

A-656

1418/2-77

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА

18/IV-77



3 - 10268

К. Андрейсек

РАСЧЕТ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ
ОТ КОНВЕРТОРА МИКРОТРОНА
В ГРАФИТОВОМ ЗАМЕДЛИТЕЛЕ
С ВОДЯНЫМ ОТРАЖАТЕЛЕМ

1977

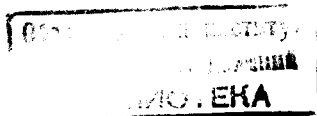
3 - 10268

К. Андрейсек

РАСЧЕТ

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ
ОТ КОНВЕРТОРА МИКРОТРОНА
В ГРАФИТОВОМ ЗАМЕДЛИТЕЛЕ
С ВОДЯНЫМ ОТРАЖАТЕЛЕМ

Направлено в АЭ и ЯЭ /ЧССР/



Андрейсек К.

3 - 10268

Расчёт распределения потока тепловых нейтронов от конвертора микротрона в графитовом замедлителе с водяным отражателем

Вычислено распределение тепловых нейтронов от источника фото-нейтронов микротрона в графитовом замедлителе. Произведено сравнение вычисленного потока с полученным экспериментально. Рассчитан поток тепловых нейтронов от источника фотонейтронов микротрона в графитовом замедлителе с водяным отражателем. Сделан расчёт потока тепловых нейтронов в водяном замедлителе.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований
Дубна 1976

© 1977 Объединенный институт ядерных исследований Дубна

В данной работе рассматривается вопрос об использовании отражателя в дополнение к графитовому замедлителю для повышения потока тепловых нейтронов.

Поток нейтронов, получаемый в такой среде, можно применить для целей активационного анализа. Расчет распределения потока для разных конфигураций замедлителя и отражателя позволяет выбрать оптимальный вариант облучения. Такая задача может быть решена с помощью кинетического уравнения или уравнения диффузии на ЭВМ.

Решение кинетического уравнения требует значительного машинного времени, поэтому был выбран метод диффузии с использованием четырех энергетических групп, что, хотя и является приближенным решением, но для практических расчетов вполне достаточно. В качестве отражателя в расчете принималась вода.

Результаты вычисления потока тепловых нейтронов в графитовом замедлителе сравнивались с экспериментальными данными^{/1/}.

В работе также рассчитывался поток тепловых нейтронов в водяном замедлителе для сравнения с экспериментом^{/2/}.

1. ТЕОРИЯ

Прежде всего следует рассчитать распределение потока быстрых нейтронов от конвертора микротрона. Эти нейтроны возникают в результате первого столкновения нейтронов от конвертора с атомами среды и относятся к первой энергетической группе. Во внимание

принимается тот факт, что объем нейтронного конвертора имеет конечные размеры, т.е. не равен нулю.

Вычисления ведутся в сферической геометрии методом решения диффузионных уравнений.

1. Вычисление распределения быстрых нейтронов

Предполагается, что источник нейтронов моноэнергетичен, однороден и сферической формы.

Применяется функция ослабления единичного точечного источника в форме /3/

$$G(\Sigma_s \rho) = \frac{1}{4\pi \rho^2} \cdot e^{-\Sigma_s \cdot \rho} \quad /1.1/$$

где Σ_s - макроскопическое сечение рассеяния в замедляющей среде; ρ - расстояние между точкой рождения нейтрона и точкой его столкновения.

Кроме того, принимается, что эмиссионная плотность $S = 1 \text{ н/см}^3 \cdot \text{с}$ и ослабление потока нейтронов происходит только вне конвертора. Этот расчет был полностью произведен в работе /4/. Здесь приводится только конечный результат:

$$\Phi(x) = \frac{1}{8x^2} \left\{ \frac{2}{\Sigma_s} \left[\left(\frac{1}{\Sigma_s^2} + \frac{x-L}{\Sigma_s} + L(-x+L) \right) \exp(-\Sigma_s(x-L)) - \right. \right.$$

$$\left. - \left(\frac{\sqrt{x^2-L^2}}{\Sigma_s} + \frac{1}{\Sigma_s^2} \right) \exp(\Sigma_s \sqrt{x^2-L^2}) \right] + (x^2-L^2)^2 \Sigma_s \times$$

$$\times \left[\frac{\Sigma_s(x-L)}{\Sigma_s \sqrt{x^2-L^2}} \int \frac{e^{-z}}{z^2} dz - (x^2-L^2) \Sigma_s^2 \int \frac{e^{-z}}{\Sigma_s \sqrt{x^2-L^2} z^4} dz \right],$$

