

СОЗДАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЧКА НЕЙТРОНОВ НА СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ ПИЯФ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОНИКИ НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ

© 2010 г. Н. К. Абросимов, Л. А. Вайшнене, А. С. Воробьев, Е. М. Иванов, Г. Ф. Михеев, Г. А. Рябов, М. Г. Тверской, О. А. Щербаков

*Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН
Россия, 188300, Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща*

E-mail: shcherba@pnpi.spb.ru

Поступила в редакцию 02.12.2009 г.

Приводятся характеристики созданного на синхроциклотроне 1000 МэВ ПИЯФ РАН нейтронного пучка с энергетическим спектром, повторяющим спектр атмосферного нейтронного излучения. Пучок предназначен для тестирования радиационной стойкости электроники и удовлетворяет международному стандарту JEDEC. Единственный экспериментальный стенд с близким к стандарту спектром нейтронов в диапазоне энергий 0.1–750 МэВ создан в Лос-Аламосской Национальной лаборатории (США) с использованием линейного протонного ускорителя LAMPF; он используется для испытаний электронной аппаратуры в авиа- и космических фирмах США, Европы и Азии. В отличие от испытательных стендов в Лос-Аламосе и Уппсале (Швеция), в ПИЯФ РАН использован метод с рождением нейтронов на внутренней мишени ускорителя. Создание нейтронного пучка и испытательного стенда значительно расширяет экспериментальные возможности по радиационным исследованиям и может послужить базой для создания в ПИЯФ РАН уникального центра по радиационным испытаниям авиа- и космической электронной аппаратуры в соответствии с требованиями международных стандартов.

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование космической и авиационной техники в значительной степени связано с широким использованием современной микро- и наноэлектроники. Одно из основных требований к такой электронике – способность длительное время надежно функционировать в радиационных полях космического пространства и верхних слоях атмосферы. В настоящее время нормативные акты России и ведущих стран мира включают стандарты на обязательные испытания радиационной стойкости электронной аппаратуры авиационной и космической техники. Международный нормативный документ JEDEC STANDARD (Measurement and Reporting of Alpha Particles and Terrestrial Cosmic Ray-Induced Soft Errors in Semiconductor Devices) [1] предписывает проводить испытания электронных и радиоизделий в потоках нейтронов со спектром, подобным спектру нейтронов в атмосфере с широким диапазоном энергий, простирающихся от низких до 1 ГэВ. За эталон JEDEC STANDARD принят спектр нейтронов над Нью-Йорком (США).

Экспериментальный стенд ICE House на базе протонного ускорителя, где наиболее точно реализован подобный спектр нейтронов (в диапазоне энергий 0.1–750 МэВ), создан в нейтронном научном центре Лос-Аламосской Национальной

лаборатории (LANSCE) [2], где и проводят испытания электронной аппаратуры авиа- и космические фирмы США, Европы и Азии.

Типичные параметры протонного пучка: частота повторения 100 Гц, длительность макроимпульса 625 мкс, период микроимпульсов 1.8 мкс, интенсивность $3 \cdot 10^8$ протонов в микроимпульсе, что соответствует среднему току протонного пучка 1.6 мкА. Нейтронообразующая вольфрамовая мишень, являясь источником радиоактивного излучения, расположена в отдельном бетонном боксе, в стене которого находится коллиматор. Для очистки нейтронного пучка от сопутствующих частиц между мишенью и коллиматором поставлен электромагнит-сепаратор. В пучке происходит ускоренное радиационное испытание электроники. Облучение в таком пучке нейтронов в течение 1 ч эквивалентно 100 годам эксплуатации в условиях полета самолета на высоте 10 км.

Нужда в создании других испытательных центров электронной аппаратуры в нейтронных полях не удовлетворяется, в том числе и потому, что число действующих в мире ускорителей с энергией около 1000 МэВ, подходящих для этих целей, единицы. Поэтому некоторые фирмы ограничиваются испытанием аппаратуры в нейтронных полях с ограниченным по энергии спектром. Такие испытания широко проводятся, например, на ней-

