



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

12078

P16 - 12078

М.М. Комочков, Б.В. Манько, Б.С. Сычев, А.Л. Шишкин

ИССЛЕДОВАНИЕ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ФЛЮЕНСА И ДОЗЫ НЕЙТРОНОВ  
НА БОЛЬШИХ РАССТОЯНИЯХ ОТ УСКОРИТЕЛЕЙ

Дубна 1979

P16 - 12078

М.М.Комочков, Б.В.Манько\*, Б.С.Сычев\*, А.Л.Шишкин

ИССЛЕДОВАНИЕ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ФЛЮЕНСА И ДОЗЫ НЕЙТРОНОВ  
НА БОЛЬШИХ РАССТОЯНИЯХ ОТ УСКОРИТЕЛЕЙ



---

\* Московский радиотехнический институт АН СССР.

Исследование энергетического распределения флюенса  
и дозы нейтронов на больших расстояниях от ускорителей

Показано, что при расчетах энергетического распределения флюенса и дозы нейтронов на больших расстояниях от ускорителей последние могут быть представлены суперпозицией точечных источников со спектром, близким к реальному спектру вторичных нейтронов на внешней поверхности защиты ускорителя. Так, для синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ использованы модели точечного мононаправленного вверх и изотропного в верхнюю полусферу источников. Сравнение расчетов с результатами измерений флюенса и дозы нейтронов около синхроциклотрона подтвердило правомерность выбора модели и позволило определить параметр анизотропии такого источника, а также вклад нейтронов с энергией выше 20 МэВ в полную эквивалентную дозу нейтронов на больших расстояниях от ускорителя. Отмечено, что описание зависимости эквивалентной дозы от расстояния выражениями, предлагаемыми рядом авторов, может привести к значительным ошибкам при оценках индивидуальных доз.

Работа выполнена в Отделе радиационной безопасности, ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Study of the Fluence and Neutron Dose Energy  
Distribution at Large Distances from Accelerators

The transport to large distances of neutrons produced by high-energy accelerators is studied experimentally and theoretically for the Dubna synchrocyclotron. This accelerator is described by superposition of the point monodirectional and point isotropic sources with neutron spectra on a synchrocyclotron shielding. Comparison of calculated and experimental data provides for the possibility to estimate the source anisotropy and energy distribution of the fluence, and the population dose of neutrons (especially for the above 20 MeV energy of neutrons) at large distances from an accelerator. It is shown that the calculation of this dose dependence on a distance by any empirical relations could cause significant errors in estimating individual doses.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

926805

## ВВЕДЕНИЕ

Концепции радиационного риска<sup>1/</sup> и беспорогового действия на людей<sup>2/</sup> ионизирующего излучения приводят к необходимости учета и контроля уровней и доз радиации, величины которых не только сопоставимы, но и много ниже допустимых значений. Учет малых индивидуальных доз особенно важен в случаях, когда облучению подвергаются большие группы людей. Подобная ситуация в некоторой степени может иметь место в ОИЯИ, где синхроциклотрон и синхрофазотрон способны создавать на больших расстояниях поля излучений с заметными уровнями.

Измерениям и оценкам флюенса и дозы нейтронов на больших расстояниях посвящен ряд работ /см., например, <sup>3-13/</sup>. Основные результаты работ по исследованию радиального распределения плотности потока быстрых нейтронов представлены на рис. 1. Радиальные распределения представляют собой произведения плотности потока нейтронов  $\phi$  и  $4\pi R^2$ , деленные на выход нейтронов из источника в единицу времени  $Q^{12-14/}$  и для различных ускорителей образуют коридор значений. Эти распределения позволяют лучше выявить отличие в параметрах прохождения нейтронов в различных средах, окружающих ускорительные установки. На том же рисунке в виде отдельной кривой представлены результаты, полученные при измерениях в районе синхроциклотрона ОИЯИ на энергию протонов 660 МэВ в 1967 году<sup>8/</sup>. Сравнение этих данных с результатами измерений в районе синхроциклотрона ЦЕРН на энергию протонов 600 МэВ, описанными в <sup>12/</sup> показывает, что прохождение нейтронов в среде определяется не только энергией ускоренных протонов. Эффективная длина ослабления флюенса нейтронов в сре-

