

2252

ЭКЗ ЧИТ. ЗАЛА

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

2252



Л.С. Золин

ПРИМЕНЕНИЕ БОРНОГО СЧЕТЧИКА  
С  $\text{CH}_2$ -ЗАМЕДЛИТЕЛЕМ  
В НЕЙТРОННОЙ ДОЗИМЕТРИИ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1965

2252

Л.С. Золин

ПРИМЕНЕНИЕ БОРНОГО СЧЕТЧИКА  
С  $\text{CH}_3$ -ЗАМЕДЛИТЕЛЕМ  
В НЕЙТРОННОЙ ДОЗИМЕТРИИ

Научно-техническая  
библиотека  
ОИЯИ

Наибольшую биологическую опасность среди компонент рассеянного излучения на протонных ускорителях высокой энергии представляют нейтроны с энергией в интервале  $0,1 \div 20 \text{ Мэв}^{1/}$ . Поэтому вопрос контроля величины нейтронных потоков указанной энергии является одной из основных задач службы радиационной безопасности ускорителя. Задача эта, как правило, осложнена наличием потоков  $\gamma$ -квантов и заряженных частиц широкого энергетического спектра. Это обстоятельство затрудняет применение широко известных детекторов нейтронов, основанных на регистрации протонов отдачи. Выгодно выделяются в этом отношении детекторы, использующие экзотермические реакции типа  $\text{B}^{10}(\text{n}, \alpha)\text{Li}^7$ ,  $\text{Li}^6(\text{n}, \alpha)\text{H}^3$ . Большая энергия и высокая плотность линейных потерь продуктов реакций обуславливают хорошие дискриминирующие свойства подобных детекторов. Сечение указанных реакций падает по закону  $1/v$ , следствием этого является высокая эффективность регистрации тепловых нейтронов и малая чувствительность к промежуточным и быстрым нейтронам. Положение может быть изменено, если детектор тепловых нейтронов поместить в среду, хорошо замедляющую быстрые нейтроны (парафин, полиэтилен). Эффективность регистрации быстрых нейтронов при этом значительно возрастает и становится сравнимой с эффективностью регистрации тепловых нейтронов "голым" детектором ( $1-10 \text{ имп/н/см}^2$ ). Высокая чувствительность такого детектора и очень низкий собственный фон позволяют регистрировать потоки нейтронов, сравнимые с уровнем нейтронного фона от космических лучей. Последнее обстоятельство делает детектор с замедлителем весьма ценным прибором для нейтронной дозиметрии при определении уровня нейтронного излучения около экспериментальных установок, в помещениях, занятых обслуживающим персоналом ускорителя, на территории, прилегающей к зданию ускорителя и т.п.

Вышесказанное объясняет тот большой интерес, который был проявлен к детектору с замедлителем во многих лабораториях, где сталкивались с задачей регистрации ненаправленного нейтронного потока в присутствии фона  $\gamma$ -лучей и заряженных частиц. Было предложено много конструкций детектора и рассмотрены возможности создания на его основе дозиметра нейтронов <sup>1-6/</sup>.

Установлено, что, варьируя толщину замедляющего слоя, можно в широких пределах изменять эффективность детектора как функцию энергии. Особый интерес представляют два частных случая: (1) когда эффективность в широком интервале энергий изменяется незначительно, в этом случае детектор может быть использован для измерения величины потока нейтронов (если ожидается, что подавляющая часть нейтронов лежит в указанном энергетическом интервале), (2) когда зависимость эффективности от энергии с достаточной для практических целей точностью может быть сделана близкой к зависимости тканевой дозы от энергии нейтронов. Сопоставляя показания подобных потокомера и дозиметра <sup>12/</sup> можно, помимо сведений о потоке и мощности дозы, получить также оценку средней энергии нейтронов и в результате — тот необходимый минимум данных, который требуется для определения степени биологической опасности и расчета защиты от нейтронного излучения. Более подробные сведения о спектре нейтронов могут быть получены при использовании набора замедляющих блоков различной толщины <sup>17/</sup>.

