



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2009–5  
ОРИ

Г.И. Крупный, В.Н. Пелешко, Я.Н. Расцветалов,  
Е.Н. Савицкая, А.В. Санников

**К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ  
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОПОРНОГО ПОЛЯ  
НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Направлено в *Атомную энергию*

**Протвино 2009**

**Аннотация**

Крупный Г.И., Пелешко В.Н., Расцветалов Я.Н., Савицкая Е.Н., Санников А.В. К вопросу создания высокоэнергетического опорного поля нейтронного излучения. Препринт ИФВЭ 2009–5. – Протвино, 2009. – 10 с., 4 рис., 5 табл., библиогр.: 18.

Представлены методика и результаты измерений спектра нейтронов за верхней защитой экспериментального зала У-70 с помощью комбинации индиевого спектрометра Боннера и углеродного активационного детектора. Определены интегральные характеристики поля нейтронов, которое перспективно для использования в различных областях дозиметрии, радиационной физики и радиобиологии, в задачах обеспечения радиационной безопасности в условиях воздушных полетов и в космосе, а также при изучении сбоев в микроэлектронике под действием высокоэнергетических нейтронов.

**Abstract**

Krupny G.I., Peleshko V.N., Rastsvetalov Ya.N., Savitskaya E.N., Sannikov A.V. To the Question about Creation of High Energy Neutron Reference Field. Preprint 2009–5. – Protvino, 2009. – p. 10, figs. 4, tables 5, refs.: 18.

The method and measurement data for the neutron spectrum outside the top shield of the U-70 experimental hall by means of the combination of indium Bonner spectrometer and carbon activation detector are presented. The integral characteristics of the neutron field, which is promising for usage in different fields of dosimetry, radiation physics and radiobiology, in the problems of radiation safety in air flights and in space as well as in the study of upsets in microelectronics caused by high energy neutrons, have been determined.

## Введение

Низкоэнергетические опорные поля нейтронного излучения ИФВЭ [1] были созданы в девяностые годы на основе радионуклидных источников  $^{239}\text{Pu}$ -Ве и  $^{252}\text{Cf}$  для моделирования мягких спектров нейтронов за защитой протонного синхротрона ИФВЭ на 70 ГэВ (У-70) и градуировки дозиметрической аппаратуры. Последующие измерения спектров за относительно «тонкой» верхней бетонной защитой экспериментального зала У-70 показали наличие значительного вклада нейтронов высоких энергий [2]. В связи с этим существует практическая необходимость в высокоэнергетическом поле нейтронов со стабильными спектральными характеристиками для тестирования детекторов радиационного контроля, а также для применения в ряде других прикладных задач.

В частности, в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) с 1993 г. широко используются такие высокоэнергетические опорные поля [3], созданные в рамках научной программы Евросоюза «Радиационная безопасность воздушных полетов» для моделирования нейтронных спектров, генерируемых космическим излучением в атмосфере на высотах  $\sim 10$  км. Проблема обеспечения радиационной безопасности воздушных полетов возникла после выхода в свет Публикации МКРЗ №60 [4], в которой предел дозы облучения для населения был снижен до 1 мЗв/год, в результате чего экипажи авиалайнеров вошли в категорию профессионально облучаемого персонала.

Концептуальные изменения в системе дозиметрических величин и дозовых пределов нашли отражение также в отечественных Нормах радиационной безопасности НРБ-99 [5]. Кроме задач радиационной безопасности, высокоэнергетические опорные поля нейтронов являются инструментом для изучения различных радиационных эффектов, в том числе сбоев электронной аппаратуры под действием высокоэнергетических адронов, проблема которых становится все более актуальной в условиях космических и воздушных полетов, а также экспериментов на Большом адронном коллайдере (БАК).

На ускорительном комплексе ИФВЭ такое поле может быть создано на верхней защите экспериментального зала протонного синхротрона на 70 ГэВ. Наиболее подходящим является восточный участок защиты, на котором мониторинг мощности дозы нейтронного излучения при работе ускорителя проводится с помощью стационарного радиационного монитора РМ-58 автоматизированной системы радиационного контроля У-70. На этом участке на протяжении многих лет во время работы ускорителя наблюдается максимальная в экспериментальном зале мощность дозы нейтронов  $\sim 0,5\text{--}1$  мЗв/ч. Эта область верхней защиты является ближайшей к внутренним мишеням кольцевого зала ускорителя, вторичное излучение от которых в значительной степени определяет радиационную обстановку во всем экспериментальном зале. Неизменность спектральных характеристик поля нейтронов вблизи РМ-58 была ранее

установлена по результатам многолетних исследований чувствительности индивидуальных дозиметров нейтронов с помощью пассивного дозиметра-спектрометра нейтронов (ПДСН) [6].