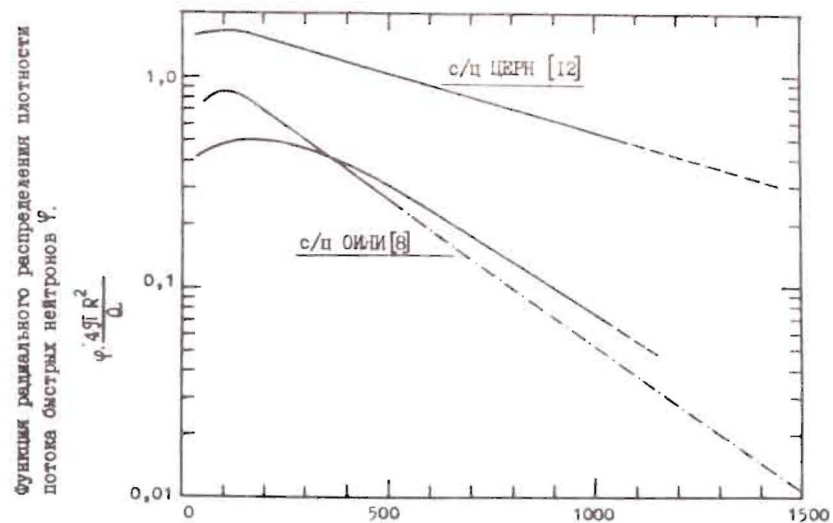


Рис. 1. Плотности потока быстрых нейтронов  $\phi = \frac{4\pi R^2}{Q}$  на различных расстояниях от ускорителей протонов,  $Q$  - выход нейтронов в воздух /нейтр./с/,  $R$  - расстояние от геометрического центра источника /м/. — эксперимент, - - - - - аппроксимация.

де, окружающей синхротрон ЦЕРН, оказалась почти в три раза больше<sup>12/</sup>, чем для синхротрона ОИЯИ<sup>8/</sup>. В этой связи становится важным более глубокое понимание физических закономерностей, определяющих прохождение нейтронов в среде за защитой ускорителей, что позволит с большей, чем до настоящего времени, достоверностью, оценивать эквивалентные дозы персонала и отдельных лиц из населения как при работе ускорителей, так и при их проектировании.

В настоящей работе предпринимается попытка достичь этой цели путем оценки энергетических распределений нейтронов и доз на различных расстояниях от синхротрона экспериментальным и расчетным способами.

## РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФЛЮЕНСА И ДОЗЫ НА БОЛЬШИХ РАССТОЯНИЯХ ОТ ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ

Расчеты поля рассеянных нейтронов выполнены на основе метода, изложенного в работе<sup>11/</sup> для двух типов источников:

- 1/ точечного мононаправленного, ориентированного перпендикулярно поверхности земли;
- 2/ точечного изотропного /в  $2\pi$  стерадиан/.

За спектр нейтронов источника принимался спектр нейтронов, выходящих с внешней поверхности защиты из обычного бетона<sup>15</sup> внутренняя поверхность которой бомбардируется нейтронами с максимальной энергией спектра

500 МэВ. Принятый в расчетах спектр близок к спектру нейтронов, измеренному в одной из точек на внешней поверхности защиты синхротрона<sup>17</sup>. Содержание воды в бетоне выбиралось равным 5% по весу. Энергетическое распределение нейтронов источника по группам приведено в таблице. Расчеты проводились без учета деформации спектра землей. Содержание водорода в воздухе принималось 0,1% по весу<sup>16</sup>. На рис. 2 приведены рассчитанные пространственные распределения эквивалентной дозы нейтронов для обоих типов источника. Кривые 1, 2 и 3 относятся к мононаправленному источнику; кривые 4, 5 и 6 - к изотропному, из них 1 и 4 - вклад в эквивалентную дозу от нейтронов с энергией выше 20 МэВ, 2 и 5 - от нейтронов, образовавшихся в воздухе в результате рассеяния нейтронов источника с энергией ниже 20 МэВ; 3 и 6 - эквивалентная доза от всех нейтронов.

