

C349.a

C-958

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P-2359



Б.С.Сычев, В.В.Мальков, М.М.Комочков, Л.Н.Зайцев

ПРОХОЖДЕНИЕ НЕЙТРОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ  
В ЖЕЛЕЗОВОДНЫХ СМЕСЯХ

*Ат. энергия, 1966, т 20, в 4, с 323-326*

Д-2359

В.С. Стрель, В.В. Мельков, М.М. Комолов, А.Н. Зинин

ПРОХОЖДЕНИЕ НЕЙТРОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ  
В ЖЕЛЕЗОБОДНЫХ СМЕСЯХ

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БНФДМУСЕР

3668/2 чф.

В практике проектирования защит ускорителей на высокие энергии часто возникает необходимость в создании защиты ограниченной или минимальной толщины. Как правило, это достигается путем применения тяжелых бетонов на железорудных заполнителях и скрапе или стали.

Однако в этих материалах возможно значительное накопление промежуточных нейтронов, которое наиболее просто можно рассчитать методом теории возраста. Для изучения процесса накопления промежуточных нейтронов были проведены экспериментальные исследования ослабления потоков нейтронов высоких энергий в железобетонной среде.

Основной экспериментальной установки являлся набор стальных пластин размерами 980 x 980 мм и толщиной 20 мм, помещенный в металлический бак с внутренними размерами 1000 x 1000 x 2000 мм. С внешних сторон бак имел защиту из бетонных блоков от рассеянного излучения. Общий вид установки показан на рис. 1.

Экспериментальная установка находилась в зале синхротрона ОИЯИ. Лицевая поверхность установки была ориентирована перпендикулярно падающему на нее пучку нейтронов, генерируемых протонами различных энергий на бериллиевой мишени. Более подробно геометрия опыта описана в работе <sup>1/</sup>.

Регистрация нейтронов различных энергетических групп осуществлялась пороговыми детекторами (табл. 1); регистрация гамма-излучения - фотопленкой. Детекторы и фотопленка во время облучения устанавливались при помощи держателей (рис. 2) внутри защиты через каждые 6-10 см по ее толщине.

Путем изменения расстояний между пластинами внутри бака, заполненного водой, изменялись плотность среды и концентрация воды (водорода) в смеси.

Исследовалось ослабление потоков нейтронов, генерируемых протонами с энергиями 170, 250, 350, 480 и 660 МэВ. На рис. 3 представлены экспериментальные данные по распределению потоков нейтронов в железе и железобетонных смесях; спектр падающих на защиту нейтронов соответствовал энергии протонов 660 и 350 МэВ. Аналогичные распределения были получены при других энергиях протонов.

Экспоненциальный характер ослабления потока нейтронов высоких энергий

( $E > 20$  Мэв) на участке защиты от  $2 \cdot 10^3$  до  $10^4$  кг.м<sup>-2</sup> позволял определить длину релаксации в железобетонных смесях (табл. 2).

С этой же длиной релаксации ослабевают быстрые нейтроны и нейтроны промежуточных энергий в железобетонных композициях, что говорит о равновесии исследованных энергетических групп нейтронов на толщине защиты более  $2 \cdot 10^3$  кг.м<sup>-2</sup>. В чистом железе на исследованных толщинах равновесие между потоками нейтронов высоких энергий и рассеянными нейтронами не устанавливается. Расчетным путем установлено, что это равновесие наступает на толщине железа в 2-2,5 м.

В настоящей работе были также рассчитаны факторы накопления промежуточных нейтронов для различных концентраций водорода в железобетонных композициях. Определены факторы накопления промежуточных нейтронов  $V(n, x)$  для единичный интервал логарифма  $x$ , как отношение функции распределения для потока промежуточных нейтронов  $G(n, x)$  к потоку нейтронов высоких энергий  $\Phi(x)$  на толщине защиты  $x$ .

