

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



СЗ42Г1
Г-899

№/кн-73

РЗ - 7282

4527/2-73

Л.В.Грошев, В.Н.Дворецкий, А.М.Демидов,
В.И.Лущиков, С.А.Николаев, Ю.Н.Панин,
Ю.Н.Покотиловский, А.В.Стрелков, Ф.Л.Шапиро

ВОДЯНОЙ И ГИДРИДЦИРКОНИЕВЫЙ КОНВЕРТОРЫ
УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ .

УДЕРЖАНИЕ НЕЙТРОНОВ
В МЕДНЫХ И СТЕКЛЯННЫХ СОСУДАХ

1973

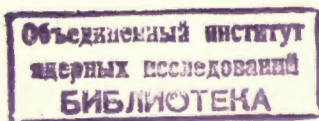
ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

Л.В.Грошев,* В.Н.Дворецкий,* А.М.Демидов,*
В.И.Лушиков, С.А.Николаев,* Ю.Н.Панин,
Ю.Н.Покотилловский, А.В.Стрелков, Ф.Л.Шапиро

**ВОДЯНОЙ И ГИДРИДЦИРКОНИЕВЫЙ КОНВЕРТОРЫ
УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ .**

**УДЕРЖАНИЕ НЕЙТРОНОВ
В МЕДНЫХ И СТЕКЛЯННЫХ СОСУДАХ**

Доложено на конференции по нейтронной физике
(Киев, 1973)



* Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова

Ультрахолодными нейтронами /УХН/ будем называть нейтроны с энергией, меньшей $E_{гр} = 2\pi\hbar^2 \frac{Nb}{m}$, где N - число ядер в единице объема, b - когерентная длина рассеяния, m - масса нейтрона. Для меди $E_{гр} = 1,7 \cdot 10^{-7}$ эв, для алюминия $E_{гр} = 0,55 \cdot 10^{-7}$ эв. УХН испытывают полное отражение от стенок при любых углах падения и могут ввиду этого удерживаться в замкнутом сосуде ^{/1/}.

В нашей предыдущей работе ^{/2/} УХН получались замедлением тепловых нейтронов на добавочном замедлителе-конверторе из алюминия, установленном в откачанном медном нейтронводе. Алюминий был выбран из-за технической простоты его использования: он удовлетворяет требованиям низкого давления паров, достаточной термической и радиационной стойкости. Однако с точки зрения выхода УХН алюминий далеко не оптимален: из-за относительно большой величины сечения захвата только малая доля образующихся в алюминии УХН выходит наружу. Теоретическое рассмотрение выхода УХН из конверторов проведено в работах ^{/3/ и /4/}.

В первой из них экспериментально подтверждено, что водородсодержащие конверторы, например, гидрид циркония, дают поток УХН на порядок больше, чем алюминиевый конвертор, причем выход возрастает еще в несколько раз при охлаждении конвертора до температуры жидкого азота. Опыты проводились на реакторе с малым нейтронным потоком $\sim 10^{10}$ н/см²сек/, т.е. в условиях, когда не возникает проблем отвода тепла и радиационной стойкости конвертора. В настоящей работе сообщаются результаты опробования некоторых конверторов на реакторе с потоком 10^{13} н/см²сек.

В работе ^{12/} описаны эксперименты по удержанию УХН в замкнутых объемах. Полученные времена удержания для медных сосудов были почти на порядок меньше ожидаемых значений для идеально гладкой поверхности чистой меди. Времена удержания для сосудов из бериллия и пиролитического графита были того же порядка, что и для медных сосудов, несмотря на существенно меньшие сечения захвата для этих материалов, и были меньше ожидаемых на 2 порядка. В данной работе приводятся результаты дальнейших экспериментов по удержанию УХН в сосудах из меди и стекла. Описан также пропорциональный счетчик УХН с гелием-3, обладающий большей эффективностью по сравнению с использованным в ^{12/} сцинтилляционным детектором.

§1. ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЙ СЧЕТЧИК УХН

Использованные в работе ^{12/} сцинтилляционные детекторы давали различные скорости счета при одном и том же весовом количестве $Li^6 OH \cdot H_2O$, нанесенного на сцинтиллятор $Zn S$. Этот факт может быть объяснен крупнозернистой кристаллической структурой детекторного слоя, причем толщина кристалликов больше оптимальной, а в промежутках между ними вероятность поглощения нейтрона мала. Если это так, то эффективность регистрации УХН таким детектором должна быть меньше 1. В связи с этим был разработан пропорциональный счетчик, в котором был разработан пропорциональный счетчик, в котором находится в газовой фазе и однородность поглощающего слоя не вызывает сомнений.