Минимальная энергия нейтронов принималась равной  $5 \cdot 10^{-8}$  МэВ, т.е. в расчетах не учитывались тепловые нейтроны. Кривые на рис. 2 нормированы на 1 нейтрон источника с энергией выше 20 МэВ. На основании данных<sup>11, 15</sup> вклад гамма-излучения в эквивалент дозы считался пренебрежимо малым. Относительный вклад различных энергетических групп в поле рассеянных нейтронов приведен в таблице для различных расстояний  $R$  от точечного мононаправленного источника. Геометрическая идеализация задачи предполагала, что расчеты выпол-

Таблица

Относительный вклад /% / различных энергетических групп нейтронов в суммарную плотность потока

$E, \text{ МэВ}$	$0,1$	$0,1+0,5$	$0,5+2$	$2+20$	$> 20$	Примечание
$R, \text{ м}$						
за стеной	19,5	5,3	10,7	15,0	49,5	бетон с содержанием водорода 0,556% по весу
100	74,7	7,6	8,9	7,8	1,0	
400	62,3	9,5	11,9	12,2	4,1	
1000	58,7	11,7	14,0	10,6	5,0	
3000	39,1	9,7	13,7	19,3	18,2	

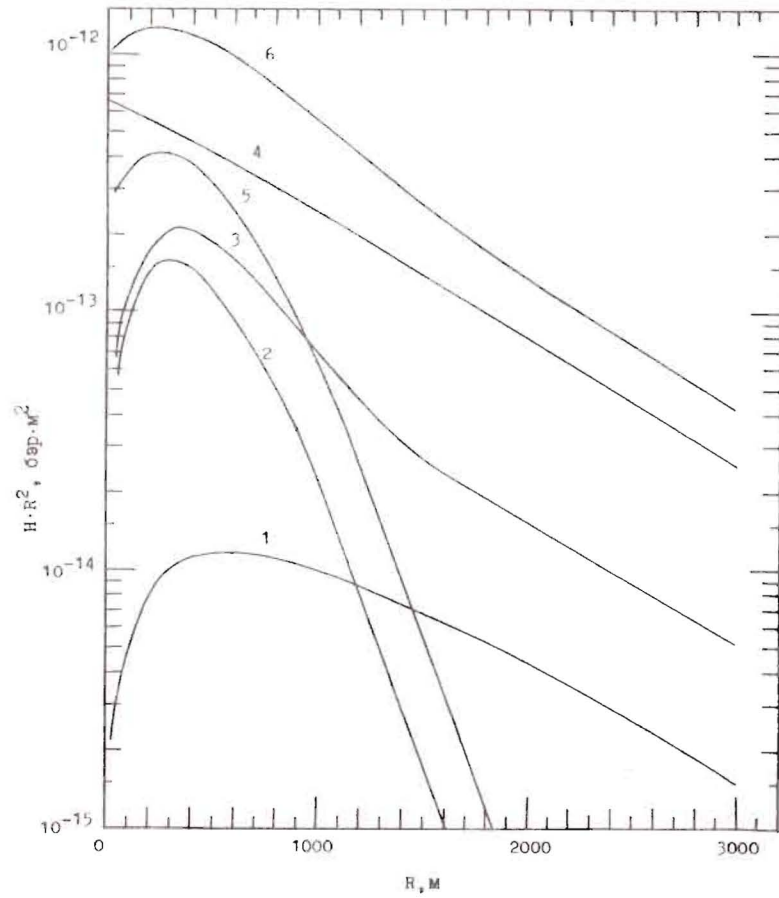


Рис.2. Эквивалентная доза нейтронов  $H \cdot R^2$  /бар·м<sup>2</sup>/ на различных расстояниях  $R$  /м/ от точечного источника.

