

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



СЗ42Г1

Г-899

2505/2-76

5/ок-76

P3 - 9534

Л.В.Грошев, В.И.Лушиков, С.А.Николаев,
Ю.Н.Панин, Ю.Н.Покотиловский, А.В.Стрелков

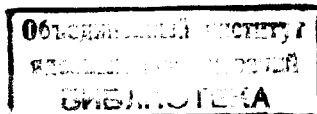
ХРАНЕНИЕ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ
В МЕДНЫХ СОСУДАХ

1976

РЗ - 9534

Л.В.Грошев, В.И.Лушиков, С.А.Николаев,
Ю.Н.Панин, Ю.Н.Покотилловский, А.В.Стрелков

**ХРАНЕНИЕ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ
В МЕДНЫХ СОСУДАХ**



Эксперименты по хранению УХН в сосудах из различных материалов /1-4/ показали, что времена хранения, как правило, оказываются значительно меньше ожидаемых значений, рассчитанных исходя из сечений захвата и неупругого рассеяния для тепловых и холодных нейтронов. Однако строгая количественная оценка наблюдаемого расхождения во всех выполненных экспериментах затруднялась тем фактом, что в сосудах хранились и детектором регистрировались ультрахолодные нейтроны относительно широкого спектра. Кривые хранения /т.е. зависимость числа остающихся в сосуде нейтронов от времени выдержки/ в этом случае не описывались простой экспоненциальной функцией. Процедура извлечения из экспериментальных кривых эффективного коэффициента поглощения УХН при однократном соударении со стенкой /именно этот коэффициент сопоставляется с теоретически ожидаемым/ включала предположения о том, что начальный спектр хранящихся УХН является максвелловским, т.е. $N(E)dE \sim E^{-1/2} dE$, эффективность детектора не зависит от энергии нейтрона и угловое распределение хранящихся нейтронов является изотропным. Все эти предположения в силу значительных технических трудностей не проверялись и, по всей видимости, в эксперименте хорошо не выполнялись.

Чтобы избавиться от указанных трудностей, мы провели измерения μ -эффективного коэффициента поглощения УХН для узких энергетических интервалов. При этом можно было надеяться, что, помимо более точного определения экспериментального значения μ , измерение зависимости μ от энергии нейтронов может пролить свет на механизм аномально большого поглощения УХН в стенках сосудов.

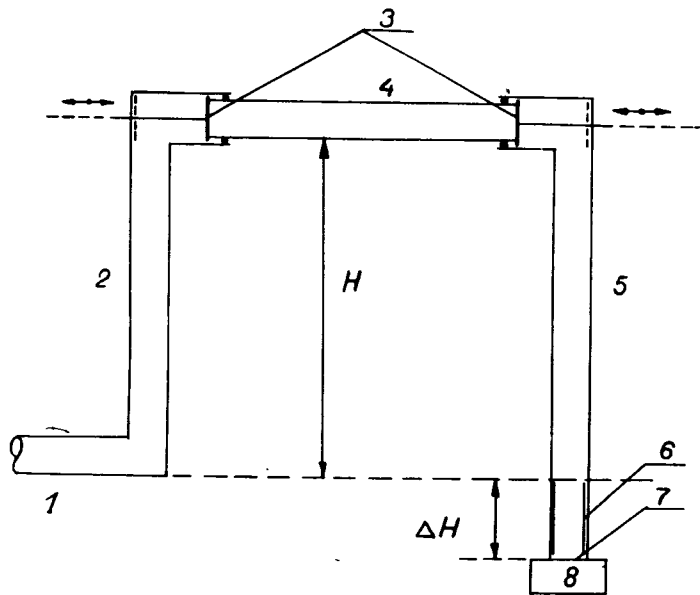


Рис. 1. Схема эксперимента по измерению времени хранения УХН для узких энергетических интервалов/пояснение в тексте/.

В работах /3/ , где исследовалось хранение УХН разных энергетических интервалов в сосудах из меди и графита, для ограничения интервала энергий нейтронов снизу применялся набор фольг из различных материалов, располагаемых перед детектором. При использовании такого способа измерения для получения информации о временах хранения и коэффициента поглощения УХН разных энергий необходимо было в дополнительных экспериментах измерять спектр заполняющих сосуд УХН, а также в других, весьма трудоемких экспериментах, определять граничные скорости для каждой из применяемых в измерениях фольг. Кроме того, оставался открытым вопрос о зависимости эффективности детектора от энергии УХН.