Т а б л и ц а 1

Краткая характеристика детекторов, использованных в опытах

| Наименование детектора                   | Используемая реакция             | Эффективная область регистрации нейтронов, Мэв | Эффективное сечение, $10^{-27}$ см <sup>2</sup> |
|--|----------------------------------|--|---|
| Полистирол с добавками терфенила и POFOP | $C^{12} (n, \alpha) C^{11}$      | $E > 20$                                       | 21  |
| Фосфор                                   | $P^{31} (n, p) Si^{31}$          | $2 < E < 20$                                   | $\approx 100$                                   |
| Индий в чехле из кадмия                  | $In^{115} (n, \gamma) In^{116m}$ | $E \approx 1,44 \cdot 10^{-6}$                 | $\int \sigma_a(E) \frac{dE}{E} = 3.10^6$        |

Т а б л и ц а 2

Длина ослабления  $\lambda_{rem}$  потока нейтронов высоких энергий ( $E > 20$  Мэв),  $кг/м^2$

| Концентрация водорода, вес %  | Длина для неупругого взаимодействия, $кг/м^2$ (расчет) | Плотность смеси, $кг/м^3$ | Энергия протонов, Мэв |           |           |           |           |
|---|--|---------------------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|   |  |                           | 170                   | 250       | 350       | 480       | 660       |
| 0   | 1410   | 7220±130                  | 1230±106              | 1630±74   | 1820±110  | 1910±110  | 1700±65   |
| 0,103   | 1400   | 7280±130                  | -                     | -         | 1680±75   | -         | 1910±210  |
| 0,245   | 1390   | 6730±120                  | -                     | -         | -         | -         | 1890±100  |
| 0,487   | 1370   | 6030±110                  | 1260±70               | -         | 1630±90   | 1820±70   | 1850±130  |
| Средневзвешенное значение величины $\frac{\lambda_{rem}}{\lambda_{in}}$ |  |                           | 0,904±0,021           | 1,16±0,05 | 1,21±0,03 | 1,34±0,01 | 1,22±0,02 |

Используя теорию возраста, можно получить для достаточно большой толщины защиты следующее выражение для фактора накопления:

$$B(u) = \frac{\bar{\Sigma}_{in} \bar{n}}{\xi(u) \Sigma_s(u)} \exp \left[ \int_{u_0}^u \Sigma_{rem}^2 \tau(u) - h(u) \right] . \quad (1)$$

Здесь  $\bar{\Sigma}_{in}$  - сечение неупругого взаимодействия нейтронов, усредненное по спектру нейтронов высоких энергий ( $E > 20$  Мэв);  $\bar{n}$  - среднее число испарительных нейтронов из ядер элементов защиты при бомбардировке их нейтронами высоких энергий;  $\xi(u)$  - среднелогарифмическая потеря энергии;  $\Sigma_s(u)$  - сечение рассеяния промежуточных нейтронов;  $\Sigma_{rem}$  - сечение выведения нейтронов высоких энергий;  $\tau(u)$  - возраст нейтронов;  $h(u)$  - резонансный интеграл захвата замедляющихся нейтронов.

Фактор накопления потока промежуточных нейтронов есть

$$B(\pi) = \int_{u_0}^{u_T} B(u) du , \quad (2)$$

где  $u_0$  соответствует энергии 0,85 Мэв,  $u_T$  - энергии 0,025 эв.

Фактор накопления дозы промежуточных нейтронов запишем в виде

$$B(D) = \frac{1}{\beta_R} \int_{u_0}^{u_T} \beta(u) B(u) du , \quad (3)$$

где  $\beta_R$  - доза на 1 нейтрон высокой энергии;  $\beta(u)$  - доза на 1 промежуточный нейтрон с летаргией  $u$ .

В таблице 3 приведены экспериментальные и расчетные значения факторов накопления  $B(u)$  для нейтронов с энергией 1,44 эв.

На основании сведений о спектре нейтронов высоких энергий в защите<sup>/2/</sup> и данных об испаряющихся из ядер нейтронов<sup>/3/</sup> их число  $\bar{n}$  выбрано равным 3.

Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных величин  $B(u)$  позволяет предположить, что для расчета факторов накопления промежуточных нейтронов теория возраста применима. По формулам (2), (3) были рассчитаны дозовые и потоковые факторы накопления промежуточных нейтронов. Величины факторов накопления приведены в таблице 3.

