "off-line" анализе экспериментальных данных действительно позволяет надежно производить измерения выхода нейтронов, превышающего флуктуации уровня фона.

Такой подход к отбору событий особенно важен при проведении поисковых экспериментов, где необходимо установить не только сам факт существования эмиссии нейтронов, но и его временную микроструктуру, принимая во внимание то, что эмиссия нейтронов может носить спорадический характер. Ниже приводится описание созданной нами экспериментальной установки, предназначенной для проведения такого типа экспериментов.

Детектирующая система

На рис. 1 приведен общий вид детектирующей системы созданной экспериментальной установки. Детектирующая система состоит из сцинтилляционного детектора 1 и детекторов тепловых нейтронов 2, 3. Сцинтилляционный детектор 1 выполнен в виде стакана из пластического сцинтиллятора с наружным диаметром 176 мм и высотой 200 мм. Диаметр внутренней полости составляет 120 мм, глубина 160 мм. Детекторы тепловых нейтронов 2 и 3, каждый из которых представляет собой сборку из пятнадцати BF_3 -счетчиков типа СММО-5, помещены в замедлитель из парафина 8 и расположены вокруг детектора 1 по образующим двух коаксиальных цилиндров диаметрами 268 мм и 368 мм. Корпус BF_3 -счетчика выполнен из нержавеющей стали в виде цилиндра длиной 300 мм, диаметром 35 мм и с толщиной стенки 0,65 мм. Анод счетчика изготовлен из молибденовой нити диаметром 100 мкм. Счетчик заполнен газом BF_3 до давления 240 мм рт.ст., содержание изотопа ^{10}B в боре составляет 87%. Счетчики каждой группы соединены параллельно между собой и, в принципе, представляют отдельный детектор тепловых нейтронов. Корпус блока детекторов 2 и 3 изготовлен в виде сосуда из двух стальных цилиндрических обечайки 5 и 6 высотой 400 мм и толщиной 1 мм (диаметр внутренней обечайки 204 мм, наружной - 480 мм) и стального доньшка 7 толщиной 4 мм. Все счетчики погружены в парафин на глубину 300 мм. Между счетчиками первой и второй группы располагается медный экран 10 (имеющий форму цилиндрической поверхности диаметром 318 мм). Каждая группа счетчиков имеет отдельный высоковольтный источник питания. Для повышения помехо-

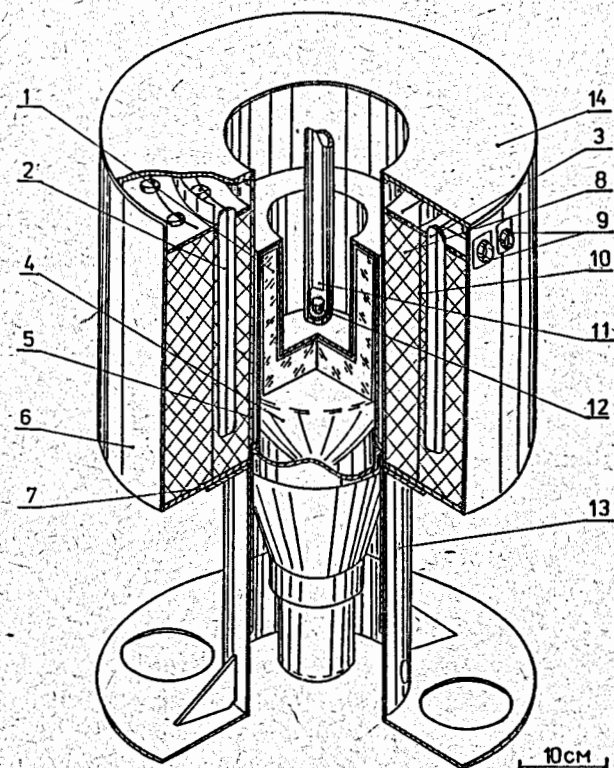


Рис. 1. Детектирующая система экспериментальной установки:
1 - сцинтилляционный детектор; 2, 3 - детекторы тепловых нейтронов; 4 - ФЭУ; 5, 6 - обечайки корпуса нейтронного детектора; 7 - доньшко; 8 - парафин; 9 - высоковольтный и высокочастотный разъемы; 10 - электромагнитный экран из меди; 11 - сосуд из нержавеющей стали; 12 - источник нейтронов; 13 - опора; 14 - крышка с медным экраном.

