

## Влияние содержания воды в бетонах на толщину защиты реакторов и ее стоимость

Д. Л. Бродер, Л. Н. Зайцев, Б. С. Сычев, А. М. Туголуков

В настоящей работе сравниваются результаты расчетов биологической защиты из различных бетонов. Рассматривался реактор с графитовым замедлителем и отражателем. Проанализированы зависимости толщины и стоимости биологической защиты из бетонов различных сортов и плотностей от содержания воды в бетонах. Цель авторов — на примере 46 сортов бетонов, наиболее широко используемых в реакторостроении СССР, определить экономическую целесообразность увеличения количества воды в бетоне.

Плотность и водосодержание различных сортов бетонов, применяемых в реакторостроении, оказывают наибольшее влияние на защитные свойства бетона, а следовательно, на толщину, вес и стоимость биологической защиты. Таким образом, выбор того или иного сорта бетона характеризуется в известной степени экономическую сторону использования ядерной энергии и, следовательно, должен учитываться при расчете и проектировании защиты.

### Влияние воды на защитные свойства бетона

Вода в связанном состоянии является непременной составляющей всех типов бетона и количество ее зависит от многих факторов: вида цемента и замедлителей, времени выдержки, температуры и других условий. Водород, входящий в состав связанной воды, обладает наибольшим сечением выведения быстрых нейтронов на единицу веса [1,2], поэтому бетон, содержащий большее количество водорода (при постоянной плотности), имеет большее эффективное сечение выведения быстрых нейтронов.

Практически изменение количества водорода в бетоне приводит к изменению сечения выведения не более чем на 12% (рис. 1). Увеличение количества водорода приводит также к уменьшению накопления промежуточных нейтронов вследствие хороших замедляющих свойств водорода для нейтронов промежуточных энергий. Длина диффузии тепловых нейтронов особенно сильно зависит от количества водорода в обычном бетоне, содержащем элементы, слабо поглощающие тепловые нейтроны. Поглощающиеся в бетоне тепловые нейтроны являются источ-

никами захватного  $\gamma$ -излучения, интенсивность которого за защитой также зависит от количества водорода в бетоне. На ослабление  $\gamma$ -излучения, падающего на биологическую защиту реактора, содержание водорода практически не оказывает влияния. Для предотвращения

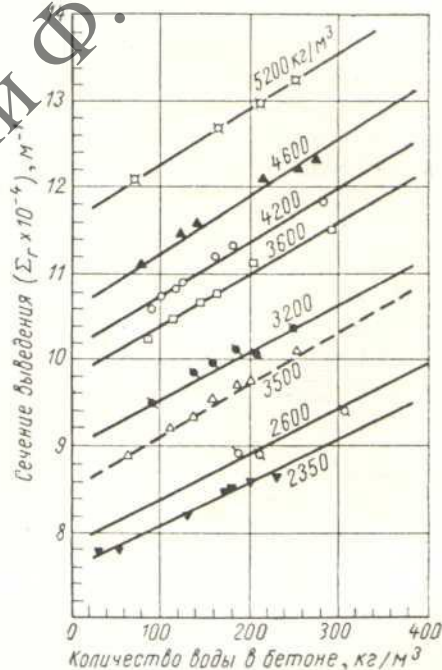


Рис. 1. Рассчитанные зависимости макроскопического сечения выведения быстрых нейтронов от количества воды в бетоне (зависимости относятся к бетонам различной плотности, состав которых указан в табл. 1).

накопления нейтронов низких энергий в целях снижения интенсивности захватного  $\gamma$ -излучения за защитой всегда старались поддерживать довольно высокое содержание водорода в бетоне [3].

Однако повышение концентрации водорода, как правило, ведет к удорожанию бетона, и поэтому определение оптимального количества водорода до настоящего времени остается актуальной задачей.