Как следует из таблицы, накопление промежуточных нейтронов в железе настолько велико, что использовать его для защиты без добавок из легких элементов практически нецелесообразно. Добавляя некоторое количество водородосодержащего материала, можно получить защиту меньшей толщины, чем защита из чистой стали, несмотря на некоторое уменьшение средней плотности.

Проследим, как меняется толщина железобетонной защиты при изменении концентрации водорода. Так как вклад гамма-излучения в мощность дозы и поток, а также вклад

тепловых нейтронов в мощность дозы пренебрежимо малы, ослабление мощности дозы  $P(x)$  и потока  $\Phi(x)$  в защите можно приближенно представить выражениями:

$$P(x) = P_1 e^{-\sum_{rem} x} (1 + V_{\sigma}^{(d)} + V^{(d)}) \quad (4)$$

$$\Phi(x) = \Phi_1 e^{-\sum_{rem} x} (1 + V_{\Sigma}^{(n)} + V^{(n)}), \quad (5)$$

где  $P_1$  и  $\Phi_1$  - соответственно мощность дозы и поток нейтронов высоких энергий ( $x=0$ );  $V_{\sigma}^{(d)}$  - дозовый фактор накопления быстрых нейтронов;  $V_{\Sigma}^{(n)}$  - сумма потоковых факторов накопления тепловых и быстрых нейтронов; приближенно принято, что  $V_{\Sigma}^{(n)}$  не зависит от водородосодержания.

Т а б л и ц а 3

Факторы накопления промежуточных нейтронов на толщине защиты от  $2 \cdot 10^3$  до  $10^4 \text{ кг м}^{-2}$

| Фактор накопления       |                   | Концентрация водорода в смеси, вес, % |             |             |             |
|-------------------------|-------------------|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|                         |                   | 0                                     | 0,103±0,017 | 0,245±0,020 | 0,467±0,017 |
| $u_1 + 1,44 \text{ эВ}$ | расчетный         | 5,8                                   | 1,1±0,17    | 0,570±0,04  | 0,24±0,01   |
|                         | экспериментальный | переменная величина                   | 1,13±0,17   | 0,55±0,03   | 0,29±0,02   |
| $V^{(d)}$               | расчетный         | 25,6                                  | 4,05        | 1,68        | 0,83        |
| $V^{(n)}$               | расчетный         | 580                                   | 37          | 16          | 8,7         |

Здесь мы принимаем сечение выведения для дозы нейтронов высоких энергий равным сечению выведения для потока нейтронов высоких энергий в связи с отсутствием достоверных сведений об изменении спектра нейтронов в защите<sup>/2/</sup> и отсутствием обоснованных данных о зависимости дозы от энергии нейтронов высоких энергий<sup>/4/</sup>.

Решая выражения (4) и (5) относительно  $x$ , находим:

$$x^{(d)} = \frac{\ln k^{(n)} + \ln (1 + V_{\sigma}^{(d)} + V^{(d)})}{\sum_{rem}}; \quad (6)$$

$$x^{(n)} = \frac{\ln k^{(n)} + \ln (1 + V_{\Sigma}^{(n)} + V^{(n)})}{\sum_{rem}}, \quad (7)$$

где  $k^{(д)}$  и  $k^{(п)}$  - кратность ослабления дозы и потока нейтронов соответственно. На рис. 4 представлены графически зависимости (6) и (7).

Оптимальное количество водорода, необходимое для получения защиты минимальной толщины, зависит как от кратности ослабления  $k$ , так и того, по какому критерию необходимо рассчитать защиту (по допустимому потоку или дозе). Например, при  $k = 10^7$  оптимальное количество водорода в железобетонной смеси должно составлять: при расчете по допустимому потоку - 0,1%, а при расчете по допустимой дозе - 0,07% по весу. Однако это незначительное количество водорода приводит к существенному сокращению толщины защиты и к значительной экономии стали: в среднем около 5000 кг на каждый квадратный метр площади защиты.