защищенности сигналы от каждой группы BF_3 -счетчиков (амплитуда импульса ≈ 3 мВ) поступают на вход соответствующего предусилителя (канал 2 для счетчиков внутреннего кольца, канал 3 для внешнего) по короткому кабелю ($\approx 0,5$ м) с двойным экраном. Наружный экран соединен с корпусом блока детекторов тепловых нейтронов, а внутренний - с корпусом BF_3 -счетчиков. Высокое напряжение ($\approx 1,6$ кВ) подается на анодную нить BF_3 -счетчиков через предусилитель по центральному проводу кабеля. Сосуд 11 с исследуемым источником нейтронов 12 помещается внутрь полости детектора 1. Источник нейтронов, нейтронные детекторы 1, 2, 3 находятся внутри бокса из борированного полиэтилена. Толщина стенок бокса составляет ≈ 20 см. Это позволило уменьшить величину нейтронного фона, связанного с космическим излучением, примерно на два порядка.

Использование сцинтилляционного детектора 1 позволяет дискриминировать по энергии быстрые нейтроны (испускаемые источником), попадающие в замедлитель и регистрируемые детекторами 2, 3 после окончания процесса их торможения в нем. В этом случае источник нейтронов должен находиться внутри пространства, ограниченного сцинтилляционным детектором, который, в свою очередь, должен быть окружен системой тепловых детекторов нейтронов. Устанавливая аппаратурно-амплитудный порог в канале детектора 1 либо производя "off-line" анализ событий, зарегистрированных детекторами 2, 3, с введением заданного амплитудного критерия по каналу 1, можно производить отбор событий зарегистрированных BF_3 -счетчиками, соответствующих определенному диапазону энергий быстрых нейтронов.

Регистрирующая электроника

Регистрирующая электроника производит сбор и накопление информации, поступающей с нейтронных детекторов 1, 2, 3 (время появления сигнала, амплитуда и т. д.), до передачи ее в ЭВМ.

На рисунке 2 приведена блок-схема системы сбора и обработки информации. Данная система позволяет производить в реальном масштабе времени независимые измерения типа "энергия-время" для каждого из трех детекторов. Система включает в себя 3 однотипных измерительных канала. Каждый из них состоит из предусилителя П223

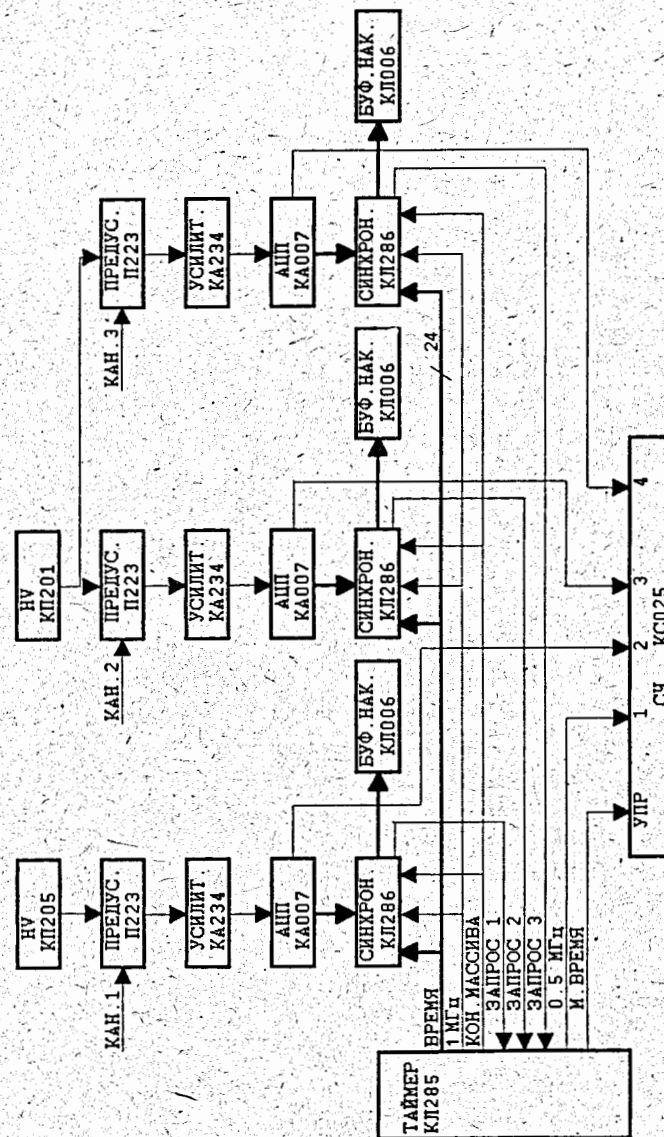


Рис. 2. Блок-схема регистрирующей электроники.