В отличие от предыдущих исследований [2, 7], где было заметно влияние заряженного компонента на показания детекторов, в данной работе применены следующие детекторы нейтронного излучения:

- мног шаровой спектрометр Боннера на основе индиевого активационного детектора тепловых нейтронов, который нечувствителен к фотонному и заряженному компонентам поля излучения;
- специально изготовленные углеродные активационные детекторы (УАД) большого объема на основе графита и полиэтилена.

Преимуществом активационных детекторов перед обычно используемыми детекторами активного типа является также независимость их показаний от импульсной структуры поля излучения ускорителя. Измерения с помощью спектрометра Боннера и УАД на верхней защите протонного синхротрона ИФВЭ выполнены в ноябрь-декабрьском сеансе 2008 г. при работе внутренних мишеней и медленного вывода протонного пучка.

### Методика и результаты измерений

Детекторы тепловых нейтронов представляют собой индиевые диски диаметром 20 мм, толщиной 1 мм и массой ~2,3 г, размещающиеся в центре шаровых полиэтиленовых замедлителей диаметром 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10 и 12 дюймов. Небольшие размеры и форма индиевого детектора практически исключают наличие полости внутри шаров спектрометра, что делает шаровой детектор в целом практически изотропным. Дополнительно для измерения плотности потока тепловых нейтронов используется отклик индиевого детектора в полиэтиленовом шаре диаметром 2 дюйма с кадмиевым покрытием. Этот выбор позволяет уменьшить погрешность метода кадмиевой разности, так как функция чувствительности двухдюймового шара, в отличие от обычно используемого «голового» индиевого детектора с мощным резонансом в сечении реакции  $^{115}\text{In}(n,\gamma)$  при энергии нейтронов 1,5 эВ, не имеет резонансной структуры, и поправка на поглощение надтепловых нейтронов кадмием мала.

Описанный выше индиевый спектрометр Боннера (ИСБ) использовался ранее [8] в низкоэнергетических опорных полях нейтронов ИФВЭ, в результате чего были подтверждены данные предыдущих измерений [1] как по спектрам, так и по интегральным величинам. С целью определения высокоэнергетического спектра нейтронов за верхней защитой У-70 ИСБ дополнен в данной работе углеродным активационным детектором на основе реакции  $^{12}\text{C}(n,x)^{11}\text{C}$  с порогом около 20 МэВ, так как чувствительность спектрометра Боннера и его разрешение малы при энергиях выше 20 МэВ. В качестве УАД использовался графит массой 1869 г в геометрии сосуда Маринелли объемом 1 л.

Облучение каждого детектора в выбранной точке проводилось поочередно на расстоянии 1 м от РМ-58 (справа по пучку), расстояние от поверхности защиты до центра всех детекторов равнялось 23 см. Длительность экспозиции каждого детектора составляла 1 час, при этом условие безостановочной работы ускорителя контролировалось по показаниям РМ-58. Все экспозиции сопровождалось мониторингом по УАД на основе полиэтилена массой 880 г в геометрии сосуда Маринелли объемом 1 л. В качестве второго монитора использовался также РМ-58.

Обсчет детекторов проводился на полупроводниковом гамма-спектрометре по линии 1,294 МэВ нуклида  $^{116\text{m}}\text{In}$ , образующего в реакции  $^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116\text{m}}\text{In}$ , и по линии 511 кэВ нуклида  $^{11}\text{C}$ , образующего в реакции  $^{12}\text{C}(n,x)^{11}\text{C}$ . Методика обработки аппаратурных спектров изложена в работе [9]. Результатами измерений являются активности детекторов в насыщении, определяемые с учетом времени экспозиции, времени обсчета и времени от конца экспозиции детекторов до начала их обсчета, а также с учетом коэффициента самопоглощения фотонов в детекторе.

**Таблица 1.** Удельные активности в насыщении активационных детекторов из состава ИСБ и УАД за верхней защитой экспериментального зала У-70 вблизи РМ-58.