Железобетонные защиты неудобны в эксплуатации. Поэтому в качестве водородо-содержащей компоненты можно использовать гидратные растворы или бетоны.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность В.С.Киселеву за помощь при расчете факторов накопления промежуточных нейтронов; В.П.Афанасьеву и В.М.Назарову за предоставление возможности использования калиброванных детекторов сверх-быстрых и промежуточных нейтронов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Л.Н.Зайцев и др. "Атомная энергия", 12, 525 (1962).
2. М.М.Комочков, Б.С.Сычев. "Атомная энергия", 15, 325 (1963).
3. П.А.Перфилов и др. Ядерные реакции под действием частиц высоких энергий. Изд. АН СССР, М-Л (1962).
4. Санитарные правила № 333-60, Госатомиздат (1960).

Рукопись поступила в издательский отдел  
9 сентября 1965 г.



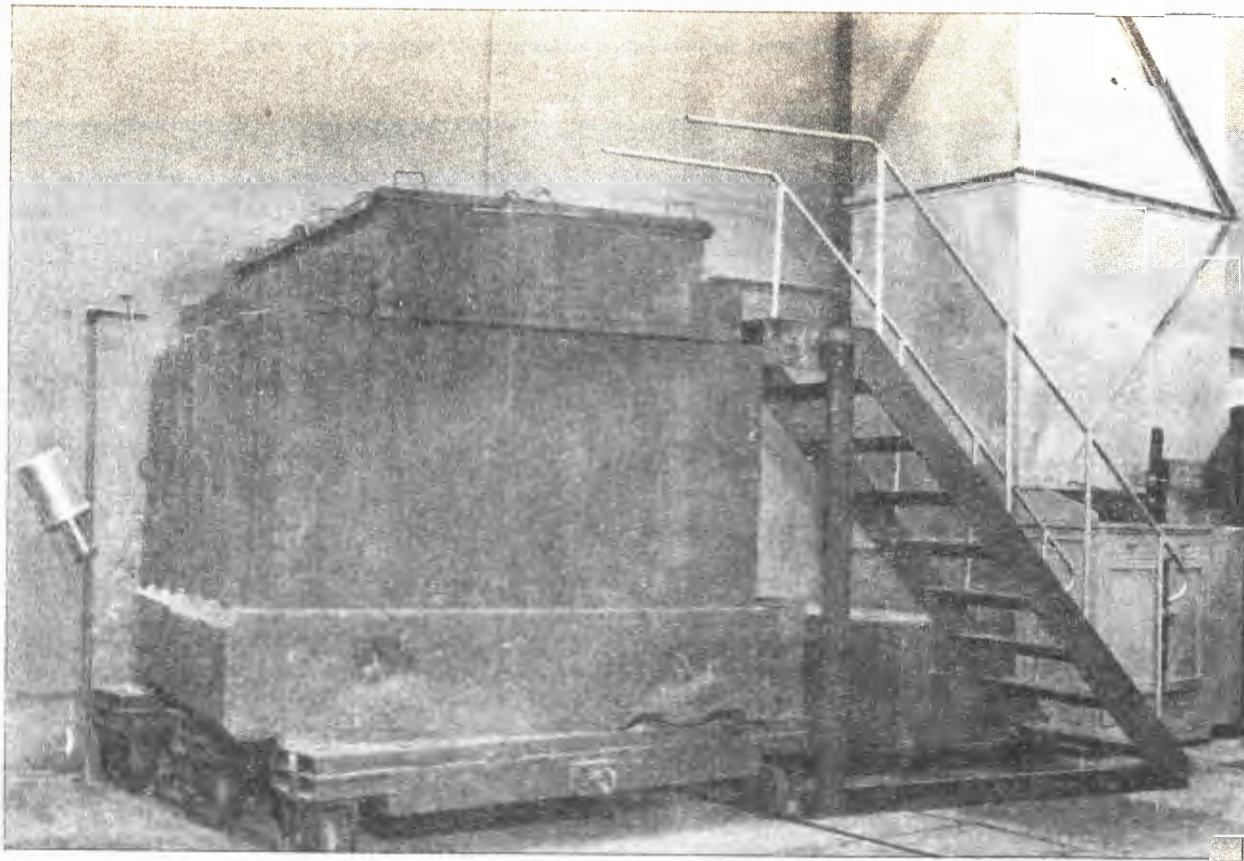


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки в главном зале синхродиклтрона ОНЯИ.

