

С 3496

3-177

28/XII-67

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P16 - 3591



Л.Н.Зайцев, Л.Р.Кимель, М.М.Комочков,  
В.П.Сидорин, Б.С.Сычев, О.А.Улитин

ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА  
ЗАЩИТЫ ОТ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
УСКОРИТЕЛЕЙ

Р16 - 3591

Л.Н.Зайцев, Л.Р.Кимель, М.М.Комочков,  
В.П.Сидорин, Б.С.Сычев, О.А.Улитин

ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА  
ЗАЩИТЫ ОТ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
УСКОРИТЕЛЕЙ



Создание методов расчета защиты от рассеянного излучения ускорителей<sup>х)</sup> является весьма актуальной задачей. Для некоторых типов ускорителей: циклотронов, фазотронов и др. объем защиты в полях рассеянного излучения составляет значительную долю полного объема защиты; для синхротрона ОИЯИ объем такой защиты (приведенный к обычному бетону) составляет приблизительно 30%. Большое значение приобретает вопрос защиты от рассеянного излучения при сооружении "мезонных фабрик".

В работе<sup>/1/</sup> предложен метод расчета ослабления потоков рассеянных нейтронов различных энергетических групп и мощности дозы захватного гамма-излучения в защите. Экспериментальные данные по ослаблению рассеянного излучения в защите<sup>/2/</sup> подтвердили применимость этого метода. Проведение расчетов защитных перекрытий, находящихся в полях рассеянного излучения, с помощью этого метода связано с большим объемом вычислительных работ, который может быть значительно уменьшен путем введения ряда предположений и допущений в математическое описание функций распределения потоков рассеянных нейтронов различных энергетических групп в защите.

В данной работе предложен приближенный метод расчета защиты от рассеянного излучения, применимый для ускорителей протонов с энергией до 1 Гэв, сущность которого заключается в следующем:

1 . При расчетах мощности дозы в защите учитываются следующие компоненты рассеянного излучения, падающие на защиту:

- 1) нейтроны высоких энергий ( $E > 20$  Мэв);
- 2) быстрые нейтроны ( $1,5 < E < 20$  Мэв);

---

х) Определение рассеянного излучения дано в работе<sup>/1/</sup> .

3) промежуточные нейтроны ( $E < 1,5$  Мэв);

4) тепловые нейтроны ;

5) гамма-излучение;

II . Согласно работам<sup>/3,4/</sup> вклад заряженных частиц в суммарную мощность дозы невелик и его можно не учитывать.

III . Введен ряд предложений и допущений, которые позволяют упростить математическое описание функций распределений потоков рассеянных нейтронов различных энергетических групп в защите. Рассмотрим указанные компоненты рассеянного излучения с учетом предположений и допущений отдельно для каждой группы.

### I . Нейтроны высоких энергий ( $E > 20$ Мэв)

Рассеянные нейтроны высоких энергий образуются в результате взаимодействия первичного излучения с материалом защиты. Геометрия образования и ослабления рассеянного излучения в защите приведена в работе<sup>/1/</sup>. Согласно работам<sup>/1,2,5/</sup>, средний угол вылета вторичных нейтронов высокой энергии из ядра материала защиты в направлении назад составляет  $\bar{\alpha} = 3/4 \pi$ , а средний угол падения этих нейтронов на последующие защиты  $-\bar{\gamma} = -\pi/4$ . Тогда в предположении, что энергия этих нейтронов в основном заключена в интервале от 20 до 100 Мэв<sup>/6,7/</sup>, а энергетическое распределение имеет вид  $1/E$ <sup>/1/</sup>, получаем следующее выражение для мощности дозы в зависимости от толщины защиты  $x$ , нормированное на один падающий нейтрон:

$$P_1(x) = \beta_1 \frac{\int_{20}^{100} \frac{1}{kE} \frac{e^{-\sum_r(E)x} \cos \bar{\gamma}}{1 + \frac{\sum_r(E)}{\sum_r \sin \bar{\gamma}}} dE}{\int_{20}^{100} \frac{1}{kE} \frac{1}{1 + \frac{\sum_r(E)}{\sum_r \sin \bar{\gamma}}} dE} \quad (1)$$

где 
$$k = \int_{20}^{100} \frac{dE}{E} = 1,61 ;$$

$\beta_1$  - доза на один нейтрон в интервале энергий нейтронов 20-100 Мэв принята равной  $0,19$  (мбэр/час)/(нейтр./см<sup>2</sup>сек), что соответствует предельно допустимой плотности потока нейтронов, равной  $15$  нейтр./см<sup>2</sup> сек;

$\Sigma_r, \Sigma_r(E)$  - сечение выведения первичных нейтронов с энергией несколько сотен Мэв и вторичных рассеянных нейтронов высокой энергии соответственно.

