объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

Л-254

16-88-65

А.Р.Крылов, Г.Н.Тимошенко

НОВЫЙ ТИП СПЕКТРОМЕТРА НЕЙТРОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ЗАЩИТЫ И ДОЗИМЕТРИИ

Направлено в журнал
"Приборы и техника эксперимента"

1988

Основной компонент полей смешанного рассеянного излучения, определяющий радиационную обстановку за защитами высокоэнергетичных ускорителей, - нейтроны широкого энергетического диапазона - от тепловых до нескольких сотен МэВ, причем до 50 - 70% эквивалентной дозы нейтронов может быть обусловлено нейтронами с энергией более 20 МэВ. На различных ускорителях, вне зависимости от энергии ускоряемых протонов, формы спектральных распределений нейтронов утечки в целом подобны и подавляющая часть спектра заключена в интервале энергий до 500 МэВ /1/. Поскольку значение удельной эквивалентной дозы нейтронов слабо зависит от энергии в диапазоне 10 - 500 МэВ, то на практике эквивалентную дозу высокоэнергетичных нейтронов определяют обычно по их флюенсу. Для этой цели наиболее часто применяются углеродсодержащие активационные детекторы (реакция $^{12}C(n,2n)^{11}C$ с порогом ~ 20 МэВ). Однако данному методу присущ ряд серьезных недостатков - сильная зависимость показаний детекторов от компонентного и спектрального состава полей излучения, в то время как, например, примесь заряженных частиц (в основном протонов) в полях излучения за сплошными защитами может достигать 10 и более процентов от общего потока адронов /2-4/. Другим недостатком активационных детекторов является низкая чувствительность. Реально минимальный измеряемый флюенс высокоэнергетичных нейтронов составляет $(2 \div 5)\cdot 10^{-4}$ $н\cdot м^{-2}\cdot с^{-1}$, что соответствует дозе $\sim 10^{-5}$ $Зв\cdot час^{-1}$. В то же время согласно нормативным требованиям /5/ создание биологических защит должно выполняться таким образом, чтобы суммарная мощность дозы от всех компонентов излучения во всем их энергетическом диапазоне не превышала за защитами $1{,}4\cdot 10^{-5}$ $Зв\cdot час^{-1}$.

Максимальная эквивалентная доза низкоэнергетичных нейтронов наиболее корректно может быть определена на основе измерения их спектров с помощью многошарового спектрометра Боннера /6/, представляющего собой сцинтилляционный счетчик с кристаллом LiJ(Eu) ($1/v$-детектор), помещаемый в сферические замедлители из полиэтилена. Спектр нейтронов находится путем решения системы уравнений, связывающих его с показаниями спектрометра при различных диаметрах замедлителей. В области энергий нейтронов более 20 МэВ спектрометр со

БИБЛИОТЕКА

стандартным набором замедлителей обладает слабой информативностью и его функции чувствительности в этом диапазоне энергий экспериментально не изучены. Поэтому для восстановления спектров нейтронов во всем энергетическом диапазоне помимо данных спектрометра Боннера привлекаются показания углеродсодержащих активационных детекторов [7,8], что позволяет нормировать высокоэнергетичную часть спектров по флюенсу, но ограничивает чувствительность метода. Форма восстановленных спектров нейтронов в области высоких энергий отражает качественно характер их поведения, однако зависит от априорного задания верхней энергетической границы спектров. К тому же спектры нейтронов в этой области энергий восстанавливаются, как правило, со значительной погрешностью. Тем не менее в настоящее время спектрометр Боннера в комплексе с активационными детекторами является основной методической базой исследований спектрального состава полей нейтронов на ускорителях, и с его помощью выявлен ряд закономерностей формирования полей. Так, установлено достоверно, что в жестких полях излучения за толстыми защитами спектры нейтронов (в единицах $\Phi(E)\times E$) имеют максимум в районе энергий 50 ÷ 150 МэВ.

