

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ДИФфуЗИЯ НЕЙТРОНОВ
В ЗАМЕДЛИТЕЛЕ СО СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТЬЮ

А. В. Антонов, А. И. Исаков, К. Д. Илешева,
В. И. Куликов, Д. А. Меркулов, А. И. Никитенко

УДК 539.125.52.

Проведено экспериментальное исследование нестационарной диффузии в воде при наличии большой сферической полости. Полученные результаты сравнены с теорией. Показано, что на основании таких экспериментов может быть определен важный нейтронно-физический параметр замедлителя - альбеда.

В последние годы в связи с созданием реакторов с каналами большого диаметра, а также в связи с развитием исследований по взаимодействию реакторов, разделенных пустотами, возникла необходимость разобраться в процессах переноса нейтронов в системах с большими полостями (предполагается, что размер полости много больше длины свободного пробега нейтронов в замедлителе, окружающем полость). Теоретический анализ спектра собственных значений уравнения переноса нейтронов для замедлителей, содержащих даже малые пустоты, предсказывает отсутствие дискретных собственных значений /1/, откуда следует, что спад плотности медленных нейтронов не должен подчиняться экспоненциальному закону (в случае наличия пустот в замедлителе). Однако, экспериментально было обнаружено /2/, что через некоторое время после вспышки быстрых нейтронов в системе с полостью все же устанавливается асимптотическая (т.е. экспоненциальная) зависимость плотности нейтронов от времени (в таком случае обычно говорят "квазиасимптотическая", подразумевая, что при очень больших временах она может отличаться от экспоненциальной).

Настоящая работа посвящена исследованию нестационарной диффузии нейтронов в замедлителе (воде), содержащем большую сферическую полость. Введение в замедлитель большой полости наруша-

ет термодинамическое равновесие между нейтронным газом и средой. Чем холоднее нейтроны, тем больше времени они тратят на пролет через полость, в которой отсутствует поглощение. Полость, таким образом, является своеобразной "ловушкой" холодных нейтронов, и это существенным образом влияет на характер поведения нейтронного поля во времени.

В теоретической работе /3/ была сделана попытка объяснить существование экспоненциального участка спада плотности нейтронов со временем в замедлителе, содержащем большую сферическую полость. Расчетным путем была получена зависимость от времени плотности нейтронов, имеющая квазиасимптотический начальный участок, а при достаточно больших временах переходящая в гиперболу t^{-3} . Эти расчеты были выполнены в следующих предположениях: время пролета нейтронов через полость велико, по сравнению с временем блуждания их в замедлителе; энергия и угол вылета нейтронов в полость не зависят от энергии и направления нейтронов, входящих в слой замедлителя из полости.

В односкоростном приближении авторами работы /3/ получено простое аналитическое выражение, связывающее постоянную спада плотности нейтронов со временем с характеристиками рассматриваемой системы

$$\frac{1}{2K_0} = \frac{(1 + 2R\lambda) e^{-2R\lambda} - 1}{(2R\lambda)^2}. \quad (1)$$

Здесь R - радиус полости, K_0 - среднее альbedo (вероятность, с которой нейтрон, вошедший в замедлитель из полости, возвращается обратно в полость).

Согласно /4/,

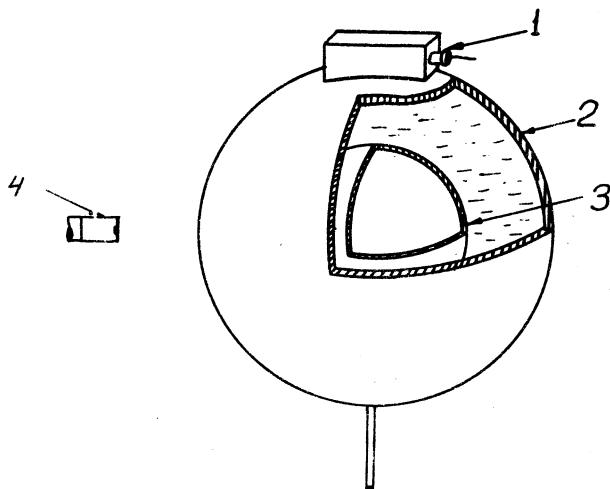
$$K_0 = 1 - \frac{4}{3} (1 - c) \nu_0 + \frac{2}{3} \mu^2; \quad \mu^2 = 2(1 - c)I(c), \quad (2)$$

где c - вероятность того, что нейтрон не поглотится при взаимодействии с ядром замедлителя, ν_0 - отношение полного пробега к длине диффузии, μ - косинус угла рассеяния, $I(c)$ - функция, протабулированная в работе /5/.