По сравнению с аналогичным выражением, полученным в работе<sup>/1/</sup>, это выражение значительно проще, поскольку численное трехкратное интегрирование заменяется однократным.

В таблице 1 (колонка 1) согласно выражению (1) вычислен вклад в мощность дозы от рассеянных нейтронов высокой энергии в защите различной толщины, выполненной из обычного бетона с содержанием водорода 0,35% по весу.

## 2. Быстрые нейтроны ( $1,5 < E < 20$ Мэв)

Сравнение потоков рассеянных быстрых нейтронов, измеренных в различных местах главного зала синхроциклотрона ОИЯИ<sup>/1/</sup>, показывает, что распределение рассеянных быстрых нейтронов в помещениях ускорителей можно считать изотропным. Тогда геометрия расчета образования и ослабления потоков рассеянных быстрых нейтронов может быть значительно упрощена.

Предположим, что источники рассеянных быстрых нейтронов равномерно распределены по полусфере радиуса  $R$ , с поверхности которой к ее центру вылетает 1 нейтрон в единицу времени в телесный угол  $2\pi$ . Тогда мощность дозы от рассеянных быстрых нейтронов в центре полубесконечной защиты, расположенной в основании полусферы, можно выразить следующим образом

$$P_2(x) = \beta_2 \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} e^{-\frac{\Sigma_r^{(2)} x}{\cos \alpha}} R^2 \sin \alpha \frac{1}{2\pi R^2} d\alpha, \quad (2)$$

где  $\beta_2 = 0,135$  (мбэр/час)/(нейтр./см<sup>2</sup>сек)<sup>/8/</sup>;

$x$  - толщина защиты вдоль нормали к ее поверхности;

$\alpha$  - угол между направлением  $x$  и направлением движения рассеянного нейтрона;

$\Sigma_r^{(2)}$  - сечение выведения быстрых нейтронов.

Выполняя интегрирование, получаем

$$P_2(x) = \beta_2 \Sigma_r^{(2)} x [ E_0(\Sigma_r^{(2)} x) - E_1(\Sigma_r^{(2)} x) ], \quad (3)$$

где  $E_0(\Sigma_r^{(2)} x)$ ,  $E_1(\Sigma_r^{(2)} x)$  - табулированные интегро-экспоненциальные функции<sup>/8/</sup>.

Результаты расчета мощности дозы от быстрых нейтронов в зависимости от толщины защиты при использовании выражения (3) приведены в таблице 1 (колонка 2).

Помимо этого необходимо учесть вклад быстрых нейтронов, образующихся в защите при неупругом взаимодействии нейтронов высокой энергии с ядрами материала защиты.

На значительных толщинах защиты устанавливается экспоненциальный закон ослабления потока нейтронов высокой энергии и равновесие между потоком нейтронов высокой энергии и потоком быстрых нейтронов<sup>/2/</sup>. Соотношение между потоками нейтронов высоких энергий и быстрых нейтронов в защите можно получить в виде квадратур, если принять, что плотность источников быстрых нейтронов пропорциональна плотности взаимодействия нейтронов высокой энергии с ядрами материала защиты. Аппроксимируя ослабление потока быстрых нейтронов по толщине полубесконечной защиты, на поверхности которой находится плоский мононаправленный источник быстрых нейтронов, функцией вида:

$$e^{-\Sigma_r^{(2)} x} \{ B_1 - (B_1 - 1) e^{-\Sigma_r^{(2)} x} \},$$

где  $B_1$  - фактор первоначального накопления быстрых нейтронов<sup>/10/</sup>, можно получить для  $x \gg \frac{1}{\Sigma_r^{(2)}}$  следующее соотношение между потоками рассматриваемых групп нейтронов:

$$B = \frac{F^{(2)}(x)}{F^{(1)}(x)} = \frac{\bar{n} \bar{\Sigma}_{in}}{2 \Sigma_r^{(1)}} \left[ B_1 \ln \frac{\Sigma_r^{(2)} + \Sigma_r^{(1)}}{\Sigma_r^{(2)} - \Sigma_r^{(1)}} - (B_1 - 1) \ln \frac{2 \Sigma_r^{(2)} + \Sigma_r^{(1)}}{2 \Sigma_r^{(2)} - \Sigma_r^{(1)}} \right] \quad (4)$$