Счетчик /рис. 1/ изготовлялся в виде цилиндра из нержавеющей стали радиусом 5 см и высотой 5 см. Во внутренней полости цилиндра медным экраном отделены 2 камеры, по центру которых протянуты нити /аноды/ толщиной 15 мкм. УХН входят в счетчик через алюминиевое окно толщиной 60 мкм, закрывающее одно из оснований цилиндрической камеры. УХН могут отражаться от стенок камеры, поэтому эффективный путь до их поглощения может превышать линейные размеры камеры.

Для уменьшения чувствительности детектора к тепловым нейтронам давление гелия-3 в счетчике было уменьшено до 5 тор, при котором еще не наблюдалось заметного снижения эффективности регистрации УХН. Такое давление наполняющего газа слишком мало, чтобы осуществить режим разряда пропорционального счетчика и чтобы задержать в газе продукты реакции

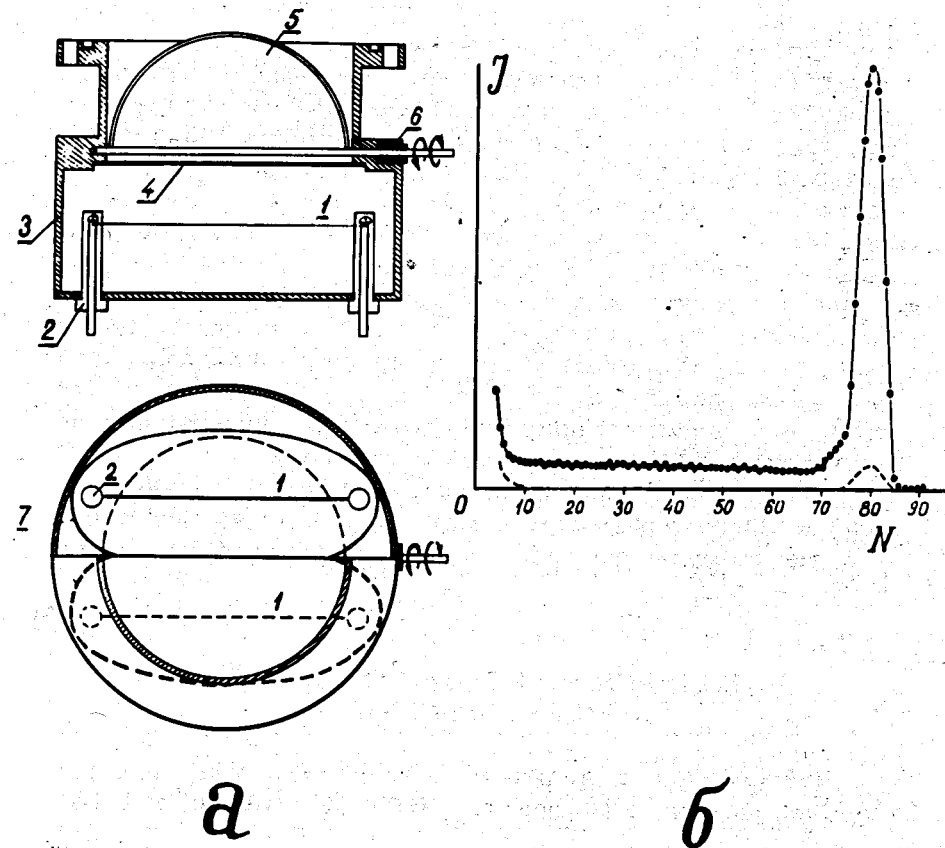
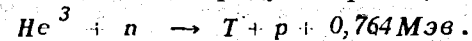


Рис. 1. а/ Схема счетчика УХН: 1 - нить - анод; 2 - изолятор; 3 - корпус; 4 - окно - алюминий, 60 мкм; 5 - шторка - медь, 10 мкм; 6 - сальник; 7 - электроды формирования электрического поля. б/ Амплитудный спектр счетчика УХН. Пунктиром показан спектр при закрытой шторке.

