

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕЙТРОНА МЕТОДОМ ХРАНЕНИЯ УХН С РЕГИСТРАЦИЕЙ НЕУПРУГО РАССЕЯННЫХ НЕЙТРОНОВ

В.Мампе*, Л.Н.Бондаренко, В.И.Морозов, Ю.Н.Панин, А.И.Фомин

*Российский научный центр "Курчатовский институт"
123182, Москва, Россия*

**Институт Лауз-Ланжевена, Гренобль*

Поступила в редакцию 18 декабря 1992 г.

Выполнены измерения времени жизни нейтрона посредством хранения ультрахолодных нейтронов с одновременной регистрацией неупруго рассеянных на стенках сосуда нейтронов. Полученный результат составил $\tau_n = 882, 6 \pm 2, 7$ с.

Задача измерения времени жизни нейтрона традиционно решалась либо пучковым методом, либо методом хранения ультрахолодных нейтронов (УХН). При использовании метода хранения УХН как правило проводится два или более эксперимента по хранению УХН в сосудах с различной частотой стеночных соударений нейтронов¹⁻⁵. Далее, расчетным путем находится соотношение ξ между вероятностями потерь УХН при взаимодействии со стенками сосудов, отличающихся частотой соударений. Совокупность данных по характерным временам хранения УХН и значениям ξ позволяет определить τ_n . Основная погрешность измерения τ_n данным методом имеет систематический характер и связана с расчетным характером определения отношения ξ . При расчете этой величины обычно используются предположения или гипотезы, которые нетривиальны в своем экспериментальном обосновании (идентичность качества поверхностей сосудов, теоретический вид зависимости коэффициента потерь от скорости УХН, изотропность углового распределения потока УХН в сосудах и др.). В настоящей статье описана новая методика измерения τ_n , основанная на хранении УХН в сосудах с одновременной регистрацией нейтронов, покидающих сосуд при неупругом взаимодействии со стенками. Особенностью ее является то, что величина ξ определяется экспериментально, и, таким образом, процедура измерения τ_n сводится к измерению только относительных величин.

Известно, что при хранении УХН в сосуде их количество $N(t)$ с течением времени t уменьшается по закону $N(t) = N(0) \exp(-\lambda_{t1}t)$, где $\lambda_{t1} = \lambda_n + \lambda_1$ - полная вероятность потерь УХН в единицу времени, усредненная на интервале $(0 - t)$, $\lambda_n = \tau_n^{-1}$ - вероятность распада нейтрона, λ_1 - вероятность потерь при столкновениях со стенками сосуда. Величина λ_1 является суммой вероятностей потерь по каналу захвата λ_c и неупругого рассеяния $\lambda_1 = \lambda_{c1} + \lambda_{ie1} = \lambda_{ie1}(1 + \lambda_{c1}/\lambda_{ie1})$. В эксперименте по хранению УХН можно определить λ_{t1} , если измерить начальное количество нейтронов в сосуде $N(0)$ и количество нейтронов, сохранившихся в сосуде к некоторому моменту t_1 . Если используемый в эксперименте сосуд окружен детекторами тепловых нейтронов, позволяющими вести регистрацию неупруго рассеянных (нагретых) на его стенках УХН, то при хранении нейтронов можно определить вероятность утечки УХН по каналу неупругого рассеяния λ_{ie1} для данного сосуда:

$$\lambda_{ie1} = \frac{J_1 \lambda_{t1} \epsilon}{[N_1(0) - N_1(t_1)] \epsilon t h} \quad (1)$$