где  $F^{(1)}(x)$ ,  $F^{(2)}(x)$  — потоки нейтронов высокой энергии и быстрых нейтронов на толщине защиты  $x$  соответственно;

$\bar{n}$  — среднее число быстрых нейтронов, испускаемых при неупругом взаимодействии рассеянных нейтронов высокой энергии с ядрами материала защиты;

$\Sigma_{in}$  — эффективное сечение неупругого взаимодействия;

$\Sigma_f^{(1)}$  — эффективное сечение выведения потока рассеянных нейтронов высоких энергий<sup>2/</sup>.

Экспериментально установлено<sup>2/</sup>, что для обычного бетона фактор накопления быстрых нейтронов на толщинах защиты более 40 см приблизительно равен 1. Это значение совпадает со значением фактора накопления, вычисленным по формуле (4).

Мощность дозы от быстрых нейтронов, образованных в защите в результате неупругого взаимодействия нейтронов высокой энергии с ядрами материала защиты, можно выразить как

$$P_3(x) = \beta_2 V F^{(1)}(x). \quad (5)$$

Результаты расчета мощности дозы согласно этому выражению приведены в таблице 1 (колонка 3).

### 3. Промежуточные нейтроны

В качестве источников промежуточных нейтронов будем рассматривать: монохроматические нейтроны с  $E_0 = 1,5$  Мэв, быстрые нейтроны и нейтроны высоких энергий. Как показано в работе<sup>1/</sup>, пространственно-энергетическое распределение промежуточных нейтронов по толщине защиты можно описать с помощью формул для плоского изотропного источника в бесконечной среде с поверхностной плотностью  $2Q_{np}/S$ :

$$q(u, x) = \frac{2Q_{np}}{S\sqrt{4\pi r}} e^{-\frac{x^2}{4r}}, \quad (6)$$

где  $Q_{np}$  — мощность источника промежуточных нейтронов;

$S$  — площадь сферы.

Тогда при  $\frac{Q_{ap}}{S} = 1$  поток промежуточных нейтронов есть:

$$\phi(u, x) = \frac{12}{\xi \Sigma_s \sqrt{4\pi r}} e^{-\frac{x^2}{4r}}, \quad (7)$$

где  $\xi \Sigma_s$  - замедляющая способность.

Используем следующее соотношение /10/:

$$r = k u \quad k = \frac{r_T}{u_T},$$

где  $r_T$  - возраст нейтронов от 1,5 Мэв до 0,025 эв,

$u_T = 18$  - летаргия.

Тогда мощность дозы, обусловленная промежуточными нейтронами, есть

$$P_4(x) = \frac{2,4}{\sqrt{r_s}} \int_0^{18} \frac{\beta(u)}{\xi \Sigma_s} \frac{e^{-\frac{4,5x^2}{r_s u}}}{\sqrt{u}} du, \quad (8)$$

где  $\beta(u)$  - коэффициент перевода плотности потока промежуточных нейтронов в мощность дозы.

Результаты расчета по формуле (8) приведены в таблице 1 (колонка 3).

Выражение для мощности дозы от промежуточных нейтронов, образованных быстрыми нейтронами, можно записать в следующем виде:

$$P_5(x) = B_D^2 P_2(x), \quad (9)$$

где  $P_2(x)$  - мощность дозы на толщине защиты  $x$ , обусловленная быстрыми нейтронами,

$B_D^2$  - дозовый фактор накопления промежуточных нейтронов по отношению к быстрым нейтронам.

Аналогичное выражение может быть записано для мощности дозы от промежуточных нейтронов, образованных нейтронами высоких энергий:

$$P_6(x) = B_D^{(1)} P_1(x), \quad (10)$$

где  $P_1(x)$  - мощность дозы на толщине защиты  $x$ , обусловленная нейтронами высоких энергий,

$B_D^1$  - дозовый фактор накопления промежуточных нейтронов по отношению к нейтронам высоких энергий.