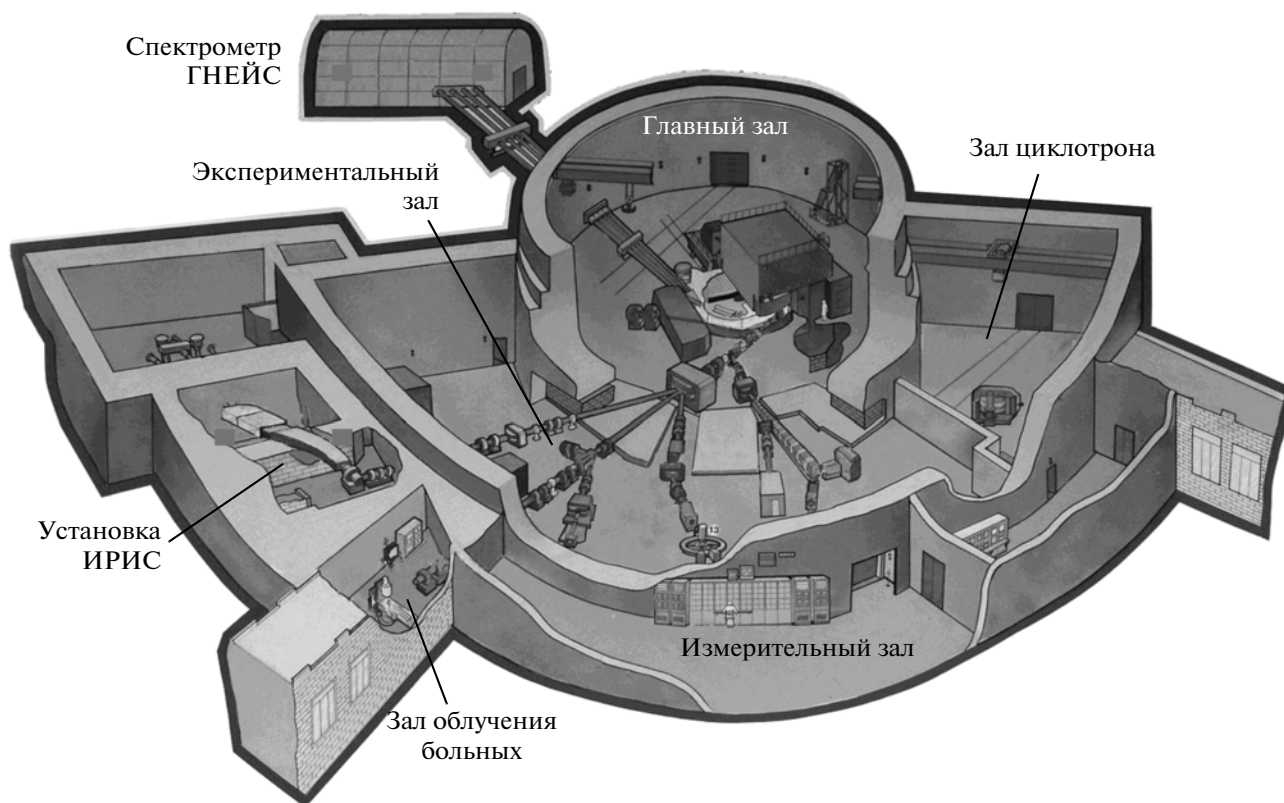


Рис. 1. Общий вид залов синхроциклотрона.

тронном генераторе в Уппсале (Швеция) с использованием циклотрона на энергию до 180 МэВ [3].

Для создания испытательного стенда нами использованы имеющаяся на синхроциклотроне внутренняя мишень и инфраструктура работающего в ПИЯФ времяпролетного нейтронного спектрометра ГНЕЙС.

1. СХЕМА ПОЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОННОГО ПУЧКА НА СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ ПИЯФ РАН

1.1. Синхроциклотрон 1 ГэВ и спектрометр ГНЕЙС

На рис. 1 приведена схема экспериментально-го комплекса синхроциклотрона 1000 МэВ ПИЯФ РАН, в том числе и ангар спектрометра ГНЕЙС.

Основные параметры синхроциклотрона [4, 5], приведенные ниже, в принципе, удовлетворяют условиям для получения нейтронного пучка с энергетическим спектром, повторяющим спектр атмосферного нейтронного излучения: энергия протонов 1 ГэВ; ток внутреннего пучка протонов ≤ 3 мкА; частота 40–60 Гц; коэффициент вывода пучка 30%; скважность 50%.

На синхроциклотроне ПИЯФ с 1975 г. действует времяпролетный спектрометр ГНЕЙС [6, 7], предназначенный для изучения нейтрон-ядерных взаимодействий с использованием техники времени пролета в диапазоне энергий нейтронов от $\sim 10^{-2}$ эВ до нескольких сотен мегаэлектрон-вольт. Охлаждаемая водой свинцовая мишень, расположенная внутри вакуумной камеры ускорителя, используется как импульсный нейтронный источник типа “spallation” со средней интенсивностью $3 \cdot 10^{14}$ нейтронов/с, длительностью нейтронной вспышки 10 нс и частотой повторений до 50 Гц. Для проведения физических экспериментов на спектрометре используются как нейтроны, вылетающие из свинцовой мишени, так и нейтроны, испытавшие многократные столкновения в полиэтиленовом замедлителе. Схема нейтронного спектрометра ГНЕЙС представлена на рис. 2.