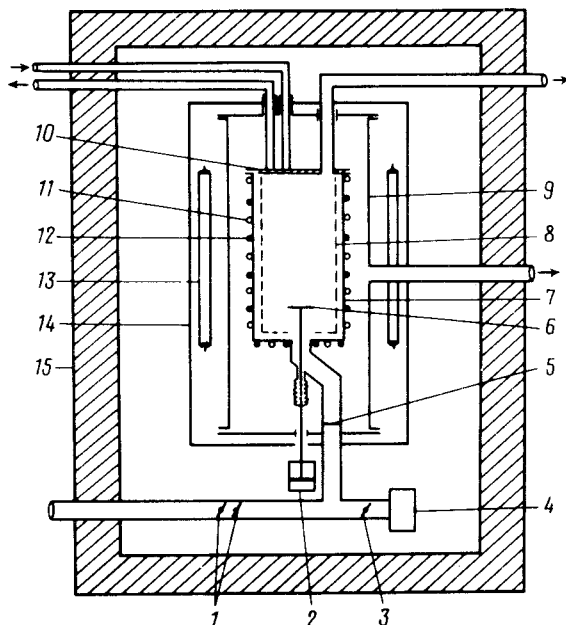


Рис.1. Схема измерительной установки. 1 - Входные заслонки нейтроновода УХН. 2 - Привод управления тарелочной заслонки 6 впуска/выпуска сосуда хранения. 3 - Заслонка детектора УХН. 4 - Детектор УХН. 5 - Тонкая (0,1мм) алюминиевая диафрагма, отделяющая высоковакуумный объем сосуда хранения от нейтроноводов. 6 - Тарелочная заслонка. 7 - Сосуд хранения. 8 - Дополнительная поверхность. 9 - Внешний вакуумный кожух установки. 10 - Рассеиватель, очищающий спектр от "надкритичных" УХН. 11 - Трубка змеевика охлаждения сосуда хранения. 12 - Нагреватель сосуда хранения. 13 - Детекторы тепловых нейтронов, возникающих от неупругого рассеяния УХН на поверхности сосуда хранения. 14 - Кадмиевая защита установки

В этом соотношении J_1 - счет нагретых нейтронов за интервал времени $(0 - t_1)$; $N(0)$ и $N(t_1)$ - количество нейтронов, зарегистрированных детектором УХН в сосуде соответственно для начального и конечного момента хранения, ϵ_{th} - эффективность регистрации нагретых нейтронов, ϵ - эффективность регистрации УХН, накопленных в сосуде. Из соотношения (1) видно, что величина λ_{ie1} определяется с точностью до неизвестного отношения эффективностей ϵ/ϵ_{th} . Возможность измерения λ_n появляется, если в сосуде контролируемым образом изменить вероятность потерь УХН при их взаимодействии со стенками. Для этого в сосуд нужно ввести дополнительную поверхность из того же материала, что и стенки сосуда, сохранив при этом величины ϵ , ϵ_{th} и отношение λ_c/λ_{ie} . Проведя хранение УХН в сосуде с дополнительной поверхностью, можно получить величину полной вероятности утечки λ_{t2} и значение

$$\lambda_{ie2} = \frac{J_2 \lambda_{t2} \epsilon}{[N_2(0) - N_2(t_2)] \epsilon_{th}}, \quad (2)$$

где J_2 - счет внешнего детектора тепловых нейтронов за интервал времени $(0 - t_2)$, $N_2(0)$ и $N_2(t_2)$ - количества УХН, зарегистрированные детектором соответственно для начального и конечного момента хранения. Из соотношений (1) и (2) следует, что величина отношения вероятностей потерь ξ для сосуда с дополнительной поверхностью и сосуда без дополнительной поверхности выражается как:

$$\xi = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{\lambda_{ie2}}{\lambda_{ie1}} = \frac{J_2 \lambda_{t2} [N_1(0) - N_1(t_1)]}{J_1 \lambda_{t1} [N_2(0) - N_2(t_2)]}. \quad (3)$$

При известных λ_{t1} , λ_{t2} и ξ вероятность распада определяется из соотношения:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_{t1}\xi - \lambda_{t2}}{\xi - 1}. \quad (4)$$

Описанная методика была реализована на интенсивном пучке УХН реактора ИЛЛ (г.Гренобль, Франция) с использованием простого варианта установки, схема которой показана на рис.1. УХН накапливались и хранились в цилиндрическом сосуде диаметром 27 и высотой 106 см. Сосуд, изготовленный из нержавеющей стали, был покрыт по внутренней поверхности слоем безводородного масла "Formblin". УХН поступали в сосуд через входные заслонки по вертикальному нейтронному каналу с алюминиевой заслонкой и запирались тарелочной заслонкой, расположенной в дне сосуда. Начальное $N(0)$ и конечное $N(t)$ количество УХН в сосуде регистрировались газовым пропорциональным детектором на основе ^3He . Для ограничения спектра накапливаемых УХН в сосуде по энергии на верхнем фланце сосуда был установлен полиэтиленовый поглотитель УХН. Сосуд представлял собой герметичный объем, откачивавшийся до давления $(2 - 3) \cdot 10^{-6}$ торр турбомолекулярным насосом. Температура сосуда изменялась в пределах от $+25^\circ\text{C}$ до -55°C прокачкой через его поверхностный змеевик хладоносителя.

Для изменения вероятности потерь УХН в объем сосуда вводилась дополнительная поверхность из нержавеющей стали толщиной 150 мкм. Поверхность создавалась тонкостенным, покрытым с обеих сторон слоем масла "Formblin" цилиндрическим сосудом диаметром 25 и высотой 105 см с системой отверстий на боковой поверхности и дне. Сосуд УХН был установлен в алюминиевый вакуумный кожух, откачивавшийся до $5 \cdot 10^{-5}$ торр. Детектор нагретых нейтронов состоял из 28 цилиндрических нейтронных счетчиков на основе ^3He , укрепленных вертикально на боковой поверхности кожуха. Длина каждого счетчика 1 м, диаметр 3 см, эффективность регистрации в изотропном потоке нейтронов 78%. Для защиты детектора от внешнего нейтронного поля реактора установка была закрыта кадмиевым чехлом и борированным полиэтиленом.