Метод расчета

При расчетах предполагалось, что на поверхности бетона, прилегающей к стальному корпусу реактора (рис. 2), расположены плоские бесконечные изотропные источники  $\gamma$ -излучения и нейтронов. Корпус больших реакторов современных атомных электростанций может рассматриваться как бесконечная излучающая плоскость. Погрешности, связанные с анизотропией излучения на поверхности корпуса

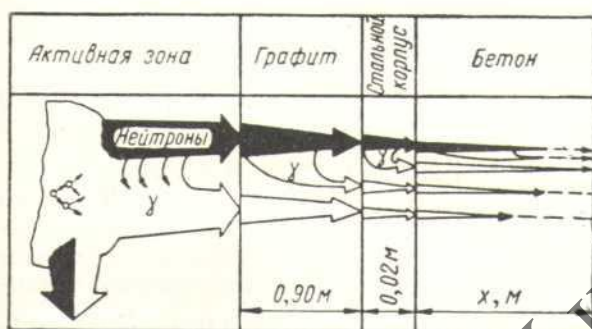


Рис. 2. Схема защиты реактора.

и краевыми эффектами, в подобном сравнительном расчете не учитывались. Однако при точных вычислениях доз за защитой их следует принимать во внимание.

**Быстрые нейтроны.** Ослабление быстрых нейтронов рассчитывалось с использованием сечений выведения для отдельных элементов, приведенных в работе [4]. Хотя величины сечений выведения рекомендованы для сред, содержащих некоторое минимальное количество водорода, в работах [5, 6] указывается на возможность использования этих сечений для достаточно легких материалов, не содержащих водорода. Выбор энергетического порога группы быстрых нейтронов зависит от порога неупругого рассеяния нейтронов на ядрах элементов, входящих в состав защиты. Поскольку сравнивались бетоны с довольно различной плотностью (2300—5200 кг/м<sup>3</sup>), сочли разумным выбрать граничную энергию 1,5 Мэв.

Для плоского изотропного источника ослабление потока и мощности дозы соответственно определяются следующими выражениями:

$$I(x) = I_0 E_1(\Sigma_r, x); \quad (1)$$

$$P_6 = I(x) \beta_6, \quad (2)$$

где  $\Sigma_r$  — макроскопическое сечение выведения, м<sup>-1</sup>;  $x$  — толщина защиты, м;  $\beta_6$  — коэф-

фициент, равный  $\frac{3,75 \cdot 10^{-14}}{\text{ОБЭ}} \text{дж} \cdot \text{м}^2 / \text{кг} \cdot \text{нейтр}$  [1] (ОБЭ — относительная биологическая эффективность).

**Промежуточные нейтроны.** Ослабление потока промежуточных нейтронов ( $E < 1,5 \text{ Мэв}$ ) рассчитывалось по методу, предложенному в работах [6, 7]. В качестве ведущей группы в этом методе приняты нейтроны с  $E > 1,5 \text{ Мэв}$ . Фактор накопления вычислялся из асимптотического выражения

$$B(u) = \frac{\Sigma_r}{\xi(E) \Sigma_s(u)} \exp[\tau(u) \Sigma_r^2 - h(u)] \quad (3)$$

(здесь обозначения те же, что и в работе [7]).

Дозовый фактор накопления промежуточных нейтронов определялся следующим образом:

$$B_d(u) = \frac{\beta_1(u)}{\beta_6} B(u). \quad (4)$$

Значение дозы на один промежуточный нейтрон  $[\beta_1(u)]$  заимствовано из работы [1]. Интегральный дозовый фактор накопления промежуточных нейтронов определяется выражением

$$B_d = \int B_d(u) du. \quad (5)$$

**Тепловые нейтроны.** Ослабление потока и мощности дозы тепловых нейтронов определялось соответственно по следующим формулам теории диффузии:

$$\varphi(x) = \varphi_0 e^{-x/L}; \quad (6)$$

$$P_T(x) = \varphi(x) \beta_T, \quad (7)$$

где  $L$  — длина диффузии, м;  $\beta_T$  — коэффициент, равный  $\frac{1,04 \cdot 10^{-15}}{\text{ОБЭ}} \text{дж} \cdot \text{м}^2 / \text{кг} \cdot \text{нейтр}$ .

Асимптотическое значение фактора накопления потока тепловых нейтронов, возникших в результате замедления быстрых нейтронов, определялось по формуле

$$B_T = \frac{\Sigma_r \exp[\tau_T \Sigma_r^2 - h(u_T)]}{\Sigma_a [1 - (\Sigma_r L)^2]}, \quad (8)$$

где  $\Sigma_a$  — сечение захвата тепловых нейтронов, м<sup>-1</sup>;  $\tau_T$  — возраст нейтрона от энергии 1,5 Мэв до 0,025 эв;  $u_T = 17,9$ .