Ниже дается описание конструкции и приводятся характеристики детектора нейтронов, основанного на изложенном выше принципе, который был использован службой дозиметрии Лаборатории высоких энергий при исследовании полей нейтронного излучения синхрофазотрона.

#### Конструкция и калибровка детектора

Для детектирования нейтронов, замедлившихся до тепловой энергии, были использованы борные счетчики типа СМ-5 и СМО-5 (обогащенный  $V^{10}$ ), расположенные по оси полиэтиленовых цилиндров высотой 32 см (рис. 1). Для защиты от тепловых нейтронов цилиндры покрывались снаружи слоем кадмия толщиной 0,8 мм. Выбор цилиндрической конструкции датчика продиктован типом детектора тепловых нейтронов, хотя она и не обеспечивает полную изотропность характеристик детектора. Недостаток этот не играет, однако, решающей роли, поскольку в практике нейтронной дозиметрии на ускорителях, как правило, имеют дело с нейтронным излучением, близким к изотропному, и достаточная достоверность результатов обеспечивается применением усредненных по углу значений эффективности детектора. При исследовании зависимости эффективности от энергии нейтронов и толщины замедлителя был использован набор цилиндров с толщиной замедляющего слоя (полуразность внешнего и внутреннего диаметров) 20, 30, 40, 60, 70, 120 мм.

Интервал энергий от 0,025 до 14 Мэв был изучен с помощью фотонейтронных источников  $Sb-\gamma-Be$ ,  $Rd Th-\gamma-D_2O$  и нейтронов реакций  $D(d,n)He^3$ ,  $Rd Th-\gamma-Be$   $T(d,n)He^4$ . Были использованы также такие наиболее доступные немонахроматические источники нейтронов, как  $Po-\alpha-В$  и  $Pu-\alpha-Be$ , форма секторов которых хорошо известна <sup>18,9,10/</sup>. Градуировка источников была выполнена методом активации

марганца (2%-ный водный раствор  $KMnO_4$ ). Абсолютный выход нейтронов определен путем сравнения с ( $Ra-\alpha-Be$ ) —источником Н-28. Ошибка в определении абсолютного выхода оценена в  $\pm 8\%$ , помимо статистической ошибки и ошибки калибровки источника Н-28 ( $\pm 3\%$ ), была учтена также ошибка, связанная с введением поправки на утечку нейтронов из марганцевой ванны, ввиду ее ограниченных размеров (200 л). В случае  $D(d,n)He^3$  — реакции мониторингирование производилось по протонам сопутствующей реакции  $D(d,p)H^3$ . Отношение дифференциальных сечений этих реакций известно с точностью  $\pm 10\%$  <sup>11/</sup>, этим и определялась ошибка в вычислении потока нейтронов с энергией 2,3 Мэв. Поток нейтронов с энергией 13,5 Мэв в реакции  $T(d,n)He^4$  контролировался путем регистрации  $\alpha$  —частиц, погрешность в величине потока нейтронов в данном случае также определялась точностью ( $\pm 5\%$ ), с которой известно отношение дифференциальных сечений выхода нейтронов и  $\alpha$  —частиц.

Эффективность детектора к тепловым нейтронам была определена с помощью источника, предложенного в работе <sup>12/</sup>. Нейтроны источника в тепловой области имеют максвелловское распределение по скоростям с температурой 540°К, выход тепловых нейтронов определен с точностью 10%.

Эффект от нейтронов, рассеянных от стен и поля помещения, в котором производились измерения, определялся по отклонению от закона  $1/r^2$  путем сопоставления результатов измерений при различных расстояниях между детектором и источником.

Результаты измерений эффективности детектора как функции толщины замедляющего слоя и энергии нейтронов для случая, когда нейтроны падают под углом  $90^\circ$  к оси счетчика, представлены на рис. 2. Кривые имеют характерный максимум, который сдвигается в сторону больших толщин с увеличением энергии нейтронов. Поскольку эффективность детектора цилиндрической формы является функцией угла падения ( $\theta$ ) нейтронов относительно оси счетчика, были произведены измерения эффективности как функции угла для каждого случая толщины замедлителя и энергии нейтронов. Эта зависимость при двух существенно различных энергиях 0,025 и 4,5 Мэв представлена графически на рис. 3 и 4. Видно, что угловая зависимость значительна и возрастает с уменьшением угла  $\theta$ . Однако усредненная эффективность детектора

$$\bar{\eta} = \int_0^{\pi/2} \eta(\theta) \cos \theta d\theta$$

в интервале энергий от 0,02 до 14 Мэв отличается от эффективности при  $\theta = 90^\circ$  не более чем на 30%.