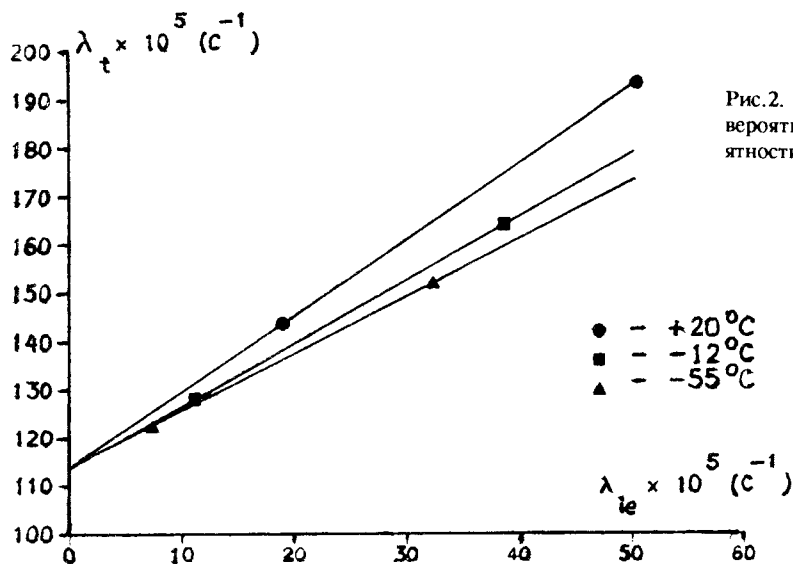
Сводная таблица поправок

N	+20	-12	-55	среднее
0	880,16 ± 6,89	881,27 ± 1,67	891,99 ± 3,98	882,08 ± 1,50
1	0,00 ± 0,02	-0,16 ± 0,02	-8,78 ± 0,88	-0,73 ± 0,36
2	-6,36 ± 2,01	-2,24 ± 1,30	-2,38 ± 1,19	-2,43 ± 1,32
3	-1,48 ± 0,74	-0,51 ± 0,26	-0,32 ± 0,16	-0,54 ± 0,27
4	+6,12 ± 3,60	+2,85 ± 1,82	+0,13 ± 0,29	+2,62 ± 1,69
5	+0,72 ± 0,36	-0,21 ± 0,11	-0,58 ± 0,29	-0,21 ± 0,11
6	+3,09 ± 1,55	+0,74 ± 0,37	+0,37 ± 0,19	+0,80 ± 0,40
7	+0,23 ± 0,05	+0,85 ± 0,24	+2,01 ± 0,76	+0,96 ± 0,22
S	+2,32 ± 4,48	+1,32 ± 2,30	-9,55 ± 1,73	+0,48 ± 2,24
R	882,48 ± 8,22	882,59 ± 2,84	882,44 ± 4,34	882,56 ± 2,70

Примечание: N - номер поправки; в строке $N = 0$ приведены непоправленные значения τ_n , в строке R - значения τ_n после введения поправок, а в строке S - средневзвешенные величины поправок

Во время эксперимента было выполнено 20 серий измерений λ_n для различных интервалов времени хранения и при трех различных температурах

сосуда (+20, -12 и -55°C). Среднее количество накапливаемых нейтронов в начальный момент хранения $(35 - 45) \cdot 10^3$. Характерные времена хранения в сосуде без дополнительной поверхности $\tau_1 = \lambda_{t1}^{-1}$ составляли 700, 770 и 820 с при температурах сосуда 25, -12 и -55°C. В каждом отдельном измерении λ_n при фиксированной температуре определялись величины λ_{t1} , λ_{t2} и соответствующие им значения λ_{ie1} и λ_{ie2} , задававшиеся в относительных единицах в предположении, что отношение $\epsilon/\epsilon_{th} = 1$. Для примера на рис.2 показана связь между значениями λ_{t1} , λ_{t2} и λ_{ie1} , λ_{ie2} , полученная в трех сериях измерений, выполненных при различных температурах.



В предварительной публикации ⁶ был сообщен результат $\tau_n = 883, 2 \pm 2, 9$ с. При получении окончательного значения был более точно учтен ряд методических погрешностей и поправок к величине λ_n , определяемой непосредственно из соотношений (1-4). Основные источники методических погрешностей измерений носили следующий характер:

1. Утечка нейтронов через щель тарелочной заслонки. Поправка к λ_n за счет этого канала определялась экспериментально путем регистрации нейтронов, вытекавших через щель, детектором УХН.