Факторы накопления промежуточных нейтронов по отношению к нейтронам высоких энергий и быстрым нейтронам на достаточно больших толщинах защиты ( $x \gg \sqrt{r_T}$ ) могут быть определены по данным работы<sup>/10/</sup>. Значения мощностей дозы в зависимости от толщины защиты, полученные при использовании выражений (9) и (10), приведены в таблице 1 (колонка 5 и 6).

#### 4. Тепловые нейтроны

Суммарный поток тепловых нейтронов в защите от рассеянного излучения обусловлен несколькими факторами. Поток тепловых нейтронов, возникший в деталях ускорителя и защитных стенах, очень быстро ослабляется в защите от рассеянного излучения. Следовательно, вклад таких нейтронов в суммарную мощность дозы можно не учитывать. Имеет смысл учитывать только вклад от тепловых нейтронов, образованных в защите в результате замедления быстрых и промежуточных нейтронов, поскольку, как показывают оценки, вкладом в мощность дозы от тепловых нейтронов, возникших из нейтронов высокой энергии, можно пренебречь. Выражение для мощности дозы от тепловых нейтронов, образованных при замедлении промежуточных нейтронов, нормированное на один падающий промежуточный нейтрон, можно получить при решении уравнения диффузии<sup>/11,12/</sup>;

$$P_T(x) = \frac{\beta_T P_T e^{r_T/L^2}}{2L \Sigma_a} \left\{ \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{r_T}} - \frac{\sqrt{r_T}}{L} \right) e^{-\frac{x}{L}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{r_T}} + \frac{\sqrt{r_T}}{L} \right) \right] e^{\frac{x}{L}} \right] \right\}, \quad (11)$$

$$P_T = e^{-\int_{E_1}^{E_0} \frac{\Sigma_a}{\xi \Sigma_s} \frac{dE}{E}}$$

где  $\beta_T$  - коэффициент перевода плотности потока тепловых нейтронов в мощность дозы;

$L$  - длина диффузии тепловых нейтронов;

$\Sigma_a$  - сечение поглощения тепловых нейтронов.

Результаты расчета мощности дозы, согласно выражению (11), приведены в таблице 1 (колонка 7).

Для мощности дозы от тепловых нейтронов, образованных при замедлении быстрых нейтронов, можно получить следующее выражение

$$P_{\gamma}(x) = P_2(x) V_{\text{д}}^3, \quad (12)$$

где  $P_2(x)$  — мощность дозы на толщине защиты  $x$ , обусловленная быстрыми нейтронами,

$V_{\text{д}}^3$  — дозовый фактор накопления тепловых нейтронов, по отношению к быстрым нейтронам.

Результаты расчета мощности дозы, согласно выражению (12), при использовании данных работы /10/ по факторам накопления тепловых нейтронов по отношению к быстрым нейтронам приведены в таблице 1 (колонка 8).

## 5. Гамма-излучение

Мощность дозы захватного гамма-излучения от промежуточных и тепловых нейтронов, нормированная на один падающий нейтрон, может быть вычислена, согласно /1/, по следующей формуле:

$$P_{\gamma}(x) = \frac{\alpha}{2} \sum_{(j)} \eta(E_j) \left\{ 2.4 e^{\mu_j^2 (r_T + L^2)} \left[ \left( 1 + \operatorname{erf} \left[ \frac{x}{2\sqrt{r_T + L^2}} - \mu_j \sqrt{r_T + L^2} \right] \right) e^{-\mu_j x} + \right. \right. \\ \left. \left. + \left( 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{x}{2\sqrt{r_T + L^2}} + \mu_j \sqrt{r_T + L^2} \right] \right) e^{\mu_j x} \right] + \right. \\ \left. + \frac{E_j}{\sqrt{r(r_T + L^2)}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(x-x')^2}{4(r_T + L^2)}} E_1(\mu_j |x-x'|) dx' \right\}, \quad (13)$$

где  $\alpha = 1,54 \cdot 10^{-3}$  (мр/час)/(Мэв/см<sup>2</sup>сек) =  $4,27 \cdot 10^{-4}$  (мкр)/(Мэв/см<sup>2</sup>);

$\eta(E_j)$  - выход захватных гамма-квантов с энергией  $E_j$  на один поглощенный нейтрон;

$\mu_j$  - линейный коэффициент поглощения гамма-квантов с энергией  $E_j$ . Расчет захватного гамма-излучения, образующегося в результате замедления быстрых нейтронов, можно выполнять согласно методике, предложенной в работах по физике защиты ядерных реакторов<sup>/13/</sup>. Аналогично можно определить захватное гамма-излучение, возникшее от нейтронов высокой энергии.