В настоящей работе реализован более простой способ измерения времени хранения УХН для достаточно узких энергетических интервалов /~ 10 нэВ, а, в прин-

ципе, возможно, и более узких/. Способ заключается в комбинированном использовании замедления и ускорения УХН в поле тяжести и одной фольги из материала с известной граничной скоростью. На рис. 1 показана схема эксперимента. На схеме: 1 - участок вакуумированного нейтроновода, по которому УХН поступают к устройству для измерения времени хранения, 4 - сосуд для хранения УХН, 3 - впускной и выпускной клапаны УХН, 7 - фольга из материала с известной граничной энергией E_{ϕ} , располагаемая непосредственно перед детектором УХН /8/, 6 - вертикальный участок нейтроновода длиной ΔH со стенкой из материала с граничной скоростью более высокой, чем граничная скорость материала фольги. При использовании входного нейтроновода 1 с достаточно большим количеством поворотов спектр УХН, поступающих к установке, резко обрывается сверху при энергии, равной $E_{гр}$ материала нейтроновода /см.^{1/}/. При диффузии УХН в поле тяжести на вертикальном участке нейтроновода 2 весь спектр УХН смещается вниз по шкале энергии на величину mgH / H - высота подъема УХН на участке 2, g - ускорение свободного падения/, на участке 5 нейтроны восстанавливают первоначальную энергию. В простейшем варианте описываемого метода, когда $E_{гр} = E_{\phi}$ /использовались медный нейтроновод и медная фольга/, в детектор попадают нейтроны, имеющие на уровне детектора энергию в фиксированном интервале

$$E_{гр} + mg\Delta H > E > E_{гр} \quad /1/$$

Нейтроны с меньшей энергией через фольгу не проходят, нейтроны с большей энергией в спектре отсутствуют. Это последнее обстоятельство проверялось в дополнительных измерениях в геометрии, когда $\Delta H = 0$ и оба клапана открыты. При этом счет нейтронов уменьшается в 15 ± 40 раз по сравнению с измерениями в случае, когда $\Delta H = 25$ см, и в 5 раз по сравнению со случаем $\Delta H = 10$ см.

В измерительном объеме, находящемся на высоте H над уровнем нейтроновода, этому интервалу регистри-

руемых детектором нейтронов соответствует интервал энергий

$$E_{гр} - mgH > E > E_{гр} - mg(H + \Delta H). \quad /2/$$

Меняя таким образом высоту H , можно провести измерение времени хранения УХН для любого участка шириной $mg\Delta H$ в доступном диапазоне энергий нейтронов: $0 < E < E_{гр}$. При этом отпадает необходимость учета энергетической зависимости эффективности детектора, так как независимо от H детектор регистрирует нейтроны в узком фиксированном интервале /1/. Процесс измерения времени хранения, вакуумные условия и способ обработки поверхности медного сосуда были такими же, как в работе /2/. На рис. 2 показаны полученные этим методом кривые хранения УХН для различных интервалов энергий нейтронов.

Для извлечения из полученных экспериментальных данных о временах хранения УХН в узких интервалах энергии / $\Delta H = 25$ см соответствует 25 нэВ энергии нейтрона / информации о коэффициенте поглощения УХН в этих интервалах используется лишь предположение об изотропности потока УХН в сосудах во время хранения, справедливость которого будет обсуждена ниже. В этом случае легко можно вычислить длину свободного пробега нейтрона между столкновениями со стенкой. Коэффициент поглощения μ выражается следующим образом через измеренное время хранения T /с учетом поправки на распад нейтрона/:

$$\mu = \frac{d}{v} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right), \quad /3/$$

где d - средняя длина пробега нейтрона между столкновениями со стенками сосуда, v - средняя скорость нейтронов в рассматриваемом интервале энергий УХН, T_0 - время жизни нейтрона до β -распада. Средняя длина пробега вычислилась по газокинетической формуле, справедливой для изотропного потока нейтронов

$$d = \frac{4V}{S}, \quad /4/$$

где V - объем сосуда, S - площадь внутренней поверхности.