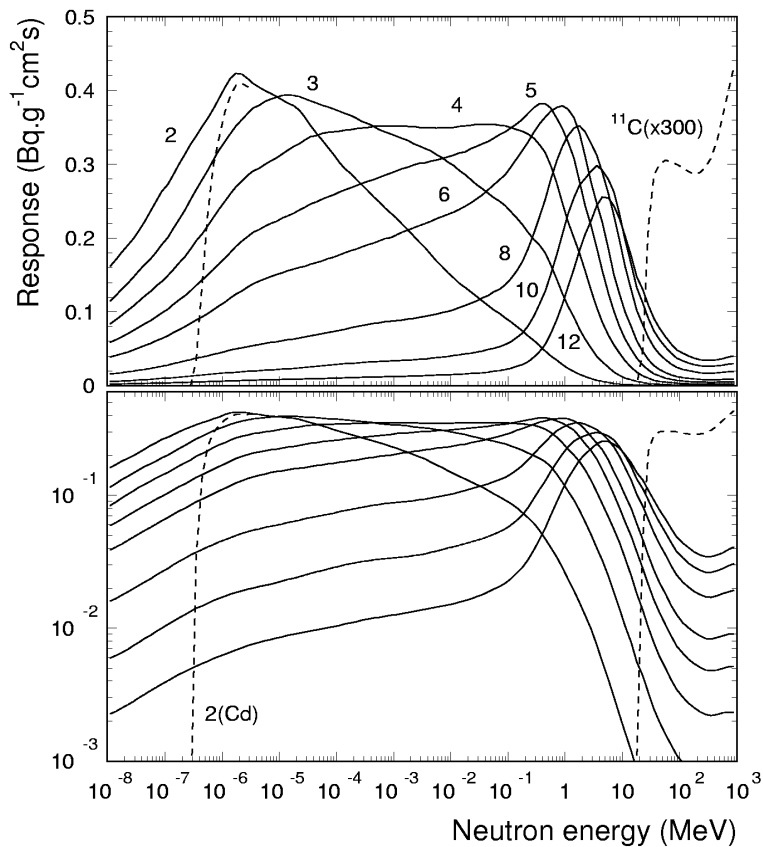
№	Детектор	Удельная активность (Бк/г)	СКО (%)
1	Индий в 2" шаре с кадмием	31	15
2	Индий в 2" шаре	54	13
3	Индий в 3" шаре	80	12
4	Индий в 4" шаре	98	12
5	Индий в 5" шаре	103	12
6	Индий в 6" шаре	107	12
7	Индий в 8" шаре	104	12
8	Индий в 10" шаре	82	13
9	Индий в 12" шаре	63	13
10	УАД (графит)	0,365	15

Суммарные погрешности результатов измерений складываются из статистических погрешностей, погрешностей мониторингования и градуировки гамма-спектрометра, а также временных и геометрических погрешностей. Сравнение показаний двух мониторов (УАД (полиэтилен) и РМ-58) за 10 экспозиций показало постоянство их отношения, которое равно  $(0,78 \pm 0,03)$  Бк/(мкЗв/час). Это свидетельствует о стабильности работы ускорителя во время проведения измерений, что является необходимым условием получения достоверных данных при работе с активационными детекторами. В табл. 1 представлены окончательные результаты измерений, приведенные к средней активности полиэтиленового монитора, равной 500 Бк, что соответствует средней мощности дозы в точке мониторингования 650 мкЗв/час по РМ-58.

### Энергетические зависимости чувствительности спектрометра

Функции чувствительности ИСБ были рассчитаны ранее по программе FANEUT в диапазоне энергий от  $10^{-8}$  до 20 МэВ [10] и по программе HADRON от 20 МэВ до 1,5 ГэВ [11]. Градуировка спектрометра выполнена в работе [8] по величине плотности потока надкадмиевых нейтронов радионуклидного источника  $^{252}\text{Cf}$ . Энергетические зависимости чувствительности (ЭЗЧ) ИСБ в единицах удельной активности на единичную плотность потока нейтронов приведены на рис. 1.

