

13. Б. И. Синицын, С. Г. Цыпин. «Атомная энергия», 12, 306 (1962).
14. I. Bourgeois, et al. Доклад № 1190, представленный Францией на Вторую международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958).
15. G. Chapman, C. Storrs. Effective Neutron removal Gross Sections for Shielding, Report AECD-3978, 1955.
16. В. П. Машкович, С. Г. Цыпин. «Атомная энергия», 11, 251 (1961).



УДК 621.039.538 : 539.125.5.04

Металло-водная защита от точечных нейтронных источников

О. А. Барсуков, В. С. Авзянов

Статья посвящена исследованию процессов миграции нейтронов в металло-водной защите. Рассчитано пространственно-энергетическое распределение нейтронов в железе, воде и многослойной металло-водной защите для точечного Po—Be-источника. Использованные двадцатигрупповое и пятигрупповое диффузионно-транспортные приближения проверены экспериментально. Работа позволила установить ряд существенных особенностей в распределении нейтронов в указанной защите.

Постановка задачи

В настоящее время наметились два основных пути в развитии методов расчета нейтронных защит. Первый из них представляет феноменологической теорией сечения выведения, которая, не рассматривая вопросов о деталях перераспределения нейтронов в среде, позволяет чисто эмпирически оценить эффективность той или иной защиты. Второе направление представлено, во-первых, методами, основанными на решении кинетического уравнения Больцмана, и, во-вторых, способом статистических испытаний (известным также как метод Монте-Карло). Такой подход к проблеме позволяет в принципе точно описать механизм миграции и перераспределения нейтронов в среде.

При разработке оптимального варианта защиты крайне важно знать детали поведения потоков нейтронов внутри нее. С этой точки зрения второй путь, очевидно, более рационален. Однако получение точного решения кинетического уравнения для многокомпонентных многослойных экранов связано с большими трудностями, а метод Монте-Карло очень громоздок. Поэтому представляется целесообразным, не выходя из рамок второго направления, применять приближенный метод расчета, основанный на условном разделении потока нейтронов на две компоненты: на нерассеянную часть, описываемую экспоненциальным законом, и на рассеянную, определяемую

с приемлемой точностью диффузионным уравнением, решение которого достаточно разработано и просто [1]. В частности, в работе [2] многогрупповой метод расчета был модифицирован применительно к решению задачи с переменным энергетическим спектром. Такой подход оправдан в случае сравнительно тонкой защиты (толщиной 20—30 см), когда теория сечения выведения не применима, поскольку спектр нейтронов в этой области не является еще установившимся.

Отыскание оптимального варианта защиты предполагает следующую постановку задачи. Точечный источник быстрых нейтронов помещен в центре металло-водной среды*. Требуется найти такое сочетание слоев, при котором максимальный эффект замедления и поглощения нейтронов, а также захват γ -излучения наблюдались бы при минимальных размерах слоев и минимальном весе защиты в целом.

Рассеянная компонента нейтронного потока учитывается путем использования диффузионного многогруппового приближения уравнения Больцмана по методу, изложенному в работе [2].

В качестве исходного спектра в расчетах принято энергетическое распределение нейтронов точечного Po — Be-источника мощностью 10^8 нейтр/сек, расположенного всегда в центре сферы. Последняя представляла собой либо однородную среду (железо, вода), либо многослойную среду, состоящую из слоев железа и воды. Радиус сферы с учетом экстраполированной границы принят равным 30 см; шаг разбиения по радиусу во всех расчетах 1 см. Большая часть расчетов проведена в двадцатигрупповом приближении, часть — в пятигрупповом.

*При теоретических расчетах всегда принимается, что защита имеет вид сферы, эксперименты же осуществлялись в более сложной геометрии (см. ниже).

При двадцатигрупповом расчете разбивка по энергиям проводилась следующим образом:

Группа	Энергия	Группа	Энергия
1	10,8—9,8 Мэв	11	1,5—1,1 Мэв
2	9,8—9,4 Мэв	12	1,1 Мэв—55 кэв
3	9,4—7,75 Мэв	13	55—28 кэв
4	7,75—7 Мэв	14	28—15 кэв
5	7—6 Мэв	15	15—6 кэв
6	6—5,45 Мэв	16	6—1,5 кэв
7	5,45—4,8 Мэв	17	1,5—450 эв
8	4,8—4 Мэв	18	450—220 эв
9	4—3,1 Мэв	19	220—6 эв
10	3,1—1,5 Мэв	20	6—0,025 эв

Указанная разбивка обусловлена тем, что спектр Po — Be-источника весьма сложен и охватывает область энергии $\sim 0,9-11$ Мэв, где нейтронные сечения сильно изменяются. Таким образом, перераспределение нейтронов в указанном диапазоне может быть исследовано лишь при достаточно мелком разложении спектра. Необходимо также учитывать, что жесткая компонента потока нейтронов в водной защите составляет существенную часть общего потока на всех расстояниях от источника.