/1.2/

где $\Phi(x)$ - поток быстрых нейтронов в точке с координатой X ; L - радиус нейтронного конвертора; Σ_s - макроскопическое сечение рассеяния в замедляющей среде.

2. Расчет потока тепловых нейтронов для двух пространственных областей: замедлитель, отражатель

Разбивка спектра нейтронов на 4 энергетических интервала обуславливает решение восьми дифференциальных уравнений второго порядка с 16 дополнительными условиями. Для каждой энергетической группы необходимо выполнить 4 условия:

- 1/ непрерывность потока на границе между областями;
- 2/ непрерывность плотности потока на границе;
- 3/ обращение тока в нуль на экстраполированной границе внешней области;
- 4/ выполнение условия источника.

Решается 8 уравнений диффузии /4 - для замедлителя, 4 - для отражателя/ путем разложения групповых потоков в ряды Фурье.

$$D_{iC} \Delta \Phi_{iC} - (\Sigma_{iC} + \Sigma_{iC}^a) \Phi_{iC} + \Sigma_{i-1,C} \cdot \Phi_{i-1,C} = 0,$$

$$D_{iR} \Delta \Phi_{iR} - (\Sigma_{iR} + \Sigma_{iR}^a) \Phi_{iR} + \Sigma_{i-1,R} \cdot \Phi_{i-1,R} = 0,$$

$i = 2, 3, 4;$

для первой группы /быстрые нейтроны/

$$D_{1C} \Delta \Phi_{1C} - (\Sigma_{1C} + \Sigma_{1C}^a) \Phi_{1C} + S = 0,$$

/2.1/

$$D_{1R} \Delta \Phi_{1R} - (\Sigma_{1R} + \Sigma_{1R}^a) \Phi_{1R} = 0,$$

где Δ - оператор Лапласа; ϕ_{iC}, ϕ_{iR} - групповые потоки в замедлителе и отражателе; S - распределение быстрых нейтронов; D_{iC}, D_{iR} - коэффициенты диффузии в замедлителе и отражателе; Σ_{iC}, Σ_{iR} - макроскопические сечения замедления в замедлителе и отражателе; $\Sigma_{iC}^a, \Sigma_{iR}^a$ - макроскопические сечения поглощения в замедлителе и отражателе.

Последовательность расчетов для i -ой группы

В замедлителе разлагается групповой поток ϕ_{iC} в следующий ряд:

$$\phi_{iC} = \sum_n B_n \frac{\sin \lambda_n x}{x}, \quad /2.2/$$

где λ_n - пока неизвестные коэффициенты.

Решение уравнения диффузии предполагаем в том же виде:

$$\phi_{i+1,C} = \sum_n S_n \frac{\sin \lambda_n x}{x}. \quad /2.3/$$

Если заменить ряды и решить уравнение диффузии в данной области, получается выражение для коэффициентов S_n :

$$S_n = \frac{B_n \cdot \Sigma_{iC}}{D_{i+1,C} \lambda_n^2 + \Sigma_{i+1,C} + \Sigma_{i+1,C}^a}. \quad /2.4/$$

В отражателе разлагается групповой поток в ряд Фурье:

$$\phi_{iR} = \sum_n B'_n \frac{\sin \frac{n\pi}{2R_{ex}} (x + R_{ex})}{x}, \quad /2.5/$$

где R_{ex} - экстраполированная длина. Решение предлагается в виде

$$\phi_{i+1,R} = C \sum_n S'_n \frac{\sin \frac{n\pi}{2R_{ex}} (x + R_{ex})}{x}, \quad /2.6/$$

где C - постоянная связи обоих решений.