Основные характеристики спектрометра ГНЕЙС: *импульсный источник нейтронов* – средняя интенсивность быстрых нейтронов $\leq 3 \times 10^{14}$ нейтронов/с, длительность вспышки быстрых нейтронов ~ 10 нс, частота вспышек нейтронов ≤ 50 Гц, размеры внутренней свинцовой охлаждаемой мишени $40 \times 20 \times 5$ см, полиэтиленового замедлителя – $30 \times 10 \times 5$ см; *спектрометр* – чис-

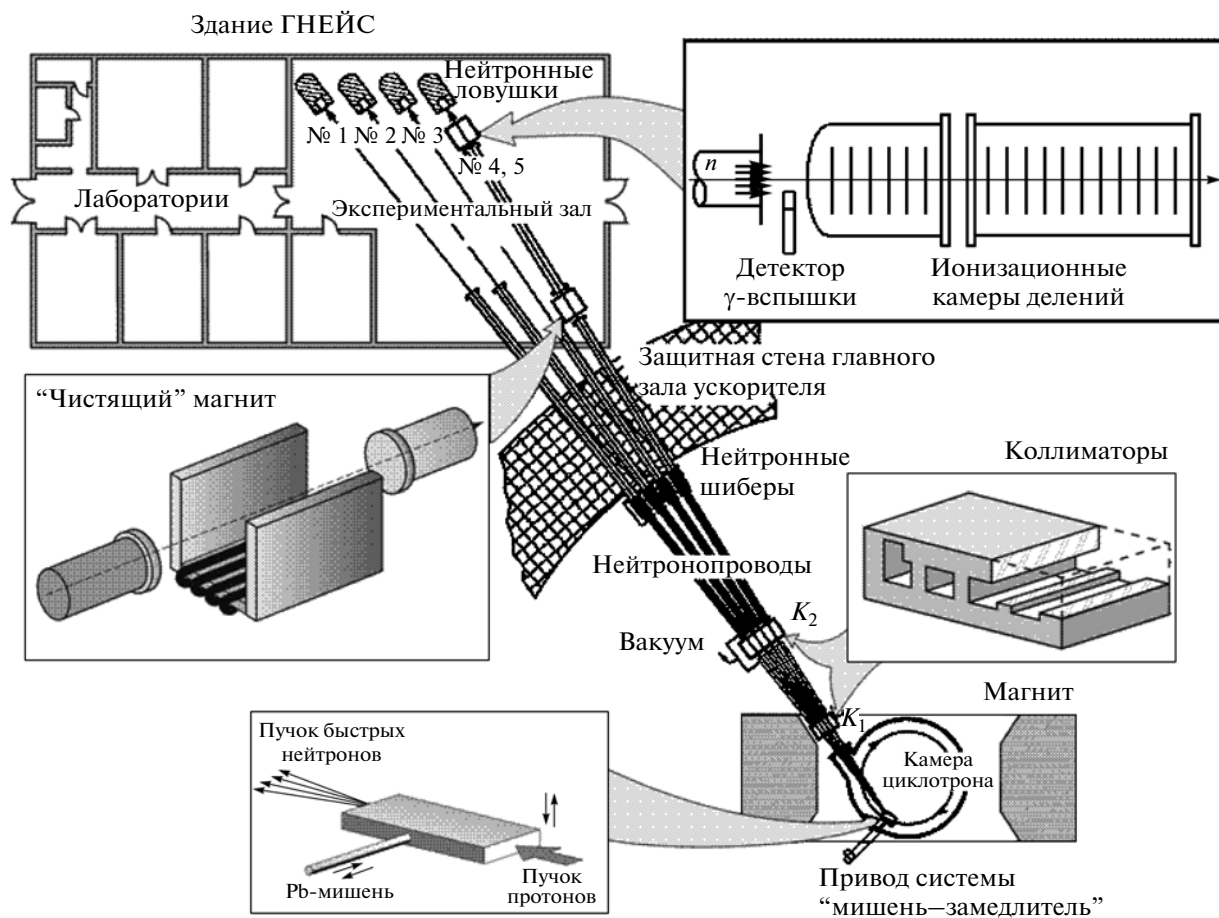


Рис. 2. Схема нейтронного времяпролетного спектрометра ГНЕЙС. K_1 и K_2 — нейтронные коллиматоры.

ло вакуумированных пролетных баз — 5, длина пролетных баз 35–50 м, размеры экспериментального зала (здание ГНЕЙС) 45 × 30 м.

1.2. Применение инфраструктуры ГНЕЙС для получения спектра нейтронов, повторяющего спектр атмосферного нейтронного излучения

Создание пучка на внешней мишени потребовало бы больших затрат по созданию тракта транспортировки протонного пучка, радиационно-защищенного мишенного устройства, создания нового экспериментального зала, что связано с проведением строительных работ. В нашем случае для получения широкого спектра нейтронов вплоть до 1000 МэВ с распределением по энергиям, аналогичным спектру атмосферных нейтронов, оказалось гораздо проще использовать существующую инфраструктуру спектрометра ГНЕЙС и его внутреннюю мишень. Здесь необходимо отметить ряд моментов:

1. Для получения широкого спектра нейтронов, включая нейтроны высоких энергий, необходимо использовать нейтроны не из замедлите-

ля, а из мишени. Такая возможность на спектрометре ГНЕЙС предусмотрена.

2. Ускоритель, нейтронопроводы, мишень и здание спектрометра ГНЕЙС (см. рис. 1 и рис. 2) расположены таким образом, что угол отбора нейтронного пучка равен 27–32°.