При пятигрупповом расчете разбивка проводилась следующим образом:

Группа	Энергия
1	10—1 Мэв
2	1—0,1 Мэв
3	0,1 Мэв—100 эв
4	100—1 эв
5	1—0,03 эв

По указанной разбивке нейтроны источника попадают в первую группу. Во всех группах сечения усреднены с учетом энергетических спектров.

В экспериментах регистрировали потоки быстрых и резонансных нейтронов, а также γ -лучей захвата. Для регистрации промежуточных нейтронов был использован счетчик типа СЧ-3, для измерений медленных нейтронов — детекторы из серебра диаметром 10 и толщиной 0,5 мм, обернутые кадмием. Бета-излучение серебра регистрировали с помощью торцового счетчика Т-25 ВФЛ, помещенного в свинцовый домик. Измерение γ -излучения осуществ-

лялось цилиндрическим счетчиком Гейгера. В опытах использовались стандартные Po — Be-источники нейтронов активностью до 15 кюри. Статистическая точность измерений составляла 0,3—3%.

Погрешность определения потока нейтронов при решении уравнений в диффузионном приближении должна возрастать с увеличением расстояния от источника. Этим, в частности, обусловлена неопределенность диффузионного

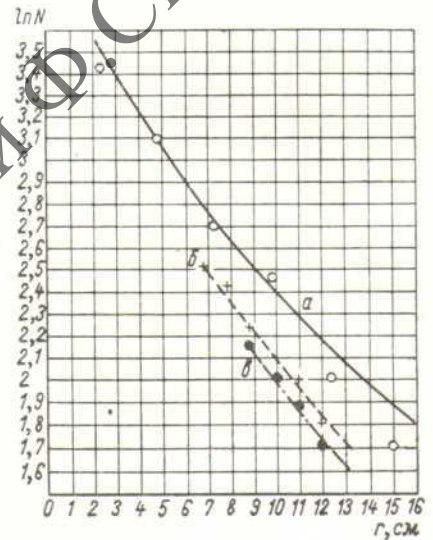


Рис. 1. Зависимость потока нейтронов N от расстояния r в изучаемой железо-водной защите (точки соответствуют экспериментальным данным, кривые — теоретическому расчету):

a — распределение быстрых нейтронов в чистой воде; $b, в$ — распределение быстрых нейтронов в системе железо — вода [источники находятся в железном экране толщиной 7 см (b) и 9 см ($в$)].

приближения для расчета защиты большой толщины. Для оценки погрешности при использовании железо-водной защиты толщиной $\sim 10-20$ см экспериментальные результаты были сопоставлены с теоретическими (рис. 1). Измерения проводились пороговым детектором из Al^{27} , экранированного кадмием. Активность в таком детекторе наводится нейтронами с энергией выше 1 Мэв. Теоретическая кривая была получена суммированием потоков в верхних группах, т. е. в энергетическом интервале 10,8—1,1 Мэв. Сопоставление теоретических кривых с экспериментальными точками показывает их удовлетворительное совпадение в интересующем нас интервале расстояний.

Пространственно-энергетическое распределение нейтронов в однородной и двухслойной средах

Предварительные расчеты проводились для однородных водной и железной сфер. На рис. 2 представлены энергетические спектры нейтронов в железе на различных расстояниях от точечного источника (φ_i — число нейтронов в

Для расчета распределения нейтронов в воде (двадцатигрупповое приближение) были учтены анизотропия рассеяния на кислороде (использованы данные работы [3]) и замедление на нем нейтронов. На рис. 4 представлены рассчитанные энергетические спектры нейтронов в воде. Обращает на себя внимание следующая характерная особенность этого спектра: с удалением от источника наблюдается