В результате решения уравнения диффузии в отражателе получается отношение для коэффициентов S'_n :

$$S'_n = \frac{B'_n \cdot \Sigma_{i,R}}{D_{i+1,R} \left(\frac{n\pi}{2R_{ex}}\right)^2 + \Sigma_{i+1,R} + \Sigma_{i+1,R}^a}. \quad /2.7/$$

Постоянная C определяется из условия непрерывности потоков на границе между слоями. Для нее получается выражение

$$C = \frac{\sum S_n \sin \lambda_n R}{\sum S'_n \sin \frac{n\pi}{2R_{ex}} - (R + R_{ex})}, \quad /2.8/$$

где R - радиус замедлителя. Постоянные λ_n находятся из условия непрерывности плотностей потоков на границе между слоями:

$$D_{i+1,R} \dot{\phi}_{i+1,R}(R) = D_{i+1,C} \dot{\phi}_{i+1,C}(R), \quad /2.9/$$

где точкой над ϕ обозначены производные координаты. Из вычислений вытекает следующее уравнение:

$$\frac{\sum S_n R \lambda_n \cos(\lambda_n R)}{\sum S_n \sin(\lambda_n R)} - 1 = \quad /2.10/$$

$$= \frac{D_{i+1,R}}{D_{i+1,C}} \left(\frac{\sum S'_n R \frac{n\pi}{2R_{ex}} \cos \frac{n\pi}{2R_{ex}} (R + R_{ex})}{\sum S'_n \sin \frac{n\pi}{2R_{ex}} (R + R_{ex})} - 1 \right).$$

Если выразить правую часть уравнения /2.10/ через A , то получается трансцендентное уравнение для решения искомых коэффициентов λ_n :

$$\operatorname{tg} \lambda_n R = \frac{\lambda_n R}{A + 1} \quad /2.11/$$

Последовательные вычисления для каждой группы в конечном итоге дают распределение потока тепловых нейтронов в замедлителе и отражателе. Задача была решена на ЭВМ CDC-6400. В программе были использованы четыре подпрограммы из библиотеки CERN:

- 1/ программа SIMPS, вычисляющая определенный интеграл методом Симпсона;
- 2/ программа TRICOF, вычисляющая коэффициенты разложения в ряд Фурье;
- 3/ программа TRISUM, с помощью которой вычисляется сумма ряда Фурье;
- 4/ программа KOR, с помощью которой были найдены корни трансцендентного уравнения.

3. Поправка на поглощение в центре замедлителя

В работах /1,5/ экспериментально наблюдается некоторое падение плотности потоков нейтронов в областях, близких к конвертору нейтронов, но четкого объяснения этого явления не дано. В данной работе путем расчета показано, что этот эффект объясняется захватом нейтронов конструкционными материалами экспериментальной установки /конвертор нейтронов, выводной канал электронов, тормозная мишень и т.д./.

Проблема решается при использовании теории возмущений /3/. Возмущенный поток представляется в виде

$$\phi(r) = \phi_0(r) + \delta\phi = \phi_0(r) + \sum_n a_n F_n(r), \quad /3.1/$$

где $\phi_0(r)$ - невозмущенный поток; $\delta\phi$ - коррекция потока; $F_n(r)$ - базисные функции, по которым разлагается коррекция $\delta\phi$.

$$F_n(r) = \frac{\sin \frac{n\pi}{2R_{ex}} (r + R_{ex})}{r} \quad /3.2/$$

Поскольку базис функций F_n ортогонален, для коэффициентов разложения a_n получается известным способом следующая формула:

$$a_n = \frac{\int_v F_n(r) \delta\phi(r) dr}{\int_v F_n^2(r) dr} \quad /3.3/$$

Интегрирование производится по объему, в котором происходит изменение сечения захвата. В результате приходим к конечному выражению для коэффициентов:

$$a_n = \frac{\int_v F_n(r) \delta\Sigma_a \cdot \phi_0(r) dr}{[D(\frac{n\pi}{2R_{ex}})^2 + \Sigma_a^0] \int_v F_n^2(r) dr}, \quad /3.4/$$

где Σ_a^0 - первоначальное сечение захвата; $\delta\Sigma_a$ - изменение сечения захвата. Подставим найденные значения коэффициентов в выражение /3.1/ и получим возмущенный нейтронный поток.

