

ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕСИ ТВЕРДОЙ И ЖИДКОЙ ФАЗ ВОДОРОДА  
МЕТОДОМ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ДИФФУЗИИ

А. В. Антонов, А. И. Исаков, И. А. Копысов, В. И. Куликов,  
О. А. Лангер, П. А. Меркульев, А. И. Никитенко, А. А. Тихомиров

УДК 539.125.52

Исследовалась нестационарная диффузия нейтронов в смеси твердой и жидкой фаз водорода (вблизи тройной точки). При концентрации ортофазы 68% определен коэффициент диффузии для твердого водорода  $D = (2,01 \pm 0,06) \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$ .

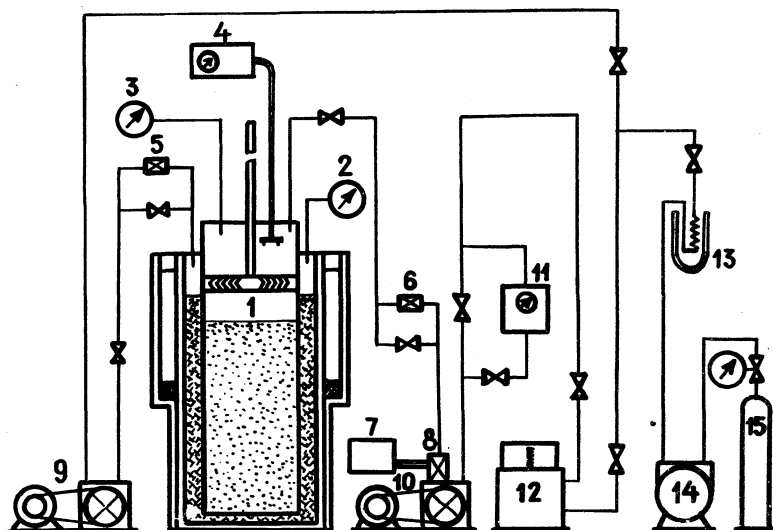
Ранее авторами /1,2,3/ было показано, что при диффузии нейтронов в термодинамически неравновесном жидком водороде нейтронный газ в температурное равновесие со средой не приходит, и его средняя "температура" почти в два раза превышает температуру жидкого водорода. В свете этих работ представляет интерес исследовать термализацию и диффузию нейтронов также и при замерзании водорода. Кроме того, поскольку подобные эксперименты позволяют с высокой точностью измерять коэффициент диффузии максвелловских нейтронов, они являются существенным дополнением к измерениям дифференциальных сечений нейтронов в жидком и твердом водороде /4/.

В данной работе исследовалась диффузия нейтронов в смеси жидкой и твердой фаз - "шуге" при температуре 14 К и давлении 52 мм рт. ст. (тройная точка). Известно /5/, что для определения коэффициентов диффузии  $D$ , диффузионного охлаждения  $c_2$ , времени жизни  $\lambda_0^{-1}$  нейтронов необходимо измерить постоянные  $\lambda$  экспоненциального закона затухания плотности нейтронов со временем для ряда блоков исследуемого вещества, размер которых характеризуется геометрическим параметром  $B^2$ . Параметры диффузии определяются из соотношения

$$\lambda = \lambda_0 + DB^2 - cB^4 + \dots$$

Для получения "шуги" была создана установка, показанная на рис. 1. "Шуга" находилась в цилиндре радиуса  $R = 9$  см под

поршнем, высота которого над дном могла изменяться от нуля до  $h = 50$  см. Внутренняя поверхность цилиндра и поршень были кадмированы; в кадмиевом покрытии дна была прорезь, под которой располагался счетчик нейтронов (СНМ-17).