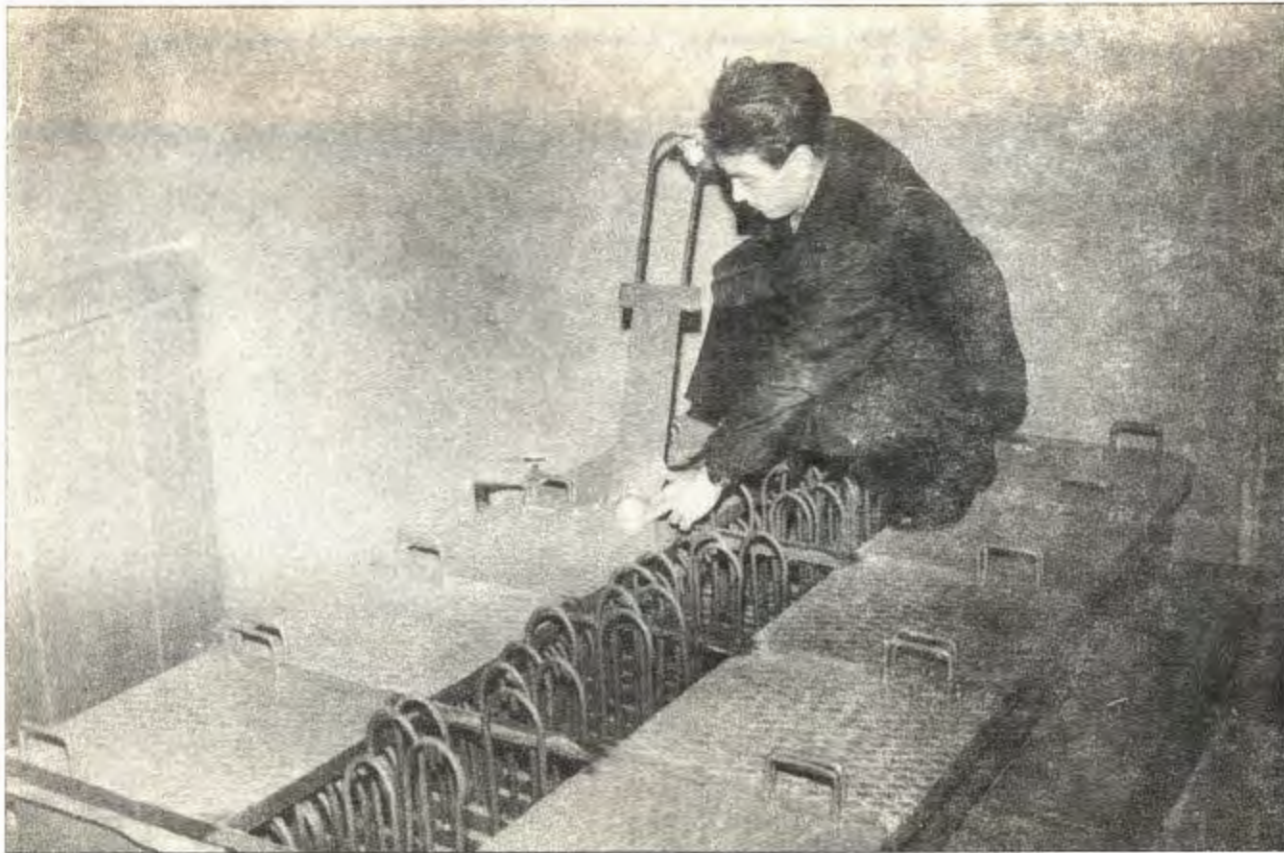


Рис. 2. Закладка детектора в держателях экспериментальной установки.