[1], формирующего усилителя КА234 [2], АЦП КА007, синхронизатора записи КЛ286 и буферного накопителя КЛ006 [3].

Измерение времени появления событий, зарегистрированных детекторами 1, 2, 3, и синхронизацию работы системы обеспечивает таймер КЛ285. Код времени с него подается через внешнюю шину на синхронизатор записи КЛ286 в каждый амплитудный измерительный канал.

Система включает также 4-канальный счетчик КС025, контроллер крейта КК012 [4] и высоковольтные источники питания КП201 для счетчиков тепловых нейтронов и КП205 [5] для фотоумножителя.

После запуска системы начинается цикл измерения, во время которого таймер с частотой 0,5 МГц подает через внешнюю шину 24-разрядный код времени в синхронизаторы амплитудных каналов. При срабатывании АЦП любого из амплитудных каналов, после окончания времени преобразования сигнала, синхронизатор записи КЛ286 производит с помощью синхросигналов (частота 1 МГц) от таймера запись в соответствующий буферный накопитель кода амплитуды (8 бит) и соответствующего ему кода времени (24 бита).

Цикл измерения завершается при переполнении любого буферного накопителя или переполнении внутреннего счетчика таймера (≈ 17 секунд). При этом таймер подает в магистраль КАМАК сигнал L, блокирует буферные накопители и разблокирует входы счетчиков КС025, три из которых начинают регистрировать сигналы от детекторов, а четвертый измеряет "мертвое время" системы. Это время определяется временем вывода данных из буферных накопителей в ЭВМ.

После считывания этих данных и содержимого счетчиков программно подается сигнал начала следующего цикла измерения. Программа обработки поступающей информации обеспечивает: накопление в ОЗУ ПЭВМ данных для построения амплитудных и временных спектров событий, зарегистрированных детекторами 1, 2, 3; запись экспериментальных данных на диск; построение и отображение на дисплее амплитудных и временных спектров; вычисление основных статистических параметров амплитудных и временных распределений; индикацию числовой и статистической информации о загрузке по каналам, об объеме данных, "мертвом", "живом" и текущем времени; формирование текстового файла с информацией о накопленных спектрах; вывод информации на печать. Основные характеристики системы сбора и обработки информации определяются следующими параметрами:

- точность измерения времени - 2 мкс;
- число каналов амплитудного спектра - 256;
- максимальная длительность непрерывного цикла измерения - 17 с.

Следует отметить, что для повышения надежности работы детектирующей системы и регистрирующей электроники (в процессе их разработки и создания) особое внимание уделялось нами техническому решению принципиально важных, на наш взгляд, вопросов.

Во-первых, ВФ₃-счетчики в каждой из сборок 2, 3 подбирались таким образом, чтобы их характеристики были весьма близкими (примерно одно и то же значение амплитуды сигналов на выходе ВФ₃-счетчиков при одном и том же напряжении на них). Во-вторых, осуществлялась тщательная электромагнитная экранировка детектирующей системы, состоящей из ВФ₃-счетчиков и коммуникаций между ними (это достигалось путем использования экранов из железа и меди, полностью окружающих детектирующую систему). В-третьих, в электронной системе, выполненной в стандарте "КАМАК", использовались высокостабильные модули. Кроме этого, обращалось внимание на надежность работы переходных конденсаторов в предусилителях, т.к. даже редкие микропробои в них могли привести к имитации исследуемого эффекта. Проверка стабильности работы всей регистрирующей электроники, детекторов, а также калибровка спектрометрических нейтронных каналов осуществлялась с помощью стандартных источников ²⁵²Cf, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co. На рис. 3 в качестве примера приведено амплитудное распределение событий, зарегистрированных ВФ₃-счетчиком, при калибровке спектрометрического канала источником ²⁵²Cf. Положение центра тяжести основного пика в амплитудном распределении соответствует энерговыделению в детекторе $\approx 2,3$ МэВ (согласно каналу реакции захвата теплового нейтрона $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow \alpha + {}^7\text{Li} + 2,3 \text{ МэВ}$), а второго пика, который по площади от первого пика составляет $\approx 7\%$, соответствует регистрации канала реакции $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow \alpha + {}^7\text{Li} + 2,8 \text{ МэВ}$.