Как правило, в работах, посвященных исследованию детекторов с замедлителем, данные в области промежуточных энергий нейтронов отсутствуют или же носят оценочный характер. Это объясняется трудностью постановки эксперимента в данной области. Единственным методом, который может обеспечить здесь хорошее энергетичес-

кое разрешение, является метод спектрометрии по времени пролета. Но и при использовании этого метода возникают дополнительные трудности, связанные с большим временем жизни тепловых нейтронов (несколько сотен микросекунд) в таких замедляющих средах, как парафин, полиэтилен. Это ограничивает доступный для исследования интервал энергий – и тем сильнее, чем меньше база пролета. Измерения в области промежуточных энергий с детектором описываемой конструкции, были выполнены на 1000-метровой базе импульсного реактора ОИЯИ, это позволяло охватить интервал энергий от 1 эв до 2–10 кэв (для различных толщин). Выше этого предела сказывается искажающее действие времени замедления и диффузии тепловых нейтронов, учет которых затруднителен. Определение формы спектра ( $E^{-0.915}$ ) в указанном интервале энергий и определение абсолютной величины потока (с точностью  $\pm 10\%$ ) было выполнено с помощью BF<sub>3</sub>-счетчика в предположении, что сечение реакции  $V^{10}(n, \alpha)$  в этом интервале подчиняется зависимости  $1/v$ .

Результаты измерений эффективности  $\eta$  во всем исследованном интервале энергий от 1 эв до 14 Мэв представлены в координатах  $E, \eta$  на рис. 5 и 6. В области промежуточных энергий при толщинах замедляющего слоя  $\delta > 30$  мм эффективность плавно уменьшается с ростом  $\delta$ , это обусловлено тем, что процесс замедления завершается в поверхностном слое и плотность потока тепловых нейтронов в центре блока замедлителя полностью определяется процессом диффузии тепловых нейтронов. При использовании внешнего кадмиевого экрана эффективность резко падает к нулю в области кадмиевой границы (0,4 эв). Поведение незакадмированного детектора в области ниже 1 эв не исследовалось, однако из сопоставления значений эффективности при 1 и 0,04 эв (540°K) следует, что эффективность детектора в этом интервале при толщине замедлителя  $\delta = 20\text{--}30$  мм существенно падает. Это связано, очевидно, со значительным увеличением сечения рассеяния нейтронов, когда их энергия становится меньше энергии связи протонов в молекулах полиэтилена (парафина).

#### Определение потока и энергии нейтронов

По известной зависимости эффективности детектора от энергии и толщины замедлителя можно получить, как отмечалось, сведения о потоке и энергии быстрых нейтронов. Среднюю энергию нейтронов можно оценить, в частности, по положению максимума скорости счета как функции толщины замедлителя или по длине релаксации, определяемой по спадающей ветви этой зависимости<sup>/13/</sup>. Еще более простой способ оценки средней энергии состоит в сравнении показаний детектора при двух различных толщинах замедлителя<sup>/2/</sup>. Если ограничиться областью энергий от 0,02 до 10 Мэв, то задача определения нейтронного потока с приемлемой для целей дозиметрии точностью ( $\pm 20\%$ ), может быть решена таким подбором толщины замедлителя, при котором эффективность слабо изменяется с энергией. Измеритель потока такого рода был предложен рядом авторов<sup>/1,2/</sup>.