Поэтому в счетчик добавлялся балластный газ, аргон, до давления 760 тор и углекислый газ /до ≈ 5 тор/ для стабилизации процесса газового усиления. Несмотря на то, что содержание аргона в смеси составляло $\approx 99\%$, относительная малость сечений захвата и неупругого рассеяния нейтронов в аргоне делает нагрев и захват УХН на атомах аргона сравнительно маловероятным процессом / $\approx 4\%$ /. Для определения фона от более быстрых, чем УХН, нейтронов обе камеры счетчика могли поочередно перекрываться медной / ≈ 10 мкм/ полукруглой шторкой. При некоторых измерениях шторка устанавливалась в среднее положение, при этом рабочая площадь детектора удваивалась и составляла ≈ 60 см². Алюминиевое окно счетчика не пропускает нейтроны с энергией, меньшей $0,55 \cdot 10^{-7}$ эв. Для более быстрых нейтронов вероятность отражения зависит от энергии и угла падения. Расчет пропускания алюминиевого окна, усредненного по спектру $E dE$ в интервале / $0,55 \div 1,7 / 10^{-7}$ эв в предположении изотропного распределения скоростей нейтронов, дает величину $\bar{T} = 0,40$. Измерения показали, что в одинаковых условиях пропорциональный счетчик регистрирует в 1,5 раз большую скорость счета УХН, чем сцинтилляционный детектор /при равенстве облучаемых УХН поверхностей счетчиков/*.

В дальнейшем предполагается снабдить счетчик окном, мало поглощающим и мало отражающим нейтроны, что значительно улучшит его свойства как детектора УХН.

§2. ВОДЯНОЙ И ГИДРИДЦИРКОНИЕВЫЙ КОНВЕРТОРЫ УХН

Нейтронород с водяным конвертором УХН был установлен на канале №3 реактора ИРТ-М. ИАЭ им. И. В. Кур-

чатова. Нейтронородом являлась изогнутая электрополированная медная труба с внутренним диаметром 90 мм и длиной около 6 метров. Плотность потока тепловых нейтронов у торца нейтронорода составляла $\approx 2 \cdot 10^{13}$ н/см²сек. Схема конвертора УХН показана на рис. 2а. Конвертор представлял из себя плоскую цилиндрическую ампулу из алюминия с тонкой передней стенкой толщиной 0,25 мм. Через ампулу непрерывно прокачивалась вода по замкнутому контуру.

Скорость счета УХН пропорциональным счетчиком с алюминиевым окном площадью 60 см² составляла ≈ 100 сек⁻¹ и уменьшилась до ≈ 50 сек⁻¹ за 8 месяцев эксплуатации канала, несмотря на принятые меры по предотвращению попадания атмосферного воздуха в нейтронород. Фон нейтронов с энергией большей, чем граничная энергия для меди, составлял 10% от счета УХН.

С целью выбора оптимального конвертора УХН для работы на реакторе с достаточно высоким потоком нейтронов был создан нейтронород УХН на сквозном касательном канале №7 реактора ИРТ-М. Нейтронород представлял собой электрополированную медную трубу внутренним диаметром 65 мм и длиной около 10 метров. Измерение потоков УХН производилось с помощью пропорционального и сцинтилляционного счетчиков, располагаемых на конце нейтронорода. С противоположного конца нейтронорода вставлялись конверторы УХН из различных материалов. При испытаниях конверторы располагались вблизи активной зоны реактора в потоке тепловых нейтронов $\approx 5 \cdot 10^{12}$ н/см²сек на расстоянии около 5 м от детектора.

Испытываемые конверторы из алюминия, магния и гидроциркония представляли собой диски $\phi 62$ мм х 5 мм. При работе с конвертором из гидроциркония был необходим достаточно эффективный теплоотвод с конвертора, в котором в результате радиационного нагрева выделяется до нескольких десятков ватт тепла. При отсутствии эффективного теплоотвода неизбежен разогрев конвертора на несколько сот градусов, сопровождающийся в условиях вакуума в нейтронороде выходом

* Таким образом, эффективность сцинтилляционного детектора составляет $0,3 \div 0,5$, тогда как в /2/ она принималась равной 1. С учетом этого уменьшается различие между наблюдаемой в /2/ и ожидавшейся скоростью счета.

