

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЛЬБЕДО НА ГРАНИЦЕ
ВАКУУМ - ЖИДКИЙ ВОДОРОД ДЛЯ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНО
ЗАТУХАЮЩЕГО НЕЙТРОННОГО ПОТОКА

А. В. Антонов, А. И. Исаков, В. И. Кузиков,
О. А. Лангер, Д. А. Меркулов, А. И. Никитенко

УДК 539.125.52

Экспериментально изучалась нестационарная диффузия нейтронов в жидком водороде при наличии большой полости. Впервые получено значение альbedo нейтронов для жидкого водорода с концентрацией ортофазы 60% $k_0(\lambda_0) = 0,67 \pm 0,05$.

В работах /1-5/ был предложен и апробирован прецизионный метод определения альbedo нейтронов для экспоненциального затухания нейтронного потока. Метод основан на изучении процесса нестационарной диффузии нейтронов в гетерогенной системе, представляющей собой сферическую, сравнительно тонкостенную оболочку из исследуемого замедлителя.

Как предсказывает теория /6/, плотность тепловых нейтронов, образовавшихся в такой системе после ее облучения импульсом быстрых нейтронов, затухает со временем, вообще говоря, по весьма сложному неэкспоненциальному закону. Однако при выполнении некоторых условий на экспериментальной зависимости плотности тепловых нейтронов $N(t)$ от времени должен наблюдаться участок квазиэкспоненциального спада ($N(t) \sim e^{-\lambda_0 t}$), характеризуемой средним временем жизни нейтронов в системе λ_0^{-1} . Этот участок расположен при временах $t \leq 4/|\lambda_0|$; при больших t наступает отклонение от экспоненциального спада, и при $t \rightarrow \infty$ $N(t) \sim t^{-5}$. Теория /1/ справедлива при условиях

$$R \gg \langle \Sigma_{tr}^{-1} \rangle_T, \quad L_0 \gg \langle \Sigma_{tr}^{-1} \rangle_T$$

где R - радиус полости, L_0 - длина диффузии нейтронов в замедлителе, Σ_{tr} - транспортное макроскопическое сечение замедлителя,

а символ $\langle \dots \rangle_T$ означает усреднение по максвелловскому спектру нейтронов, соответствующему температуре замедлителя T .

В случае, если указанные условия выполняются, постоянная затухания λ_0 связана со средним альбедо нейтронов от сферической поверхности $k_0(\lambda_0)$ соотношением /4/:

$$k_0(\lambda_0) = \left[1 + \frac{\sqrt{\pi}}{3} x + \frac{1}{4} x^2 + \frac{\sqrt{\pi}}{15} x^3 + \frac{1,384 - \ln x}{144} x^4 \right]^{-1}, \quad (I)$$

$$x = \frac{2R\lambda_0}{v_T}; \quad v_T = \sqrt{\frac{2kT}{m}}.$$

Независимый расчет $k_0(\lambda_0)$ в диффузионном приближении дает:

$$k_0(\lambda_0) = \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon};$$

$$\varepsilon = \frac{2}{\langle v \rangle_T} \left[\frac{1}{R} + \frac{1}{L_0} \sqrt{1 - \frac{\lambda_0}{\alpha}} \operatorname{cth} \left(\frac{H + z_0}{L_0} \sqrt{1 - \frac{\lambda_0}{\alpha}} \right) D_0 x \right. \\ \left. x \left[1 - \frac{3D_0}{\langle v \rangle_T} (\alpha - \lambda_0) \right] \right], \quad (2)$$

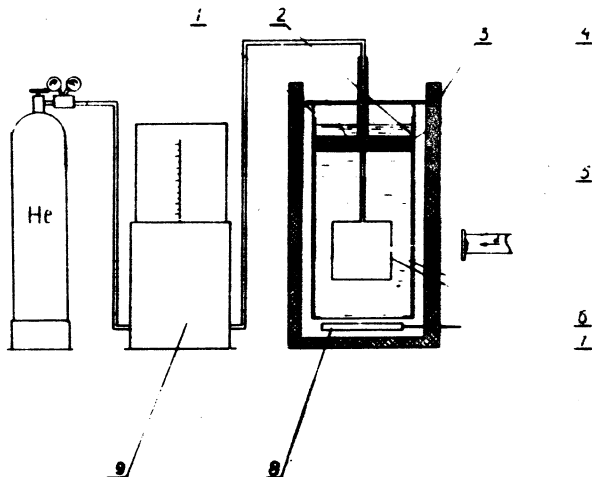
$$D_0 = \left\langle \frac{v}{3\Sigma_{tr}} \right\rangle_T; \quad z_0 = 2,13 \frac{D_0}{\langle v \rangle_T},$$

где α - вероятность поглощения нейтрона в замедлителе в единицу времени, v - скорость нейтрона, H - толщина слоя замедлителя.