В таблице 1 приведены результаты расчетов вкладов в мощность дозы от рассеянного нейтронного излучения различных групп и захватного гамма-излучения согласно вышеизложенному методу. Вклад в мощность дозы от нейтронов различных энергетических групп нормирован на один нейтрон данной группы, а вклад в мощность дозы от вторичного нейтронного и гамма-излучения - на один нейтрон той энергетической группы нейтронов, которая приводит к его возникновению.

Данные этой таблицы могут быть использованы для расчета защиты от рассеянного излучения ускорителей протонов с энергией до 1 Гэв. В качестве примера можно использовать данные измерений потоков рассеянного излучения различных энергетических групп (табл. 2) для двух характерных полей рассеянного излучения синхротрона ОИЯИ<sup>/1,2/</sup>.

Эти данные могут быть рассмотрены в качестве параметров входной информации для установления верхнего и нижнего пределов толщины защиты от рассеянного излучения. В таблицах 3,4 приведены вклады в мощность дозы от различных компонентов рассеянного излучения и суммарная мощность дозы в защите различной толщины из обычного бетона ( $\rho = 2,35 \text{ г/см}^3$ ) с содержанием водорода 0,35% по весу, вычисленные при использовании начальных потоков рассеянных нейтронов, приведенных в таблице 2. Для первого варианта энергетического состава рассеянного излучения, будем называть его "жестким" спектром рассеянного излучения, толщина защиты, необходимая для снижения уровня излучения до предельно допустимой дозы в обслуживаемом и необслуживаемом помещениях<sup>/8/</sup>, составляет 220 и 150 см обычного бетона. В этом случае основной вклад в мощность дозы от рассеянного излучения обусловлен нейтронами высоких энергий (35-40%), быстрыми (25%) и промежуточными нейтронами (30%), возникшими при замедлении нейтронов высокой энергии. Для второго

варианта энергетического состава рассеянного излучения, будем называть его "мягким" спектром рассеянного излучения, необходимая толщина защиты составляет 140 и 105 см обычного бетона, соответственно. В последнем случае основной вклад в мощность дозы за защитой толщиной 140 см обусловлен захватным гамма-излучением, образованным промежуточными и тепловыми нейтронами (60%), быстрыми нейтронами (20%) и тепловыми нейтронами, возникшими из промежуточных нейтронов (8,5%). Основной вклад в мощность дозы за защитой толщиной 105 см обусловлен захватным гамма-излучением, образованным промежуточными и тепловыми нейтронами (58%), тепловыми нейтронами, возникшими из промежуточных нейтронов (25%) и захватным гамма-излучением, образованным быстрыми нейтронами (13%).

### Л и т е р а т у р а

1. Л.Р. Кимель и др. Препринт ОИЯИ Р9-3402, Дубна 1987.
2. Л.Р. Кимель и др. Препринт ОИЯИ Р9-3435, Дубна 1987.
3. Б.С. Сычев. Препринт ОИЯИ Р9-3269, Дубна 1987.
4. S. J. Lindenbaum, Ann. Rev. Nucl. Sci., **11**, 213 (1961).
5. S. Charalambus et al, CERN, DI (HP)74, April 1965.
6. В.И. Кочкин и др. Препринт ОИЯИ Р-1743, Дубна 1984.
7. Proceedings International Conference on Sector-focused Cyclotrons and Meson Factories CERN 63-19, 29 May 1963, p. 157.
8. Санитарные правила работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений. Госатомиздат, М, 1963.
9. В.И. Пагурова. Таблицы интегро-экспоненциальной функции. ВЦ АН СССР, М, 1959.
10. Д.Л. Бродер и др. Бетон в защите ядерных установок. Атомиздат, М, 1966.
11. С. Глестон, М. Эдлунд. Основы теории ядерных реакторов. ИЛ, М, 1954.
12. Р. Мегриблиан, Д. Холмс. Теория реакторов. Госатомиздат М, 1962.
13. Д.Л. Бродер и др. Атомная энергия **16**, 26 (1964).