Известны отдельные попытки расширить методическую основу измерений характеристик полей высокоэнергетичных нейтронов (камера деления с Bi , спектрометр на основе искровых камер, наборы различных активационных детекторов и т.д.), но из-за серьёзных недостатков широкого применения в физике защиты и дозиметрии эти способы не нашли. Таким образом, методическое обеспечение спектрометрии высокоэнергетичных нейтронов в настоящее время остается еще слабо разработанным и на практике достижение рекомендованной точности измерений дозы [9] таких нейтронов в полях за защитами, удовлетворяющими нормативным требованиям, не представляется пока возможным.

В Отделе радиационной безопасности и радиационных исследований Объединенного института ядерных исследований для измерений флюенса и максимальной эквивалентной дозы нейтронов высокой энергии был разработан новый прибор – потокомер-дозиметр нейтронов [10-13], во многом свободный от указанных выше недостатков. Его показания практически не зависят от примеси заряженного компонента в полях излучения и от спектров нейтронов. К тому же прибор обладает чувствительностью, на три-четыре порядка более высокой, чем углеродсодержащие активационные детекторы, и пригоден для измерений не только в контролируемых зонах, но и для радиационного мониторинга на местности в районах расположения высокоэнергетичных ускорителей. В течение двух лет потокомер-дозиметр использовался при исследованиях радиационной обстановки на синхрофазотроне и сильноточном фазотроне ОИЯИ.

Потокомер-дозиметр представляет собой счетчик нейтронов S_n с детектором в виде цилиндра из пластического сцинтиллятора, обладающего хорошей тканеэквивалентностью, диаметром и высотой 120 мм. Детектор окружен охранным сцинтиллятором вето-счетчика $\bar{S}$, предназначенного для режекции заряженных частиц (рис.1). Порог вето-счетчика – 1,2 МэВ в единицах эквивалентной по световыходу энергии электронов (ЭЭЭ); толщина стенок охранного сцинтиллятора – 1,4 г·см$^{-2}$. Эффективность работы прибора в полях, содержащих значительную примесь заряженных частиц, низкоэнергетичных нейтронов и γ-квантов, достигается путем предварительного отбора событий $S_n + \bar{S}$ и дискриминации в канале S_n событий с малыми энерговыделениями. Для обеспечения линейности нейтронного счетчика в области больших энерговыделений на его фотоумножитель подается питание, сниженное по сравнению с номинальным. Электронная логика прибора выполнена на блоках КАМАК производства фирмы "Polon"; анализатор – NTA-1024.

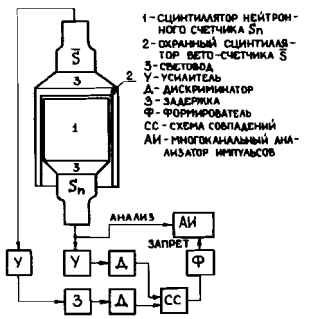

Рис.1. Общий вид конструкции и структурная схема прибора.

Максимальная эквивалентная доза H нейтронов с энергией более 20 МэВ определяется через линейные комбинации показаний прибора N при определенных порогах регистрации импульсов j :

$$H \simeq \int \Phi(E)\sum_j a_j \varepsilon_j(E)\,dE = \sum_j a_j \int \Phi(E)\varepsilon_j(E)\,dE = \sum_j a_j N_j .$$

Здесь $\Phi(E)$ – спектр нейтронов; $\varepsilon_j(E)$ – энергетическая зависимость эффективности регистрации нейтронов при пороге нейтронного счетчика j ; a_j – некоторые коэффициенты, подобранные таким образом, чтобы функция квазичувствительности прибора $\lambda(E)$ была близка к энергетической зависимости максимальной удельной дозы нейтронов $h_M(E)$ [5,14]:

$$\lambda(E) = \sum_j a_j \varepsilon_j(E) \simeq h_M(E).$$

Выбор коэффициентов a_j, при котором начиная с определенной энергии нейтронов $\lambda(E)=1$, позволяет находить аналогичным образом флюенс нейтронов. На рис.2 для примера приведена функция квазичувствительности потокомера и формула определения плотности потока нейтронов с энергией более 23 МэВ. Дифференциальная нелинейность потокомера не превышает 8%. Значения порогов j указаны в единицах ЭЭЭ, МэВ. Для удобства набор информации производится на многоканальном анализаторе,