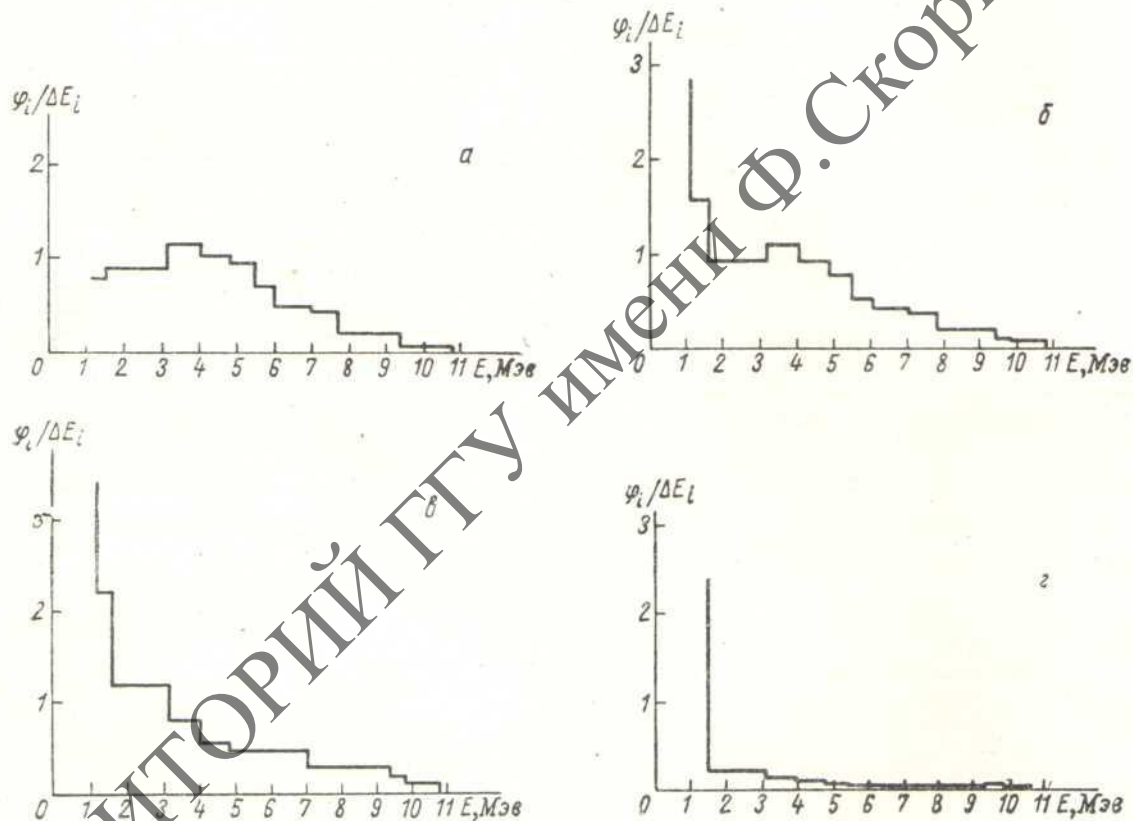


Рис. 2. Энергетические спектры нейтронов в железе на различных расстояниях от точечного $Po - Be$ -источника (см):
а — 1; б — 3; в — 13; г — 28.

энергетическом интервале шириной ΔE), а на рис. 3 дано радиальное распределение нейтронов разных энергетических групп (двадцатигрупповое приближение).

Анализ гистограмм и кривых показывает, что с увеличением расстояния от источника спектр значительно смягчается. В самом деле, если на расстоянии 1 см от источника максимум распределения приходится на 3—5 Мэв, то на расстоянии 3 см он смещается на 3—4 Мэв, а на расстоянии 28 см лежит при 1 Мэв.

непрерывное перераспределение спектра; при этом увеличивается жесткая компонента, что компенсируется соответствующим уменьшением мягкой составляющей.

Следующий этап работы — изучение пространственно-энергетического распределения нейтронов в двухслойной среде. Точечный источник быстрых нейтронов располагался в центре железной сферы, радиус которой принимался равным 4; 7; 9 см. Эти зоны окружались сферическими слоями воды. На рис. 5

показаны распределения потоков нейтронов некоторых энергетических групп по радиусу двухслойных систем. Для сравнения там же

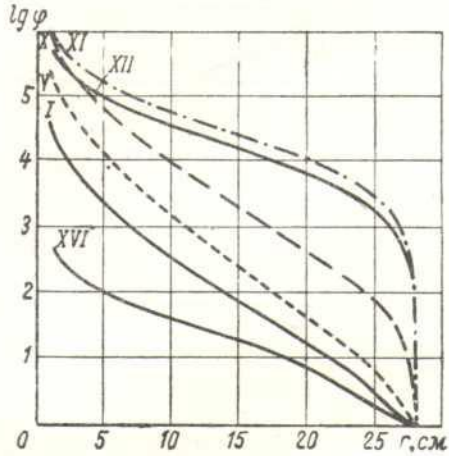


Рис. 3. Радиальное распределение нейтронов различных энергетических групп (группы показаны римскими цифрами).

нанесены соответствующие кривые распределения потоков в однородной заполненной водой среде.

На рис. 6 приведены гистограммы энергетических спектров нейтронов на разных расстояниях от источника. Анализ показывает, что в двухслойной среде происходит также значительное перераспределение энергетического спектра нейтронов в зависимости от расстояния. Так, например, в железе спектр смягчается (r равно 5 и 9 см), а в воде значительно ужестчается (r равно 15 и 25 см).

Характерный излом распределения на границе сред обусловлен различием рассеивающих и замедляющих свойств железа и воды. В воде нейтронные потоки низких энергетических групп по абсолютной величине больше, чем в железе. Это свидетельствует о том, что в рассматриваемой системе возникают два противоположных потока: быстрых нейтронов из железа в воду и замедляющихся нейтронов (включая тепловые) из воды в железо (т. е. по направлению к источнику).