Формула (8) справедлива при  $L < \frac{1}{\Sigma_r}$ . Если  $L > \frac{1}{\Sigma_r}$ , то можно записать

$$B(x) = \frac{\Sigma_r \exp[\tau_T \Sigma_r^2 - h(u_T)]}{\Sigma_a (L \Sigma_r - 1)} \exp\left[\left(\Sigma_r - \frac{1}{L}\right)x - 1\right]. \quad (9)$$

Следует отметить, что выражения (8) и (9) недействительны вблизи границы между двумя различными материалами.

Определение длин диффузии для сложных веществ связано с известными трудностями, так как тепловые нейтроны взаимодействуют с молекулами и группами молекул вещества. Поэтому принцип аддитивности, используемый в методике сечения выведения, несправедлив для расчета длин диффузии, что особенно отчетливо наблюдается для бетона.

При расчете длин диффузии, близких к экспериментально измеренным в бетоне, полагалось, что тепловой нейтрон рассеивается молекулой воды изотропно (в противоположность анизотропному рассеянию чистым водородом) в лабораторной системе координат.

Длина диффузии рассчитывалась по следующей формуле:

$$\frac{1}{L^2} = 3\bar{\Sigma}_a\bar{\Sigma}_s(1 - \bar{\omega}), \quad (10)$$

где  $\bar{\Sigma}_s$  — среднее сечение рассеяния;  $\bar{\omega}$  — средний косинус угла рассеяния.

Полагая, что  $\bar{\omega} = 0$ , вычисления (по элементам бетона) проводили, как и в работе [7].

$$P_{\text{захв}}(x) = \frac{1}{4} I_0 e^{-\Sigma_r x} \frac{\exp(\tau \Sigma_r^2)}{1 - (\Sigma_r L)^2} \cdot \frac{\Sigma_r^2}{\Sigma_a} \sum_{i=1}^6 \frac{n_i \alpha_i}{\mu_i - \Sigma_r} (1 - e^{-(\mu_i \Sigma_r) x}), \quad (16)$$

**Внешнее  $\gamma$ -излучение.** Наличие стальной тепловой защиты или стального корпуса типично для многих реакторов, поэтому источник захватного  $\gamma$ -излучения из стали целесообразно представить в виде плоского изотропного источника. Без учета накопления рассеянных  $\gamma$ -квантов изменение их потока по толщине защиты описывается функцией вида

$$-E_i(-\mu x) = \int_{\mu x}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt.$$

Для  $\mu x \gg 1$  можно принять

$$-E_i(-\mu x) \approx \frac{e^{-\mu x}}{\mu x + 1}. \quad (11)$$

В интересующей нас области значений энергий (4–8 Мэв) и при значении усредненного атомного номера бетонов, равном  $\sim 20$ , выражение для дозового фактора накопления может быть записано в виде [8]

$$B(\mu x) \approx \frac{1}{2} \mu x + 1. \quad (12)$$

Тогда ослабление падающего потока и мощности дозы  $\gamma$ -излучения на больших толщинах можно соответственно записать следующим образом:

$$F(x) = \frac{1}{2} F_0 e^{-\mu x}, \quad (13)$$

$$P_\gamma(x) = F(x) \alpha(E_\gamma), \quad (14)$$

где  $\alpha(E_\gamma)$  — доза на один  $\gamma$ -квант с энергией  $E_\gamma$  [1].

Если разбить спектр  $\gamma$ -излучения на группы по энергиям, то мощность дозы можно определить по формуле

$$P_\gamma(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 F_{0i} e^{-\mu_i x} \alpha_i \quad (15)$$

(значения  $\alpha_i$  взяты из работы [1]).

**Захватное  $\gamma$ -излучение в бетоне.** Наиболее проникающие захватные  $\gamma$ -кванты имеют начальную энергию  $\sim 7$  Мэв. При такой энергии для больших толщин дозовый фактор накопления можно принять равным  $\frac{1}{2} \mu x + 1$ , а мощность дозы представить следующим выражением:

#### Сравнение защитных свойств различных бетонов

По изложенной выше методике рассчитывалось ослабление излучений реактора в 46 наиболее широко используемых типах бетона. Химический состав бетонов приведен в табл. 1, а ядерные константы в табл. 2. Относительное изменение количества водорода в бетоне весьма мало сказывается на процентном изменении других элементов и плотности бетона [9]. Эти изменения характеризуются разбросом точек на рис. 1.