Полученная таким образом зависимость $\mu(v)$ для электрополированной медной поверхности показана на рис. 3 /точки на кривой 1/. Там же приведена теоретическая кривая 2 для среднего по углам падения нейтрона коэффициента эффективного поглощения

$$\mu_0 = \frac{2\eta}{y^2} (\arcsin y - y \sqrt{1-y^2}), \quad /5/$$

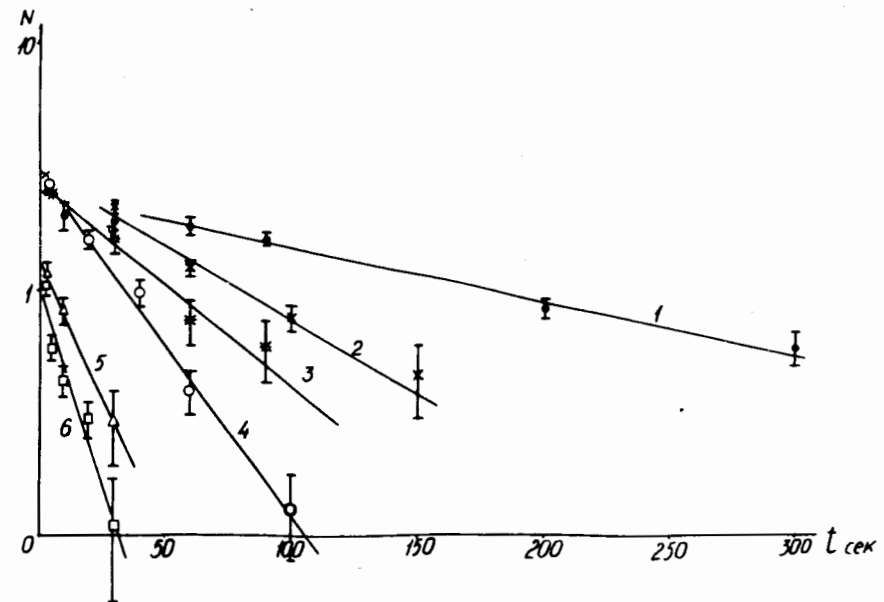


Рис. 2. Кривые хранения в медном сосуде размером $68,5 \times 200$ см нейтронов с разными энергиями.
 1 - /5-30/ нэВ = /200+17/ с,
 2 - /50-75/ нэВ = /70,4+5,5/ с,
 3 - /65-90/ нэВ = /52,0+7,3/ с,
 4 - /95-120/ нэВ = /32,2+2,3/ с,
 5 - /145-170/ нэВ = /20,5+5,0/ с,
 6 - /160-170/ нэВ = /13,5+4,0/ с.

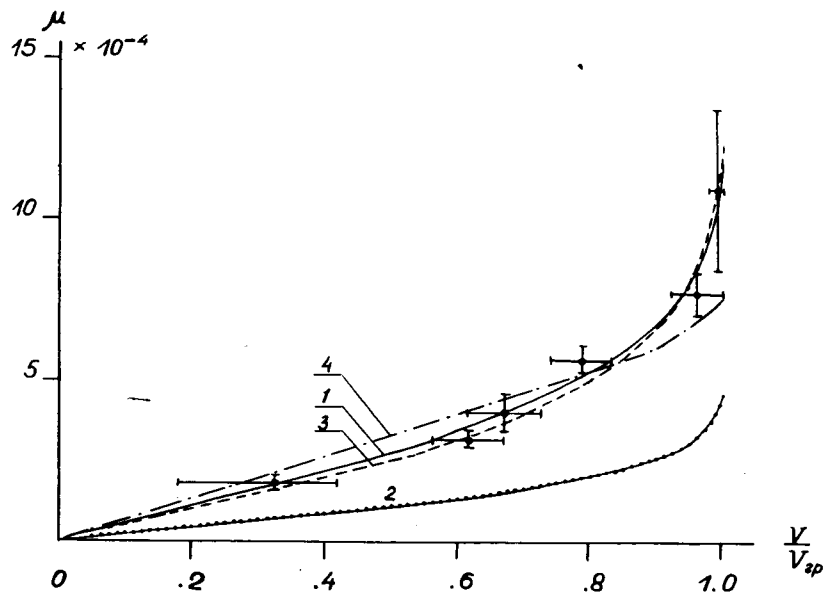


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения УХН в медном сосуде от скорости нейтронов. Горизонтальные линии на экспериментальных точках указывают полный интервал скоростей нейтронов, хранящихся в сосуде. Пояснения к кривым - в тексте.