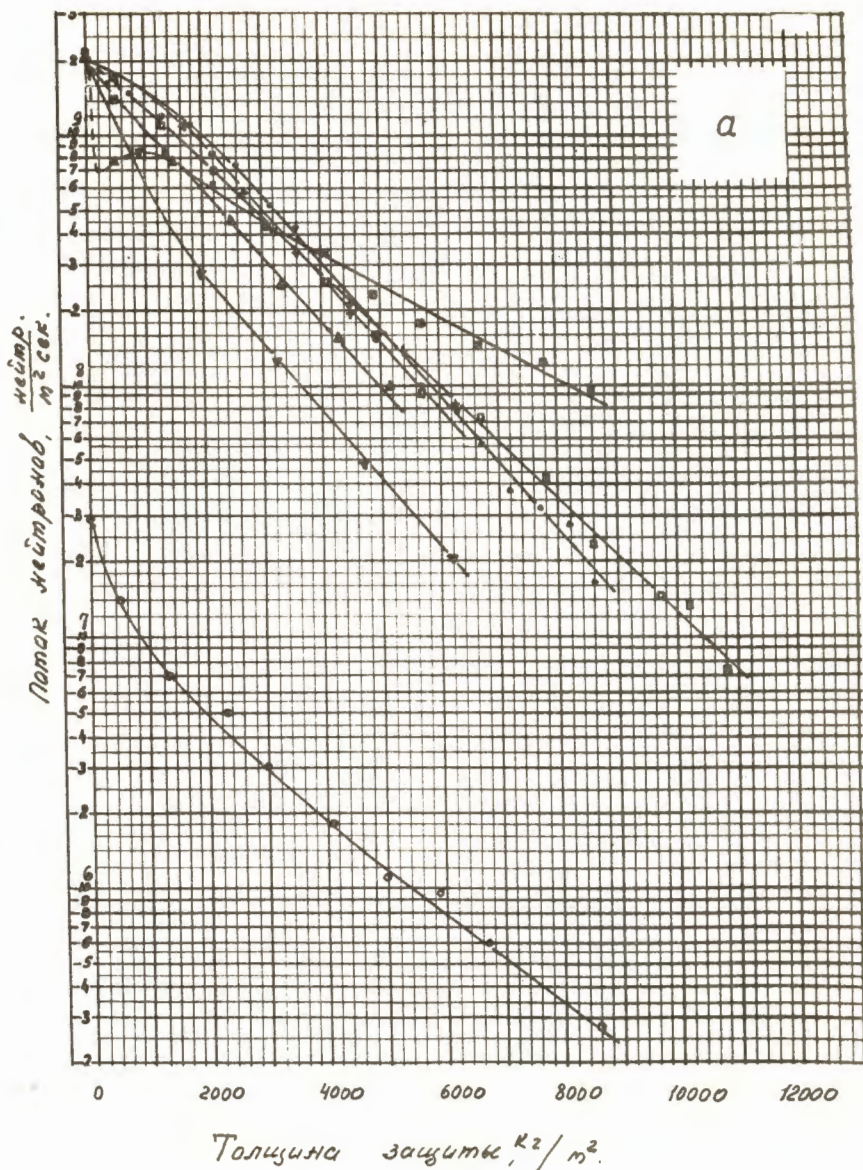


Рис. 3а. Ослабление потоков нейтронов от бериллиевой мишени, бомбардируемой протонами с энергией 660 Мэв. ● - кривая ослабления потока нейтронов высоких энергий ( $E > 20$  Мэв) в железе, + - кривая ослабления потока быстрых нейтронов ( $E = 2-20$  Мэв) в железе, ■ - кривая ослабления потока резонансных нейтронов ( $E = 1,44$  эв) в железе, □ - кривая ослабления потока резонансных нейтронов в среде с содержанием водорода 0,103% по весу, ▲ - то же с содержанием водорода 0,245% по весу, ▼ - то же с содержанием водорода 0,467% по весу, ○ - кривая ослабления мощности дозы гамма-излучения,  $10^{-4}$  мкр/сек, в железе.