Для расчета была выбрана наиболее типичная схема защиты реактора, которая приведена на рис. 2. Учитывая существующую тенденцию к отказу от дорогостоящей тепловой защиты, толщину стали перед сравниваемыми типами бетона приняли равной 2 см. Считалось также,

Таблица 1

Содержание водорода и химический состав бетонов, вес. %

| Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Содержание водорода при t=85° C |      |      |      |      |      | Содержание других элементов при среднем количестве водорода |      |       |       |      |       |       |
|------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|---|------|-------|-------|------|-------|-------|
|                              | номер бетона                    |      |      |      |      |      | O   | Al   | Si    | S     | Ca   | Fe    | Ba    |
|                              | 1                               | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |   |      |       |       |      |       |       |
| 2300                         | 0,10                            | 0,35 | 0,61 | 0,81 | 0,84 | 0,94 | 52,90   | 4,41 | 30,95 | 0,15  | 4,66 | 2,03  | —     |
| 2600                         | 0,78                            | 0,88 | 1,28 | 1,96 | 2,04 | 2,10 | 40,53   | 0,74 | 3,96  | —     | 5,20 | 46,39 | —     |
| 3200                         | 0,30                            | 0,46 | 0,54 | 0,62 | 0,70 | 0,85 | 32,82   | 0,89 | 11,10 | —     | 4,94 | 48,81 | —     |
| 3500                         | 0,19                            | 0,35 | 0,43 | 0,50 | 0,58 | 0,64 | 31,00   | 2,80 | —     | 11,50 | 3,50 | 7,53  | 42,50 |
| 3600                         | 0,25                            | 0,33 | 0,43 | 0,49 | 0,61 | 0,89 | 32,05   | 3,26 | 12,38 | —     | 3,69 | 50,13 | —     |
| 4200                         | 0,23                            | 0,26 | 0,32 | 0,42 | 0,46 | 0,74 | 15,47   | 1,13 | 4,89  | —     | 1,24 | 66,27 | —     |
| 4600                         | 0,18                            | 0,28 | 0,33 | 0,50 | 0,60 | 0,65 | 9,36  | 1,54 | 0,89  | —     | 1,67 | 75,25 | —     |
| 5200                         | 0,15                            | 0,35 | 0,43 | 0,52 | —    | —    | 5,05  | 2,54 | 0,20  | 0,13  | 3,13 | 78,24 | —     |

Таблица 2

Ядерные константы для бетонов

| Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Длина релаксации γ-квантов, см |     |      |      |      |      | Длина выведения быстрых нейтронов, см |      |      |      |      |      |
|------------------------------|--------------------------------|-----|------|------|------|------|---------------------------------------|------|------|------|------|------|
|                              | энергия, Мэв                   |     |      |      |      |      | номер бетона                          |      |      |      |      |      |
|                              | 1                              | 2   | 3    | 4    | 5    | 6    | 1                                     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| 2300                         | 6,4                            | 9,7 | 11,9 | 13,7 | 16,2 | 18,0 | 13,1                                  | 12,6 | 12,2 | 11,8 | 11,5 | 11,4 |
| 2600                         | 6,2                            | 8,7 | 10,6 | 12,1 | 13,9 | 15,0 | 12,4                                  | 14,4 | 11,8 | 9,8  | 9,6  | 9,4  |
| 3200                         | 5,1                            | 7,2 | 8,5  | 9,8  | 10,5 | 11,8 | 10,7                                  | 10,2 | 10,1 | 10,0 | 9,9  | 9,7  |
| 3500                         | 5,1                            | 7,3 | 8,5  | 9,0  | 9,9  | 9,9  | 11,4                                  | 10,8 | 10,7 | 10,4 | 10,3 | 10,2 |
| 3600                         | 4,3                            | 6,6 | 7,7  | 8,3  | 9,5  | 10,1 | 9,8                                   | 9,5  | 9,4  | 9,3  | 8,9  | 8,7  |
| 4200                         | 3,9                            | 5,5 | 6,6  | 7,2  | 8,0  | 8,5  | 9,4                                   | 9,3  | 9,2  | 8,9  | 8,8  | 8,4  |
| 4600                         | 3,6                            | 5,0 | 6,1  | 6,5  | 7,3  | 7,6  | 9,0                                   | 8,8  | 8,6  | 8,3  | 8,2  | 8,1  |
| 5200                         | 3,2                            | 4,5 | 5,3  | 5,9  | 6,4  | 6,7  | 8,3                                   | 7,9  | 7,7  | 7,5  | —    | —    |

что температура бетона благодаря его охлаждению не превышает 85° C.