3. Расстояние от мишени до аппаратуры в зале ГНЕЙС составляет 30–40 м, что сравнимо с 12 м на установке ICE House в Лос-Аламосе. На последней для радиационных испытаний обычно используется протонный пучок до 1.7 мкА, тогда как внутренний пучок в синхроциклотроне ПИЯФ достигает 3 мкА.

4. Расчеты для нейтронного источника ГНЕЙС были выполнены с помощью программного комплекса GEANT-4 [8]. Рассчитывался выход нейтронов из свинцовой мишени при облучении ее протонами с энергией 1000 МэВ и интенсивностью пучка внутри камеры синхроциклотрона ПИЯФ $1.8 \cdot 10^{13}$ нейтронов/с. Длина мишени по пучку равнялась 40 см. Расстояние до “точки наблюдения” было взято равным 30.5 м, диапазон регистрируемых углов 20–35°. Было показано, что рассчитанный энергетический спектр нейтронов

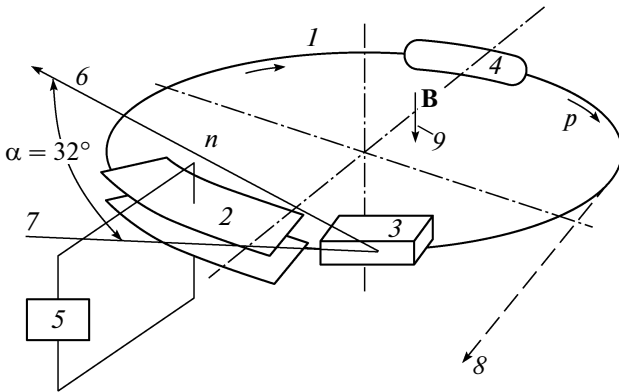


Рис. 3. Схема работы нейтронного генератора. 1 – “конечная” орбита протонов с энергией 1 ГэВ; 2 – пластины электростатического дефлектора; 3 – нейтронообразующая мишень; 4 – сгусток протонов; 5 – блок питания и управления дефлектором; 6 – ось направления нейтронного пучка; 7 – направление касательной к орбите; 8 – направление оси выводимых из ускорителя протонов для использования их в различных физических экспериментах; 9 – направление магнитного поля ускорителя.

близок по форме к стандартному спектру, а по величине потока в области выше 1 МэВ отличается от установки ICE House не более чем на 20%.

5. Отметим также, что, применяя различные режимы работы импульсного дефлектора, отклоняющего пучок на внутреннюю мишень, возможно регулировать временную структуру нейтронного пучка и тем самым обеспечить дополнительные преимущества нашей схемы [9].

1.3. Импульсный дефлектор

Схема работы синхроциклотрона с внутренней нейтронообразующей мишенью приведена на рис. 3. На радиусе “конечной” орбиты ускоряемых протонов 1 установлен электростатический дефлектор 2. На этом же радиусе, ниже плоскости орбиты 1, установлена нейтронообразующая мишень 3. Таким образом, ни дефлектор 2, ни мишень 3 не препятствуют свободному движению сгустка ускоренных протонов 4. Пластины дефлектора 2 подсоединены к многофункциональному блоку питания и управления дефлектором 5.

В нужный момент, когда сгусток 4 достигает предельной энергии и вращается по конечной орбите, на пластины дефлектора подается импульс напряжения необходимой полярности и амплитуды. Сгусток протонов получает импульс в вертикальном направлении, в результате чего он отклоняется и попадает на торец мишени. Ось нейтронного пучка 6 проходит через центр мишени и составляет угол α с касательной 7 к конечной орбите.

Временные характеристики импульсного нейтронного пучка определяются временем взаимодействия ускоренного протонного пучка с мишенью. Минимально возможное время взаимодействия определяется азимутальной протяженностью сгустка $\Delta\varphi \approx 45^\circ$ и равно $\approx 8-12$ нс, что является приемлемой величиной для использования времяпролетной методики. При достаточно большой амплитуде напряжения, подаваемого на пластины дефлектора, можно осуществить 100%-ный однооборотный сброс протонного пучка на внутреннюю мишень.

Схема для расчета работы нейтронного генератора приведена на рис. 4. Уравнения вертикального движения частицы в стандартном виде при нахождении ее между пластинами дефлектора (область I) и вне его (область II) имеют вид:

$$I \quad Z'' + nZ = \frac{e\varepsilon_z}{m\omega_0},$$

$$II \quad Z'' + nZ = 0,$$

где Z – отклонение протонов по вертикали, n – показатель спада магнитного поля, e – заряд электрона, m – масса протона, ω_0 – равновесная частота обращения нейтрона, ε_z – напряженность электрического поля дефлектора, дифференцирование ведется по углу обращения протона $\theta = \omega_0 t$.