няются для бесконечной воздушной среды и источника с осевой симметрией. Тот факт, что грунт имеет другой состав и плотность, должен, разумеется, сказаться на форме спектра рассеянных нейтронов, однако в меньшей мере на такой интегральной величине, как эквивалент дозы. Эффект влияния границы воздух-земля, по-видимому, следует оценивать, на наш взгляд, исходя из имеющихся литературных данных, например для источника деления для подобных геометрических условий.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Измерения энергетического распределения и дозы нейтронов на различных расстояниях от синхроциклотрона проводились с использованием спектрометра Боннера<sup>15</sup> - коронного борного счетчика или пропорционального гелиевого счетчика типа СМ-18 в цилиндрическом замедлителе из парафина с толщиной стенок 120 мм. Результаты измерений показаны на рис. 3 и удовлетворительно описываются выражением

$$H \cdot R^2 = Q \{ h_1 \cdot R^2 + b(h_2 \cdot R^2 - h_1 \cdot R^2) \}, \quad /1/$$

где  $H \cdot R^2$  - мощность эквивалентной дозы нейтронов на расстоянии  $R$  метров от центра синхроциклотрона,

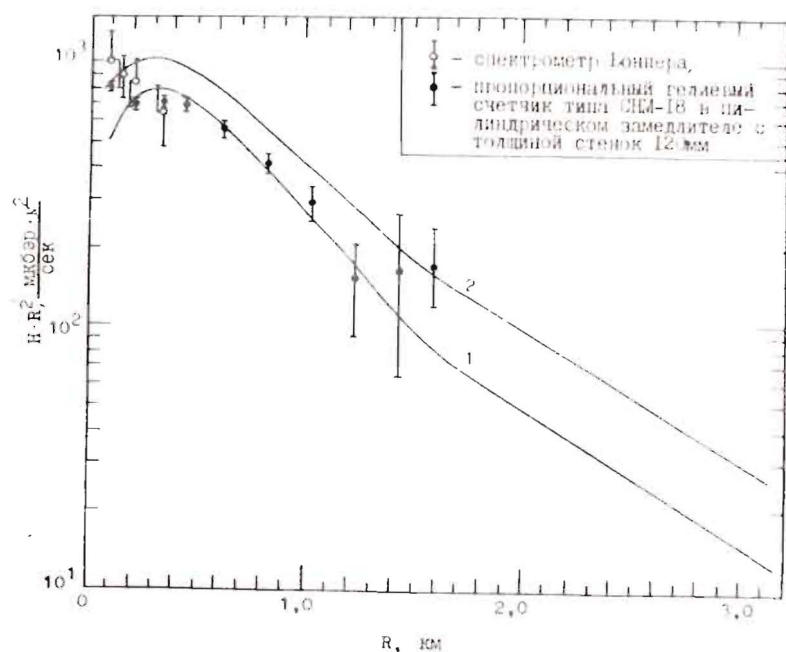


Рис.3. Эквивалентная доза нейтронов  $H \cdot R^2$  /мкбэр · м<sup>2</sup>/с/ с энергией ниже 20 МэВ /1/ и полная эквивалентная доза нейтронов /2/ на различных расстояниях от геометрического центра синхроциклотрона  $R$  /км/.

умноженная на  $R^2$ ;  $Q$  - выход нейтронов с энергией выше 20 МэВ за защиту ускорителя;  $h_1$  и  $h_2$  - соответственно расчетные мощности эквивалентной дозы нейтронов для точечного мононаправленного вверх и точечного изотропного в  $2\pi$  стерадиан источника нейтронов /рис. 2/ или "отклики" детектора для различных сфер Боннера;  $b$  - параметр, учитывающий анизотропию источника.