Соотношение мощности доз γ-излучения из стального корпуса и быстрых нейтронов на границе стали с бетоном в принятой схеме составляет 20. Для реактора ВЕРО (Великобритания) оно равно 25 [7].

Следует осторожно использовать выражение (46) для расчета мощности дозы вблизи границы стали с бетоном. Поток тепловых и промежуточных нейтронов в этой области сильно зависят от толщины тепловой защиты и состава бетона. Дополнительный вклад в мощность дозы захватного γ-излучения на границе стали с бетоном без большой погрешности можно отнести к мощности дозы γ-излучения из стального корпуса. Вообще соотношение мощностей доз на границе стали с бетоном может быть различным, так как зависит от конструкции реактора, но практически оно не бывает меньше

единицы. Как уже указывалось, изменение концентрации водорода в бетоне практически не сказывается на ослаблении потока γ-квантов, проникающих в бетон из реактора и тепловой защиты, и весьма мало влияет на защитные свойства бетона от быстрых нейтронов. От концентрации водорода сильно зависят дозовые факторы накопления промежуточных и тепловых нейтронов. Поэтому на толщину бетонной защиты наибольшее влияние будет оказывать количество водорода в бетоне в случае возможно минимальных отношений мощности дозы γ-квантов к мощности дозы нейтронов на границе тепловой защиты и бетона. Для выявления максимальных изменений толщины бетонной защиты в зависимости от количества воды соотношение доз в настоящих расчетах принималось равным единице.

Ослабление мощности дозы различных видов излучения реактора в некоторых бетонах при-

ведено на рис. 3. Расчетные дозовые факторы накопления для промежуточных и тепловых нейтронов даны в табл. 3.

Для всех типов бетона толщина защиты рассчитана в зависимости от содержания водорода (при кратности ослабления  $10^8-10^9$ ).