Эффективность регистрации нейтронов детекторами 2 и 3 составляет 5,2% и 3,5% соответственно. Измерение эффективности производилось с использованием эталонного источника нейтронов ²⁵²Cf. Эффективность сцинтилляционного детектора 1 по отношению к регистрации нейтронов с определенной энергией (испускаемых источником нейтронов) вычисляется методом Монте-Карло. Так, например,

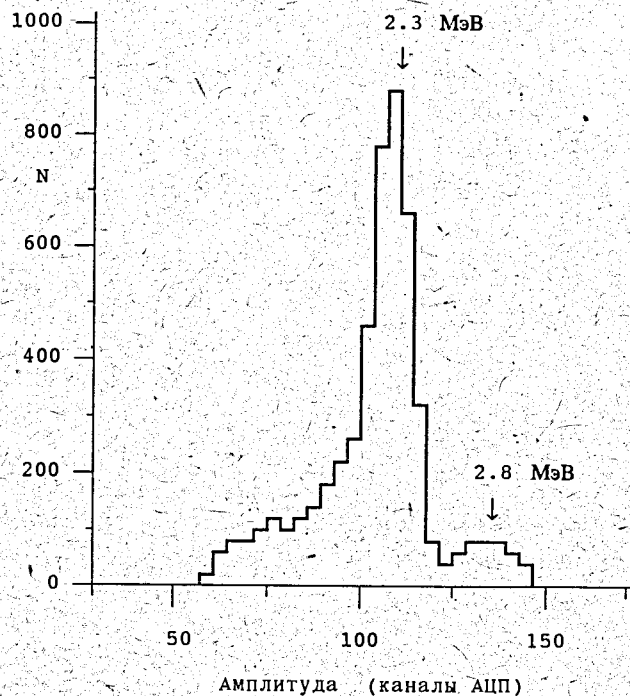


Рис. 3. Амплитудное распределение сигналов с BF_3 -счетчика, полученное при калибровке нейтронным источником ^{252}Cf

в случае регистрации нейтронов с энергией 14,1 МэВ при установленном амплитудном пороге в канале 1 (соответствующем по световыходу энергии протонов отдачи 3 МэВ) она составляет 9,4%. Введение указанного порога позволило бы в случае изучения реакции d-t -синтеза ($\text{d+t} \rightarrow {}^4\text{He}+\text{n}+17,6$ МэВ, $E_n = 14,1$ МэВ) исключить из дальнейшего анализа события, обусловленные возможным протеканием реакции d-d -синтеза ($\text{d+d} \rightarrow {}^3\text{He}+\text{n}+3,3$ МэВ, $E_n = 2,5$ МэВ). Так как время жизни нейтронов в детекторах 2 и 3 составляет ≈ 150 мкс (время жизни теплового нейтрона в парафине ≈ 178 мкс [6]), то отбор событий в режиме "off-line" производится при условии того, что временной интервал между моментами появления сигналов с детектора 1 и детекторов 2, 3 составляет порядка 400 мкс. На рис. 4 приведено распределение временных интервалов между событиями, последовательно зарегистрированными детекторами 2 и 3, полученное с использованием источника ^{252}Cf , помещенного внутрь полости детектора 1 (интенсивность источника составляла ≈ 300 с^{-1}). Требование наличия совпадений сигналов с детекторов 1 и 2, 3 в течение 400