Учитывая начальные условия входа протонов в дефлектор Z_0 и Z'_0 и сшивая решения в областях I и II на выходе протонов из дефлектора, получим решение в виде

$$Z = Z_0 \cos \sqrt{n}(\alpha + \beta) + \frac{Z'_0}{\sqrt{n}} \sin \sqrt{n}(\alpha + \beta) + \frac{2e\varepsilon_z}{nm\omega_0^2} \sin \left[\sqrt{n} \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) \right] \sin \frac{\sqrt{n}\alpha}{2}.$$

Первые два члена выражения представляют собой свободные вертикальные бетатронные колебания, определяющие вертикальный размер пучка $2a$ на входе дефлектора. Третий член представляет собой вертикальное отклонение пучка за счет действия дефлектора, которое оказывается не зависящим от начальных условий на входе в дефлектор. Используя это уравнение, можно определить величину напряжения, необходимого для отклонения пучка на величину $(h + a)$ при заданных α , β и n и расстоянии между пластинами d :

$$U = \varepsilon_z d = \frac{(h + a)dE\omega_0^2}{ec^2} \frac{1}{q(\alpha, \beta, n)}, \quad (1)$$

где $q(\alpha, \beta, n) = \frac{2 \sin \left[\sqrt{n} \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) \right]}{n} \sin \frac{\sqrt{n}\alpha}{2}$, $E = mc^2$.

Подставляя в (1) параметры синхроциклотрона $E = 1.938$ ГэВ, $\omega_0 = 83.6 \cdot 10^6$ с⁻¹, получим зависимость величины отклоняющего напряжения

только от геометрии дефлектора и расположения мишени:

$$U, \text{ кВ} = 15 \frac{(h+a)d}{q},$$

где h , a и d измеряются в см.

Оценим необходимую величину напряжения на дефлекторе при расстоянии между его пластинами $d = 6$ см. Пусть верхний край мишени расположен на расстоянии $h = a = 2$ см от медианной плоскости, т.е. практически касается пучка. Тогда необходимое напряжение на дефлекторе U будет равно 84.7 кВ (при $n = 0.05$, $q = 4.25$) и 118 кВ (при $n = 0.15$, $q = 3.05$).

Жесткие требования налагаются на длительность фронта отклоняющего импульса ≤ 50 нс (время нахождения сгустка вне пластин электрода), а также на точность синхронизации импульса отклонения с азимутальным положением сгустка относительно дефлектора. Отметим, что ошибка в синхронизации приводит к многооборотному сбросу протонного пучка и появлению нескольких нейтронных вспышек, следующих друг за другом через период обращения сгустка ~ 76 нс.

Используя схему отклонения пучка, применяемую при работе времяпролетного спектрометра ГНЕЙС, получаем короткие вспышки нейтронов, следующие с частотой 50 Гц. Такая временная структура может оказаться неоптимальной для проведения on-line-тестирования микросхем с низким временным разрешением.

Использование дефлектора для отклонения протонного пучка на внутреннюю мишень в принципе позволяет регулировать временную структуру импульсного нейтронного пучка. Подавая на дефлектор импульсы различной амплитуды и длительности, можно варьировать скорость подачи пучка на нейтронообразующую мишень и таким образом изменять временную структуру нейтронного пучка. Другая возможность – подача на пластины дефлектора синусоидального напряжения с частотой вертикальных бетатронных колебаний. Варьируя частоту, амплитуду и длительность, можно изменять скорость отклонения протонного пучка и регулировать временную структуру нейтронного пучка на мишени [9].

2. ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА НЕЙТРОНОВ

Нами были проведены эксперименты по измерению интенсивности и энергетических спектров нейтронов.

Измерения выполнялись с мишенью без замедлителя на пучке № 5 спектрометра на пролетных базах длиной 48.5 и 36 м. При этом нейтронный пучок проходил в вакуумированных секциях нейтронопровода через стену главного зала синхротронного цикла в здание спектрометра ГНЕЙС (рис. 1 и 2). Система стальных, латунных и свин-

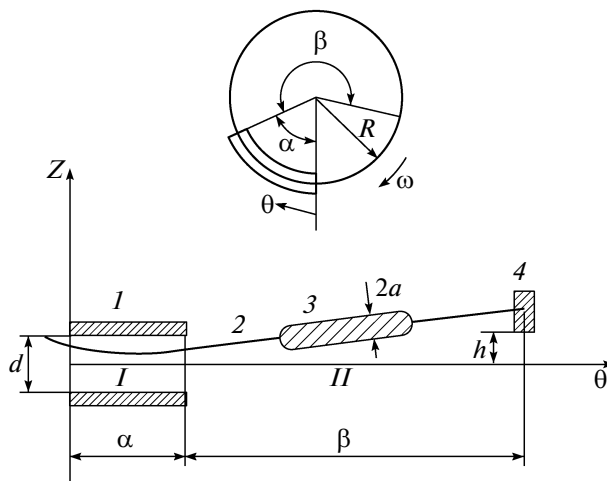


Рис. 4. Схема расчета импульсного дефлектора. 1 – пластины дефлектора; 2 – траектория движения сгустка; 3 – сгусток ускоренных протонов; 4 – мишень.

цовых коллиматоров формировала пучок $\varnothing 50$ мм на пролетной базе 36 м и $\varnothing 180$ мм на базе длиной 48.5 м. При работе на пролетной базе 48.5 м измерения выполнялись с использованием “чистящего” магнита, расположенного на расстоянии 36 м от мишени – источника нейтронов. Этот магнит предназначен для удаления из нейтронного пучка заряженных частиц, образующихся на коллиматорах и фильтрах нейтронного пучка.