Для определения альбедо в жидком водороде был использован криостат (см. рис. I). По некоторым техническим соображениям было затруднительно изготовить экспериментальную установку в форме описанного выше сферического слоя, для которого производились теоретические расчеты.

Жидкий водород заливался в цилиндрический криостат с внутренним диаметром сосуда 26 см и высотой 70 см. Для создания полости в водородном объеме размещался пустотелый цилиндр ($\phi = h = 15$ см) из чистого алюминия, наполненный гелием. Цилиндр укреплялся на тонкостенной алюминиевой трубке, проходившей через центр покрытого кадмием поршня криостата, и мог закрепляться на избранной высоте над его дном. Между поршнем и стенкой криостата был

зазор ~ 1 мм. Изнутри водородный объем был покрыт кадмием. Счетчик нейтронов размещался под дном криостата против прорези в кадмиевом покрытии. Криостат наполнялся жидким водородом на 10–15 см выше поршня. Объем водорода под поршнем, в котором изучался

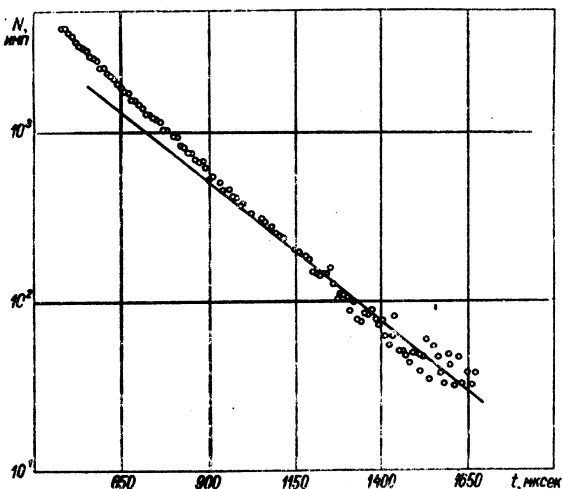


Р и с.1. Схема экспериментальной установки. 1 - сосуд для жидкого водорода; 2 - кадмиевое покрытие; 3 - защита из карбида бора; 4 - подвижный поршень; 5 - мишень нейтронного генератора; 6 - жидкий водород; 7 - цилиндрическая полость, заполненная гелием; 8 - детектор медленных нейтронов типа СМ-17; 9 - газгольдер для гелия; 10 - балон с гелием и редуктор

нестационарный перенос нейтронов, во время измерений оставался неизменным. Мишень импульсного генератора нейтронов располагалась вблизи криостата на расстоянии от него ~ 30 см. Генератор облучал установку импульсами нейтронов с энергией 14 МэВ продолжительностью ~ 5 мксек, следовавшими друг за другом с частотой порядка 500–800 гц. Средняя интенсивность нейтронного потока достигла 10^9 н/сек. С помощью описанной установки снимались "кривые затухания" плотности медленных нейтронов. Измерения в основном проводились с жидким водородом, имевшим значительную концентрацию ортофазы $\sim 60\%$. В экспериментальные кривые зату-

ханы вносились необходимые исправления, вычитался фон, делались поправки на просчеты.

На рис.2 приведена одна из таких кривых затухания, полученных в результате измерений. Концентрация ортофазы $\sim 60\%$. Мы по-



Р и с.2. Зависимость скорости счета детектора от времени.