II. КОНКРЕТНЫЕ РАСЧЕТЫ

1. Исходные данные

Весь интервал энергий был разделен на четыре группы следующим образом:

1. 2 МэВ - 3 кэВ,
2. 3 кэВ - 5 эВ,
3. 5 эВ - 0,025 эВ,
4. 0,025 эВ.

В качестве верхнего предела энергетического спектра нейтронов взята энергия 2 МэВ /среднее значение энергии спектра деления/. Из сборника нейтронных сече-

Замедлитель	Группы	Σ_s	Σ_a	Σ_{zp}	D	d_{ex}	τ
		см ⁻¹	см ⁻¹	см ⁻¹	см	см	см ²
Вода	I	0,68	0,00086	0,082	1,470	1,4367	24
	II	1,454	0,00044	0,227	0,690	1,4367	
	III	1,460	0,00746	0,275	0,685	1,4367	
	IV	1,460	0,02191	0,000	0,684	1,4367	
Графит	I	0,285	0,0000	0,0064	1,240	2,70	354
	II	0,380	0,0000	0,0094	0,940	1,98	
	III	0,380	0,0000	0,0120	0,940	1,98	
	IV	0,380	0,0004	0,0000	0,940	1,98	

ний /6,7/ были выбраны для средних энергий указанных групп сечения для графита и воды и затем вычислялись следующие величины: макроскопическое сечение рассеяния Σ_s , макроскопическое сечение захвата Σ_a , коэффициент диффузии D , макроскопическое сечение замедления Σ_{zp} , возраст нейтронов $\tau = \sum_i \frac{D_i}{\Sigma_{zp_i}}$, длина экстраполяции d_{ex} . Все величины представлены в таблице.

2. Расчет потока тепловых нейтронов для графитовой среды

Вышеприведенный метод был сначала применен для вычисления потока в одной области /без отражателя/,

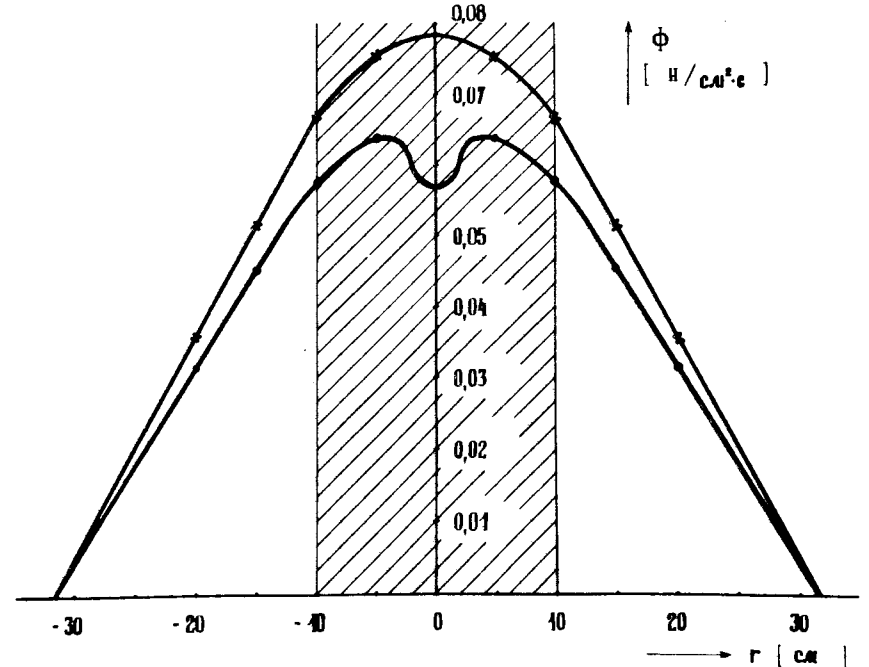


Рис. 1. Распределение потока тепловых нейтронов в графите, $R = 30$ см; \times - без учета поглощения в центральной области; o - с учетом поглощения.