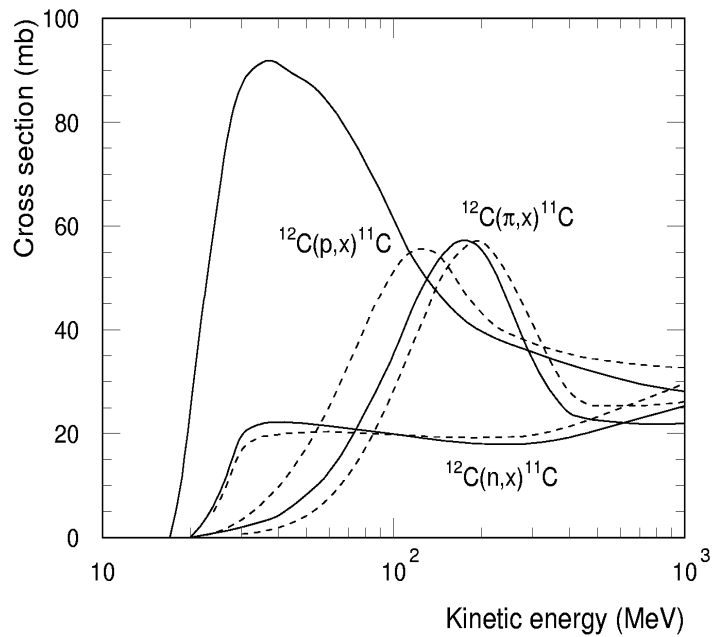
Индиевые детекторы имеют небольшие размеры и вес, практически не возмущают поле нейтронного излучения внутри шара и нечувствительны к сопутствующим излучениям (фотонам и заряженным частицам). Эти условия не выполняются в случае массивного углеродного детектора, для которого необходимо учитывать поглощение нейтронов и активацию детектора вторичными частицами, образующимися во взаимодействиях нейтронов с ядрами углерода, а также активацию сопутствующими заряженными адронами. Последние факторы более важны, так как сечения образования нуклида  $^{11}\text{C}$  на углероде протонами и пионами значительно больше, чем для нейтронов.



**Рис. 1.** Энергетические зависимости чувствительности ИСБ и углеродного детектора массой 1869 г. Цифры у кривых – диаметр шаровых полиэтиленовых замедлителей в дюймах.

Для оценки этих эффектов были выполнены расчеты по программе HADRON [12] эффективных сечений активации углерода нейтронами, протонами и пионами при изотропном облучении детектора массой 1869 г в геометрии сосуда Маринелли. Результаты представлены на рис. 2 в сравнении с оцененными микроскопическими сечениями [13], которые использовались в расчетах в качестве входных данных. В случае пионов приведены средние значения по  $\pi^+$  и  $\pi^-$ . Можно видеть, что микроскопические сечения в области максимума в 4,5 раза выше для протонов и в 3 раза выше для пионов, чем соответствующие нейтронные сечения.

Ситуация значительно улучшается при использовании массивного детектора. Эффективные сечения активации протонами с энергиями несколько десятков МэВ, пробоги которых меньше размеров детектора, малы по сравнению с микроскопическими сечениями. При энергиях протонов выше 100 МэВ преобладает эффект дополнительной активации углерода вторичными частицами, однако он невелик. Эффективные сечения для пионов и нейтронов отличаются от микроскопических незначительно. В частности, нейтронные сечения снижаются максимум на 20% при энергиях вблизи порога и возрастают не более чем на 20% при высоких энергиях. ЭЗЧ углеродного детектора в единицах удельной активности на единичную плотность потока нейтронов, приведенная на рис. 1, рассчитана как произведение эффективного сечения в квадратных сантиметрах на число ядер в 1 г углерода из условия равенства скорости образования и распада радиоактивных ядер в условиях насыщения.



**Рис. 2.** Микроскопические сечения активации углерода нейтронами, протонами и пионами (сплошные кривые) и эффективные сечения для массивного углеродного детектора (штриховые кривые).

Протоны и пионы, сопутствующие высокоэнергетическим нейтронам за защитой ускорителя, вносят дополнительный вклад в активацию углерода, что является источником систематической неопределенности при измерении плотности потока нейтронов. Оценка этого вклада была выполнена на основе расчетных спектров адронов [14] за верхней бетонной защитой высокоэнергетического опорного поля ЦЕРН аналогично работе [13]. Результаты приведены в табл. 2 для «тонкого» детектора с использованием микроскопических сечений и для массивного детектора (эффективные сечения).

**Таблица 2.** Оценка вкладов протонов и пионов, сопутствующих нейтронам в опорном поле ЦЕРН [3] за верхней бетонной защитой, в активацию углеродного детектора. Все данные относятся к диапазону энергий выше 20 МэВ.

Функционал	«Тонкий» детектор	Массивный детектор
$\bar{\sigma}_n$ (мб)	19,0	18,7
$\bar{\sigma}_p$ (мб)	61,0	34,5
$\bar{\sigma}_\pi$ (мб)	33,6	33,3
$\Phi_p / \Phi_n$ (%)	1,76	
$\Phi_\pi / \Phi_n$ (%)	1,42	
$\Phi_p \bar{\sigma}_p / \sum \Phi_i \bar{\sigma}_i$ (%)	5,2	3,1
$\Phi_\pi \bar{\sigma}_\pi / \sum \Phi_i \bar{\sigma}_i$ (%)	2,3	2,4
Вклад ( $p+\pi$ ) (%)	7,5	5,5

Полученные данные показывают, что применение массивного детектора снижает вклад заряженных адронов до 5,5% по сравнению с 7,5% для «тонкого» детектора. Применимость результатов для опорного поля ЦЕРН в условиях У-70 не вполне очевидна, однако при отсутствии более надежных данных мы основываемся на подобии условий формирования адронных спектров в сравниваемых полях излучения. Для учета вклада протонов и пионов показания углеродного детектора, приведенные в табл. 1, были уменьшены на 5,5%.