Прямая соответствует $\lambda_0 = 3300 \text{ сек}^{-1}$

лагаем, что начальный участок кривой связан с затуханием высших пространственных гармоник, вызываемых несимметрией системы и ее облучения. Поэтому значение λ_0 определялось по правой, менее крутой части кривой. Найденное при усреднении результатов двух серий измерений значение λ_0 равнялось $\lambda_0 = (3,3 \pm 0,1) \cdot 10^3 \text{ сек}^{-1}$. Для расчетов $k_0(\lambda_0)$ использовалось значение радиуса эквивалентной сферы $R_{\text{экр}}$. Значения $R_{\text{экр}}$ определялись двояким образом: 1) средний пробег в эквивалентной сфере принимался равным среднему пробегу в цилиндрической полости: $R_{\text{экр}} = R = 7,5 \text{ см}$; 2) объем эквивалентной сферы принимался равным объему полости

$$R_{\text{экр}} = R\sqrt{1,5} = 8,6$$

Результаты расчета для измерений с жидким водородом толщиной слоя 22,3 см над полостью и 12,7 см под ней приведены в таб-

лице I. Для диффузионного расчета использовались полученные ранее значения параметров диффузии в жидком водороде при концентрации ортофазы 60% /7/: $D_0 = (2,70 \pm 0,09) \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{сек}$, $\alpha = 3090 \text{ сек}^{-1}$. Как показано в /7/, в жидком нормальном водороде термодинамическое равновесие между нейтронами и средой не устанавливается. Средняя энергия нейтронов оказывается равной $\approx 40^\circ\text{K}$ при температуре замедлителя $20,4^\circ\text{K}$. Учитывая этот эффект, для расчетов принималось $v_T = 813 \text{ м/сек}$. Для сравнения приведены результаты расчета для температур 20°K и 60°K (2 и 3 строки таблицы I). Как видно из 4 столбца таблицы, наилучшее согласие между измеренным и вычисленным значением альbedo наблюдается при температуре 40°K . Можно считать, что полученные результаты еще раз подтверждают отсутствие термодинамического равновесия между нейтронами и жидким водородом при значительной концентрации ортофазы.

Таблица I

| T, °K | $R_{\text{экв}} = 7,5 \text{ см}$ | | | $R_{\text{экв}} = 8,6 \text{ см}$ | | |
|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|
| | $k_0(\lambda_0)$ по Φ -ле (I) | $k_0(\lambda_0)$ по Φ -ле (2) | Δ^* | $k_0(\lambda_0)$ по Φ -ле (I) | $k_0(\lambda_0)$ по Φ -ле (2) | Δ^* |
| 40 | $0,67 \pm 0,01$ | $0,75 \pm 0,05$ | $\pm 12\%$ | $0,63 \pm 0,01$ | $0,77 \pm 0,05$ | $\pm 22\%$ |
| 20 | $0,53 \pm 0,01$ | $0,67 \pm 0,05$ | $\pm 24\%$ | - | - | - |
| 60 | $0,82 \pm 0,02$ | $0,60 \pm 0,05$ | -26% | - | - | - |

Из приведенных результатов видно, что найденные значения альbedo в пределах 12% совпадают друг с другом. Наблюдающееся расхождение частично следует отнести за счет недостаточно точного соответствия эксперимента условиям теории, некоторой неопределенности выделения экспоненциально затухающей компоненты полного потока нейтронов, и частично несовершенства теории, в которой, например, не учитываются эффекты диффузионного охлаждения.

Таким образом, проведенные измерения показали, что метод измерения альbedo, изложенный в работе /3/, может быть успешно использован и при измерениях с жидким водородом. Найденное зна-

* Δ - значение относительной разности величин $k_0(\lambda_0)$ рассчитанных по формулам (I) и (2).

чение альbedo нейтронов для экспоненциально затухающего потока $k_0(\lambda_0) = 0,67 \pm 0,05$ при средней энергии нейтронов $40 \pm 7^\circ\text{K}$. Насколько известно авторам, величина альbedo для жидкого водорода определена впервые. При дальнейших усовершенствованиях теории и эксперимента результаты могут быть получены с более высокой точностью и для различных концентраций ортофазы.

Поступила в редакцию
14 апреля 1976 г.

Л и т е р а т у р а

1. К. Д. Ильева, М. В. Казарновский. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 3, 19 (1973).
2. К. Д. Ильева, М. В. Казарновский. "Атомная энергия", 39, 186 (1975).
3. Во-Дак Банг. Кандидатская диссертация, ФИАН, 1972 г.
4. А. В. Антонов и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 11, 34 (1973).
5. А. В. Антонов и др. Доклад на III Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 1975 г.
6. С. Б. Шихов, А. А. Шкурпелов. Сб. Теоретические и экспериментальные проблемы нестационарного переноса нейтронов, под ред. В. В. Орлова. М., Атомиздат, 1972 г.
7. А. В. Антонов и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 1, 50 (1970).