В первой серии экспериментов на пролетной базе 48.5 м измерения спектра нейтронов проводились с помощью большой плоскопараллельной ионизационной камеры деления (рис. 2) с мишенями ^{235}U и ^{238}U . Камера наполнялась рабочим газом, состоящим из смеси метана и CF_4 при абсолютном давлении 2.5–3.5 атм. Камера держала слои урана $\varnothing 80$ мм и толщиной 150–560 мкг/см² на алюминиевых подложках толщиной 0.05 мм. Расстояние между катодом с активным слоем и собирающим электродом-анодом для всех мишеней равнялось 5 мм. Мишени были расположены перпендикулярно нейтронному пучку и ориентированы активным слоем в направлении от нейтронного источника.

В работе использовалась система регистрации, основанная на аналого-цифровом преобразователе (а.ц.п.) типа Flash с частотой оцифровки 100 МГц. Измерения проводились в многостоповом режиме с практически нулевым мертвым временем, что позволяет использовать максимально достижимый ток 3 мкА внутреннего протонного пучка. В качестве стартового сигнала использовался быстрый импульс с детектора γ -вспышки (ФЭУ-30 без сцинтиллятора), помещенного в нейтронный пучок на расстоянии 2 м от камеры деления. Этот сигнал также использовался для

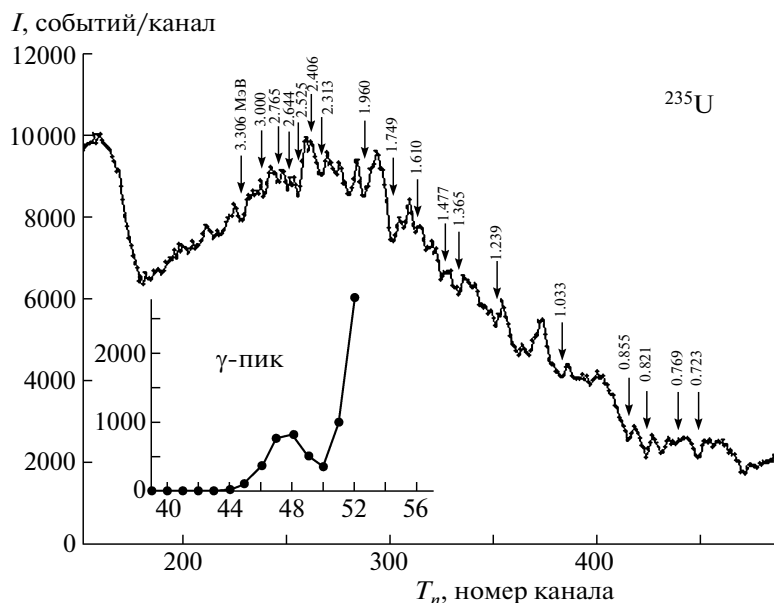


Рис. 5. Времяпролетный спектр нейтронов, измеренный с мишенью ^{235}U . T_n – время пролета нейтронов (ширина канала 10 нс), I – интенсивность зарегистрированных событий. Стрелками показано положение резонансов свинца.

контроля однооборотности сброса протонного пучка на нейтронообразующую мишень. Контроль ширины нейтронной вспышки важен для измерений при энергиях выше 1 МэВ, так как 2-я, 3-я и последующие нейтронные вспышки, вызванные многооборотным сбросом протонного пучка и разделенные временным интервалом ~ 76 нс, могут существенно ухудшить временное разрешение. В случае, когда интенсивность импульса от второго сброса была больше 10% от интенсивности первого сброса, события деления от всех мишеней, зарегистрированные для данного стартового сигнала, исключались. Для отделения сигналов событий деления от шумовых сигналов в условиях сильного сдвига нулевой линии использовался метод цифровых фильтров [10].

Калибровка, связанная с переводом шкалы времени пролета в энергетическую шкалу, была сделана с использованием релятивистских формул и положений резонансов в полном сечении углерода и свинца отдельно для каждой мишени. Для этой цели были использованы графитовый и свинцовый фильтры, а также естественная структура спектра быстрых нейтронов из свинцовой нейтронообразующей мишени (рис. 5). Нейтронный поток был вычислен из экспериментальных данных, полученных для мишеней ^{235}U и ^{238}U , и рекомендованных оценок сечений деления для этих ядер [11, 12].

Целью второй серии экспериментов на спектрометре ГНЕЙС было: 1) использование альтернативного детектора нейтронов для повышения достоверности результатов измерений спектра нейтронов; 2) расширение диапазона измерений

спектра нейтронов вплоть до 1 ГэВ; 3) повышение энергетического разрешения спектрометра в области высоких энергий.