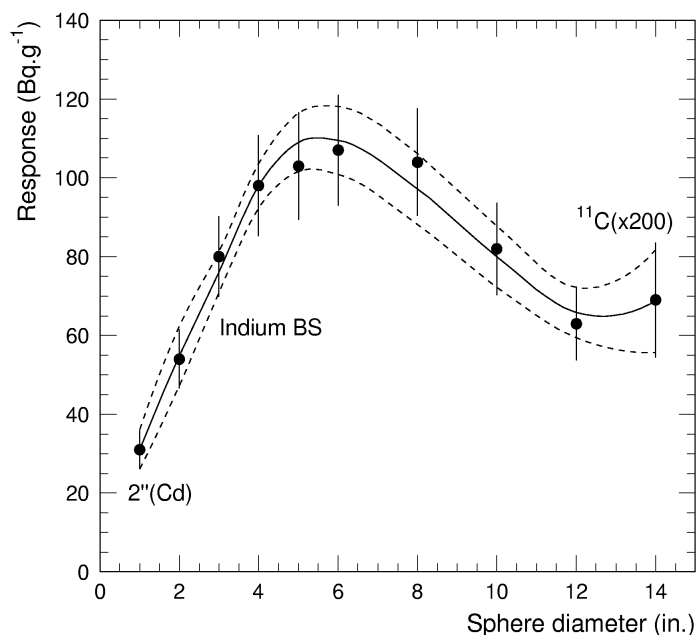
## Результаты восстановления спектра нейтронов

При восстановлении нейтронного спектра использовалась программа BON95 [15, 16], основанная на методах параметризации и итераций. Программа реализует решение системы уравнений

$$M_i = \sum_{j=1}^n A_i(E_j) \Phi(E_j) + \Delta M_i, \quad i=1, \dots, m, \quad (1)$$

где  $M_i$  – показания детекторов;  $\Delta M_i$  – неопределенности, включающие погрешности результатов измерений и функций чувствительности  $A_i(E_j) = R_i(E_j) \Delta E_j$ ;  $\Phi(E_j)$  – искомый спектр нейтронов в групповом представлении.

Метод параметризации применяется для поиска начального спектра, который уточняется далее с помощью итерационной процедуры. Высокоэнергетический нейтронный спектр параметризуется линейной суперпозицией максвелловского пика тепловых нейтронов,  $1/E$  – хвоста промежуточных нейтронов, пика испарительных нейтронов с изменяемой температурой и шириной и квазимаквелловского пика каскадных нейтронов с фиксированной температурой. Неопределенности полученного спектра и интегральных величин находятся методом вариации экспериментальных данных  $M_i$  в пределах неопределенностей  $\Delta M_i$ , в котором восстановление спектра проводится 25 раз с различными показаниями детекторов  $M'_i = M_i \pm \Delta M_i$ . Погрешности функций чувствительности ИСБ были заданы равными 5% при энергиях ниже 20 МэВ и 10% – выше 20 МэВ, для углеродного детектора они составляли 15% [13].



