

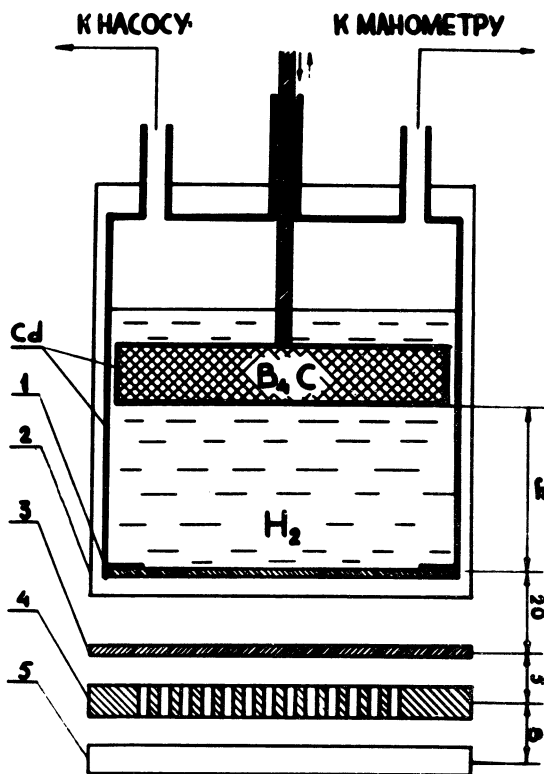
## ДИФфуЗИЯ И ТЕРМАЛИЗАЦИЯ НЕЙТРОНОВ В ЖИДКОМ ВОДОРОДЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А. В. Антонов, Во Дак Банг, А. И. Исаков,  
Ю. А. Меркульев, А. А. Тихомиров

Результаты, полученные в работе авторов<sup>1</sup>, приводят к выводу, что в жидком водороде диффузия и термализация нейтронов должны зависеть от температуры среды необычным образом. Изучение этих процессов как функции температуры и концентрации орто-фазы жидкого водорода является целью данной работы.

Нестационарная диффузия исследовалась импульсным методом. В работе использовалась установка-криостат, описанная в<sup>1</sup>, переоборудованная для целей данной работы. Установка (рис. 1) позволяла понижать температуру жидкого водорода до  $\sim 14^\circ\text{K}$  за счет откачки испаряющегося газа; температура определялась с точностью до  $\sim 0,1^\circ\text{K}$  по давлению насыщенных паров водорода с помощью табличных данных<sup>2</sup>. Измерения были проведены при концентрациях орто-фазы  $\sim 10\%$  и  $\sim 60\%$  при температуре жидкого водорода  $20,4^\circ\text{K}$  и  $15^\circ\text{K}$ .

Установка облучалась на импульсном нейтронном генераторе; вытекающие из объема под поршнем нейтроны регистрировались счетчиком, сигналы которого подавались на временной анализатор АИ-256. Из устанавливающихся при больших временах распределений находились значения константы  $\lambda$ , характеризующей затухание плотности нейтронов:  $N(t) = N_0 \exp(-\lambda t)$ . Согласно теории, изложенной, например, в<sup>3</sup>, значение



Р и с. 1. Схема измерительного устройства.

1 - дно водородного сосуда (толщина 4 мм - сталь);  
 2 - медный экран при температуре  $77^{\circ}\text{K}$  с прорезью над детектором; 3 - нейтронный фильтр (серебро или золото различных толщин); 4 - коллиматор (кадмий толщиной 4 мм с отверстиями диаметром 2 мм); 5 - детектор нейтронов - счетчик, наполненный  $\text{He}^3$ . Расстояния указаны справа в миллиметрах.