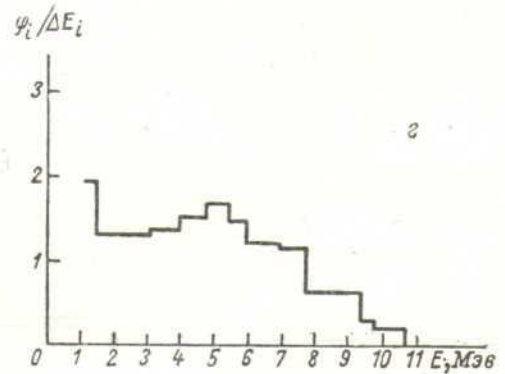
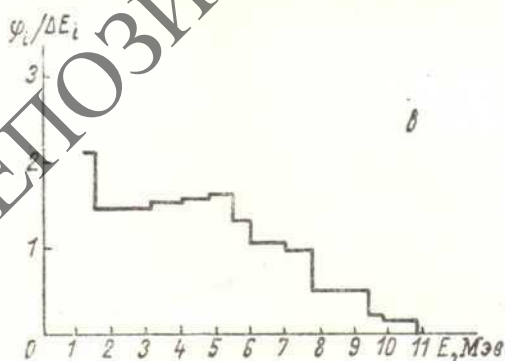
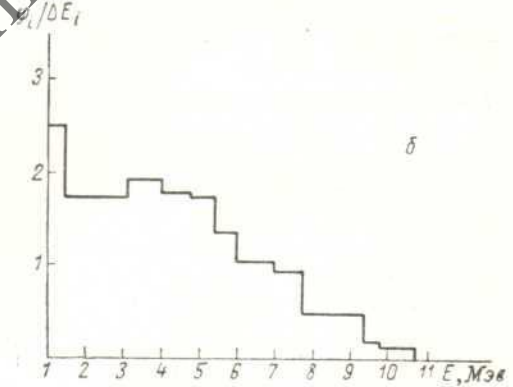
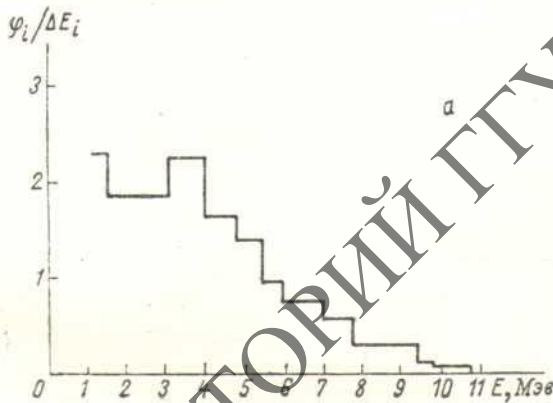


Рис. 4. Энергетические спектры нейтронов в воде на разных расстояниях от источника (см): а — 1; б — 10; в — 15; г — 25.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

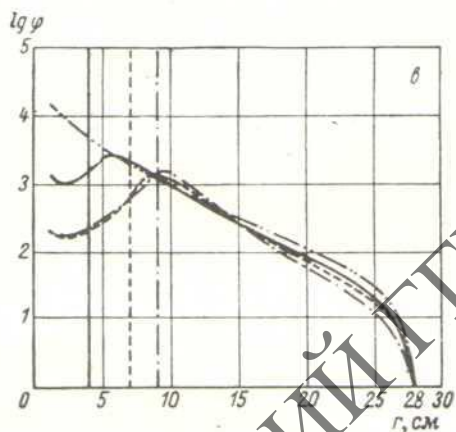
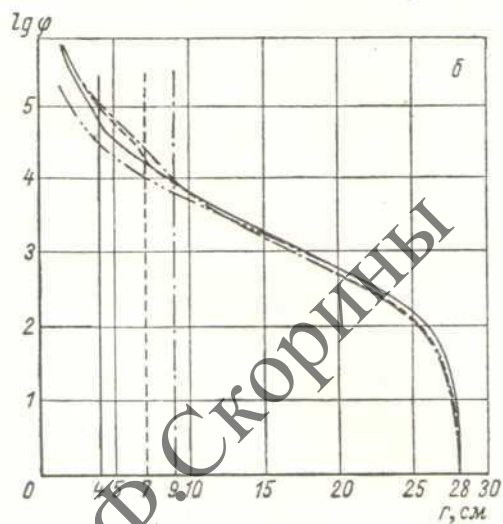
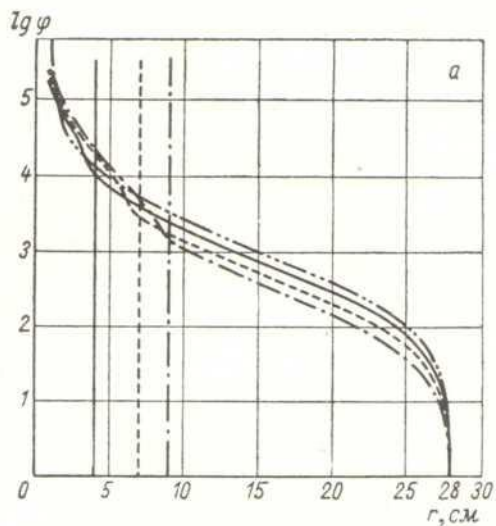


Рис. 5. Распределения потока нейтронов некоторых групп по радиусу двухслойной системы (а—пятая группа; б—10 группа; в—20 группа).