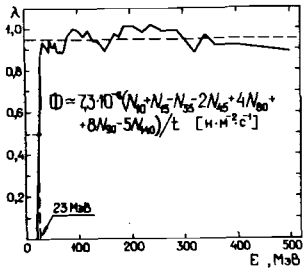

Рис.2. Функция квазичувствительности потокомера $\lambda(E)$.

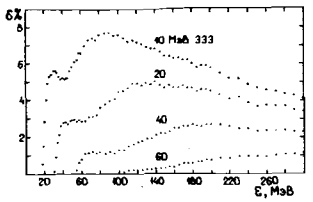

Рис.3. Энергетические зависимости эффективностей $\varepsilon(E)$ нейтронного счетчика при различных значениях порогов регистрации импульсов, рассчитанные с учетом влияния охранного сцинтиллятора.

и N_j в этом случае представляет собой набранные за время экспозиции t суммарные счета по каналам, превышающим j (шкала анализатора градуирована в единицах ЭЭЭ).

$\varepsilon_j(E)$ рассчитывались методом Монте-Карло [15] для случая бокового падения нейтронов на сцинтиллятор нейтронного счетчика, что характерно для большинства измерений за защитами ускорителей (изменение ориентации прибора приводит к изменению его показаний в пределах $\sim$ 10%). Точность расчетов по программе [15], оценивавшаяся её автором путем сравнения с рядом экспериментов, достигает в настоящее время 4 ÷ 5% [16,17] в интервале энергий нейтронов до $\sim$ 400 МэВ. При расчетах было учтено влияние вето-счетчика $\bar{S}$ на эффективность нейтронного счетчика S_n, выражающееся в ложных срабатываниях $\bar{S}$ от протонов, рожденных нейтронами в S_n и вышедших за его пределы. Этот эффект приводит к заметному снижению эффективностей при энергиях нейтронов более $\sim$ 100 МэВ. Учитывалось также собственное амплитудное разрешение счетчика S_n с данным сцинтиллятором. Некоторые расчетные эффективности нейтронного счетчика приведены для примера на рис.3. Возмущением поля высокоэнергетичных нейтронов во внутренней полости охранного сцинтиллятора можно практически пренебречь. Специальная режекция γ-квантов в приборе не предусмотрена, поскольку минимальный выбранный порог регистрации j составляет 10 МэВ ЭЭЭ (для потокомера). Доля же высокоэнергетичных γ-квантов от распада π^0-мезонов весьма мала в полях излучений за толстыми боковыми защитами, т.к. средняя энергия нейтронов в защите, как правило, ниже порога мезонообразования. Реально нижняя граница применимости потокомера по чувствительности составляет несколько нейтронов в секунду через квадратный метр [13].

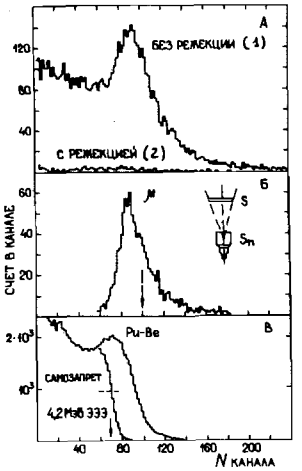

Рис.4. Аппаратурные распределения импульсов нейтронного счетчика от космического фона (А,Б) и от Pu-Be источника нейтронов (В).