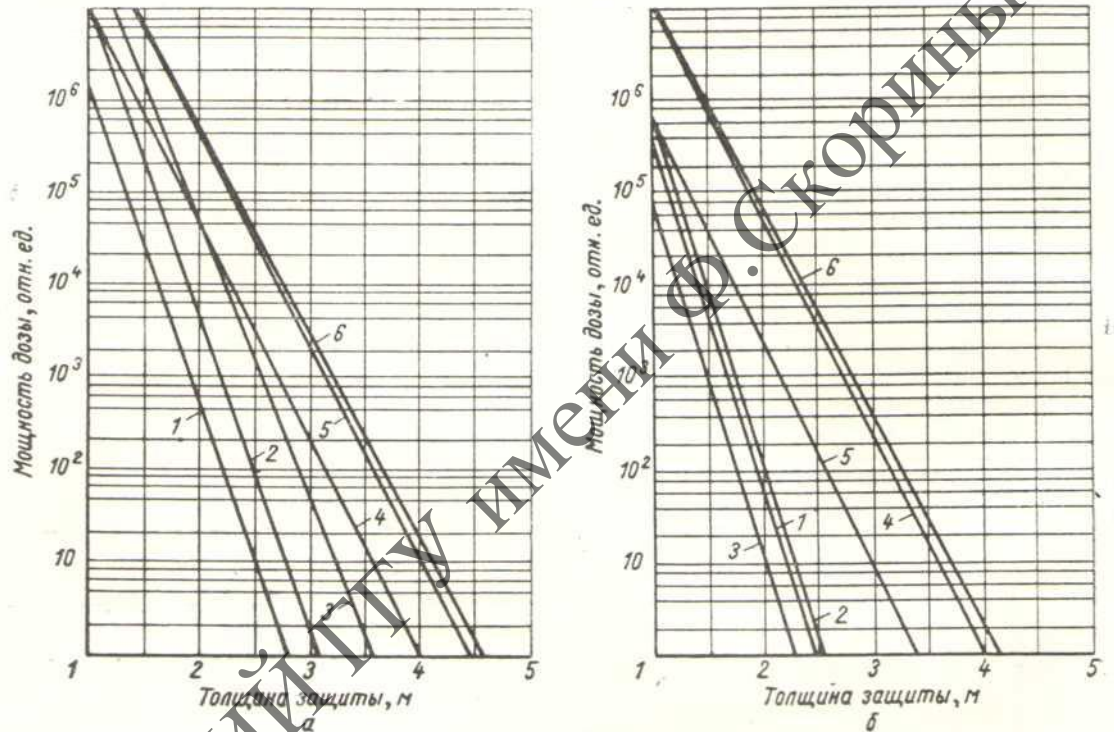


Рис. 3. Ослабление мощности дозы в обычном бетоне (а — бетон 1; б — бетон 6): 1 — быстрые нейтроны; 2 — промежуточные нейтроны; 3 — тепловые нейтроны; 4 —  $\gamma$ -излучение из стального корпуса; 5 — захватное  $\gamma$ -излучение в бетоне; 6 — суммарная мощность дозы.

Таблица 3

Дозовые факторы накопления\*

| Плотность, $\text{кг/м}^3$ | Для промежуточных нейтронов (меньше 1,5 Мэв) |     |     |     |     |     | Для тепловых нейтронов |      |      |      |      |      |
|----------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------|------|------|------|------|------|
|                            | номер бетона                                 |     |     |     |     |     | номер бетона           |      |      |      |      |      |
|                            | 1  | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| 2300                       | 10,3   | 3,4 | 2,3 | 1,9 | 1,8 | 1,6 | 205                    | 2,80 | 0,95 | 0,61 | 0,58 | 0,50 |
| 2600                       | 2,0  | 1,4 | 1,1 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,12                   | 0,10 | 0,08 | 0,05 | —    | —    |
| 3200                       | 4,2  | 3,0 | 2,7 | 2,3 | 2,1 | 1,9 | 0,11                   | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,03 |
| 3500                       | 6,3  | 3,6 | 2,5 | 2,5 | 2,1 | 2,0 | 0,35                   | 0,19 | 0,15 | 0,13 | 0,12 | 0,11 |
| 3600                       | 5,2  | 4,3 | 3,4 | 3,0 | 2,4 | 1,8 | 0,10                   | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,03 | —    |
| 4200                       | 7,4  | 6,2 | 5,0 | 3,9 | 3,4 | 2,2 | 0,06                   | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | —    |
| 4600                       | 11,7   | 6,1 | 5,4 | 3,4 | 2,8 | 2,3 | 0,11                   | 0,08 | 0,05 | 0,03 | 0,02 | —    |
| 5200                       | 23,2   | 6,0 | 4,3 | 3,5 | —   | —   | 0,29                   | 0,09 | 0,03 | 0,01 | —    | —    |

\* Дозовые факторы накопления рассчитаны для толщины защиты больше 1 м; для бетона № 1 плотностью  $2300 \text{ кг/м}^3$  — для толщины больше 3 м. Замечено хорошее совпадение рассчитанных факторов накопления для бетонов плотностью  $2300 \text{ кг/м}^3$  с факторами накопления, приведенными в работе [10].

Процентное изменение толщины защиты в зависимости от концентрации воды приведено на рис. 4. Пунктиром показаны границы значений концентраций воды, получаемых техно-

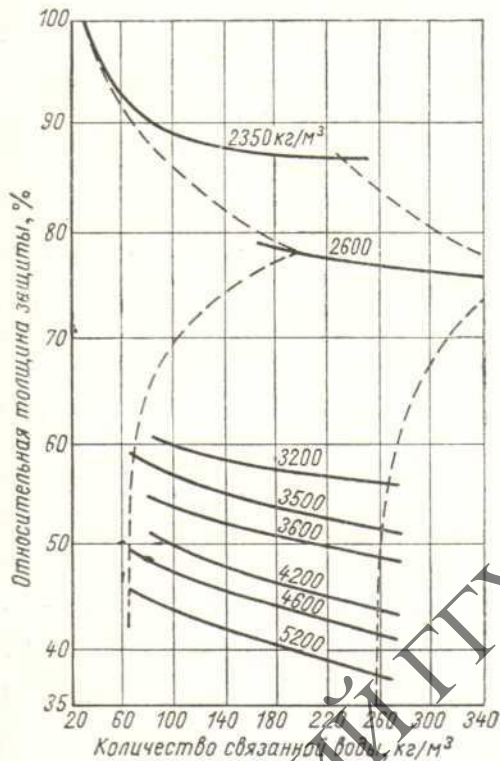


Рис. 4. Относительное изменение толщины бетонной защиты в зависимости от количества в ней воды.