Сплошная, пунктирная, штрих-пунктирная линии — кривые распределения для железной сферы радиусом 4; 7; 9 см соответственно; пунктир с двумя штрихами — распределение в чистой воде.

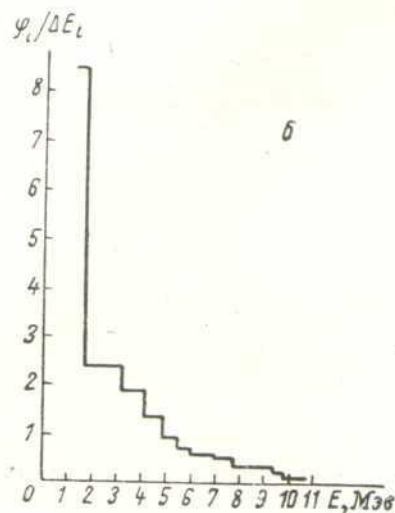
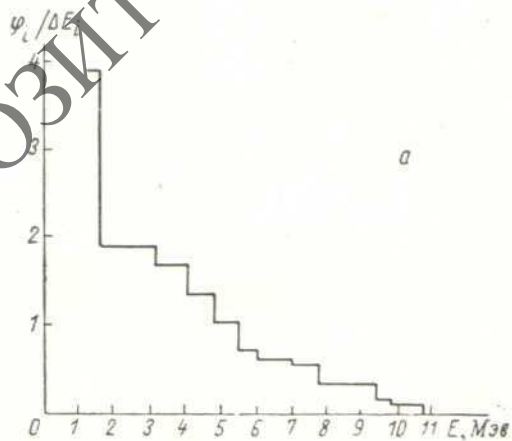


Рис. 6. Гистограммы энергетических спектров нейтронов в двухслойной а — 5; б — 9;

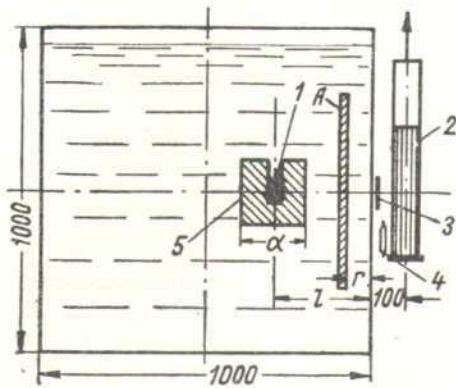


Рис. 7. Экспериментальная установка для изучения пространственно-энергетического распределения нейтронов и γ -излучения в многослойных средах: 1 — Po-Be-источник; 2 — выносной блок C4-3 с нейтронным счетчиком; 3 — серебро; 4 — γ -счетчик; 5 — цилиндр; А — слой железа или свинца.

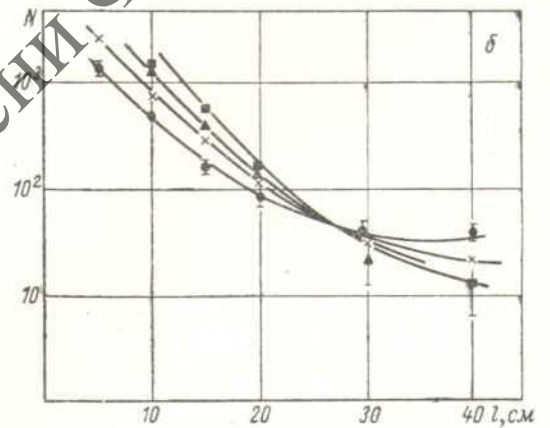
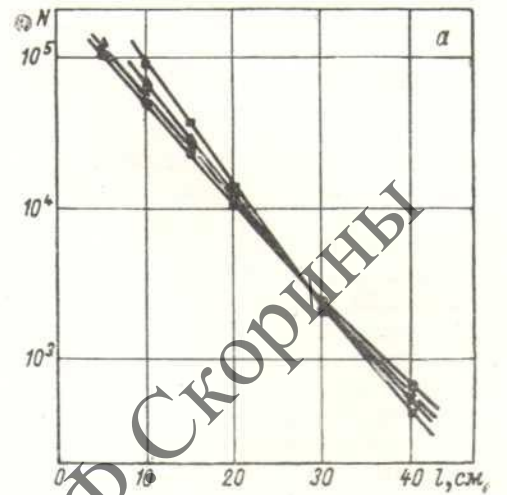
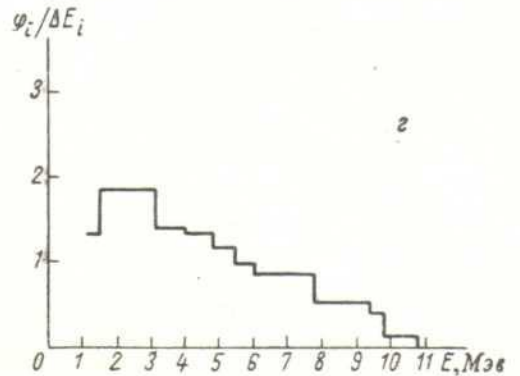
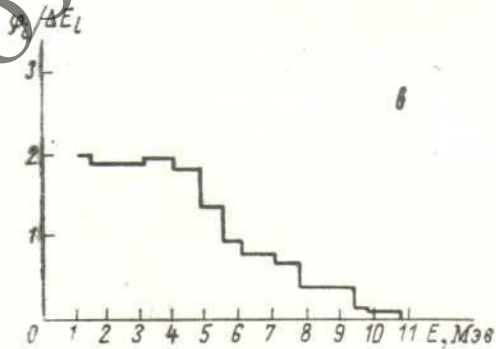