Источник  $Q$  определен в<sup>11</sup> на основании экспериментальных данных работы<sup>19</sup> и равен  $1,7 \pm 0,2 \cdot 10^9$  /нейтр./с/. Многолетние измерения уровней наведенной радиоактивности узлов синхроциклотрона показали, что ток протонов ускорителя с 1968-1969 годов возрос в  $1,46 \pm 0,46$  раза. Таким образом, для расчетов принято значение

$$Q = 2,48 \pm 0,83 \cdot 10^9 \text{ /нейтр./с/}.$$

Используя расчетные данные по "откликам" детектора в сферах Боннера /5, 10 и 12 дюймов/ для двух геометрий, экспериментальные значения "откликов" и формулу /1/, удалось определить средневзвешенное значение  $b = 0,206 \pm 0,019$ .

Расчетное значение полной эквивалентной дозы нейтронов на различных расстояниях от синхроциклотрона /формула /1// показано на рис. 3. Ошибка не превышает 33%.

## ВЫВОДЫ

Анализ представленных расчетов и экспериментальных данных показывает, что описание зависимости эквивалентной дозы нейтронов от расстояния простым выражением типа

$$H R^2 = k Q (1 - e^{-R/\mu}) e^{-R/\lambda} /8,12/ \text{ /см. рис. 1, кривая "с/ц ОИЯИ"/}$$

может привести к значительным ошибкам, т.к.  $\lambda$  принимаемая в расчетах как константа, на самом деле изменяется с расстоянием и сильно зависит от геометрии и параметров источника на близких расстояниях /<300-400 м/.

Сравнение результатов на рис. 1 и рис. 3 позволяет сделать вывод, что нижняя огибающая функции радиального распределения плотности потока быстрых нейтронов относится, по-видимому, к ускорителям с "хорошей" боковой защитой /работает модель точечного мононаправленного вверх источника/, а верхняя соответствует модели изотропного в  $2\pi$  стерадиан источника.

В заключение авторы благодарят Е.К.Гельфанд и А.Я.Серова, выполнивших часть расчетов для нейтронов с энергией  $E_n$  20 МэВ, а также С.П.Прусаченкова, В.Н.Куликова, П.А.Матвеева за большую помощь, оказанную при проведении измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалев Е.Е. Радиационный риск на Земле и в космосе. Атомиздат, М., 1976.
2. "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection" ICRP publication 26, Pergamon Press, Oxford, New York, Frankfurt, 1977.
3. Lindenbaum S.J. Ann. Rev. Nucl. Sci., 1961, 11, p. 213.
4. Lindenbaum S.J. Proc. Conf. on Shielding of High Energy Accelerators, New York, 1957, p. 191.
5. Лебедев В.Н. и др. ОИЯИ, Р-2177, Дубна, 1965.
6. Лебедев В.Н. ОИЯИ, Р-2446, Дубна, 1965.
7. Комочков М.М., Лебедев В.Н. ОИЯИ, Р-2231, Дубна, 1965.
8. Алейников В.Е., Лебедев В.Н. ОИЯИ, Р9-3393, Дубна, 1967.
9. Кимель Л.Р. и др. ОИЯИ, Р16-6182, Дубна, 1972.
10. Зайцев Л.Н. и др. ОИЯИ, Р16-6185, Дубна, 1972.
11. Манько Б.В., Серов А.Я., Сычев Б.С. Труды Радиотехнического института, серия "Ускорители заряженных частиц", 1973, № 14.
12. Rindi A., Thomas R.H. Particle Accelerators, 1975, 7, p. 23.
13. Höfert M. CERN Int. report HS-RP/IR 77-19.
14. Stephens L.D. et al. Preprint LBL-3310. California, USA, 1974.
15. Манько Б.В., Сычев Б.С. В сб.: Труды РТИАН СССР, М., 1974, № 20, с. 147.

16. Краткий физико-технический справочник. Под общ. редакцией К.П.Яковлева, Физматгиз, М., 1960, т. 1.
17. Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, Р16-9870, Дубна, 1976.
18. Алейников В.Е. и др. IAEA, Vienna, 1973, VII, p. 363.
19. Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, Р16-4727, Дубна, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 марта 1979 года.