Р и с. 1. Блок-схема установки для получения "шуги". I - криостат, 2,3 - манометры, 4 - датчик уровня водорода с измерительной схемой, 5,6 - автоматические регуляторы давления, 7 - система управления электромагнитным клапаном, 8 - электромагнитный клапан, 9 - малый форвакуумный насос, 10 - большой форвакуумный насос, II - газовый счетчик, 12 - газгольдер, 13 - азотная ловушка, 14 - компрессор, 15 - баллон

Сосуд с "шугой" находился в водородной рубашке, температура водорода в которой составляла  $\sim 14$  К. Таяние твердой фазы происходило почти исключительно в результате орто-пара конверсии водорода и "шуга" сохранялась 1-2 часа. "Шуга" получалась при интенсивной откачке водородного пара из криостата, наполненного жидким водородом. В предварительных экспериментах было установлено, что

при скорости откачки  $0,8-1,2 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ , если ее вести в прерывистом режиме (10-20 с откачка, 50-90 с перерыв для того, чтобы твердая фаза с поверхности успела опуститься на дно криостата), образуется "шуга" с содержанием твердой фазы 40-60% (по весу). Твердый водород получается в виде мелких кристаллов (1-3 мм). Образующаяся "шуга" дополнительно отжималась перфорированным поршнем. Избыток жидкости оказывался над поршнем, а под ним содержание твердой фазы увеличивалось до 80-90%. Концентрация твердой фазы рассчитывалась, исходя из измеренного значения плотности "шуги"  $\rho$ . Для определения  $\rho$  перед нейтронным экспериментом измерялась толщина слоя "шуги"  $h_0$  и толщина слоя жидкого водорода над поршнем  $h_1$  (температура которого составляла 14 К, плотность  $\rho_{14} = 76,89 \text{ кг}/\text{м}^3$ ). После окончания нейтронных измерений, таяния "шуги" и нагревания жидкого водорода до  $T = 20,4 \text{ К}$  (плотность  $\rho_{20,4} = 70,99 \text{ кг}/\text{м}^3$ ) определялась сумма толщин слоев водорода над и под поршнем  $h_2$ , а также (с помощью газгольдера) масса испарившегося газа  $m$ . Величина  $\rho$  рассчитывалась по формуле

$$\rho = \left[ m - \pi R^2 (\rho_{14} h_1 - \rho_{20,4} h_2) \right] (\pi R^2 h_0)^{-1}.$$

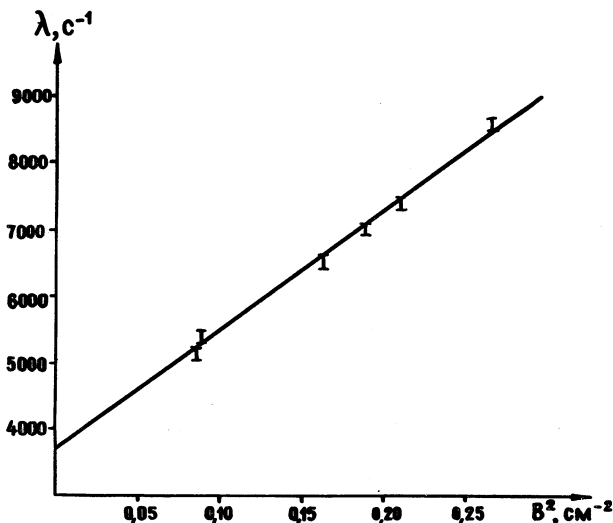
Точность измерения величин  $h_0$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  составляла  $\sim 10^{-2}$  см, величина  $\rho$  определялась с погрешностью  $\sim 0,8+0,9\%$ , содержание твердой фазы, рассчитываемое, исходя из значения  $\rho$  - с точностью 7-8%.

Нейтронные измерения проводились с помощью импульсного нейтронного генератора, управляющих и регистрирующих электронных схем, описанных в работе /1/.

На опыте измерялись зависимости скорости счета нейтронов от времени, прошедшего после срабатывания нейтронного генератора. По полученным "кривым затухания" определялись значения  $\lambda$ . Измерения были проведены при шести различных значениях  $h_0$ : 224, 206, 90, 79, 72 и 60 мм.