Рис. 8. Пространственное распределение промежуточных нейтронов в двухслойной железо-водной среде (а) и резонансных нейтронов серебра (б) в воде:

×, ▲, ■ — при наличии железного цилиндра диаметром 7,5; 14; 21 см соответственно; ● — без железного цилиндра.



системе (железо, вода) на разных расстояниях от источника (см).
а — 15; б — 21.

Экспериментальная установка (рис. 7) представляла собой кубический бак размерами $1 \times 1 \times 1$ м, залитый водой или насыщенным водным раствором борной кислоты. В баке на тросах подвешивали металлический сплошной цилиндр (из стали или марганца) с источником в центре; цилиндр можно было передвигать вдоль горизонтальной оси от стенки до центра бака. За стенкой бака помещали детекторы излучения. В ряде случаев между источником и счетчиками внутри бака располагался слой свинца или железа, обозначенный буквой А (см. рис. 7). На рис. 8 приведена зависимость потока промежуточных и резонансных нейтронов от суммарной толщины защиты l , состоящей из слоя воды и железного цилиндра (N — скорость счета в импульсах в единицу времени). Измерения проводились без экрана А. Анализ графиков показывает, что благодаря изменению угла наклона кривых $N = f(l)$ (это вызвано изменением диаметра железного сердечника) имеет место инверсия этих кривых, т. е., начиная с некоторой толщины l защита, состоящая из слоя железа толщиной $d/2$ и слоя воды толщиной $l - \frac{d}{2}$, более эффективна, чем слой воды толщиной l . Так при общей толщине защиты 40 см введение железного цилиндра диаметром 21 см дает ослабление потока быстрых нейтронов на 30%. Ход этих

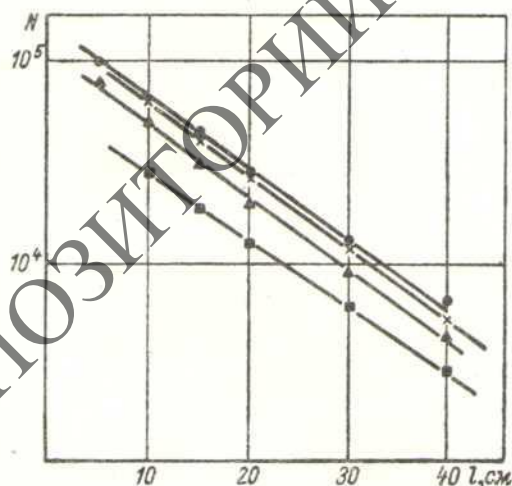


Рис. 9. Пространственное распределение γ -излучения в двухслойной железо-водной среде (обозначения точек см. на рис. 8).

кривых свидетельствует о том, что точка $l_{инв}$ инверсии соответствует расстоянию 25—27 см между источником и стенкой бака. Ана-

логичный эксперимент с марганцевым цилиндром также указывает на наличие инверсии. Одновременно с этими опытами в той же геометрии изучалось распределение γ -лучей. При этом кривые во всех случаях идут параллельно друг другу (рис. 9).

Пространственно-энергетическое распределение нейтронов в многослойных средах

После описанных в предыдущем разделе исследований геометрию еще больше усложнили. Так, теоретически была рассмотрена четырехслойная среда, а экспериментально изучены случаи, когда число слоев доходило до восьми.

Рассмотрим результаты теоретических исследований. Расчеты проводились в пятигрупповом приближении. Было изучено распределение нейтронов в двухслойных и четырехслойных средах, образованных слоями железа и воды. Источник нейтронов находился в точке $r = 0$. На рис. 10 показано радиальное распределение нейтронов разных энергетических групп в указанных системах, геометрия которых показана там же.