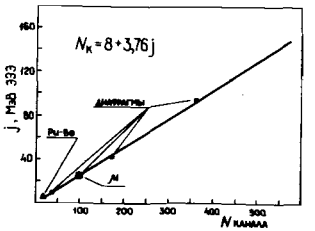

Рис.5. Зависимость порога регистрации от номера канала анализатора, полученная в результате градуировки.

Градуировка прибора осуществлялась путем засветки нейтронного счетчика от светодиода, питаемого генератором наносекундных импульсов, через светонепроницаемые диафрагмы с калиброванными отверстиями. Привязка производилась по центру тяжести распределения Ландау от мюонов космического происхождения, соответствующего энерговыделению в сцинтилляторе S_n 24,6 МэВ ЭЭЭ. Результаты градуировки представлены на рис.4,5. На рис. 4А приведены аппаратурные распределения S_n от космического фона, набранные при отключении (1) и включении (2) канала вето-счетчика $\bar{S}$. Спектр 1 обусловлен, главным образом, мюонами; спектр 2 – нейтронами космического происхождения. Аппаратурное распределение от вертикально падающих на S_n мюонов получено с помощью телескопа счетчиков, выделявшего в пространстве телесный угол $4{,}6 \cdot 10^{-2}$ ср (рис.4Б). Уровень дискриминации импульсов S_n в канале совпадений установлен эквивалентным 4,2 МэВ ЭЭЭ по пику от γ-квантов с энергией 4,43 МэВ (Pu-Be источник нейтронов). Рис.4В иллюстрирует работу прибора при самозапрете счетчиком S_n событий с энерговыделениями, большими заданного (для наглядности коэффициент преобразования увеличен). На рис.5 приведена полученная при градуировке с помощью диафрагм зависимость между энерговыделениями в S_n, т.е., по существу, порогами в единицах ЭЭЭ и номерами каналов анализатора.

Зависимость показаний S_n при различных порогах регистрации от энергетического распределения нейтронов может быть использована для измерений дифференциальных по энергии плотностей потоков нейтронов в рассеянных полях смешанного излучения за защитами ускорителей.

В работе [12] показана принципиальная возможность определения по показаниям прибора спектров нейтронов с энергией более 20 МэВ на основе восстановления различных типов заранее заданных тестовых спектров. Задача восстановления спектров сходна с задачей, решаемой при обработке результатов, полученных с помощью спектрометра Боннера (вместо функций чувствительности замедляющих сфер разного диаметра используются энергетические зависимости эффективностей S_n при различных порогах регистрации импульсов). В общем виде связь между показаниями прибора N_j при пороге j со спектром нейтронов $\Phi(E)$ определяется интегральным уравнением Фредгольма I рода:

$$N_j = \int \Phi(E)\,\mathcal{E}_j(E)\,dE \qquad j = 1 \ldots m .$$

Определение $\Phi(E)$ сводится к решению системы из m алгебраизированных уравнений, которое, в принципе, может быть неустойчивым. Для решения данной некорректной задачи используется метод статистической регуляризации [18] с привлечением априорной информации о гладкости и положительности искомого спектра. В программе восстановления спектров решается система из 13 уравнений для порогов j: 20; 25; 30; 35; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 120; 140 МэВ ЭЭЭ. Погрешности N_j – статистические. Критерием близости найденного решения к истинному спектру служит максимальное приближение вычисленных значений N_j к экспериментальным.

На рис.6 представлены некоторые результаты восстановления с помощью описанной выше методики спектров нейтронов высоких энергий, измеренных за защитами ускорителей ОИЯИ. Спектры приведены в виде $\Phi(E)\times E$. Погрешности вооотановления соответотвуют среднеквадратичным отклонениям найденной функции от наиболее вероятной величины. Спектр 6А измерен за 2-метровой бетонной защитой сильноточного фазотрона, на которую падает вторичное излучение, вылетающее под углом $\sim 15^0$ из мишени, облучаемой протонами с энергией 660 МэВ. Спектр 6Б измерялся за 3-метровой бетонной боковой защитой канала транспортировки пучков синхрофазотрона в