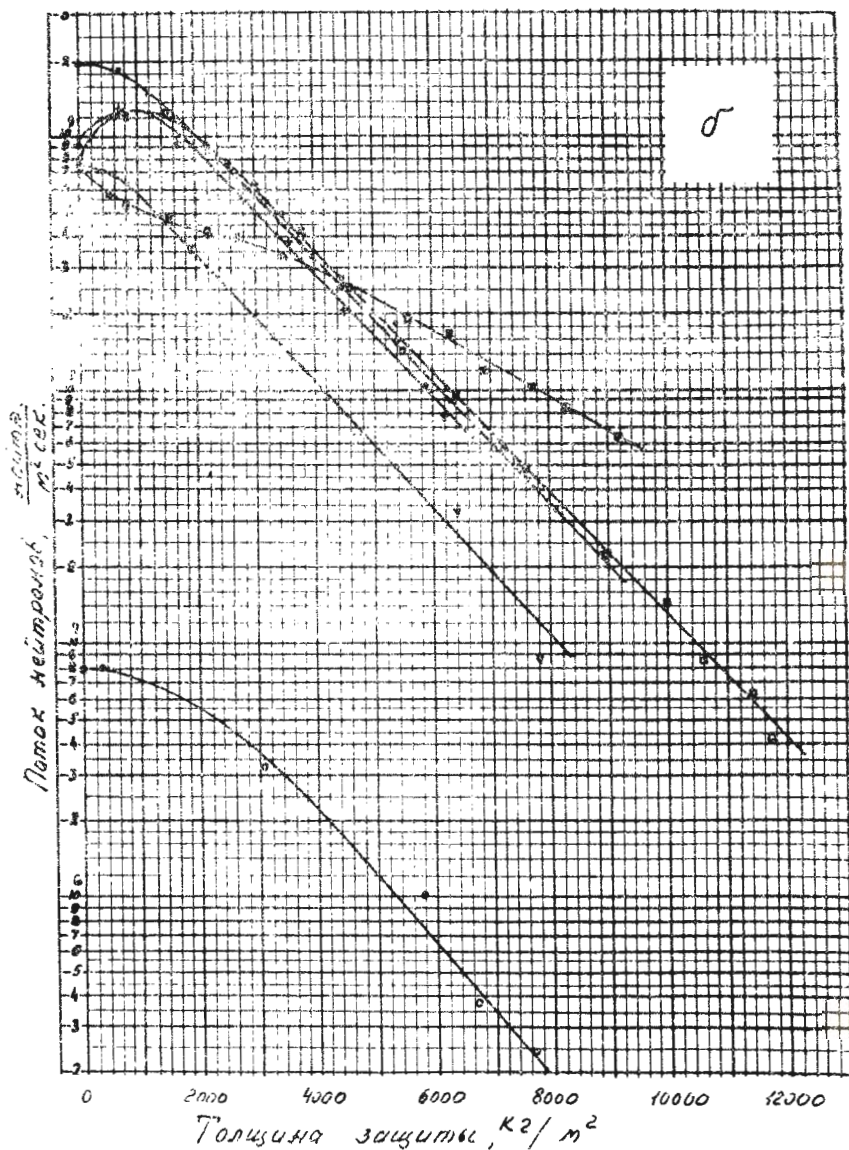


Рис. 36. Ослабление потоков нейтронов от бериллиевой мишени, бомбардирующей протонами с энергией 350 Мэв. ● - кривая ослабления потока нейтронов высоких энергий ( $E > 20$  Мэв) в железе; + - кривая ослабления потока быстрых нейтронов ( $E = 2-20$  Мэв) в железе; ■ - кривая ослабления потока резонансных нейтронов ( $E = 1,44$  эв) в железе, □ - кривая ослабления потока резонансных нейтронов в среде с содержанием водорода 0,103% по весу, ▼ - то же с содержанием водорода 0,467% по весу, ○ - кривая ослабления мощности дозы гамма-излучения,  $10^{-4}$  мкр/сек, в среде с содержанием водорода 0,103% по весу.