Однако в реально встречающихся спектрах на область промежуточных нейтронов ( $E < 0,1$  Мэв) приходится значительная часть общего нейтронного потока (до 50% и более) и пренебрежение ею недопустимо. При рассмотрении поведения эффективности (рис. 5,6) в интервале энергий от 1 эв до 10 Мэв становится очевидной невозможность осуществления "всеобщего" измерителя потока подбором толщины замедлителя. Поэтому для анализа результатов измерений рассеянного нейтронного излучения ускорителя нами был использован метод, аналогичный предложенному в работе<sup>/6/</sup>. Метод основан на сопоставлении скоростей счета, полученных с тремя замедляющими блоками различной толщины. В качестве таковых нами были выбраны цилиндры с толщиной замедляющего слоя 20; 40 и 120 мм. Спектр рассеянных нейтронов в области энергий ниже 100 кэв, как правило, близок по форме к виду  $1/E$ . Сделав подобное предположение о форме спектра, можно по результатам измерений с тремя цилиндрами определить поток промежуточных нейтронов и поток и среднюю энергию быстрых нейтронов с энергией  $> 100$  кэв.

Для быстроты обработки результатов измерений удобен графический способ определения указанных величин. Он состоит в следующем. Скорость счета детектора с каждым из трех цилиндрических замедлителей может быть выражена в процентах от суммы скоростей счета для всех трех, таким образом определяются три счетных коэффициента. Их отношение является функцией соотношения потоков быстрых и промежуточных нейтронов и энергии быстрых нейтронов. Зависимость величины счетного коэффициента от доли быстрых нейтронов в общем потоке, представляющем комбинацию нейтронов спектра  $1/E$  и быстрых нейтронов, изображается на графике прямой линией (рис. 7). Счетные коэффициенты для трех цилиндрических замедлителей выбранного диаметра были вычислены на основании экспериментальных кривых рис. 6. Каждой из трех толщин замедления (20; 40 и 120 мм) на рис. 7 отвечает семейство прямых, крайние правые точки которых соответствуют моноэнергетическим нейтронам указанных энергий, слева прямые сходятся в одну точку (случай чистого спектра  $1/E$ , обрывающегося при 100 кэв). Комбинации нейтронов спектра  $1/E$  и моноэнергетических нейтронов соответствуют точки на линиях семейств, лежащие на одной вертикальной прямой. В случае измерений в полях рассеянных нейтронов мы имеем дело не с моноэнергетическими нейтронами, а с нейтронами сплошного спектра, однако описанный способ может быть применен для анализа результатов измерений, если быстрой фракции нейтронов приписывать среднюю энергию, при которой экспериментальные точки ложатся на одну вертикальную линию. Точка пересечения последней с горизонтальной шкалой указывает долю быстрых нейтронов в общем потоке. (В качестве примера на рис. 7 нанесены значения счетных коэффициентов  $K_{\delta}$ , полученные при одном из измерений в здании синхрофазотрона – см. таблицу 1). Полный поток нейтронов может быть рассчитан по формуле:

$$\Phi = \frac{N_{\delta}}{\eta_{\delta}(1/E)p(1/E) + \eta_{\delta}(\bar{E}_{\text{б.н.}})p_{\text{б.н.}}}$$

где  $p_{\text{б.н.}}$  - доля быстрых нейтронов в общем потоке;  $p(1/E)$  - доля нейтронов промежуточной энергии спектра  $1/E$  ( $0,5 \text{ эв} < E < 10^4 \text{ эв}$ );  $\eta_{\delta}(1/E)$ ,  $\eta_{\delta}(\bar{E})$  - эффективность счетчика при толщине замедляющего слоя  $\delta$  соответственно в области промежуточных энергий и при  $E = \bar{E}_{\text{б.н.}}$  для  $\delta = 40 \text{ мм}$  ( $\eta_{\delta}(1/E) = 3,8 \text{ имп/н/см}^2$ , (при эффективности к тепловым нейтронам  $\eta_T = 4,4 \text{ имп/н/см}^2$ );  $N_{\delta}$  - число импульсов, зарегистрированных счетчиком.

В таблице приведены результаты измерений с описанным детектором нейтронов в четырех характерных точках внутри и за внешней стеной здания синхрофазотрона (рис. 8). Из приведенных цифр можно сделать вывод о том, что в поле рассеянного нейтронного излучения ускорителя промежуточные нейтроны составляют преобладающую часть общего нейтронного потока (хотя их относительный вклад в дозу невелик), поэтому пренебрежение областью промежуточных энергий или отсутствие данных об эффективности детектора в этой области может привести к значительным ошибкам при измерении потока и оценке энергии нейтронов.