В качестве детектора нейтронов в этих экспериментах использовалась система плоскопараллельных лавинных счетчиков со слоями ^{235}U и ^{238}U , помещенными в общий газовый объем камеры, заполненной гептаном при давлении около 6 Торр. Слои урана $\varnothing 50$ мм и толщиной 120–350 мкг/см² были нанесены методом вакуумного напыления тетрафторида урана на тонкую подложку из формваровой пленки. Полученные таким способом мишени позволяют одновременно регистрировать оба осколка деления в совпадении, что, в свою очередь, позволяет надежно идентифицировать акты деления на фоне событий, вызванных регистрацией в счетчике иных заряженных частиц. Низкое давление рабочего газа в камере в сочетании с более тонкими (по сравнению с обычной ионизационной камерой деления) электродами позволяет снизить фоновый эффект рассеяния нейтронов на конструкционных материалах детектора.

В качестве дополнительного монитора интенсивности нейтронного пучка использовалась стандартная ионизационная камера деления с мишенями ^{235}U и ^{238}U $\varnothing 120$ мм и толщиной 120–350 мкг/см², конструкция которой аналогична описанной выше камере деления с мишенями $\varnothing 180$ мм.

Для повышения верхнего предела измерений спектра нейтронов с 200 МэВ до 1 ГэВ необходимо было существенно улучшить энергетическое

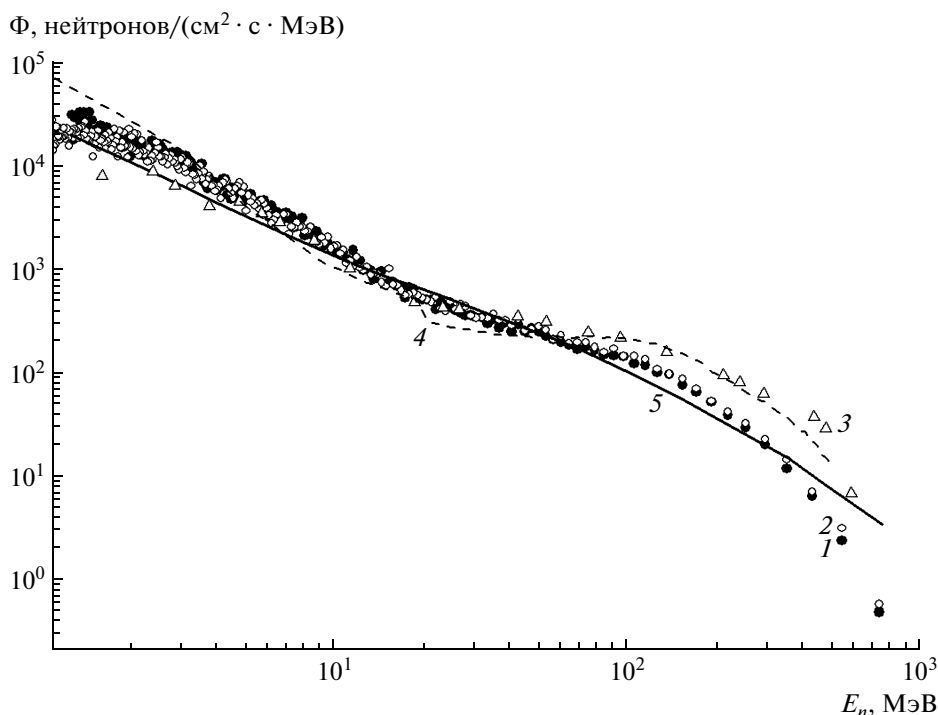


Рис. 6. Спектры нейтронов в диапазоне энергий 1–1000 МэВ. 1, 2 – ГНЕЙС, экспериментальные данные для мишеней ^{238}U и ^{235}U соответственно; 3 – спектр установки ICE House в Лос-Аламосе; 4 – ГНЕЙС, расчетный спектр; 5 – спектр стандарта JEDEC.

разрешение спектрометра, которое в этом диапазоне энергий определяется в основном длительностью вспышки быстрых нейтронов, имеющей форму, близкую к гауссовской, с шириной на половине высоты около 10 нс, и величиной дискретизации (шириной канала) временного спектра нейтронов. Переход от использовавшейся ранее величины 10 нс к ширине канала 1–2 нс был сделан с помощью новой измерительной системы на базе 4-канального а.ц.п. типа Flash (DC270, производство фирмы Acqiris, Швейцария) с частотой выборки до 1 ГГц. Такой переход позволил повысить энергетическое разрешение спектрометра на ~40%.

Измерения спектра нейтронов в расширенном диапазоне энергий были выполнены на пролетной базе 36 м. С этой целью детектор нейтронов на плоскопараллельных лавинных счетчиках и ионизационная камера деления были установлены в разрыве нейтропровода сразу после коллиматора пучка $\varnothing 50$ мм, помещенного в вакуумированной секции нейтропровода. Обработка экспериментальных данных проводилась для двух сторон мишени ^{235}U и одной стороны мишени ^{238}U по описанной выше методике.

Измеренный спектр нейтронов в диапазоне энергий 1–800 МэВ показан на рис. 6. Здесь же для сравнения приведены расчетный спектр, стандартный спектр, рекомендованный для проведения ис-

пытаний электронных изделий по международному стандарту JEDEC, и спектр нейтронов, полученный на стенде ICE House в Лос-Аламосе. В таблице приведено сравнение параметров нейтронных источников на базе синхроциклотрона ПИЯФ и LANSCE.