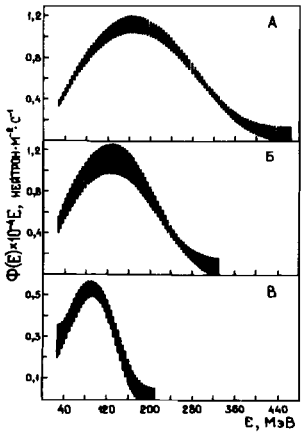

Рис.6. Спектры нейтронов за защитами сильноточного фазотрона (А,В) и синхрофазотрона (Б) ОИЯИ, восстановленные по показаниям прибора.

районе расположения мишенной станции. Энергия протонов пучка - 7,1 ГэВ. Спектр 6В измерен за гетерогенной (1,5 м железа + 2 м бетона) ловушкой пучка протонов сильноточного фазотрона. Во всех случаях спектрометр располагался на высоте пучка. Вклад заряженных частиц в показания нейтронного счетчика достигал $\sim$ 40%, причем основная часть событий, обусловленных нейтронами, сосредоточена в области относительно небольших энерговыделений.

Характер поведения представленных спектров качественно подобен форме спектров высокоэнергетичных нейтронов, измеряемых спектрометром Боннера с привлечением данных углеродсодержащих активационных детекторов. Максимумы функций $\Phi(E)\times E$ лежат в диапазоне энергий 90 ÷ ÷160 МэВ, но ширина максимумов заметно меньше, чем у спектров, полученных с помощью спектрометра Боннера. Это связано, по-видимому, с некорректной интерпретацией показаний углеродсодержащих детекторов большого объема. Учет вклада в их активацию от заряженных частиц и использование в программе восстановления спектров реальных функций чувствительности детекторов приводит к улучшению согласия по форме между спектрами, измеренными по показаниям спектрометра Боннера [19] и по описанной выше методике. Различия в значениях плотностей потоков высокоэнергетичных нейтронов, полученных по восстановленным спектрам и по формуле потокомера, не превышают 15%.

Развитие "многопороговой" методики, позволившей разработать достаточно универсальный прибор, обладающий функциями потокомера, дозиметра и спектрометра высокоэнергетичных нейтронов, в сочетании с большой чувствительностью дает возможность повысить точность измерений характеристик полей излучения за защитами ускорителей, особенно в тех полях, где мощность эквивалентной дозы меньше допустимого уровня для категории "Б" облучаемых лиц. Перспективным представляется, на наш взгляд, объединение показаний спектрометра Боннера и настоящего "многопорогового" прибора для восстановления спектров нейтронов во всем диапазоне от тепловой области до релятивистских энергий.

Авторы благодарят Алейникова В.Е., Бамблевского В.П., Бескровную Л.Г., Комочкова М.М., Куликова В.А., Солодилова А.В. за поддержку и помощь при выполнении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кимель Л.Р. Физические аспекты защиты протонных ускорителей высоких энергий. М., Атомиздат, 1976, с.68.
2. Комочков М.М., Сычев Б.С. Сборник докладов Совещания по дозиметрии и физике защиты на ускорителях. ОИЯИ, 16-4888, Дубна, 1970, с.15.