В работе /3/ также получены аналитические выражения для зависимости плотности нейтронов от времени с учетом энергетического распределения нейтронов. Однако, из-за своей громоздкости и

сложности они позволяют получить численное значение λ лишь при расчете на ЭВМ и поэтому здесь не приводятся.

Для экспериментального изучения диффузии нейтронов в замедлителе с полостью использовано несколько установок, в которых



Р и с. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - детектор медленных нейтронов типа СМН-17; 2 - внешняя сфера (медь + кадмий); 3 - внутренняя сфера (резина); 4 - мишень нейтронного генератора

размер полости можно было менять (см. рис. 1). Внешние сферы были выполнены из кадмированной меди и имели диаметры 415,2 мм и 348,0 мм.

Моделью полости служили inflatable футбольные камеры, обтянутые тонкой проволочной сеткой для уменьшения деформации под действием давления воды. Диаметры полостей приведены в табл. 1. Вся установка защищалась от фона нейтронов, рассеянных стенами помещений, кадмием толщиной 0,5 мм и карбидом бора толщиной 30 мм.

Вспышки быстрых нейтронов следовали с частотой 400 раз в секунду и имели длительность около 5 мксек. Нейтроны возникали на мишени импульсного нейтронного генератора в реакции $T(d,n)He^4$ и имели энергию 14,3 Мэв. Для исключения влияния пространствен-

ных гармоник мишень и детектор располагались, как показано на рис. 1, по различным осям симметрии. С этой же целью проводился контроль зависимости скорости счета детектора от времени при других расположениях детектора. Оказалось, что начиная с 200–300 мксек после вспышки быстрых нейтронов все кривые спада плотности нейтронов со временем практически совпадают друг с другом.

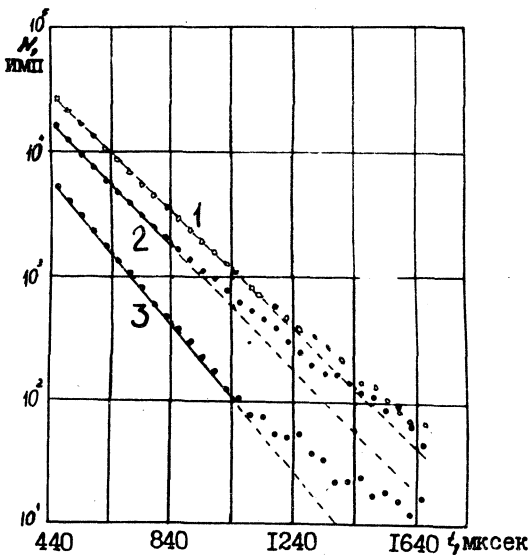
Таблица I

	$R_{\text{вн}},$ см	$R_{\text{пол}},$ см	$\rho (B^{10}),$ мг/см ³	$\lambda_{\text{эксп}},$ сек ⁻¹	$\lambda_{\text{теор}},$ сек ⁻¹	$\lambda_{\text{теор}}$ $R_{\text{пол}},$ отн. еднн.	$\lambda_{\text{эксп}}$ $R_{\text{теор}},$ отн. еднн.
1	20,76	13,26	-	2560±10	2900	7,7	6,54±0,02
2	17,4	13,4	-	2970±15	2960	7,92	7,95±0,03
3	17,4	10,4	-	3270±15	3700	7,70	6,8 ±0,03
4	20,76	10,4	-	3200±15	3660	7,62	6,73±0,03
5	20,76	13,26	0,95	4200±120	5000	13,26	11,1±0,3
6	20,76	10,4	1,046	5640±140	6320	13,1	11,7±0,4
7	20,76	13,26	2,37	4600±160	7080	18,7	12,2±0,5
8	20,76	15,76	2,6	4750±150	6950	21,9	15 ±0,3
9	17,4	13,4	2,6	5750±180	8300	22,2	15,4±0,4
10	17,4	10,4	2,6	6690±200	10700	22,2	14 ± 0,5

Опыты проводились при температуре 21°C с чистой водой и с водой, отравленной борной кислотой. Концентрация бора приведена в таблице I. Спад плотности нейтронов анализировался в интервале от 100 до 2500 мксек после вспышки быстрых нейтронов.