в частности, для случая сферического замедлителя из графита радиусом $R = 30 \text{ см}$ /рис. 1/. На этом рисунке показаны две кривые. Верхняя вычислена без учета поглощения в центральной области, а нижняя - с поправкой на это явление. Центральная область была выбрана однородной с радиусом 10 см и с такими усредненными физическими свойствами, которые соответствуют действительной системе замедления. Поток рассчитывался для конвертора из бериллия радиусом $L = 2 \text{ см}$ с эмиссионной плотностью нейтронов $S = 1 \text{ н/см}^2 \cdot \text{с}$.

3. Сравнение вычисленного потока с измеренным

Вычисленное распределение потока тепловых нейтронов в графите сравнивалось с результатами измерения

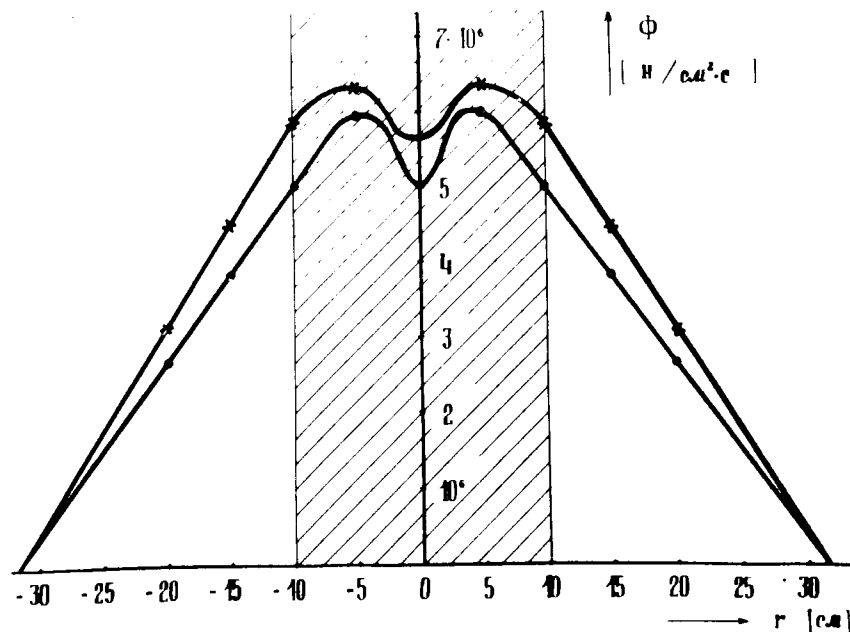


Рис. 2. Сравнение вычисленного потока с измеренным: \circ - измеренный поток, \times - вычисленный поток.

ний, проведенных в работе /1/. Для этого нужно было пересчитать полученные результаты для реального случая /бериллиевого конвертора радиусом $L = 4 \text{ см}$ и выходом нейтронов $S = 2 \cdot 10^9 \text{ н/с}$ /1/, то есть умножить их на коэффициент $K = 10^8$. Далее следовало рассчитать поток тепловых нейтронов на основе экспериментальных данных. Сравнение приведено на рис. 2.