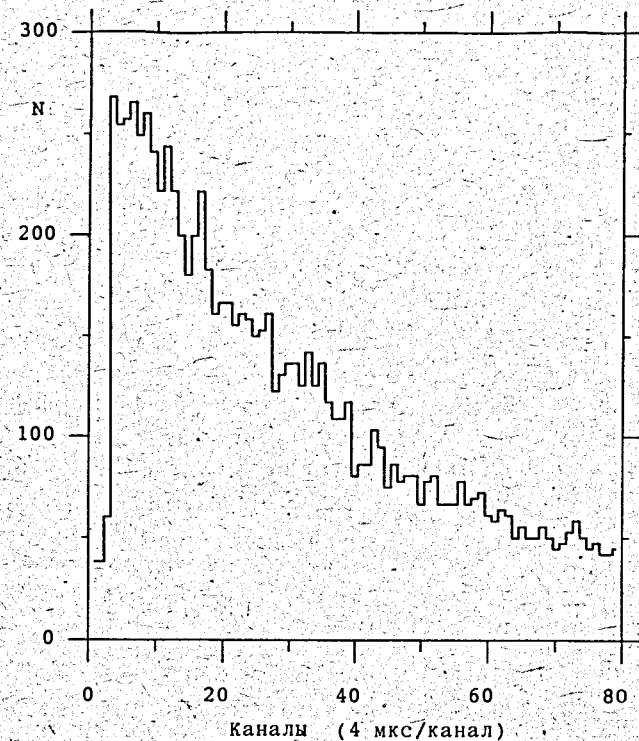


Рис. 4. Распределение временных интервалов между событиями, последовательно зарегистрированными детекторами 2, 3, полученное с источником ^{252}Cf

мкс естественно уменьшает статистику зарегистрированных событий, однако соотношение эффект/фон при этом возрастает, что, в свою очередь, позволяет понизить нижнее предельное значение измеряемого выхода нейтронов. Скорости счёта фоновых событий для детекторов 1, 2 и 3 (усредненные по интервалу измерения ≈ 100 ч) составляют $7,2$ с^{-1} , $4 \cdot 10^{-2}$ с^{-1} и $5 \cdot 10^{-2}$ с^{-1} соответственно.

Флуктуации фона описываются нормальным распределением со стандартными отклонениями $0,2$ с^{-1} , $5,2 \cdot 10^{-3}$ с^{-1} и $5,5 \cdot 10^{-3}$ с^{-1} для детекторов 1, 2 и 3 соответственно. Методика обработки экспериментальных данных, полученных как в рабочих экспозициях (с источником нейтронов либо в опытах по изучению процессов с образованием нейтронов), так и фоновых, основана на анализе распределений временных интервалов между событиями, последовательно зарегистрированными детекторами тепловых нейтронов 2, 3, либо

между событиями, зарегистрированными детектором 1 и детекторами 2, 3.

Следует отметить, что анализ распределений временных интервалов можно проводить по отдельности для детекторов 2 и 3. Целесообразно разбивать весь анализируемый диапазон временных интервалов на три поддиапазона по длительности: микросекундный, миллисекундный и секундный ($(\Delta t)_1$, $(\Delta t)_2$, $(\Delta t)_3$). Например, $(\Delta t)_1 = 0 + 1$ мс; $(\Delta t)_2 = 1$ мс + 1 с; $(\Delta t)_3 = 1$ с + 1000 с. Это обусловлено следующими обстоятельствами:

1) Сравнение рабочих и фоновых распределений временных интервалов в диапазонах $(\Delta t)_1$ и $(\Delta t)_2$ как по форме, так и по числу событий в них позволяет получить ответ на такие вопросы как: а) Носит ли импульсный характер эмиссия нейтронов, образующихся в результате протекания исследуемых процессов? б) Какова длительность нейтронных вспышек и частота их повторения? в) Какова временная структура фона, и существуют ли изменения ее в процессе измерений?

2) В случае отсутствия проявления импульсного характера эмиссии нейтронов сравнение рабочих и фоновых распределений временных интервалов, соответствующих полному временному диапазону измерения $\Delta t = (\Delta t)_1 + (\Delta t)_2 + (\Delta t)_3$, позволяет с необходимой точностью определить характеристики исследуемого процесса с образованием нейтронов (скорость процесса, сечение процесса) либо характеристики исследуемого источника нейтронов.

3) Сравнение распределений временных интервалов между моментами появления сигналов со сцинтилляционного и нейтронных детекторов, полученных в рабочих и фоновых экспозициях, позволяет получить однозначную информацию не только о самом факте существования эмиссии нейтронов с энергией, превышающей пороговое значение по каналу 1, но и о характеристиках данного процесса.

На рис. 5, в качестве примера для диапазонов $(\Delta t)_1 = 0 + 10$ мс, $(\Delta t)_2 = 10$ мс + 2 с и $(\Delta t)_3 = 2 + 200$ с приведены распределения временных интервалов между событиями, зарегистрированными детекторами 2, 3, полученные при измерении фона в течение ≈ 100 ч.