логически в бетонах. Из рисунка следует, что даже значительное увеличение количества водорода в бетоне приводит к уменьшению толщины защиты не более чем на 10%. Полученные данные хорошо согласуются с расчетами, приведенными в работе [11]. Незначительное изменение толщины объясняется, с одной стороны, малым вкладом нейтронов в суммарную мощность дозы для обычного бетона, а с другой — слабой зависимостью макроскопического сечения выведения быстрых нейтронов от количества водорода для тяжелых бетонов. Вклад в суммарную мощность дозы отдельных видов излучений приведен в табл. 4. Из таблицы следует, что при увеличении плотности бетона от 2300 до 5200 кг/м³ и примерно одинаковом процентном содержании водорода вклад  $\gamma$ -излучения в суммарную дозу за защитой изменяется от 99,9 до 5,4%. Это означает, что увеличение концентрации водорода имеет большее значение для тяжелых бетонов.

Понятия «минимум водорода в бетоне для эффективной защиты» или «достаточное количество водорода», которые неоднократно приводились в литературе, не имеют смысла, поскольку толщина защиты из бетона при постоянной плотности является монотонной функцией содержания водорода. Увеличение концентрации водорода в бетоне связано с необходимостью увеличения расхода цемента или применения дорогостоящих видов цемента и заполнителей. Поэтому оптимальное количество водорода при заданной кратности ослабления определяется исключительно такой толщиной

Таблица 4

Вклад отдельных видов излучений реактора в мощность дозы на внешней поверхности бетонной защиты, % \*

| Плотность бетона, кг/м³ | Номер бетона | Количество водорода, вес. % | $\gamma$ -Излучение из стального корпуса | Захватное $\gamma$ -излучение в бетоне | Энергия нейтронов   |                        |                     |
|-------------------------|--------------|-----------------------------|--|--|---------------------|------------------------|---------------------|
|                         |              |                             |  |  | быстрых >1,5 Мэв    | промежуточных <1,5 Мэв | тепловых 0,025 эв   |
| 2300                    | 2            | 0,35                        | 44,1                                     | 55,8                                   | $3,3 \cdot 10^{-4}$ | $1,1 \cdot 10^{-3}$    | $9,5 \cdot 10^{-4}$ |
| 2600                    | 1            | 0,78**                      | 64,8                                     | 27,1                                   | 2,6                 | 5,2                    | 0,3                 |
| 3200                    | 1            | 0,30                        | 32,6                                     | 45,1                                   | 4,3                 | 18,7                   | 0,47                |
| 3500                    | 2            | 0,35                        | 1,7                                      | 26,4                                   | 15,0                | 54,0                   | 2,9                 |
| 3600                    | 2            | 0,33                        | 17,7                                     | 22,8                                   | 11,1                | 47,5                   | 0,9                 |
| 4200                    | 3            | 0,32                        | 5,8                                      | 18,4                                   | 12,5                | 62,8                   | 0,5                 |
| 4600                    | 3            | 0,33                        | 3,5                                      | 12,4                                   | 13,0                | 70,5                   | 0,6                 |
| 5200                    | 2            | 0,35                        | 0,2                                      | 5,2                                    | 13,3                | 80,0                   | 1,3                 |

\* Суммарная мощность дозы рассчитана при кратности ослабления  $10^8-10^9$  и равных дозах от быстрых нейтронов и внешнего  $\gamma$ -излучения на границе стали с бетоном.

\*\* Наименьшее количество водорода в лимонитовом бетоне.