справедливая в случае идеально гладкой поверхности с резкой границей вещество - вакуум. Здесь $y = v/v_{gp}$,

$$\eta = \frac{\text{Im } b}{\text{Re } b} = \frac{\sigma_z + \sigma_{ny}}{2 b \lambda},$$

b - длина рассеяния, σ_z, σ_{ny} - сечения захвата и неупругого рассеяния, λ - длина волны нейтрона. В расчете принято согласно /5/ $\sigma_z + \sigma_{ny} = 873$ барн при $v = 10$ м/с и температуре 303°K , $b = 0,76 \cdot 10^{-12}$ см и соответственно $\eta_{Cu} = 1,45 \cdot 10^{-4}$. Все экспериментальные точки лежат значительно выше этой теоретической кривой и в пределах точности эксперимента одинаково хорошо описываются тремя возможными механизмами повышенного поглощения УХН в стенках сосуда.

а/ Суммарное сечение захвата и неупругого рассеяния УХН /например, за счет загрязнений, распределенных в поверхностном слое/ примерно в 2,6 раза больше сечения для чистой меди /кривая 1, рис. 3, рассчитанная по формуле /5/ с параметром $\eta = 3,74 \cdot 10^{-4}$ /.

б/ Поверхность сосуда не является идеально гладкой. Для количественного расчета влияния шероховатости поверхности использовалась простейшая однопараметровая модель с размытым потенциалом на границе вещество -

вакуум вида $U(z) = \frac{\hbar^2}{2m} U_{gp} (1 + \exp(-\frac{z}{a}))^{-1}$, имеющая строгое решение /6/ и дающая для усредненного по углам падения коэффициента поглощения следующее выражение:

$$\mu = \mu_0 + \frac{4\eta}{y^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{U_{gp} a^2}{n^2} \arctg \left(\frac{ny}{n\sqrt{1-y^2} + \sqrt{U_{gp}} a} \right) + \arctg \left(\frac{\sqrt{U_{gp}} a y}{n + \sqrt{U_{gp}} a \sqrt{1-y^2}} \right) - \frac{y \sqrt{U_{gp}} a}{n} \right]. \quad /6/$$

Результаты расчета с параметром размытия $a = \lambda_{gp} = 110 \text{ \AA}$ и при $\eta = \eta_{Cu} = 1,45 \cdot 10^{-4}$ представлены кривой 3 рис. 3.

в/ На поверхности сосуда имеется водяная /или масляная/ пленка, приводящая из-за большого сечения неупругого рассеяния нейтронов на водороде к нагреванию УХН при прохождении через нее. Дополнительное поглощение УХН в такой пленке согласно /7/ равно $\mu_{пл} =$

$$= \frac{m \lambda}{\pi \hbar^2} \text{Im} \int \psi^* U_{пл} \psi dr. \quad \text{Полагая потенциал пленки}$$

$U_{пл}$ чисто мнимым и усредняя поглощение в пленке по углам падения, можно получить, что

$$\mu = \frac{4\eta_{пл} t}{y} \left[1 - \frac{1}{t} \int_0^1 \left(\frac{1-2y^2 x^2}{2xy} \sin 2xyt - 2 \sqrt{1-y^2 x^2} \sin^2 xyt \right) dx, \quad /7/ \right]$$

где $\eta_{пл} = \frac{Im U_{пл}}{E_{гр}}$, $y = v/v_{гр}$, t - толщина пленки в единицах $\lambda_{гр}$, $E_{гр}$, $v_{гр}$, $\lambda_{гр}$ - соответственно граничная энергия, скорость и длина волны для материала стенки сосуда.

Кривая 4 рис. 3 получена суммированием поглощения /7/ в пленке /предполагалась водяная пленка с сечением нагрева $3,1 \cdot 10^3$ барн/молекулу при $v = 10$ м/с толщиной $t = 0,5 \lambda_{гр} = 55 \text{ \AA}$ / и поглощения в медной стенке /5/.