Созданная установка использовалась нами при проведении поисковых исследований [7,8] на протяжении длительного времени. Достоверность полученных результатов [7,8] гарантирована стабильной работой как детектирующей системы, так и регистрирующей электроники.

В заключение отметим, что созданная установка может эффективно использоваться в экспериментах по измерению множественности

нейтронов, а также для определения малых количеств делящегося вещества в исследуемых образцах.

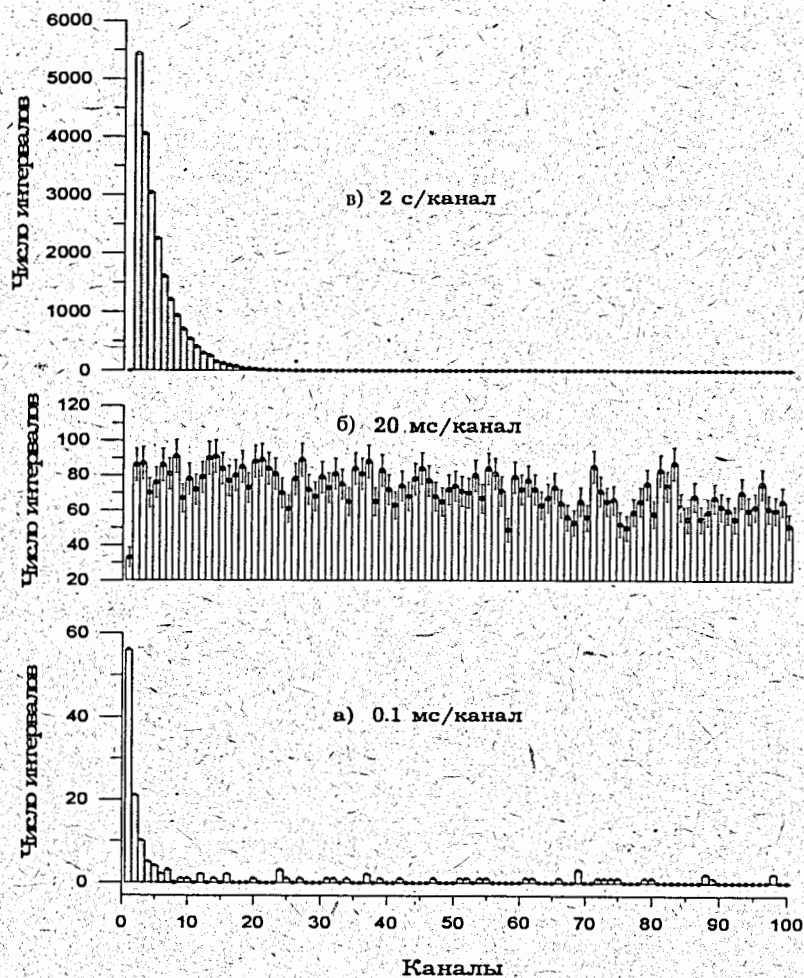


Рис. 5. Распределения временных интервалов между событиями, зарегистрированными детекторами 2, 3, соответствующие различным диапазонам измерения длительности интервалов: а - 0 + 10 мс; б - 10 мс + 2 с; в - 2 + 200 с. Распределения а, б и в соответствуют полному числу событий, зарегистрированных детекторами 2 и 3 в течение фоновых измерений

Литература

1. Ю.К.Акимов и др., Сообщение ОИЯИ 13-89-279, Дубна, 1989.
2. Ю.К.Акимов и др., ПТЭ, № 3, 1985, с.131.
3. В.А.Антюхов и др., Сообщение ОИЯИ 10-80-650, Дубна, 1980.
4. В.А.Антюхов и др., Сообщение ОИЯИ P10-90-589, Дубна, 1990.
5. Ю.К.Акимов и др., в кн. "XIV Международный симпозиум по ядерной электронике", Д13-90-600, Дубна, 1990, с.179-185.
6. К.Бекурц, К.Виртц, Нейтронная физика: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1965.
7. В.М.Быстрицкий и др., Препринт ОИЯИ Д15-94-498, Дубна, 1994.
8. В.М.Быстрицкий и др., Препринт ОИЯИ Д15-94-499, Дубна, 1994.