В настоящее время в ПИЯФ ведутся работы по организации стенда, инфраструктуры и необходимой аппаратуры для проведения массовых испытаний на нейтронном пучке авиационной и космической электронной аппаратуры.

Источник протонов	LANSCE	Синхроциклотрон ПИЯФ
Вещество мишени	Вольфрам	Свинец
Энергия протонов, МэВ	800	1000
Частота вспышек, Гц	200	50
Максимальная интенсивность нейтронов на 4π , нейтронов/с	$20 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{14}$
Поток нейтронов на стенде, нейтронов/(с · см ²)	$1.7 \cdot 10^5$	10^5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ПИЯФ на базе синхроциклотрона 1000 МэВ получен нейтронный пучок с энергетическим спектром нейтронов, повторяющим спектр атмосферных нейтронов и удовлетворяющим международному стандарту JEDEC [13]. Этот пучок является вторым в мире и единственным в Европе спектром с верхней границей до 1000 МэВ, позволяющим проводить ускоренные испытания компонентов радиоэлектроники по международным стандартам.

В последние десять лет ПИЯФ регулярно проводит на договорной основе испытания радиационной стойкости электроники на протонном пучке. На ускорителе создан специализированный пучок со стандартизированными параметрами, созданы приборы для диагностики пучка и приборы измерения дозы. На протонных пучках синхроциклотрона 1000 МэВ ПИЯФ ведутся работы как сотрудниками ПИЯФ, так и сторонними ведущими организациями России по проведению радиационных испытаний: ОАО «РНИИ “Электрон-стандарт”» (С.-Петербург), ОАО “ЭНПО СПЭЛС” (Москва), ФГУП ЦНИИ “Комета” (Москва) и др. [14]. ПИЯФ обладает большим опытом для проведения исследований и испытаний микро- и наноэлектроники, имеет лабораторию радиационной физики с высококвалифицированными научными кадрами.

Создание нового нейтронного пучка и испытательного стенда значительно расширяет экспериментальные возможности по радиационным исследованиям на синхроциклотроне ПИЯФ. Появилась возможность создания в ПИЯФ уникального европейского центра по радиационным испытаниям авиа- и космической электронной аппаратуры на протонном и нейтронном пучках в соответствии с высокими требованиями международных стандартов.

Авторы благодарят А.С. Покровского, А.Г. Котова и В.И. Юрченко за разработку систем спектрометра ГНЕЙС, за многолетнюю успешную его экс-

плуатацию и настройку для проведения эксперимента, а также А.Б. Лаптева — активного участника всех экспериментов на спектрометре ГНЕЙС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.jedec.org/download/search/JESD89A.pdf>.
2. *Lisowski P.W., Bowman C.D., Russell G.J. et al.* // Nucl. Sci. and Engineering. 1990. V. 106. P. 208.
3. *Prokofiev A.V., Blomgren J., Majerle M. et al.* // NSREC 2009, Radiation Effects Data Workshop. Quebec, 20–24 July, 2009. Paper W-27. P. 1.
4. *Абросимов Н.К., Алхазов В.Г., Дмитриев С.П. и др.* // ЖТФ. 1971. Вып. 41. С. 1769.
5. *Abrossimov N.K., Mikheev G.F., Riabov G.A.* // PNPI Synchrocyclotron in 2002–2006. PNPI XXXV. Main Scientific Activity 2002–2006. Gatchina: PNPI, 2007. P. 6.
6. *Abrossimov N.K., Borukhovich G.Z., Laptev A.B. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Section A. 1985. V. 242. P. 121.
7. *Абросимов Н.К., Котов А.Г., Куликов А.В. и др.* // Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 2–4 октября 1972. М.: Наука, 1973. Том II. С. 94.
8. GEANT-4. <http://geant4.web.cern.ch/geant4>.
9. *Абросимов Н.К., Куликов А.В., Михеев Г.Ф.* А.с. 997593 РФ // БИ. 2000. № 25. Часть II. С. 433.
10. *Burgess D.D., Tervo R.J.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Section A. 1983. V. 214. P. 431.
11. *Carlson A.D., Chiba S., Hamsch F.-J. et al.* // Summary Report of a Consultants' Meeting held in Vienna. Austria, 2–6 December 1996. IAEA Report INDC (NDC)-368. Vienna. 1997. P. 23.
12. *Shcherbakov O.A., Donets A.Yu., Evdokimov A.V. et al.* // Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology. 7–12 October 2001, Tsukuba, Ibaraki, Japan; J. Nucl. Sci. and Technol. Suppl. 2. 2002. V. 1. P. 230.
13. *Абросимов Н.К., Иванов Е.М., Михеев Г.Ф. и др.* Патент 80646 РФ // Бюл. Изобретения. Полезные модели. 2009. № 4. С. 123.
14. *Абросимов Н.К., Воробьев А.С., Иванов Е.М. и др.* // Петербургский журнал электроники. 2009. № 1. С. 31.