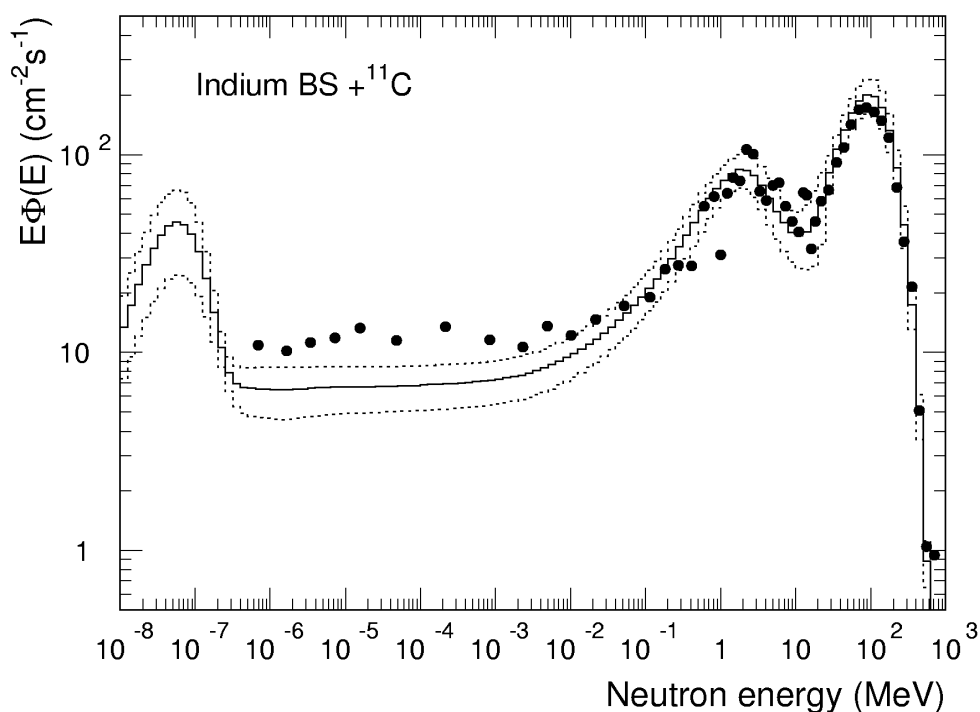
**Рис. 3.** Сравнение экспериментальных (точки) и расчетных (кривая с коридором неопределенностей) показаний детекторов, полученных при восстановлении нейтронного спектра.

На рис. 3 показаны экспериментальные отклики детекторов с их полными неопределенностями, рассчитанными с учетом погрешностей функций чувствительности. Точки для кадмированного двухдюймового шара и УАД приведены условно для общности на диаметрах 1 и 14 дюймов соответственно. Сплошная кривая на рисунке проведена по значениям расчетных откликов, полученным при восстановлении спектра нейтронов, штриховые кривые показывают коридор погрешностей этих откликов (СКО). Хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных, описываемых гладкой кривой, свидетельствует об отсутствии систематических



ошибок в результатах измерений и функциях чувствительности. Малое значение функционала  $\chi^2 / m = 0,09$ , полученное при восстановлении, возможно, говорит о завышенных погрешностях экспериментальных данных.

Результаты восстановления спектра нейтронов в 110-групповом представлении (10 групп на порядок энергии нейтронов) представлены на рис. 4. Там же приведен для сравнения спектр нейтронов [14] за верхней бетонной защитой высокоэнергетического опорного поля ЦЕРН, рассчитанный по программе FLUKA92 и нормированный на плотность потока надкадмиевых нейтронов восстановленного спектра. Оба спектра близки по форме в области испарительного и каскадного пиков, вносящих основной вклад в плотность потока и мощность дозы. Нерегулярности в расчетном спектре связаны со структурой сечений взаимодействия быстрых нейтронов с ядрами бетона. Различия экспериментального и расчетного спектров в области промежуточных нейтронов объясняются, по нашему мнению, различным составом бетона в эксперименте и расчете, главным образом по содержанию водорода.



**Рис. 4.** Спектр нейтронов за верхней защитой экспериментального зала У-70 вблизи РМ-58, восстановленный по показаниям ИСБ и УАД (гистограмма с коридором неопределенностей) в сравнении с расчетным спектром высокоэнергетического опорного поля ЦЕРН (точки).

В целом результаты сравнения двух спектров подтверждают наше предположение о сходном механизме формирования адронных спектров как в опорном поле ЦЕРН, так и за верхней защитой У-70. Это является обоснованием возможности использования в наших условиях расчетных данных по вкладу заряженных адронов в активацию углеродного детектора, приведенных в табл. 2, так как спектры протонов и пионов за толстыми защитами под большими углами к мишени полностью определяются лидирующим нейтронным компонентом излучения. Отметим также, что достоверность расчетного спектра ЦЕРН [14] неоднократно подтверждена результатами измерений с помощью различных спектрометров [13, 16, 17].

Сходство нейтронных спектров высокоэнергетических опорных полей ИФВЭ и ЦЕРН имеет для нас важное практическое значение еще по двум причинам. Во-первых, ранее было установлено аналогичное подобие спектра ЦЕРН за бетонной защитой и нейтронных спектров в атмосфере, генерируемых космическим излучением (смотри, например, [18]). Во-вторых, в экспериментальных исследованиях в опорных полях ЦЕРН за прошедшие годы принимали участие десятки лабораторий из Европы и ведущих стран мира с дозиметрами и спектрометрами активного и пассивного типов. В результате было накоплено большое количество информации по чувствительности различных детекторов к высокоэнергетическим нейтронам, которая может быть применима и в условиях опорного поля ИФВЭ.