$\lambda$  связано со значениями коэффициента диффузии  $\bar{D}$ , диффузионного охлаждения  $C$  и среднего времени жизни  $(\bar{\Sigma}_a V)^{-1}$  соотношением

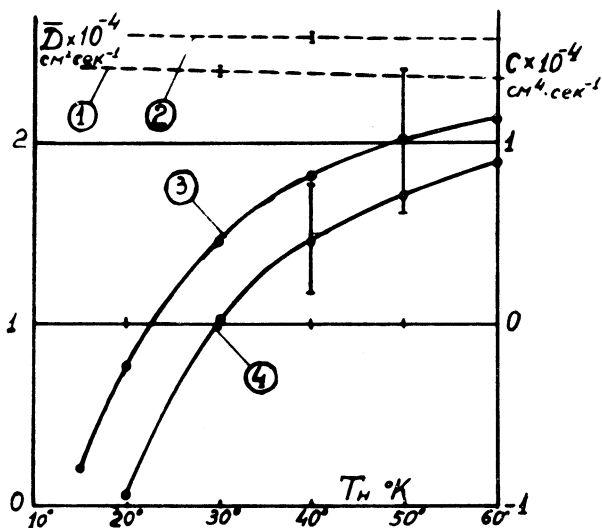
$$\lambda = (\bar{\Sigma}_a V) + \bar{D}B^2 - CB^4 + \dots \quad (1)$$

где  $B^2$  - наименьшее собственное значение оператора Лапласа для блока замедлителя, размеры которого (высота  $H$  и радиус  $R$ ) увеличены на  $Z_0 = 0,71 l_{tr}$ ;  $l_{tr}$  - транспортный пробег нейтрона

$$B^2 = \left(\frac{2,405}{R + Z_0}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H + 2Z_0}\right)^2. \quad (2)$$

Наборы значений, соответствующих одной и той же концентрации орто-фазы, использовались для определения  $\bar{D}$  и  $C$  по соотношению (1) методом наименьших квадратов. Параметр  $\bar{\Sigma}_a V$ , рассчитанный на основании литературных данных, был найден при температуре водорода  $20,4^\circ\text{K}$  равным  $3090 \text{сек}^{-1}$ , при  $15^\circ\text{K} - 3312 \text{сек}^{-1}$ .  $\bar{D}$  и  $C$  вычислялись по итерационному методу, описанному в<sup>1</sup>. Диффузионные параметры были определены при различных предположениях о средней скорости нейтронов, выбор которой был необходим для определения длины экстраполяции  $Z_0 = 2,13\bar{D}/V$ . Типичные зависимости  $\bar{D}$  и  $C$  от "температуры" нейтронов ( $T_n = mv^2/3k$ ) показаны на рис. 2. Из рисунка видно, что  $\bar{D}$  от  $T_n$  почти не зависит, а  $C$  при возрастании  $T_n$  меняется радикально, переходя от отрицательных (лишенных физического смысла) значений к положительным. При понижении температуры водорода (при ортоконцентрации 62%), коэффициент  $C$  увеличивается, что, по-видимому, связано с некоторой деформацией спектра нейтронов. Отношение коэффициентов диффузии, полученных при температурах водорода  $20,4^\circ\text{K}$  и  $15^\circ\text{K}$ , умноженное на отношение плотностей, близко к единице. Непосредственная оценка показывает, что в случае, если бы нейтроны приходили в равновесие со средой, это отношение было бы  $\sim 1,27$  (по данным работы<sup>4</sup>