Рукопись поступила в издательский отдел  
17 ноября 1987 г.

Таблица 1

Вклады в мощность дозы от рассеянного нейтронного излучения различных энергетических групп и гамма-излучения в залегах из бетона различной толщины  $H$  (мдэр/час)(нейтр/сек см<sup>2</sup>)

Толщина бетона на захватных экранах, см	Быстрые нейтроны на захватных экранах, см		Промежуточные нейтроны		Тепловые нейтроны		Гамма-излучение	
	(E>20 Мэв)	(1,5-20 Мэв)	(E>1,5 Мэв)	(E<1,5 Мэв)	(E>0,025 эв)	(E<0,025 эв)	(E>0,025 эв)	(E<0,025 эв)
0	1,9.10 <sup>-1</sup>	1,35.10 <sup>-1</sup>	1,7.10 <sup>-1</sup>	4,6.10 <sup>-1</sup>	3,7.10 <sup>-1</sup>	9,3.10 <sup>-3</sup>	2,10 <sup>-2</sup>	2,10 <sup>-2</sup>
20	5,20.10 <sup>-2</sup>	1,0.10 <sup>-2</sup>	4,6.10 <sup>-2</sup>	1,2.10 <sup>-2</sup>	2,8.10 <sup>-2</sup>	7,7.10 <sup>-3</sup>	6,0.10 <sup>-3</sup>	6,0.10 <sup>-3</sup>
40	1,75.10 <sup>-2</sup>	1,4.10 <sup>-3</sup>	1,25.10 <sup>-2</sup>	4,7.10 <sup>-3</sup>	3,9.10 <sup>-3</sup>	3,6.10 <sup>-3</sup>	6,5.10 <sup>-3</sup>	2,1.10 <sup>-3</sup>
60	6,4.10 <sup>-3</sup>	2,0.10 <sup>-4</sup>	4,5.10 <sup>-3</sup>	6,7.10 <sup>-4</sup>	5,6.10 <sup>-4</sup>	1,1.10 <sup>-3</sup>	2,3.10 <sup>-3</sup>	8,6.10 <sup>-4</sup>
80	2,6.10 <sup>-3</sup>	3,15.10 <sup>-5</sup>	1,8.10 <sup>-3</sup>	1,1.10 <sup>-4</sup>	8,8.10 <sup>-5</sup>	2,6.10 <sup>-4</sup>	8,4.10 <sup>-4</sup>	3,6.10 <sup>-4</sup>
100	1,2.10 <sup>-3</sup>	5,35.10 <sup>-6</sup>	8,0.10 <sup>-4</sup>	1,1.10 <sup>-5</sup>	1,5.10 <sup>-5</sup>	6,6.10 <sup>-5</sup>	3,0.10 <sup>-4</sup>	1,5.10 <sup>-4</sup>
120	5,6.10 <sup>-4</sup>	1,0.10 <sup>-6</sup>	4,0.10 <sup>-4</sup>	3,4.10 <sup>-6</sup>	2,8.10 <sup>-6</sup>	1,6.10 <sup>-5</sup>	8,5.10 <sup>-5</sup>	6,30.10 <sup>-5</sup>
140	2,9.10 <sup>-4</sup>	1,7.10 <sup>-7</sup>	2,10 <sup>-4</sup>	5,7.10 <sup>-7</sup>	5,2.10 <sup>-7</sup>	3,6.10 <sup>-6</sup>	2,5.10 <sup>-5</sup>	2,6.10 <sup>-5</sup>
160	1,45.10 <sup>-4</sup>	1,0.10 <sup>-8</sup>	1,0.10 <sup>-4</sup>	1,0.10 <sup>-7</sup>	7,9.10 <sup>-8</sup>	8,2.10 <sup>-8</sup>	9,2.10 <sup>-7</sup>	7,5.10 <sup>-6</sup>
180	7,5.10 <sup>-5</sup>	5,5.10 <sup>-9</sup>	5,2.10 <sup>-5</sup>	1,8.10 <sup>-8</sup>	1,1.10 <sup>-8</sup>	1,5.10 <sup>-8</sup>	2,1.10 <sup>-7</sup>	4,7.10 <sup>-6</sup>
200	3,9.10 <sup>-5</sup>	1,0.10 <sup>-9</sup>	2,8.10 <sup>-5</sup>	3,4.10 <sup>-9</sup>	1,4.10 <sup>-9</sup>	2,8.10 <sup>-9</sup>	4,8.10 <sup>-8</sup>	6,2.10 <sup>-7</sup>
220	2,0.10 <sup>-5</sup>	5,0.10 <sup>-10</sup>	1,3.10 <sup>-5</sup>	1,6.10 <sup>-9</sup>	-	1,1.10 <sup>-8</sup>	2,0.10 <sup>-7</sup>	8,6.10 <sup>-7</sup>