Интегральные характеристики восстановленного высокоэнергетического спектра нейтронов представлены в табл. 3. Оценены полная плотность потока, мощности поглощенной дозы, амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы, эффективных доз направленного  $\dot{E}$  (AP) и изотропного  $\dot{E}$  (ISO) облучений. Приведены также средняя энергия спектра надкадмиевых нейтронов, средний коэффициент качества  $\bar{Q} = H^*(10)/D$  и коэффициент перехода от флюенса к амбиентному эквиваленту дозы  $h^*(10) = H^*(10)/\Phi$ .

В табл. 4 показаны вклады тепловых, промежуточных, быстрых и высокоэнергетических нейтронов во флюенс, поглощенную дозу и амбиентный эквивалент дозы нейтронов. Можно видеть, что высокоэнергетические нейтроны (каскадный пик) вносят основной вклад в рассматриваемые функционалы – от 43% во флюенс до 68% в поглощенную дозу.

**Таблица 3.** Интегральные характеристики нейтронного излучения за верхней защитой экспериментального зала У-70 вблизи РМ-58, соответствующие средней мощности дозы по монитору РМ-58 650 мкЗв/час.

$\dot{\Phi}$ (см <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> )	$\dot{D}$ (мкГр/час)	$\dot{H}^*(10)$ (мкЗв/час)
839 ± 67	121 ± 13	881 ± 76
$\bar{E}(\geq 0,4 \text{ эВ})$ (МэВ)	$\bar{Q}$ (Зв/Гр)	$h^*(10)$ (пЗв·см <sup>2</sup> )
52,3 ± 7,5	7,29 ± 0,28	292 ± 14
$\dot{H}_p(10)$ (мкЗв/час)	$\dot{E}$ (AP) (мкЗв/час)	$\dot{E}$ (ISO) (мкЗв/час)
898 ± 76	928 ± 91	725 ± 91

**Таблица 4.** Процентные вклады тепловых ( $E < 0,4$  эВ), промежуточных ( $0,4 \text{ эВ} \leq E < 0,1$  МэВ), быстрых ( $0,1 \text{ МэВ} \leq E < 20$  МэВ) и высокоэнергетических ( $E \geq 20$  МэВ) нейтронов во флюенс, поглощенную дозу и амбиентный эквивалент дозы нейтронов.

Функционал	Тепловые	Промежуточные	Быстрые	Высокоэнергетические
$\Phi$	11,6	12,3	32,7	43,4
$D$	0,8	1,0	30,5	67,7
$H^*(10)$	0,5	0,8	42,8	55,9

Для более полного описания поля излучения вблизи РМ-58 в той же точке были проведены измерения мощности амбиентного эквивалента дозы фотонов и заряженных частиц с помощью термолюминесцентных детекторов <sup>7</sup>LiF, практически нечувствительных к нейтронному

излучению. Полученное значение  $\dot{H}_{\gamma+ch}^*(10) = 110$  мкЗв/час составляет около 11% от полной мощности амбиентного эквивалента дозы. Поскольку коэффициент качества фотонов и заряженных частиц полагается равным единице, их вклад в полную поглощенную дозу равен ~48%. Оцененные интегральные характеристики смешанного излучения, включающего нейтроны, фотоны и заряженные частицы, представлены в табл. 5.

**Таблица 5.** Интегральные характеристики смешанного излучения за верхней защитой экспериментального зала У-70 вблизи РМ-58.

$\dot{D}$ (мкГр/час)	$\dot{H}^*$ (10)(мкЗв/час)	$\bar{Q}$ (Зв/Гр)
231	991	4,3

### Заключение

За верхней защитой экспериментального зала протонного синхротрона ИФВЭ измерены отклики детекторов индиевого спектрометра Боннера и углеродного активационного детектора, по которым восстановлен спектр нейтронов и определены его интегральные характеристики. Достаточно высокая мощность дозы, стабильность и сходство измеренного спектра со спектрами космических нейтронов в атмосфере позволяют рассматривать его в качестве перспективного опорного поля для использования в различных областях дозиметрии, радиационной физики и радиобиологии.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Ю.В.Белецкой, С.А.Другачёнку и А.М.Мамаеву за помощь в проведении измерений.