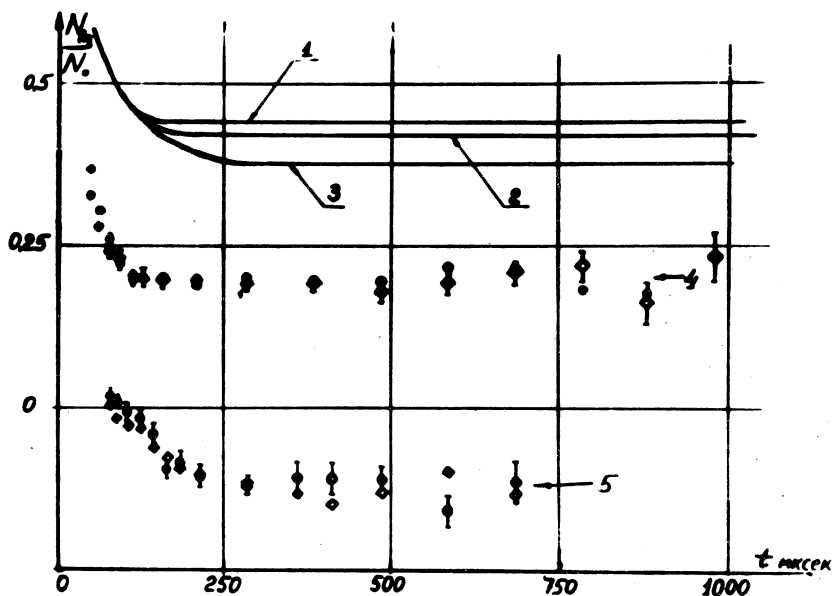
принималось, что  $\rho \bar{D} \sim v^{1,6}$ ). Таким образом, наблюдающаяся на эксперименте зависимость  $\bar{D}$  от температуры водорода свидетельствует об отсутствии температурного равновесия между нейтронами и термодинамически неравновесным жидким водородом.



Р и с. 2. Диффузионные параметры  $D$  и  $C$  в функции предполагаемой "температуры" нейтронов  $T_n$  ( $T_n = \frac{mv^2}{3k}$ ) для водорода при концентрации орто-фазы 62%. 1,2 - коэффициенты диффузии для температур водорода соответственно 15,5 и 20,4°К. 3,4 - коэффициенты диффузионного охлаждения для тех же температур.

Для исследования процесса термализации на установке (рис. 1) измерялись коэффициенты прозрачности фильтров "1/v" для нейтронов, прошедших через коллиматор (кадмиевую пластину толщиной 4 мм с отверстиями диаметром 2 мм). На рис. 3 показаны кривые прозрачности для одного и того же объема водорода ( $H = 27$  см) при концентрациях орто-фазы око-

ло 10, 30 и 60% и температурах 15 и 20,4°К. Из рисунка видно, что коэффициенты прозрачности при этих



Р и с. 3. Зависимость от времени прозрачности серебряного фильтра толщиной 1 мм для концентраций ортоводорода: 1 - 10%; 2 - 34%; 3 - 60% (кривые проведены по усредненным значениям экспериментальных точек для 15°К и 20,4°К). 4 - экспериментальные значения для концентрации орто-фазы 62% (смещены вниз на 0,25); 5 - для концентрации 10% (смещены вниз на 0,5); ○ - при температуре водорода 20,4°К; ◇ - при 15°К.

температурах близки друг к другу. При уменьшении концентрации орто-фазы они заметно уменьшаются. Первый из этих фактов свидетельствует о том, что средняя энергия нейтронов понижается медленнее, чем температура среды; второй, безусловно, связан с диффузионным охлаждением нейтронного спектра, с одной

стороны, и с приближением водорода к термодинамическому равновесию при уменьшении концентрации орто-фазы, с другой. По устанавливающимся коэффициентам прозрачности были определены "температуры" нейтронов  $T_n$  (соответственно скорости  $\bar{v}_n$ ), и с учетом их — приведенные в таблице значения параметров  $\bar{D}$  и  $C$ .