\*) Вклад в мощность дозы от нейтронов различных энергетических групп нормирован на один нейтрон данной группы, а вклад от захватного нейтронного и гамма-излучения - на один нейтрон той энергетической группы, которая приводит к его возникновению.

Таблица 2

Потоки рассеянных нейтронов (нейтр)/(см<sup>2</sup>сек) в помещении синхротрона ОИЯИ [1] [2].

Вид спектра :	Нейтроны высоких энергий (E>20 Мэв) :	Быстрые нейтроны (1,5 < E < 20 Мэв) :	Промежуточные нейтроны (E < 1,5 Мэв) :
"Жесткий" спектр	4.10 <sup>4</sup>	4,5.10 <sup>4</sup>	7.10 <sup>5</sup>
"Мягкий" спектр	2.10 <sup>2</sup>	1,7.10 <sup>4</sup>	3,3.10 <sup>5</sup>

Таблица 3

Выходы в мощность дозы (мдв/час) в зале из бетона от компонент "жесткого" спектра рассеянного излучения.

Толщина бетона на входе излучения, см	Нейтронный спектр, (E>20 Мэв)	Быстрые нейтроны, (1,5-8,20 Мэв)	Промежуточные нейтроны, (E<1,5 Мэв)	Тепловые нейтроны, (E<0,025 Мэв)	Гамма-излучение, (E<0,1 Мэв)	Суммарная мощность дозы
0	7,6.10 <sup>3</sup>	6,1.10 <sup>3</sup>	5,4.10 <sup>3</sup>	5,1.10 <sup>5</sup>	1,4.10 <sup>4</sup>	6,0.10 <sup>5</sup>
20	2,1.10 <sup>3</sup>	4,5.10 <sup>2</sup>	1,5.10 <sup>3</sup>	1,0.10 <sup>4</sup>	8,3.10 <sup>3</sup>	3,2.10 <sup>4</sup>
40	7,0.10 <sup>2</sup>	6,2.10 <sup>1</sup>	5,0.10 <sup>2</sup>	9,3.10 <sup>3</sup>	4,0.10 <sup>3</sup>	1,0.10 <sup>4</sup>
60	2,6.10 <sup>2</sup>	9,0	1,8.10 <sup>2</sup>	5,3.10 <sup>1</sup>	7,5.10 <sup>2</sup>	2,9.10 <sup>2</sup>
80	1,0.10 <sup>2</sup>	1,4	7,4.10 <sup>1</sup>	1,5	1,4.10 <sup>2</sup>	8,6.10 <sup>1</sup>
100	4,8.10 <sup>1</sup>	0,24	3,2.10 <sup>1</sup>	2,0.10 <sup>-2</sup>	2,0.10 <sup>1</sup>	2,6.10 <sup>1</sup>
120	2,2.10 <sup>1</sup>	4,5.10 <sup>-2</sup>	1,6.10 <sup>1</sup>	1,0.10 <sup>-4</sup>	0,7	7,5.10 <sup>0</sup>
140	1,2.10 <sup>1</sup>	7,6.10 <sup>-3</sup>	8	8	2,7	2,1.10 <sup>0</sup>
160	5,8	1,3.10 <sup>-3</sup>	4	4	0,36	7,8.10 <sup>-1</sup>
180	3,0	-	2	2	0,145	3,5.10 <sup>-1</sup>
200	1,6	-	1,1	1,1	0,034	1,6.10 <sup>-1</sup>
220	0,8	-	0,52	0,52	0,019	8,2
					0,19	4,0
					2,8.10 <sup>-2</sup>	2,0
					9,10 <sup>-3</sup>	
					7,10 <sup>-3</sup>	
					3,6.10 <sup>-2</sup>	

Таблица 4

Вклад в мощность дозы (мзр/час) в защите из бетона от компонент "мягкого" спектра рассеянного излучения.