Анализ кривых рис. 10, а свидетельствует о том, что влияние железного сердечника приводит к заметным аномалиям в ходе кривых. Эти аномалии растут с уменьшением энергии нейтронов. Так, например, если для первой группы изменение хода кривой на границе между железом и водой сравнительно невелико, то для пятой группы влияние границы приводит к образованию максимума на кривой. Однако с дальнейшим увеличением расстояния от границы быстро восстанавливается закон экспоненциального убывания плотности нейтронов во всех группах. Если теперь сравнить с этим графиком кривые рис. 10, б, где показано распределение нейтронов в геометрии железо — жидкость — железо — жидкость, то обращает на себя внимание искажение экспоненциального характера хода кривых, обусловленное влиянием дополнительных слоев железа. Для изучения свойств многослойной защиты в кубическом баке, залитом чистой водой, на расстоянии $l = 40$ см в железном цилиндре помещался источник (см. рис. 7). В промежутке между стенкой бака и этим цилиндром помещался слой железа или свинца А толщиной 15 мм. Результаты измерений потока быстрых нейтронов показаны на рис. 11. Согласно рис. 11 при увеличении r уменьшают-

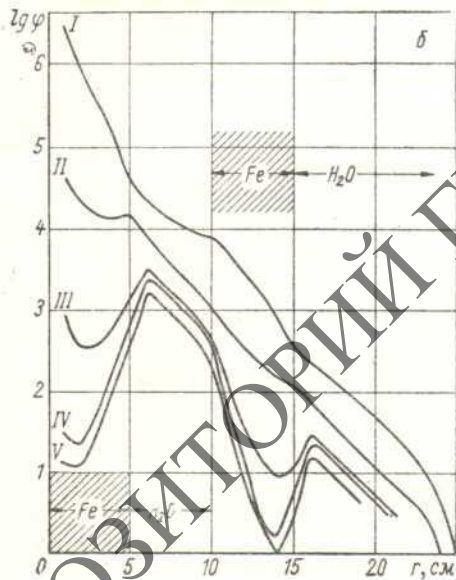
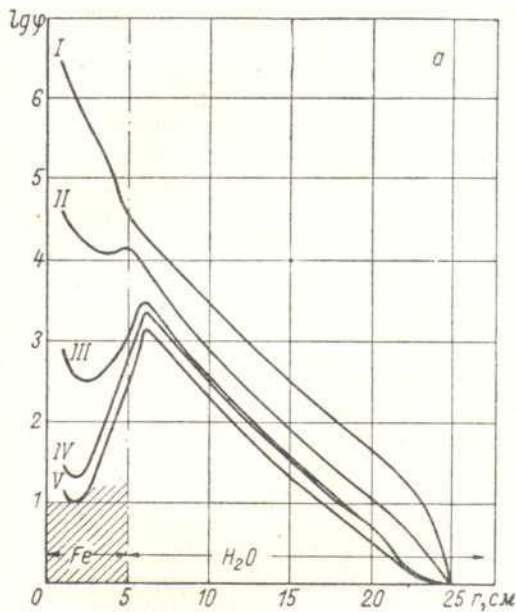


Рис. 10. Теоретические кривые радиального распределения нейтронов (пятигрупповое приближение) в двухслойной железо-водной среде (а) и в четырехслойной среде (б).

и показания прибора. При удалении слоя свинца от стенки скорость счета уменьшается. Расположение кривой для свинца над кривой 3 свидетельствует о том, что введение дополнительного свинцового слоя ухудшает защитные свойства системы, а введение дополнительного слоя железа улучшает их, особенно если рас-

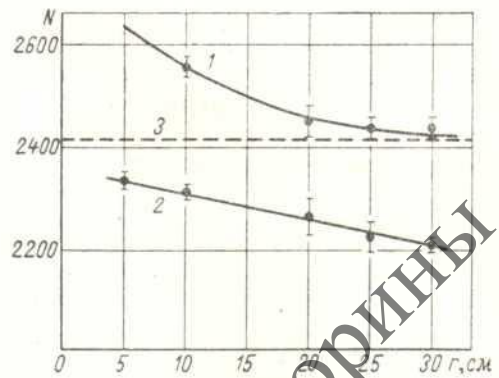


Рис. 11. Пространственное распределение быстрых нейтронов в многослойной среде (источник помещен за защитой слоя железа толщиной 7 см и слоя воды толщиной 33 см; в воде размещается дополнительный слой из железа или свинца толщиной 15 мм; r — расстояние между дополнительным слоем и наружным концом защиты):

1 — свинцовый слой; 2 — железный слой; 3 — без дополнительного слоя.

полагать этот слой вблизи центрального стального сердечника.