Ни один из трех рассмотренных механизмов не представляется нам целиком ответственным за аномально большое поглощение УХН, поскольку получаемые значения параметров η , a , t заметно превышают их оценочные величины. В то же время, к сожалению, приведенные экспериментальные данные не позволяют полностью исключить какой-либо из этих механизмов. Повышение точности измерений зависимости μ от энергии нейтронов, по-видимому, мало прояснит картину, так как в любое из описаний можно внести дополнительные параметры /распределение примесей на поверхности, параметры шероховатости, граничную энергию, пленки и т.д./, улучшающие согласие модели с экспериментом. Большая однозначность в определении механизма поглощения УХН, на наш взгляд, может быть получена путем прямого измерения влияния на μ физических характеристик поверхности сосуда или его температуры.

Использованное выше предположение об изотропности потока УХН внутри измерительного сосуда качественно следует из того, что вероятность диффузного отражения нейтрона от стенки сосуда велика /согласно работам^{1,8/} для электрополированной меди она составляет несколько процентов/ по сравнению с вероятностью поглощения нейтрона $\mu \sim \eta \sim 10^{-3}$, т.е. изотропность потока УХН устанавливается значительно быстрее, чем идет его ослабление.

Для проверки этого предположения были выполнены измерения с сосудами различных размеров, т.е. с разной средней длиной свободного пробега УХН. На рис. 4 приведены результаты измерений времени хранения УХН

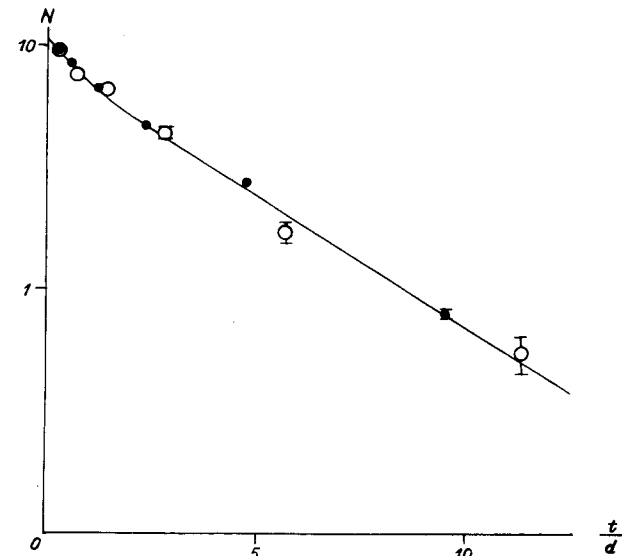


Рис. 4. Кривая хранения УХН в сосудах из меди $\phi 8,5$ см и длиной 200 см /темные точки/ и 20 см /светлые точки/. По оси абсцисс - отношение времени выдержки к длине свободного пробега в с/см.

для спектра скоростей с границами 3,2 - 5,7 м/с в цилиндрических сосудах диаметром 8,5 см и длиной 200 см /темные точки/ и 20 см /светлые точки/. Экспериментальные точки удовлетворительно описываются единой кривой, зависящей от отношения времени хранения t к средней длине свободного пробега d , вычисленной по формуле /4/ для изотропного потока /т.е. от среднего числа столкновений со стенкой сосуда/. Эти результаты подтверждают отсутствие каких-либо эффектов выстраивания потока УХН при хранении в медных сосудах.

Авторы выражают большую признательность В.К.Игнатовичу за полезные дискуссии и помощь в расчетах.

Литература

1. Л.В.Грошев и др. Препринт ОИЯИ, РЗ-5392, Дубна, 1970.

2. Л.В.Грошев и др. Препринт ОИЯИ, РЗ-7282, Дубна, 1973. Материалы конференции по нейтронной физике, Киев, 1973.
3. A.Steyerl, W.D.Trustedt. *Z.Physik*, 267, 379 (1974).
4. А.И.Егоров и др. *ЯФ*, 19, 300 /1974/.
5. A.Steyerl, H.Vonach. *Z.Physik*, 250, 166 (1972).
6. В.К.Игнатович. Препринт ОИЯИ, Р4-7055, Дубна, 1973.
7. В.К.Игнатович. А.В.Степанов. Препринт ОИЯИ, Р4-7832, Дубна, 1974.
8. A.Steyerl. *Nucl.Instr. and Meth.*, 101, 295 (1972).

Рукопись поступила в издательский отдел
11 февраля 1976 года.