4. Расчет потока тепловых нейтронов для двух областей

Был вычислен поток тепловых нейтронов в графитовом замедлителе с водяным отражателем со следующими размерами сред:

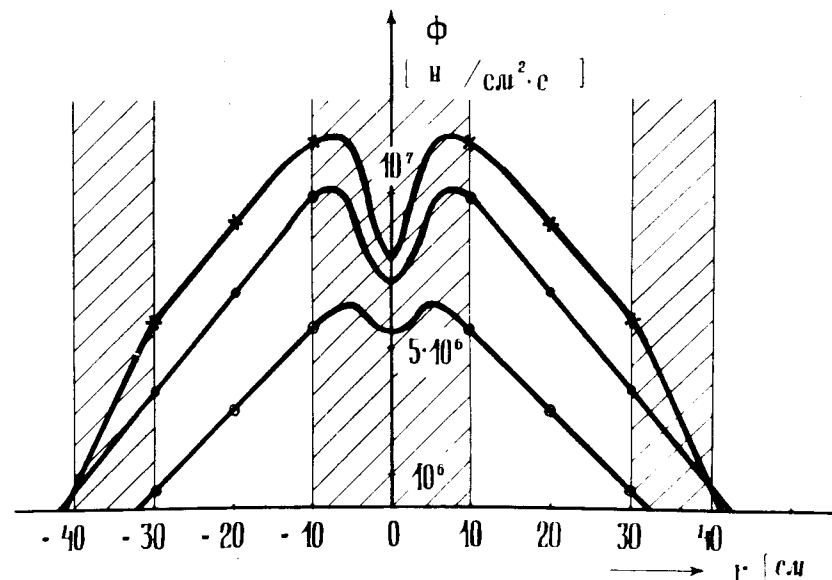


Рис. 3. Распределение потока тепловых нейтронов: \times - в графите, $R = 30 \text{ см}$, с водяным отражателем, $T = 10 \text{ см}$; \bullet - в графите, $R = 40 \text{ см}$. \circ - в графите, $R = 30 \text{ см}$.

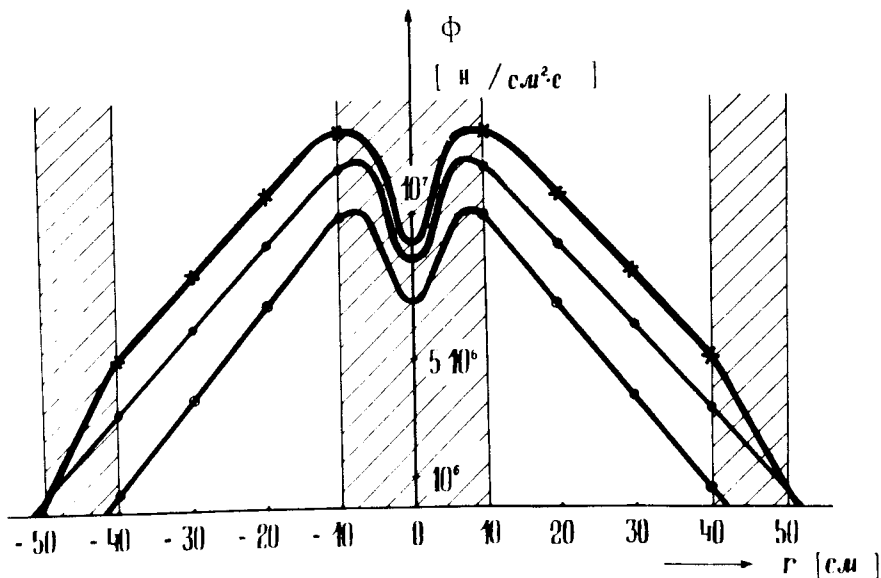


Рис. 4. Распределение потока тепловых нейтронов: × - в графите, $R = 40$ см, с водяным отражателем, $T = 10$ см; • - в графите, $R = 50$ см; o - в графите, $R = 40$ см.

графит, $R = 30$ см; вода, $T = 10$ см;
графит, $R = 40$ см; вода, $T = 10$ см.

Толщина водяного отражателя выбиралась с учетом условия бесконечного отражателя. Таким отражателем является среда с размерами больше, чем три длины диффузии. Для воды $l_D = 2,88$ см^{1/3}. Для каждого случая производилось сравнение с распределением потока только в графитовых блоках двух размеров. Результаты показаны на рис. 3, 4.

5. Водяной замедлитель

Наконец, был сделан расчет распределения потока тепловых нейтронов в водяном замедлителе радиуса $R = 30$ см.