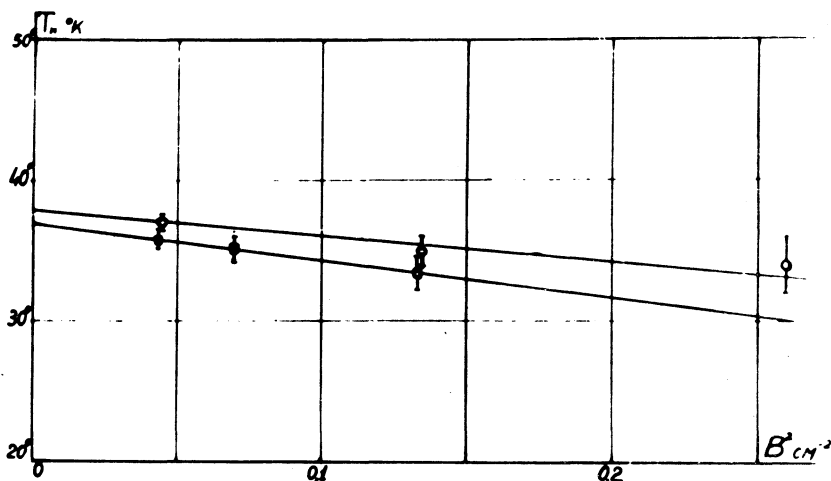
Таблица 1

Концентрация орто-фазы, %	Температура водорода, °К	Плотность водорода, г/см <sup>3</sup>	"Температура" нейтронов, °К
62 ± 2	20,4	0,071	38 ± 2
	15	0,076	37 ± 2
8 ± 2	20,4	0,071	28 ± 3
	15	0,076	25 ± 3

$\bar{D} \times 10^{-4}$ , см <sup>2</sup> сек <sup>-1</sup>	$C \times 10^{-4}$ , см <sup>4</sup> сек <sup>-1</sup>	$\frac{\rho_{20} \bar{D}_{20}}{\rho_{15} \bar{D}_{15}}$
2,58 ± 0,08	0,42 ± 0,25	1,02 ± 0,04
2,38 ± 0,08	0,65 ± 0,25	
11,7 ± 0,3	27,0 ± 6,0	1,05 ± 0,04
10,4 ± 0,4	26,0 ± 6,0	

При определении  $T_n$  вводилась поправка на искажение спектра при фильтрации нейтронов через стальное дно криостата (толщиной 4 мм) и поправка, учитывающая пролетное расстояние<sup>5</sup>.

В таблице 1 значения  $T_n$  даны для безграничной среды; они определены путем экстраполяции к  $V^2 = 0$  графиков  $T_n = f(V^2)$  типа приведенных на рисунке 4. Этот рисунок показывает, что при возрастании



Р и с. 4. "Температура" нейтронов, получаемая для различных объемов жидкого водорода при концентрации орто-фазы 60%.  $\circ$  - для температуры водорода 20,4°К  
 $\square$  - для температуры 15°К.

$V^2$  происходит заметное диффузионное охлаждение нейтронного спектра. Значения  $C$ , оцененные по этим измерениям, не противоречат величинам, найденным из диффузионных измерений.

Анализ приведенных данных позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Температурное равновесие между нейтронами и жидким водородом с заметным содержанием орто-фазы ( $> 8\%$ ) при температурах от 15°К до 20,4°К не устанавливается. При диффузии нейтронный газ непрерывно подогревается при актах неупругого рассеяния нейтронов на молекулах ортоводорода, переводящих их в

пара-состояние. В результате этого процесса средняя энергия нейтронов в полтора-два раза превышает среднюю энергию теплового движения молекул водорода.

2. При диффузии в ограниченных объемах в жидком водороде отчетливо наблюдается явление диффузионного охлаждения спектра нейтронов.

В заключение авторы благодарят Б. В. Гранаткина за участие в предварительных экспериментах и М. В. Казарновского за многочисленные полезные обсуждения.

Поступила в редакцию  
31 июля 1970 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. А. В. Антонов, Во Дак Банг, Б. В. Гранаткин, А. И. Исаков, Ю. А. Меркульев, А. А. Тихомиров. Сборник "Краткие сообщения по физике" № 1, 50 (1970).
2. Справочник "Свойства жидкого и твердого водорода". Издательство стандартов, Москва 1969 г. стр. 6 и 9.
3. К. Беркуц, К. Виртц. "Нейтронная физика" Атомиздат, Москва, 1968 г.
4. J. U. Koppel and J. A. Young. Phys. Rev., 135, A603 (1964).
5. L. Pal et al. Pulsed Neutron Research (IAEA), v.1, 165 (1965).