атомов водорода из гидрида циркония. Теплоъем осуществлялся с помощью циркулирующих по медным трубам воды или жидкого азота /рис. 2б/. Трубки припаялись к тонкослойному медному покрытию на поверхности пластинки из гидрида циркония *. Магний конвертор во избежание возможного распыления магния на стенки нейтронновода под действием реакторного облучения располагался внутри тонкостенной $\sim 0,25$ мм/алюминиевой ампулы, охлаждаемой проточной водой /рис. 2в/. Для улучшения теплоконтакта магниевой пластинки с охлаждаемой водой ампулой последняя заполнялась инертным газом. Алюминиевый конвертор был изготовлен из сплава АД-1. Результаты измерений выходов УХН из различных конверторов приведены в табл. 1. При испытаниях конверторы располагались в одинаковом нейтронном потоке; регистрация УХН производилась вышеописанным двухкамерным пропорциональным счетчиком с площадью входного окна каждой камеры ~ 30 см². Относительно высокий выход УХН из гидридциркониевого конвертора указывает на его перспективность в качестве источника УХН. Испытание конвертора из гидрида циркония в течение полутора месяцев работы реактора /чистое время облучения около 20 суток/ не показало заметного снижения выхода УХН.

§3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПО ВЫХОДАМ УХН ИЗ КОНВЕРТОРОВ

Как видно из результатов экспериментов, все исследованные конверторы дают значительно больший вклад УХН, чем использованный в работе /2/ алюминиевый конвертор. Согласно работе /3/ выражение для потока

* Авторы выражают глубокую благодарность Р.Б.Штрапениной и А.И.Соловью за разработку технологии нанесения медного покрытия на поверхность гидрида циркония.

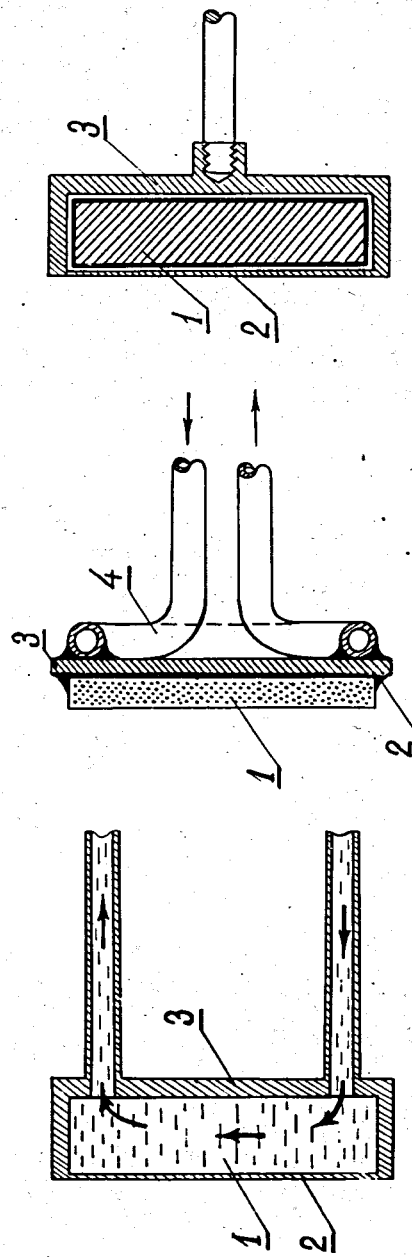


Рис. 2. Схема конвертора УХН. а/ Водяной конвертор с алюминиевым окном: 1 - вода; 2 - алюминиевое окно 0,25 мм; 3 - алюминиевый корпус. б/ Гидридциркониевый конвертор: 1 - гидрид циркония; 2 - оловянный припой; 3 - медная подложка; 4 - трубки охлаждающей в/ Магний конвертор: 1 - магний; 2 - алюминиевое окно 0,25 мм; 3 - алюминиевый корпус.

Таблица I

Скорость счёта УХН для различных конверторов

Конвертор Температура	Тепловой поток на конверторе н/см ² сек	Нейтронвод	Скорость счёта УХН имп/сек	Детектор
H ₂ O, Al-оболочка 0,3 мм; ~300°K	2 · 10 ¹³	С ₂ Ø 9,4 см · l = 6 м	100	Пропорцион. счётчик с оном A 2 0,06 мм, 60 см ²
Al; 400°K	5 · 10 ¹²	С ₂ Ø 6,5 см · l = 4 м	4,2	"
Mg, Al-оболочка 0,2 мм; ~300°K	"	"	8,8	"
Zr H ₂ ; ~300°K	"	"	24	"
Zr H ₂ ; ~100°K	"	"	40	"
Zr H ₂ ; ~300°K	"	"	27	"
Zr H ₂ ; ~100°K	"	"	48	"

УХН вблизи водяного конвертора может быть записано в виде *

$$\phi = \frac{\phi_0}{4T_H^2} \int_0^{E_{Cu}} \frac{k E dE}{k + \alpha(1 - \frac{1}{2} k')} = \frac{\phi_0}{8} \left(\frac{E_{Cu}}{T_H} \right)^2 K_{cp}, \quad /1/$$

где ϕ_0 - полный поток тепловых нейтронов на конвертор, E_{Cu} - граничная энергия для медного канала, T_H - температура теплового спектра нейтронов, k, k' - коэффициенты прохождения УХН через алюминиевое окно, усредненные по углам падения для изотропной и направленной компонент потока УХН соответственно. Коэффициент α определяется характеристиками нейтронвода и равен $\approx 0,3$.