Автор благодарит М.И. Салацкую за помощь, оказанную при градуировке источников нейтронов, а также В.М. Назарова и В.И. Салацкого, при содействии которых были выполнены измерения на установках Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

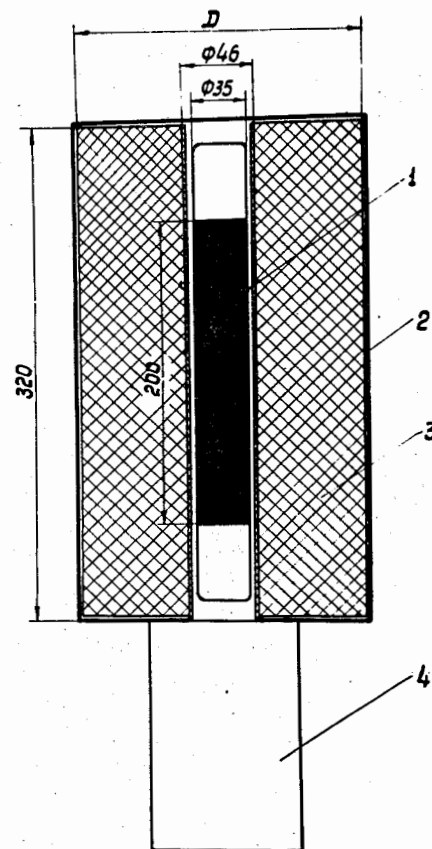
#### Л и т е р а т у р а

1. R.Wallace, B.Y.Moyer, H.W.Patterson, A.R.Smith and L.D.Stephens. Selected Topics in Radiation Dosimetry, IAEA, Vienna, 1961, p. 579-588.
2. De Pänger. Nucl. Inst. and Methods, v.5, No. 2, p. 61-74, 1959.
3. Х.Д. Андросенко, Г.Н. Смирненк. ПТЭ, 5, 1962, стр. 64.
4. О.И. Лейпунский. Neutron Dosimetry, IAEA, Vienna, 1963, vol. II, p. 377-384.
5. D.E.Nachtigall. Neutron Dosimetry, IAEA, Vienna, vol. II, p.269-274, 1963.
6. D.E.Hankins. Neutron Dosimetry, IAEA, Vienna, vol.II, p.123-136, 1963.
7. R.L.Bramblett, R.L.Ewing and T.W.Bonner, Nucl. Instr. and Meth., v.9, No.1, p.1-12, 1960.
8. K.W.Geiger and C.J.D. Jarvis, Canadian Journal of Physics, 40, No.1, p.33-48, 1962.
9. S.Notarrigo, R.Parisi, R.Ricamo and A.Rubbino, Nuclear Physics, 29, p.507-514, 1962.
10. Л. Медведки. Атомная энергия, 13, 583-587 (1962).

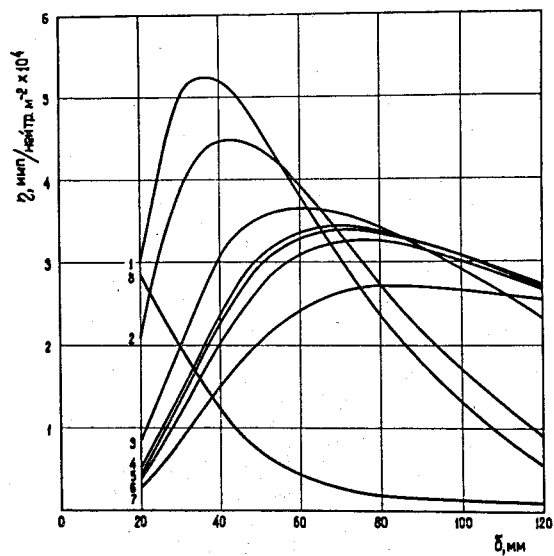
12. Р.Д. Васильев, Г.А. Дорофеев, Т.С. Мордовская, В.И. Петров, М.И. Пшменов. Neutron Dosimetry, IAEA, Vienna, vol. II, p.477-486, 1963.