В следующем цикле опытов оценивалась эффективность многослойного железного сердечника, составленного из набора коаксиальных цилиндров (рис. 12), и сравнивалась с водной однородной средой и сплошным железным цилиндром, толщина которого равнялась сум-

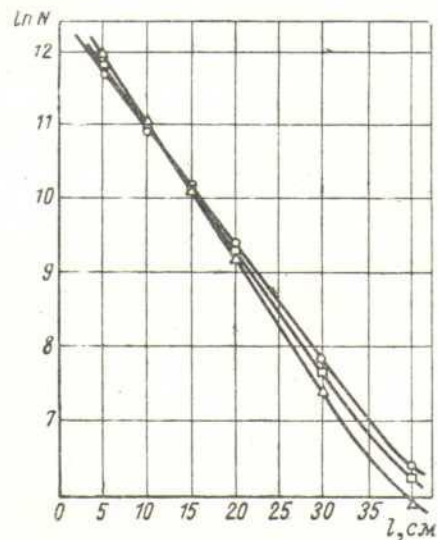


Рис. 12. Сравнение пространственного распределения быстрых нейтронов при использовании сплошного и многослойного железных цилиндров:

△ — сплошной железный экран толщиной, равной толщине многослойного железного фильтра; □ — многослойный цилиндр; ○ — чистая вода.

марной толщине железа многослойной защиты. Многослойный цилиндр гораздо меньше ослабляет поток нейтронов, чем сплошной железный цилиндр эквивалентной толщины.

Итоги исследования

1. Использованный в настоящей работе метод расчета позволяет детально проследить за изменением спектра нейтронов в любой многослойной системе. Учитывая универсальность метода, можно рекомендовать его для использования в расчетах пространственно-энергетического распределения нейтронов от источника, имеющего произвольный спектр при условии, что толщина защиты невелика (порядка десятков сантиметров).

2. Детально прослежено изменение энергетического спектра нейтронов, испускаемых точечным $Po - Be$ -источником, находящимся в однородной конечной среде, состоящей из железа или воды. При этом, если средой является железо, то наблюдается значительное смягчение спектра, причем на расстоянии больше 10 см преобладающими компонентами в интегральном нейтронном потоке становятся группы нейтронов с энергией меньше 2 Мэв. Особенно велика интенсивность потока промежуточных нейтронов, уже испытавших замедление ($E < 0,9$ Мэв). Если же средой является вода, значительной компонентой энергетического спектра становится группа нейтронов с энергией 10,8—1 Мэв. В то же время вода обеспечивает быстрое и эффективное замедление нейтронов меньших энергий.

3. Представляется целесообразным использовать комплекс из водородсодержащего вещества (воды, парафина) и металла (железа или меди). Применение свинца нецелесообразно. Защитные свойства двухслойного железо-водного экрана лучше по сравнению с однослойной водной защитой лишь при условии, что

общая толщина двухслойного экрана l больше инверсионной длины $l_{инв}$ ($l_{инв} = 25$ см). При этом источник сначала окружается экраном из железа, а затем слоем воды.

Такая защита имеет существенный недостаток: в интервале энергий нейтронов около 3—1 Мэв, где сечение неупругого рассеяния железа становится малым, а сечение упругого рассеяния на водороде еще невелико, создаются условия для накопления нейтронов этих энергий.

4. Двухслойная железо-водная защита указанной выше геометрии более эффективна, чем многослойная защита, при одинаковой суммарной толщине слоя железа.

На границе железо — вода создаются условия своеобразной «фокусировки» нейтронов низких энергий в центр системы, что также обуславливает лучшие защитные свойства рекомендуемой защиты. Возможно, что эффективность предложенной защиты можно несколько увеличить за счет усложнения рельефа поверхности сердечника, так как при этом, согласно ориентировочным оценкам, можно ожидать улучшения условий фокусировки нейтронов в центр системы.

Результаты исследования были применены для конструирования нейтронного контейнера. Создана модель контейнера, вес и объем которой почти в два раза ниже веса и объема стандартной заводской установки того же типа при одинаковой мощности дозы на поверхности обоих контейнеров.

Поступила в Редакцию 23/VII 1962 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. И. Марчук. Численные методы расчета ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1958.
2. О. А. Барсуков, В. С. Авзянов. «Атомная энергия», 5, 478 (1961).
3. Справочник по ядерно-физическим константам для расчета реакторов. М., Атомиздат, 1960.

УДК 621.039.714.066

Осветление и очистка радиоактивных сточных вод методом флотации

В. В. Пушкарев, Ю. В. Егоров, Е. В. Ткаченко, В. Л. Золотавин

Методом флотации гидроокисей железа и алюминия изучено осветление и очистка радиоактивных сточных вод, содержащих значительные количества моющих и комплексобразующих веществ. Показано, что по

сравнению с отстаиванием при флотации можно получать осадки с меньшим объемом при большей скорости осветления.