Для оценки k и k' можно получить выражения

$$k = 2 \int_0^{\pi/2} \frac{(1 - R(\theta))^2 r(\theta)}{1 - R^2(\theta) r^2(\theta)} \cos \theta \sin \theta d\theta, \quad /2/$$

$$k' = 3 \int_0^{\pi/2} \frac{(1 - R(\theta))^2 r(\theta)}{1 - R^2(\theta) r^2(\theta)} \cos^2 \theta \sin \theta d\theta, \quad /2'/$$

где θ - угол падения УХН на границу вакуум-алюминий, $R(\theta)$ - коэффициент отражения УХН от этой границы, $r(\theta)$ - фактор ослабления нейтронной волны при однократном прохождении окна конвертора за счет захвата и неупругого рассеяния.

Оценки интегралов /2/ и /2'/ дают после усреднения по падающему спектру $E dE$ значения $k \approx 0,3$ и $k' \approx 0,4$. Для фактора ослабления потока УХН алюминиевым окном конвертора k_{cp} согласно /1/ получим оценку $k_{cp} \approx 0,6$.

* Выражение /1/ получено из условия баланса потоков на границе конвертор-вакуум с учетом скачка потенциала на этой границе.

Эффективность детектора при оптимальном заполнении его гелием-3 определяется в основном коэффициентом прохождения УХН через тонкое алюминиевое окно. Если пренебречь поглощением нейтронов в алюминиевом окне детектора, то интегрирование /2/ дает для усредненной по углам падения УХН эффективности детектора:

$$\epsilon(E) = \frac{1}{\sqrt{1-x}} - x \arctg \sqrt{1-x}, \quad x = \frac{E_{Al}}{E}, \quad /3/$$

где E_{Al} - граничная энергия алюминия. Среднее по спектру значение эффективности детектора составляет $\bar{\epsilon} \approx 0,4$.

С учетом приведенных факторов ослабления потока УХН алюминиевыми окнами конвертора и детектора согласно /1.2/ и формуле /3/ работы /2/ ожидаемая скорость счета УХН для водяного конвертора должна быть равна

$$I_{дет} = \frac{\phi_0}{4} \left(\frac{E_{Cu}}{T_H} \right)^2 K_{ср} \frac{\bar{\epsilon} S_{дет} \exp(-\frac{\ell}{L})}{1 + \frac{\bar{\epsilon} S_{дет}}{a \cdot S_k}} = 250 \text{ сек}^{-1} /4/$$

при $\phi_0 = 2 \cdot 10^{13} \text{ н/см}^2 \text{ сек}$, $T_H = 400^\circ \text{ К}$, длине канала $\ell = 5,5 \text{ м}$, диффузионной длине $L = 4,7 \text{ м}$, площади сечения канала $S_k = 70 \text{ см}^2$ и площади входного окна детектора $S_{дет} = 60 \text{ см}^2$. Экспериментально полученная скорость счета УХН 100 сек^{-1} отличается от ожидаемой примерно в 2,5 раза. Полученное расхождение может быть связано с тем, что в данном случае теория диффузии является довольно грубым приближением.

Относительно измерений выходов УХН из различных конверторов, проведенных в касательном канале, следует отметить, что теория /3/ предсказывает следующие отношения выходов УХН из использованных нами конверторов:

$$\phi_{Al}(400^\circ \text{ К}) : \phi_{Mg}(300^\circ \text{ К}) : \phi_{ZrH_{1,9}}(300^\circ \text{ К}) : \phi_{ZrH_{1,9}}(100^\circ \text{ К}) = 1 : 4,1 : 8,5 : 32.$$

Измеренные нами отношения оказались равными: $1 : 2,1 : 6,5 : 11,5$, что заметно отличается от расчета. Выход УХН из $ZrH_{1,9}$ конвертора мог несколько уменьшиться из-за частичного выхода водорода из гидрида при нагреве конвертора до 250° С для припайки трубок охлаждения. Не исключено, что на выходе УХН из гидрида циркония существенно сказывается наличие в нем неоднородностей размером порядка длины волны УХН. Упругое рассеяние на этих неоднородностях увеличивает длину пути УХН до выхода из конвертора, что особенно существенно при низкой температуре конвертора, когда сечение неупругого рассеяния значительно уменьшается.