13. Block, S., Shon, F.J., Health Physics, 8, 533, 1962.

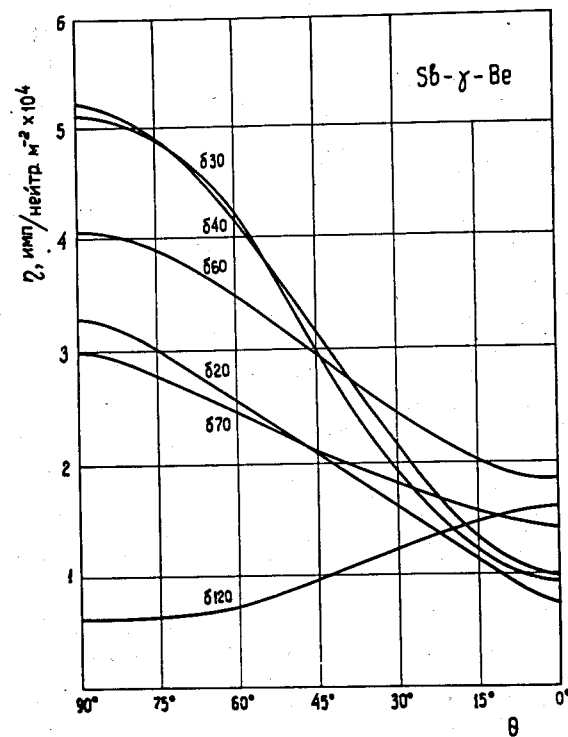
Рукопись поступила в издательский отдел  
1 июля 1965 г.



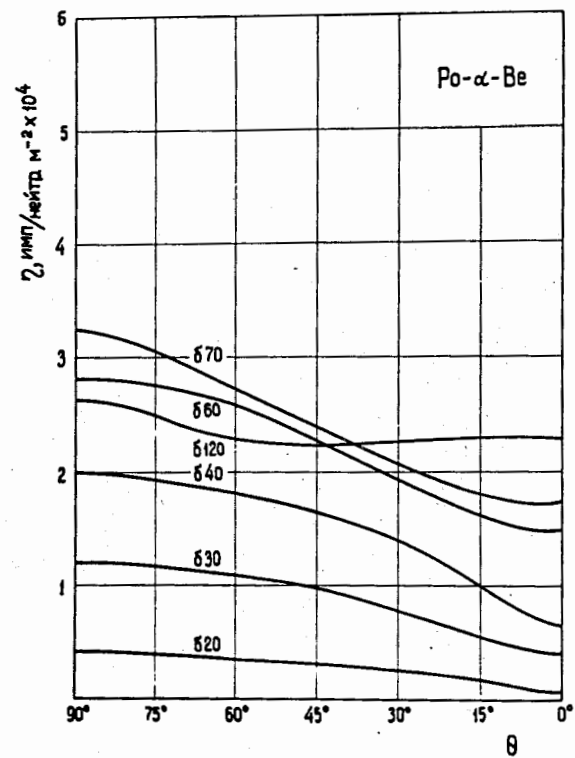
Р и с. 1. Конструкция детектора нейтронов. 1 - рабочий объем счетчика, 2 - кадмиевое покрытие (0,6 мм), 3 - замедлитель (парафин, полиэтилен), 4 - предусилитель.