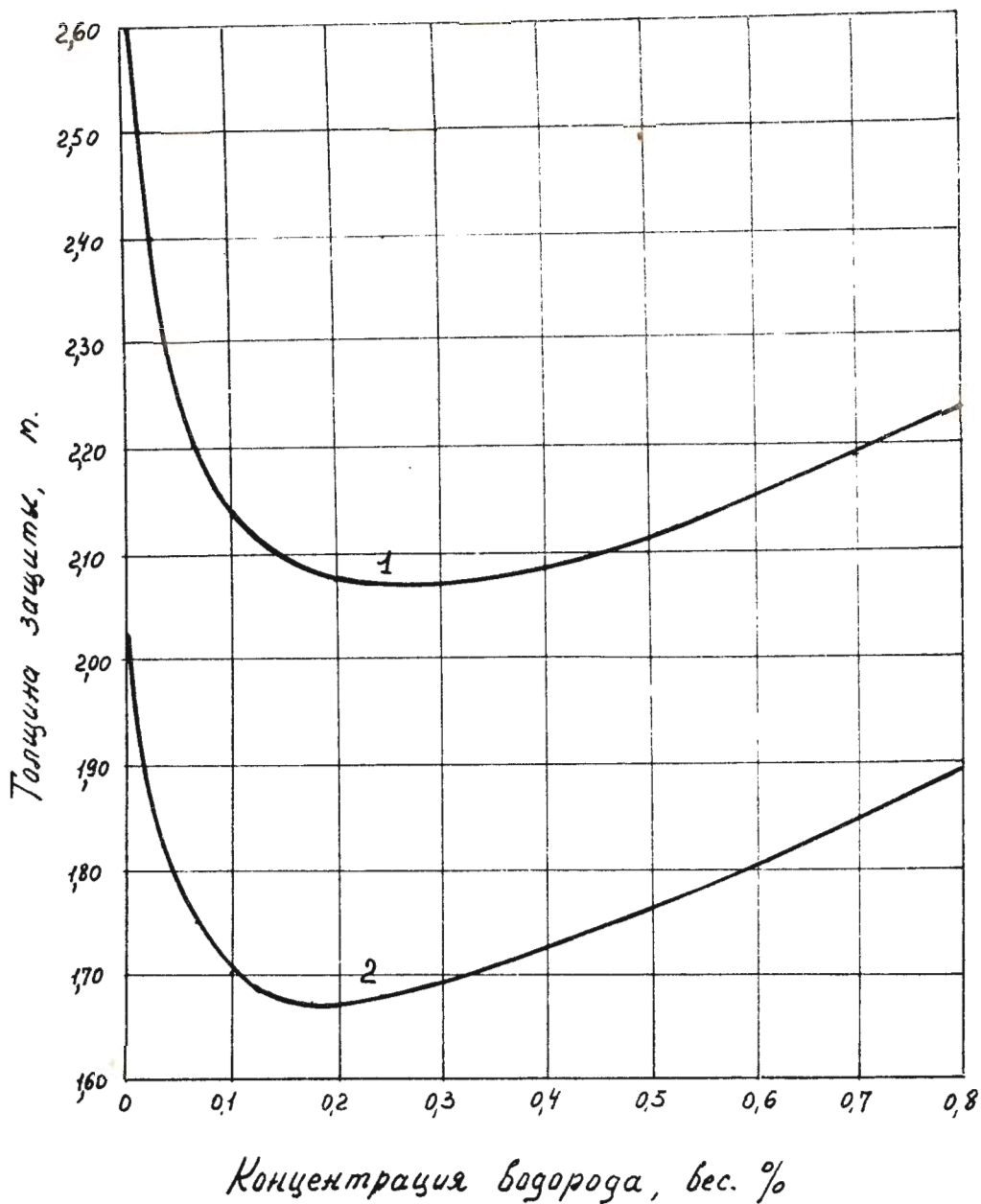


Рис. 4. Зависимость толщины железобетонной защиты от концентрации водорода для кратности ослабления равной 200. 1 - при расчете по допустимому потоку, 2 - при расчете по допустимой дозе.