§4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО УДЕРЖАНИЮ УХН В ЗАКРЫТЫХ СОСУДАХ

Измерение времен удержания УХН производилось с помощью установки, схема которой представлена на рис. 3. В качестве сосудов для удержания УХН использовались трубы внутренним диаметром 8-9 см и длиной 2-3 метра из различных материалов. Автоматически управляемые вентили, через которые производился напуск УХН в объем и выпускание их на детектор, приводились в движение сжатым воздухом. Вентили обеспечивали плотное запираение объемов, в которых удерживались УХН, что минимизировало утечку нейтронов из объема через щели. Во время измерений в сосудах поддерживался вакуум 10^{-4} тор . Обработка внутренней поверхности медных труб производилась путем электрополировки в различных электролитах. Для обработки стеклянных труб применялись слабые растворы плавиковой кислоты. Результаты экспериментов существенно зависели от способа и тщательности обработки поверхностей. В табл. 2 и на графиках рис. 4 и 5 приведены наилучшие из полученных результатов.

Изменение спектра нейтронов осуществлялось подъемом или опусканием сосуда, в котором должны храниться нейтроны, на определенный уровень относительно

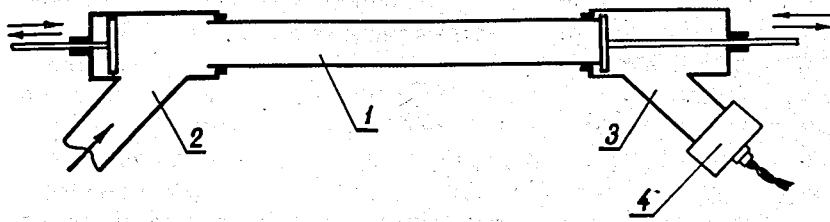


Рис. 3. Схема эксперимента по удержанию УХН: 1 - труба - сосуд для накопления УХН; 2,3 - входной и выходной клапаны УХН; 4 - детектор УХН.

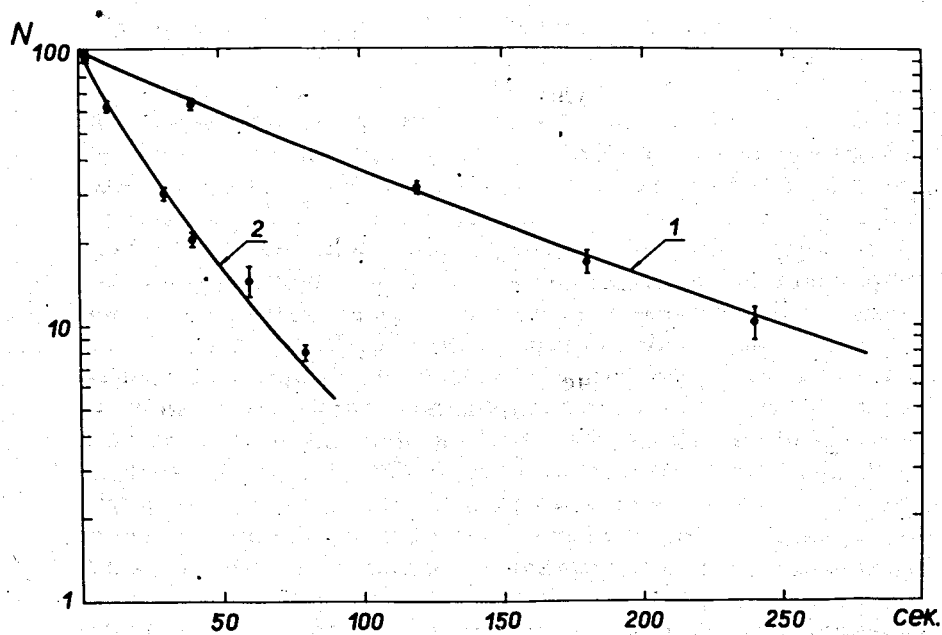


Рис. 4. Зависимость числа нейтронов, оставшихся в медном сосуде ϕ 85 мм., от времени хранения t . 1. Для спектра УХН $1,5 \text{ м/сек} \leq v \leq 3 \text{ м/сек}$. 2. Для спектра УХН $3,2 \text{ м/сек} \leq v \leq 5,7 \text{ м/сек}$.