экрана, которая дает наименьшую стоимость биологической защиты. На рис. 5 приведена относительная стоимость бетонной защиты реактора в зависимости от концентрации водорода\*. Из

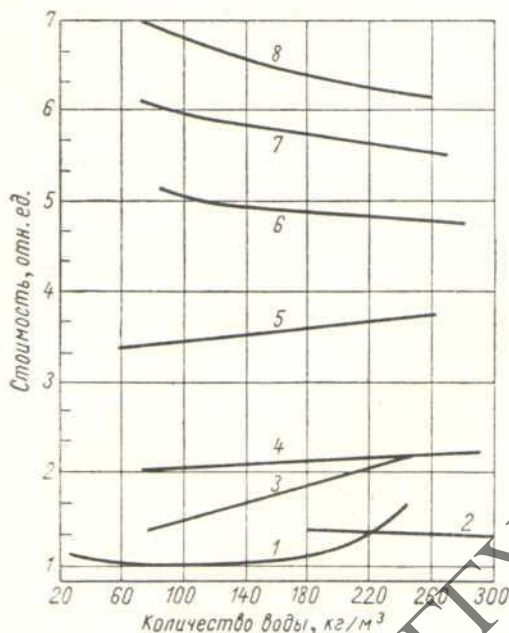


Рис. 5. Относительная стоимость цилиндрической защиты из бетонов различной плотности в зависимости от содержания воды.

1 — обычный бетон (2300 кг/м<sup>3</sup>); 2 — лимонитовый бетон (2600 кг/м<sup>3</sup>); 3 — гематитовый бетон (3200 кг/м<sup>3</sup>); 4 — баритовый бетон (3500 кг/м<sup>3</sup>); 5 — гематитовый бетон с добавкой стали (3600 кг/м<sup>3</sup>); 6—8 — бетоны со стальными наполнителями (4200—5000 кг/м<sup>3</sup>).

рисунка следует, что стоимость защиты из обычного бетона плотностью 2300 кг/м<sup>3</sup> оказывается минимальной при содержании связанной

\*Подробности расчета стоимости будут опубликованы в журнале «Бетон и железобетон».

воды 80 кг/м<sup>3</sup> (водорода 0,35%). Стоимость защиты из тяжелых бетонов плотностью до 4000 кг/м<sup>3</sup> минимальна при наименьшем количестве практически содержащейся в бетоне воды; стоимость защиты плотностью более 4000 кг/м<sup>3</sup>, наоборот, минимальна при максимальном содержании воды.

Существует бетон плотностью около 4000 кг/м<sup>3</sup>, стоимость защиты из которого не меняется при любом изменении количества водорода. Для такого бетона условием оптимального количества водорода (воды) уже будет не стоимость защиты, а ее минимальная толщина, которая, естественно, получается при максимальном количестве водорода.

За постоянной интерес к работе и практические советы авторы выражают благодарность А. Н. Козаровскому.

Поступила в Редакцию 8/VIII 1963 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Гольдштейн. Основы защиты реакторов. М., Госатомиздат, 1961.
2. Д. Л. Бродер, К. К. Попков. «Инж.-физ. ж.», 12, 118 (1961).
3. Reactor Handbook, Vol. III. N. Y. — London, 1962, p. 95.
4. G. Lindakers. Atomkernenergie, H. 7/8, 272 (1961); H. 10, 379 (1961).
5. Д. Л. Бродер и др. «Инж.-физ. ж.», 12, 65 (1962).
6. Д. Л. Бродер, А. А. Кутузов. В сб. «Нейтронная физика». М., Госатомиздат, 1962, стр. 263.
7. Б. Прайс, К. Хортон, К. Спинни. Защита от ядерных излучений. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
8. Защита транспортных установок с ядерным двигателем. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
9. Л. Н. Зайцев, М. М. Комочков. «Сб. тр. Моск. инж.-строит. ин-та», № 41, 33 (1962).
10. A. Avery et al. AERE-R-3216, 1960.
11. M. Clark. Nucl. Engng, 6, 16 (1961).

УДК 539.125.525 : 546.26 — 162 : 546.815.546.72

## Спектры быстрых нейтронов реактора, прошедших через графит, свинец и железо

А. П. Веселкин, Ю. А. Егоров, Ю. В. Орлов, Ю. В. Панкратьев

С помощью сцинтилляционного спектрометра быстрых нейтронов с одним водородсодержащим датчиком измерены спектры быстрых нейтронов реактора в диапазоне 0,7—11 Мэв, прошедших через различные

по толщине слои графита, свинца и железа. Измерения сделаны на водо-водяном исследовательском реакторе в «барьерной» геометрии. Результаты экспериментов позволили определить деформацию спектра