Типичные экспериментальные кривые приведены на рис. 2 и 3. На этих кривых можно наблюдать участки квазиасимптотического спада плотности нейтронов от времени, которые начинаются после установления пространственных распределений, то-есть примерно через 400–800 мксек после облучения системы импульсом быстрых нейтронов. Протяженность этих участков сильно зависит от степени отравления воды. При больших концентрациях бора они либо совсем малы (150–300 мксек), либо не наблюдаются совсем.

В таблице приведены значения постоянных квазиасимптотического спада нейтронной плотности λ , как экспериментальные, так

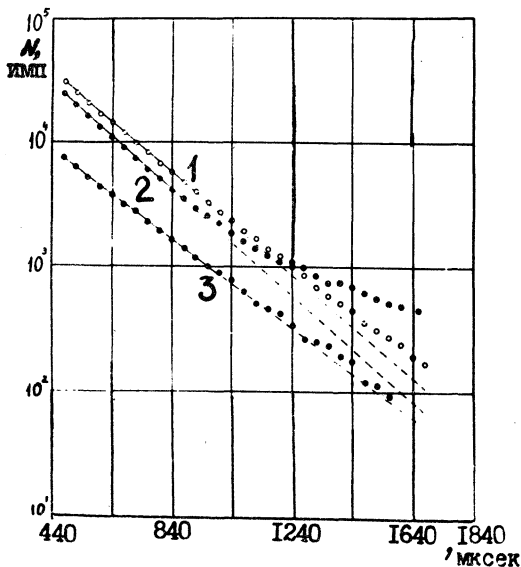


Р и с. 2. Зависимость скорости счета детектора от времени при различной геометрии (концентрация бора $2,6 \text{ мг/см}^3$)

1 - $R_{\text{ВН}} = 17,4 \text{ см}$, $R_{\text{ПОЛ}} = 13,4 \text{ см}$;

2 - $R_{\text{ПОЛ}} = 15,76 \text{ см}$; $R_{\text{ВН}} = 20,76 \text{ см}$;

3 - $R_{\text{ВН}} = 17,4 \text{ см}$, $R_{\text{ПОЛ}} = 10,4 \text{ см}$.



Р и с. 3. Зависимость скорости счета детектора от времени при $R_{\text{ВН}} = 20,76 \text{ см}$.

1 - $R_{\text{ПОЛ}} = 13,26 \text{ см}$, отравление $0,95 \text{ мг/см}^3$;

2 - $R_{\text{ПОЛ}} = 13,26 \text{ см}$, отравление $2,37 \text{ мг/см}^3$;

3 - $R_{\text{ПОЛ}} = 10,4 \text{ см}$, отравление $1,046 \text{ мг/см}^3$.

и рассчитанные на основе метода, изложенного в /3/. Для неотравленной воды наблюдается весьма хорошее совпадение эксперимента с расчетом. Некоторые расхождения между экспериментальными и теоретическими данными λ в случае отравленной воды, по-видимому, могут быть вызваны как приближенным характером модели, использованной для расчета λ , так и проявлением в эксперименте влияния материала оболочки полости (резина толщиной 0,2-0,8мм). Как видно из таблицы, произведение λ на радиус сферической полости есть величина постоянная, не зависящая от радиуса полости и толщины слоя замедлителя (если толщина его больше пробега рассеяния нейтрона). Эта величина определяется отражающими свойствами замедлителя. Непосредственная связь между $\lambda R_{пол}$ и параметром K_0 - средним альбедо (см. рис. /1/) делает возможным применение описанной методики при измерении этого параметра для различных отражающих поверхностей.

В заключение авторы благодарят М. В. Казарновского за полезные обсуждения, а также Р. Н. Трактирникову за помощь в изготовлении сферических оболочек.

Поступила в редакцию
15 октября 1973 г.

Л и т е р а т у р а

1. G. Grosshüg, G. Rönberg. Journal of Nuclear Energy, 25, 361 (1971).
2. Во-Дак Банг. Кандидатская диссертация, ФИАН, 1972 г.
С. Б. Шихов, А. А. Шкурёпов. Сб. Теоретические и экспериментальные проблемы нестационарного переноса нейтронов, под ред. В. В. Орлова. М. Атомдат, 1972 г.
3. К. Д. Илиева, М. В. Казарновский. Краткие сообщения по физике ФИАН № 3, стр. 19 (1973).
4. К. Кейз, П. Цвайфель. Линейная теория переноса, "Мир", М., 1972 г.
5. K. M. Case, F. de Hoffman, G. P. Placzek. Introduction to the Theory of Neutron Diffusion. Washington, 1953.