нейтронпроводов. При этом нейтроны должны изменять свою кинетическую энергию на величину mgh , где g - ускорение свободного падения, h - разность уровней нейтронвода и сосуда, m - масса нейтрона. Регистрация нейтронов производилась с помощью пропорционального счетчика с алюминиевым окном. В некоторых случаях для увеличения эффективности регистрации нейтронов малых скоростей детектор опускался относительно уровня сосуда с тем, чтобы нейтроны перед попаданием в детектор приобрели в поле тяготения дополнительную энергию.

§5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО УДЕРЖАНИЮ УХН

В случае идеально гладкой поверхности с резкой границей вещество-вакуум потенциал взаимодействия УХН со стенками сосуда имеет вид скачка: $U = U_1 - iU_2$. Действительная часть этого потенциала задается известным выражением $U_1 = 2\pi\hbar^2 N \frac{Re b}{m}$. Для мнимой части согласно [5, 6] можно принять

$$U_2 = \frac{\hbar N}{2} (\sigma_c + \sigma_{ну}) v, \quad /5/$$

где σ_c и $\sigma_{ну}$ - сечение захвата и неупругого рассеяния соответственно, v - скорость нейтрона. При неупругом рассеянии на стенке сосуда ультрахолодные нейтроны приобретают энергию порядка энергии тепловых колебаний атомов сосуда и с вероятностью, близкой к единице, выходят из диапазона УХН. Таким образом, оба процесса - захват и неупругое рассеяние, - дающие вклад в мнимую часть потенциала U , приводят к выбыванию УХН из сосуда. Рассматривая оба эти процесса как поглощение УХН стенками сосуда, для коэффициента поглощения μ нейтрона с энергией E ($E < E_{гр}$) при одном столкновении со стенкой нетрудно получить выражение

$$\mu = \frac{2\eta x}{\sqrt{1-x^2}} \quad (\eta \ll 1), \quad /6/$$

где $\eta = \frac{U_2}{U_1}$, $x = \left(\frac{E}{E_{гр}}\right)^{1/2} \cos \theta$, θ - угол падения нейтрона на стенку сосуда.

Если внутри сосуда нейтроны распределены равномерно по объему и изотропно по направлению вектора скорости, то средний по углам падения на стенку сосуда коэффициент поглощения будет равен

$$\bar{\mu} = 2 \int_0^{2/\pi} \mu \cos \theta \sin \theta d\theta = \frac{2\eta}{y^2} (\arcsin^{1/2} y - y^{1/2} \sqrt{1-y}), \quad /7/$$

где $y = \frac{E}{E_{гр}}$.

Число нейтронов, остающихся в сосуде к моменту времени t после его наполнения, равно:

$$N(t) = e^{-\lambda t} \int_{E_{min}}^{E_{max}} N_0(E) \exp\left(-\frac{v}{a} \bar{\mu} t\right) dE. \quad /8/$$

Здесь $N_0(E)$ - спектр нейтронов в сосуде в момент его заполнения; a - средняя длина пробега нейтрона между двумя столкновениями; v - скорость нейтрона; $\lambda = 10^{-3}$ 1/сек - постоянная β -распада свободного нейтрона; E_{min} и E_{max} - минимальная и максимальная энергии используемого спектра УХН.

При использовании широкого энергетического спектра УХН формула /8/ показывает, что зависимость от времени числа остающихся в сосуде нейтронов отличается от экспоненциальной и не может быть хорошо описана каким-либо одним эффективным временем удержания. Качественно этот вывод подтверждается настоящими экспериментами /кривая 2 на рис. 4 и кривая 1 на рис.5/, выполненными с лучшей статистической точностью, чем в работе /2/.