### Список литературы

- [1] Г.И.Бритвич, В.С.Волков, Ю.И.Колеватов, А.К.Кременецкий, В.Н.Лебедев, В.Д.Майоров, Я.Н.Расцветалов, Л.А.Трыков, А.А.Чумаков. *Спектры и интегральные характеристики опорных полей нейтронов на базе радионуклидных источников нейтронного излучения.* Препринт ИФВЭ 90-48, Протвино, 1990.
- [2] Е.А.Белогорлов, Г.И.Крупный, А.А.Кузнецов, В.Н.Лебедев, Я.Н.Расцветалов. *Высокоэнергетические спектры адронов на ускорителе протонов с энергией 70 ГэВ.* Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Том 2, с. 396. Дубна, 1987.
- [3] A.Aroua, M.Höfert, A.V.Sannikov and G.R.Stevenson. *Reference fields for in-flight dosimetry.* CERN/TIS-RP/TM/93-46. Geneva, 1993.
- [4] ICRP. *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.* Publication 60. – Oxford: Pergamon Press, 1991.
- [5] *Нормы радиационной безопасности (НРБ-99).* М.: Минздрав России, 1999.
- [6] А.В.Санников. *Пассивный дозиметр-спектрометр нейтронов для высокоэнергетических ускорителей.* Препринт ИФВЭ 90-133, Протвино, 1990.
- [7] Е.А.Белогорлов, Г.И.Бритвич, Г.И.Крупный, А.А.Кузнецов, В.С.Луканин, Я.Н.Расцветалов. *Методические вопросы применения многошарового спектрометра Боннера в радиационных исследованиях на ускорителе ИФВЭ.* Препринт ИФВЭ 85-3, Серпухов, 1985.

- [8] Г.И.Крупный, Я.Н.Расцветалов, Е.Н.Савицкая, А.В.Санников. *Многошаровой спектрометр нейтронов с активационным детектором тепловых нейтронов на основе реакции  $^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116\text{m}}\text{In}$* . IX Российская научная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях». 24-26 октября 2006 г., Обнинск. Тезисы докладов, с. 121-123.
- [9] Г.И.Крупный, Г.Н.Стеценко, А.А.Янович. *Методические вопросы использования пороговых активационных детекторов в радиационных исследованиях на ускорительном комплексе ИФВЭ*. Препринт ИФВЭ 2000-30, Протвино, 2000.
- [10] A.V.Sannikov. *Calculated response functions of indium loaded Bonner spectrometer*. CERN internal report CERN/TIS-RP/IR/94-05, 1994.
- [11] A.V.Sannikov, V.Mares and H.Schraube. *High energy response functions of Bonner spectrometers*. Radiat. Prot. Dosim. **70**, 291 (1997).
- [12] A.V.Sannikov, E.N.Savitskaya. *Physics of the HADRON code: recent status and comparison with experiment*. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. **A450**, 127-137 (2000).
- [13] J.Liu, A.V.Sannikov and G.R.Stevenson. *Neutron energy spectra of the CERN-CEC reference field facility measured by the indium Bonner spectrometer and carbon activation detector*. CERN/TIS-RP/IR/94-17. Geneva, 1994.
- [14] S.Roesler and G.R.Stevenson. *July 1993 CERN-CEC experiments: calculation of hadron energy spectra from track-length distributions using FLUKA*. CERN internal report CERN/TIS-RP/IR/93-47 (1993).
- [15] A.V.Sannikov. *BON95, a universal user-independent unfolding code for low informative neutron spectrometers*. GSF report. Munich, 1995.
- [16] А.В.Санников. *Развитие методов спектрометрии нейтронного излучения на больших протонных ускорителях*. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Протвино, 2006.
- [17] V.Mares, A.V.Sannikov and H.Schraube. *The response functions of a He-3 Bonner spectrometer and their experimental verification in high energy neutron fields*. Proc. Third specialist meeting on shielding aspects of accelerators, targets and irradiation facilities. Sendai, Japan, OECD Nuclear Energy Agency, 1997.
- [18] H.Schraube, J.Jakes, A.V.Sannikov, E.Weitzenegger, S.Roesler and W.Heinrich. *The cosmic ray induced neutron spectrum at the summit of the Zugspitze (2963 m)*. Radiat. Prot. Dosim. **70**, 405 (1997).

*Рукопись поступила 14 апреля 2009 г.*

Г.И.Крупный, В.Н.Пелешко, Я.Н.Расцветалов, Е.Н.Савицкая, А.В.Санников.  
К вопросу создания высокоэнергетического опорного поля нейтронного излучения.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы *Word*.

Редактор Н.В. Ежела.

---

Подписано к печати 17.04.2009. Формат 60 × 84/8.      Офсетная печать.  
Печ.л. 1, 25.      Уч.– изд.л. 1,2.      Тираж 80.      Заказ 17.      Индекс 3649.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,  
142284, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ 2009-5, ИФВЭ, 2009

---