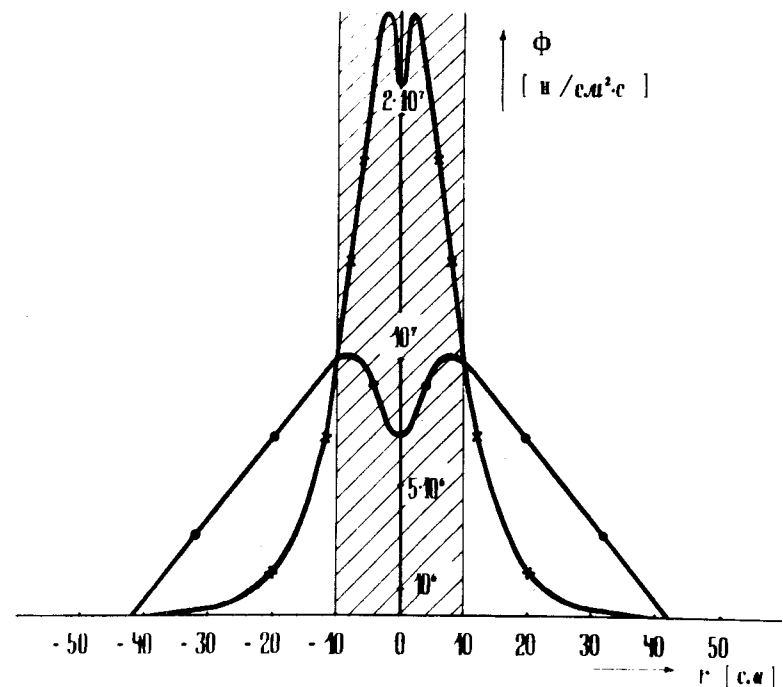


Рис. 5. Распределение потока тепловых нейтронов: × - в воде, $R = 40$ см; o - в графите, $R = 40$ см.

На рис. 5 представлены результаты в сравнении с данными для графитового замедлителя. Расчетные данные подтверждаются экспериментом, результаты которого опубликованы в работе /2/.

6. Распределение потока надтепловых нейтронов

В данной работе также вычислялось распределение потока надтепловых нейтронов. Оказывается, что повышение потока, вызванное использованием водяного отражателя, очень мало.

III. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

1. На рис. 1,3,4,5 приведены результаты расчета распределения потока тепловых нейтронов в графите, в воде и в графите с водяным отражателем. Показано, что наиболее эффективной является система /в пределах поставленной в работе задачи/, состоящая из графита с отражателем.

2. Из расчетных данных следует, что ослабление потока нейтронов в центре замедлителя объясняется поглощением нейтронов конструкционными материалами /конвертор, выводной канал и т.д./.

3. Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными в пределах точности измерений.

Таким образом, предлагаемый простой метод расчета распределения потоков нейтронов в различных средах может служить для ориентации при подготовке экспериментов с использованием фотонейтронов микрофона.

Автор глубоко признателен Ч.Шимане за постановку задачи и руководство работой, Г.Н.Флерову за поддержку и постоянный интерес к работе, В.Я.Выропаеву за обсуждение результатов, а также Т.В.Базаркиной за помощь в подготовке рукописи к печати.

Литература

1. Выропаев В.Я. Препринт ОИЯИ, 14-9446, Дубна, 1976.
2. Выропаев В.Я. Препринт ОИЯИ, 14-9615, Дубна, 1976.
3. Глестон С., Эдлунд М. Основы теории ядерных реакторов, Москва, ИЛ, 1954.
4. Смутны В. Дипломная работа FJFI, Прага, 1976.
5. Самосюк В.Н. и др. Атомная энергия, 1972, 32, вып.5.
6. Абагян Л.П. и др. Групповые константы для расчета ядерных реакторов, Москва, Атомиздат, 1964.
7. Hughes D.J. and Schwartz R.V. BNL-325, 2nd, 1958.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 января 1977 года.