Толщи- на за- щиты, см	Нейтроны эи- сонских энергий ( $E > 20$ Мэв)	Быстрые нейтроны ( $1,5 E < 20$ Мэв)	Быстрые нейтроны, образован- ные нейтро- нами высо- ких энергий	Промежуточ- ные нейтро- ны ( $E < 1,5$ Мэв)	Промежуточ- ные нейтро- ны, образо- ванные ней- тронами эи- сонских энер- гий	Промежуточ- ные нейтро- ны, образо- ванные быс- тронами ней- сонских энер- гий	Промежуточ- ные нейтро- ны, образо- ванные быс- тронами ней- сонских энер- гий	Тепловые нейтроны, образован- ные быстры- ми нейтрона- ми	Тепловые нейтроны, образован- ные быстры- ми нейтрона- ми	Гамма-излу- чение, обра- зованное чужими ней- тронами	Гамма-излу- чение, обра- зованное чужими ней- тронами	Гамма-излуче- ние, образован- ное нейтрона- ми высоких энергий	Суммарная мощность дозы
0	$3,8 \cdot 10^1$	$2,3 \cdot 10^3$	$2,7 \cdot 10^1$	$2,4 \cdot 10^5$	$3,4 \cdot 10^1$	$7,8 \cdot 10^3$	$6,6 \cdot 10^3$	$6,3 \cdot 10^3$	$3,1 \cdot 10^3$	-	4,0	$2,8 \cdot 10^5$	
20	$1,0 \cdot 10^1$	$1,7 \cdot 10^2$	7,4	$5,0 \cdot 10^3$	9,3	$5,8 \cdot 10^2$	$4,0 \cdot 10^3$	$4,8 \cdot 10^2$	$2,5 \cdot 10^3$	-	1,2	$1,7 \cdot 10^4$	
40	3,5	$2,4 \cdot 10^1$	2,5	$4,5 \cdot 10^2$	3,1	$8,0 \cdot 10^1$	$2,0 \cdot 10^3$	$6,6 \cdot 10^1$	$1,2 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^2$	0,42	$3,9 \cdot 10^3$	
60	1,3	3,4	0,9	$2,5 \cdot 10^1$	1,1	$1,1 \cdot 10^1$	$3,6 \cdot 10^2$	9,5	$3,8 \cdot 10^2$	$3,9 \cdot 10^1$	0,17	$8,4 \cdot 10^2$	
80	0,5	0,53	0,37	0,71	0,46	1,8	$6,8 \cdot 10^1$	1,5	$9,3 \cdot 10^1$	$1,4 \cdot 10^1$	$7,2 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^2$	
100	0,24	$9,1 \cdot 10^{-2}$	0,16	$9 \cdot 10^{-3}$	0,21	0,31	9,6	0,25	$2,2 \cdot 10^1$	5,1	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^1$	
120	0,11	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$8,0 \cdot 10^{-2}$	-	0,10	$6 \cdot 10^{-2}$	1,3	$4,8 \cdot 10^{-2}$	5,3	1,4	$1,2 \cdot 10^{-2}$	8,4	
140	$5,8 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	-	$5,2 \cdot 10^{-2}$	$9,7 \cdot 10^{-3}$	0,17	$8,8 \cdot 10^{-3}$	1,2	0,42	$5,2 \cdot 10^{-3}$	2,0	
160	$2,9 \cdot 10^{-2}$	-	$2,0 \cdot 10^{-2}$	-	$3,2 \cdot 10^{-2}$	-	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0,3	0,13	$2,0 \cdot 10^{-3}$	0,54	
180	$1,5 \cdot 10^{-2}$	-	$1,0 \cdot 10^{-2}$	-	$1,3 \cdot 10^{-2}$	-	$3,6 \cdot 10^{-3}$	-	$7 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$9,5 \cdot 10^{-4}$	0,15	
200	$7,8 \cdot 10^{-3}$	-	$5,6 \cdot 10^{-3}$	-	$7 \cdot 10^{-3}$	-	-	-	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-4}$	0,05	
220	$3,8 \cdot 10^{-3}$	-	-	-	-	-	-	-	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	0,01	