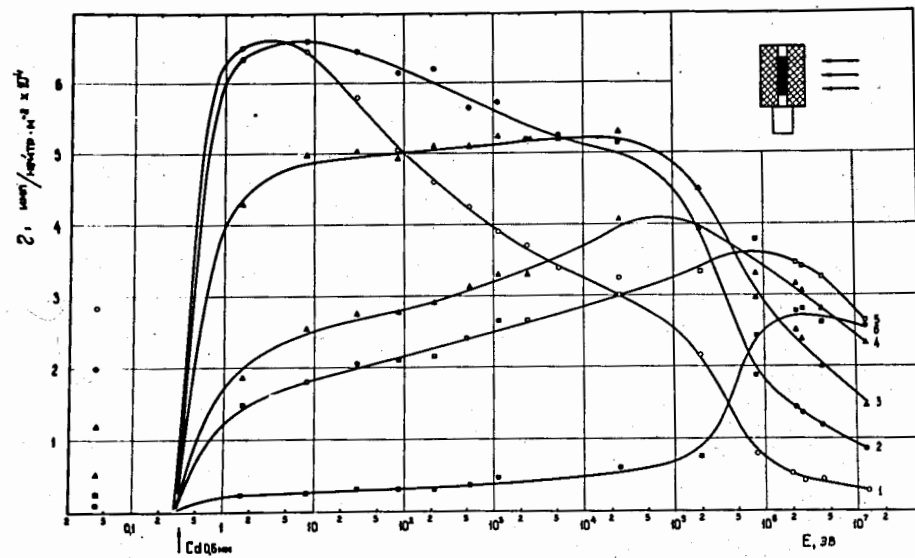
Р и с. 2. Зависимость эффективности детектора от толщины замедляющего слоя и энергии нейтронов (угол падения нейтронов  $\theta = 90^\circ$ ).  
 1 - Sb- $\gamma$ -Be ( $E = 0,025$  Мэв), 2 - RdTh- $\gamma$ -D<sub>2</sub>O ( $E = 0,20$  Мэв),  
 3 - RdTh- $\gamma$ -Be ( $E = 0,80$  Мэв), 4 - D(d,n) ( $E = 2,3$  Мэв),  
 5 - Po- $\alpha$ -B ( $E = 2,8$  Мэв), 6 - Pu- $\alpha$ -Be ( $E = 4,5$  Мэв),  
 7 - T(d,n) ( $E = 13,5$  Мэв), 8 - Тепловые нейтроны ( $T = 540^\circ\text{K}$ ).



Р и с. 3. Угловая зависимость эффективности детектора для нейтронов от (Sb- $\gamma$ -Be) источника ( $E = 0,025$  Мэв).



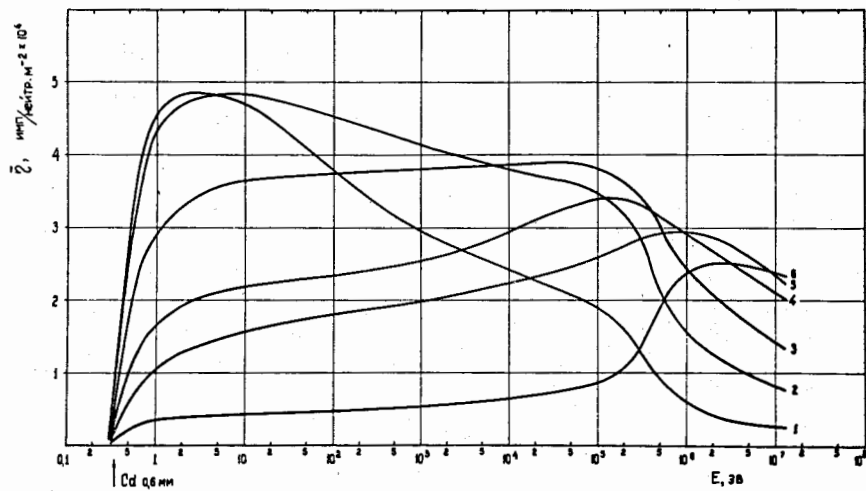
Р и с. 4. Угловая зависимость эффективности детектора для нейтронов от (Po-α-Be) источника ( $E = 4,5$  Мэв).



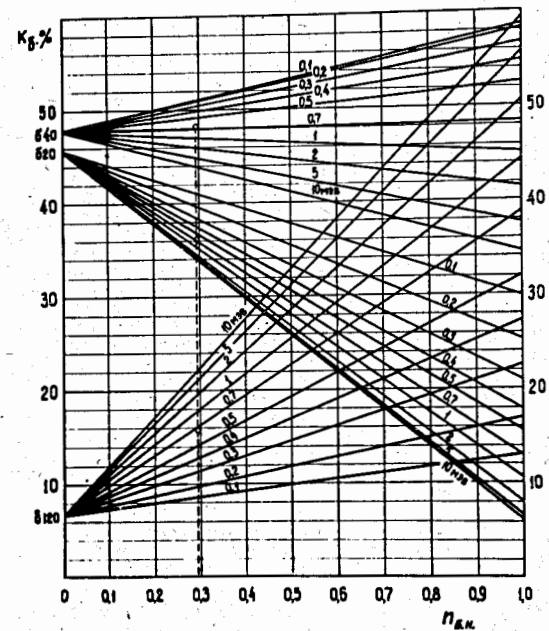
Р и с. 5. Эффективность детектора как функция энергии нейтронов при различных толщинах замедляющего слоя (угол падения нейтронов  $90^\circ$ ).