До и после измерений с "шугой" снимались калибровочные зависимости с жидким водородом при  $T = 20,4 \text{ К}$ . Эти зависимости служили для дополнительного контроля концентрации ортофазы /1/. Ее среднее значение для двух первых больших объемов было 64%, для остальных - 68%. Соответственно плотность шуги составляла  $(85 \pm 0,8) \text{ кг}/\text{м}^3$  и  $(84,7 \pm 0,7) \text{ кг}/\text{м}^3$ , что отвечает содержаниям твердой

фазы (87±8)% и (80±7)%. Для определения параметров диффузии значения  $\lambda$  для двух больших объемов были приведены к плотности и концентрации, которые соответствовали четырем малым объемам. При введении поправки на изменение концентрации от 64% до 68% мы поль-



Р и с. 2. Зависимость  $\lambda(B^2)$  для "шуги" при концентрации ортофазы 68%, температуре 14 К, содержании твердой фазы (80±7)%

зовались зависимостью  $D$  от концентрации ортофазы для жидкого водорода [1] и считали, что  $\lambda_0$  в "шуге" отличается от  $\lambda_0^* = 3090 \text{ с}^{-1}$  для жидкого водорода при  $T = 20,4 \text{ К}$  только вследствие различия их плотностей. Поправки в  $\lambda$  были отрицательны и составляли около 2% от  $\lambda$ . По шести значениям  $\lambda$ , соответствующим 68% концентрации ортофазы при содержании твердого водорода (80±7)% методом наименьших квадратов были найдены значения  $D$  и  $C$  ( $D = (2,03 \pm 0,06) \cdot 10^4 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $C = 6500 \pm 2500 \text{ см}^4 \cdot \text{с}^{-1}$ ). На рис. 2 показана зависимость постоянной спада  $\lambda$  от  $B^2$  и нанесены экспериментальные точки (величина  $\lambda_0$  принималась равной  $3690 \text{ с}^{-1}$ ). Исходя из найденного значения  $D$  для "шуги" с 80% содержанием твердой фазы и коэффициента диффузии для жидкого водорода при

14 К /1-3/  $D_{\text{ж}} = (2,12 \pm 0,04) \cdot 10^4 \text{ см}^3/\text{с}$  мы путем интерполяции оценили коэффициент диффузии для 100% "шуги" - твердого водорода  $D_{\text{ТВ}} = (2,01 \pm 0,06) \cdot 10^4 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ .

Согласно нашим измерениям  $(D_{\text{ж}} - D_{\text{ТВ}})/D_{\text{ж}} = (5,2 \pm 3,5)\%$ . Это различие может проистекать из-за следующих трех причин: возрастания плотности среды при замерзании водорода, изменения транспортного сечения, изменения средней скорости нейтронов. Первый из этих факторов должен привести к уменьшению коэффициента диффузии при замерзании водорода на  $(\rho_{\text{ТВ}} - \rho_{\text{ж}})/\rho_{\text{ж}} \approx 12\%$ . Вопрос об изменении  $\sigma_t$  при изменении агрегатного состояния сложен и требует дополнительного исследования. Однако, исходя из качественных соображений, мы полагаем, что вероятнее всего  $\sigma_t$  при замерзании водорода увеличивается вследствие возрастания связанности рассеивающих ядер. Следовательно, этот фактор может привести только к уменьшению коэффициента диффузии.

Таким образом, результаты эксперимента показывают, что средняя скорость нейтронов при замерзании водорода во всяком случае не убывает, но, по-видимому, даже несколько возрастает ( $\approx$  на 7%).

Поступила в редакцию  
20 июля 1977 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 ФИАН", № 1, 50 (1970).
2. А. В. Антонов, Во Дак Банг, А. И. Исаков, Ю. А. Меркульев, А. А. Тихомиров, Сборник "Краткие сообщения по физике ФИАН", № 3, 86 (1970).
3. А. В. Антонов, Во Дак Банг, А. И. Исаков, Ю. А. Меркульев, Сборник "Краткие сообщения по физике ФИАН", № 1, 58 (1971).
4. "Рассеяние тепловых нейтронов" под ред. Игелстаффа, Атомиздат, Москва, 1970 г.
5. К. Бекурц, К. Виртц, "Нейтронная физика", Атомиздат, Москва, 1968 г.