2. Слабая линейная зависимость величины λ_{ie} от времени, связанная с тем, что накапливаемые в сосуде УХН имели достаточно широкий энергетический спектр $(0 - 10, 5 \cdot 10^{-8}$ эВ). Для определения этой погрешности экспериментально исследовалась зависимость скорости счета детектора нагретых нейтронов от времени, после чего в результат измерений ξ вводилась поправка, изменявшая величину λ_n .

3. При хранении УХН появляется слабая зависимость эффективности ϵ_{th} от времени, обусловленная постепенным смягчением спектра УХН в сосуде и проявляющаяся в разной степени для сосуда с дополнительной поверхностью и без нее. Влияние этих факторов на измеряемую величину параметра ξ определялось расчетным путем для различных модельных спектров УХН с анализом их эволюции во времени.

4. Небольшое отличие величины ϵ_{th} при регистрации нагретых УХН в начальный момент хранения для сосуда с дополнительной поверхностью и без нее. Указанная разница связана в основном с некоторым различием в пространственном положении боковой поверхности сосуда и дополнительной поверхности. Частично отличие величины ϵ_{th} обусловлено также дополнительным поглощением нагретых нейтронов в материале дополнительной поверхности. Поправка к величине λ_n , вызванная этим отличием, вводилась расчетным путем из геометрии эксперимента.

5. Вариации эффективности ϵ регистрации сохранившихся в сосуде нейтронов $N(0)$ и $N(t)$, вызванные тем, что спектр УХН трансформируется, становясь более мягким с течением времени хранения. При этом эффективность регистрации числа $N(0)$ оказывается несколько меньше, чем эффективность регистрации $N(t)$, что приводит к погрешности в определении как λ_{t1} и λ_{t2} , так и ξ . Поправка к величине λ_n в данном случае вводилась расчетным путем с использованием экспериментальных данных по характерным временам вытекания УХН из сосуда и временным зависимостям скоростей счета детектора нагретых нейтронов.

6. Некоторое отличие в величине эффективности ϵ регистрации УХН для сосуда с дополнительной поверхностью и без нее. Это отличие обусловлено как разными характерными временами хранения УХН в двух геометриях измерений, так и разными временами вытекания их на детектор. Поправка к величине λ_n , обусловленная этим эффектом, вводилась из экспериментальных данных по характерным временам хранения и вытекания УХН.

7. Небольшое нарушение условия ($\lambda_{c1}/\lambda_{ie1} = \lambda_{c2}/\lambda_{ie2}$), связанное с некоторым различием температуры стенок сосуда и стенок дополнительной поверхности. Поправка вводилась расчетным путем с привлечением данных по сечениям захвата и неупругого рассеяния нейтронов на масле "Fomblin".

В результате обработки 15 из 20 серий измерений и после введения поправок по пп.1-7 окончательное значение $\tau_n(c)$ составило:

$$\tau_n = 882,6 \pm 2,7 \text{ с.}$$

В таблице приведены значения методических поправок с их погрешностями к первичному значению τ_n с учетом разброса внутри каждой серии.

Авторы благодарны сотрудникам ИАЭ им.И.В.Курчатова Е.В.Турбину, Е.В.Рогову, С.М.Чернявскому за помощь в изготовлении установки, а также сотрудникам ИЛЛ Д.Дюбберсу, К.Шреккенбаху, В.Дрекселу, Ф.Шору, Р.Бендеру и П.Яджиеву за помощь в организации и проведении эксперимента.

-
1. Ю.Ю.Косвинцев, Ю.А.Кушнир, В.И.Морозов, Г.И.Терехов, Письма в ЖЭТФ **31**, 257 (1980).
 2. Ю.Ю.Косвинцев, В.И.Морозов, Г.И.Терехов, Письма в ЖЭТФ **44**, 444 (1984).
 3. W.Mampe, P.Ageron, J.C.Bates, et al., Nucl. Instr. and Meth. A **284**, 111 (1989).
 4. A.G.Kharitonov, V.V.Nesvizhevsky, A.P.Serebrov, et. al. Nucl. Instr. and Meth. A **284**, 98 (1989).
 5. Л.Н.Бондаренко, В.И.Морозов, Ю.Н.Панин и др., Препринт ИАЭ-5342/2, Москва, 1991.
 6. В.Мампе, Л.Н.Бондаренко, В.И.Морозов, Ю.Н.Панин, А.И.Фомин. Труды Международной школы "Физика слабых взаимодействий при низких энергиях" Дубна, 1990 (LEWI'90), с.346-349.