1 -  $\delta = 20$  мм (полиэтилен), 4 -  $\delta = 80$  мм (парафин),  
 2 -  $\delta = 30$  мм (полиэтилен), 5 -  $\delta = 70$  мм (полиэтилен),  
 3 -  $\delta = 40$  мм (полиэтилен), 6 -  $\delta = 120$  мм (парафин).

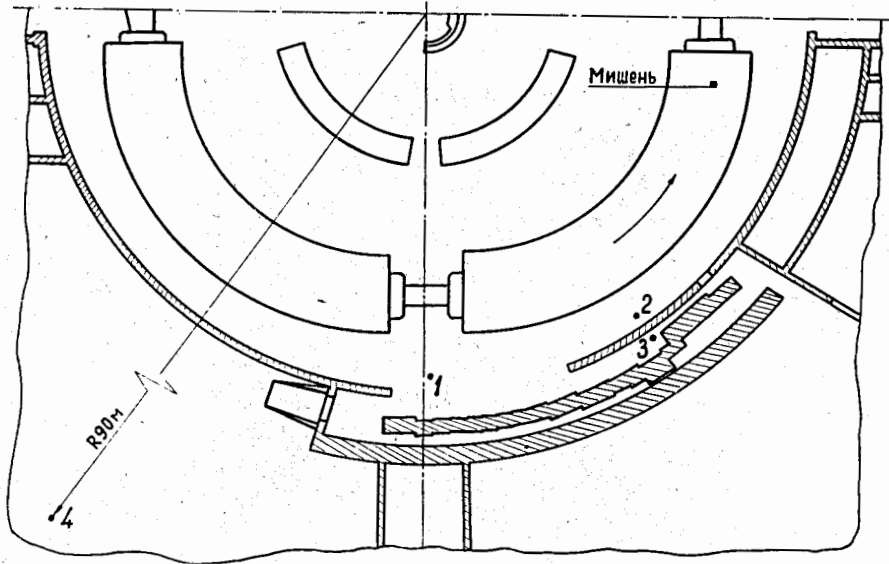




Р и с. 6. Усредненная по углу эффективность детектора как функция энергии нейтронов при различных толщинах замедляющего слоя (см. рис. 5).



Р и с. 7. Зависимость счетных коэффициентов для трех толщин замедлителя от энергии быстрых нейтронов и их доли в смешанном потоке быстрых нейтронов и промежуточных нейтронов спектра  $1/E$  ( $0,5 \text{ эв} < E < 0,1 \text{ Мэв}$ ).



Р и с. 8. Северная часть здания синхрофазотрона. Результаты измерений с нейтронным детектором в точках 1,2,3,4 приведены в таблице.

Т а б л и ц а

Район измерений	х.з.к.		Полный поток нейтронов Н/см <sup>2</sup> /10 <sup>10</sup> пр	Доля сист-рых нейтронов, %	Е.б.н. Мэв	Доза нейтронов, мкбэр/10 <sup>10</sup> пр.		
	20	40				бегстрне нейтроны	Промежуточн. нейтроны	
1 - Около прямолинейного ускорителя	34,2	45,6	20,2	1260	30	2	13,7	1,75
2 - В районе центральной части одного из квадратов ускорителя	36	48,3	15,7	980	30	0,7	8,1	1,37
3 - В том же районе, но за стеной 0,6 м (кирпич)	33,6	49,2	17,2	130	38	0,6	1,25	0,16
4 - На расстоянии 50 м от внешней стены здания ускорителя	36,3	44,5	19,2	19	25	7	0,19	0,029