3. Алейников В.Е.,Комочков М.М.,Крылов А.Р.,Тимошенко Г.Н. ОИЯИ, Р16-11891, Дубна, 1978.
4. Комочков М.М.,Лебедев В.Н. Практическое руководство по радиационной безопасности на ускорителях заряженных частиц. М., Энергоатомиздат, 1986, с.80.
5. Нормы радиационной безопасности НРБ-76 и основные санитарные правила. М., Энергоиздат, 1981.
6. Bramblett R.L.,Ewing R.I.,Bonner T.W. A new type of neutron spectrometer. Nucl. Instr. & Meth., v.9, N1, 1960.
7. Алейников В.Е.,Гердт В.П.,Комочков М.М. Neutron monitoring for radiation protection purposes., v.1, IAEA, Vienna, 1973.
8. Алейников В.Е.,Гердт В.П.,Комочков М.М. В трудах IУ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, т.2, с.240.
9. General principles of monitoring for radiation protection of workers. ICRP, Publication 35, N4, Pergamon Press, 1982.
10. Алейников В.Е.,Солодилов А.В.,Тимошенко Г.Н.,Хан Г. Препринт ОИЯИ Р16-80-453, Дубна, 1980.
11. Алейников В.Е.,Солодилов А.В.,Тимошенко Г.Н.,Хан Г. ОИЯИ, 16-82-419, Дубна, 1982.
12. Алейников В.Е.,Комочков М.М.,Тимошенко Г.Н.,Солодилов А.В. АЭ, 1983, т.54, вып.1, с.68.
13. Алейников В.Е.,Солодилов А.В.,Тимошенко Г.Н. Препринт ОИЯИ 16-85-34, Дубна, 1985.
14. Radiation protection instrumentation and its application. ICRP, Publication 35, N.Y., Pergamon Press, 1982.
15. Stanton N.R. Ohio state university, COO-1545-92, 1971.
16. Del Guerra A. Nucl. Instr. & Meth., v.135, 1976, p.337.
17. Cecil R.A. et al. Nucl. Instr. & Meth., v.161, 1979, p.439.
18. Туронцева Л.С. Решение обратных некорректных задач методом статистической регуляризации (программа ОБР-23). Препринт ИПМ АН СССР, М., 1975.
19. Белогорлов Е.А.,Крупный Г.И.,Кузнецов А.А.,Лебедев В.Н., Расцветалов Я.Н. В трудах X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, ОИЯИ, Д9-87-105, 1987, т.2, с.396.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 января 1988 года.

Крылов А.Р., Тимошенко Г.Н. 16-88-65

Новый тип спектрометра нейтронов высокой энергии для исследований в области физики защиты и дозиметрии

Описан прибор для измерений характеристик высокоэнергетичного нейтронного компонента в полях смешанного рассеянного излучения за защитами ускорителей. Принцип работы прибора основан на зависимости показаний нейтронного счетчика на основе пластического сцинтиллятора от дифференциальной по энергии плотности потока высокоэнергетичных нейтронов при различных порогах регистрации импульсов. Прибор, состоящий из нейтронного счетчика, окруженного охранным сцинтиллятором для режекции заряженных частиц, обладает высокой чувствительностью и может использоваться для измерения флюенсов, максимальной эквивалентной дозы и спектров нейтронов с энергиями более 20 МэВ. Восстановление спектров нейтронов по показаниям прибора осуществляется методом статистической регуляризации. Описаны конструкция прибора, его градуировка и методики измерений, приведены некоторые предварительные результаты восстановления спектров нейтронов за защитами ускорителей ОИЯИ.

Работа выполнена в Отделе радиационной безопасности и радиационных исследований ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод авторов

Krylov A.R., Timoshenko G.N. 16-88-65

A New Type of High Energy Neutron Spectrometer for Investigations in Radiation Protection Physic and Dosimetry

The device for measurements of high energy neutron component characteristics in mixed undirectional radiation fields behind the accelerators shieldings is described. The principle of the device is based on dependence readings of neutron counter with plastic scintillator on high energy neutron energy differential flux density at various thresholds of signal registration. The device consisting of neutron counter surrounded by veto scintillator to charged particles rejection has a high sensibility and can be used for measurements of fluxes, maximum equivalent doses and spectra of neutrons with energy above 20 MeV. The unfolding of neutron spectra basing on device data is performed by the statistical regularization method The device construction, calibration, measurement methods and some preliminary results of neutron spectra behind the JINR accelerators shieldings unfolding are presented.

The investigation has been performed at the Department of Radiation Safety and Radiation Researches, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988