Поскольку экспериментальная зависимость $N(t)$ не может быть описана эффективным временем удержания, в отличие от работы /2/ вместо времени удержания в настоящей работе из измеренных значений $N(t)$ методом наименьших квадратов по формуле/8/ определялся эффективный параметр $\eta_{эксп}$, который может быть сравнен

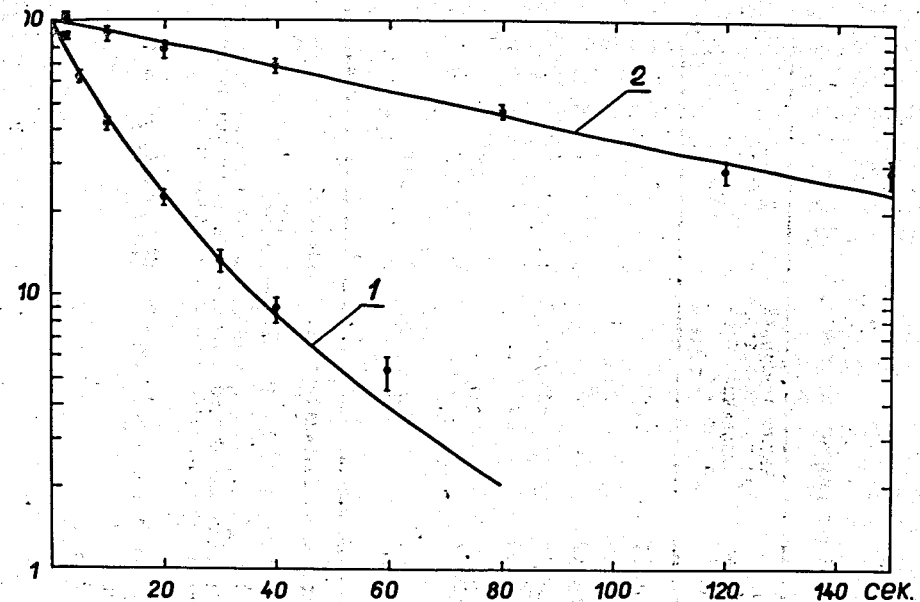


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, для стеклянных сосудов $\phi 80$ мм: 1. Боросодержащее стекло, спектр $1,7 \text{ м/сек} \leq v < 4,3 \text{ м/сек}$. 2. Безборное стекло, спектр $3,2 \text{ м/сек} \leq v < 4,2 \text{ м/сек}$.

с теоретическим значением $\eta_{теор} = \frac{\sigma_c + \sigma_{ну}}{2\lambda Re b}$. Кривые,

проведенные через экспериментальные точки на рис. 4,5, рассчитаны для найденных значений $\eta_{эксп}$. В расчете $\eta_{эксп}$ принималось, что начальный спектр УХН в интервале от E_{min} до E_{max} является максвелловским, т.е. $N_0(E) \approx E^{1/2} dE$, и эффективность детектора не зависит от энергии нейтрона.

Как видно из табл. 2, для меди и безборного стекла имеет место значительное расхождение между $\eta_{эксп}$ и $\eta_{теор}$. Более того, при использовании одного и того же медного сосуда параметр $\eta_{эксп}$ различен для разных участков используемого спектра УХН. Хотя этот разброс значений $\eta_{эксп}$ для меди частично может быть связан

Результаты экспериментов по удержанию УХН в замкнутых сосудах

Материал и внутренний диаметр трубы	Обработка внутренней поверхности	Интервал скорости УХН м/сек	$Z_{\text{экп}}$ $\cdot 10^3$	Число отражений до потери нейтрона с граничной ско- ростью $1/\pi Z_{\text{теор}}$	$Z_{\text{теор}}$ $\cdot 10^3$
Медь ϕ 85 мм	Электрополировка Электролит H_2PO_4	3,2 + 5,7	0,46 ± 0,01	690	0,14*
"	"	4,7 + 5,7	0,32 ± 0,02	990	"
"	"	0 + 4,6	0,50 ± 0,02	635	"
"	"	1,5 + 3,0	0,54 ± 0,03	590	"
Безборное стекло ϕ 80 мм	Многokrратное травление HF 3% P-ром	5,2 + 4,2	0,10 ± 0,01	3180	0,005**
Боросодержащее стекло	Промывка дистиллятом	1,7 + 4,3	1,50 ± 0,1	210	1,6***

* При вычислении $Z_{\text{теор}}$ для меди использовались данные по полны сечениям УХН из работы [7].

** Безборное стекло марки 13 В имело состав (по весу) $SiO_2 + 63,5\% ; Al_2O_3 - 15,5\% ; MgO - 4\% ; CaO - 13\% ; Na_2O - 2\% ; F - 2\%$, плотность $2,4 \text{ г/см}^3$. При вычислении $Z_{\text{теор}}$ для этого стекла использовалось сечение захвата на ядрах элементов, входящих в состав стекла; сечение неупругого рассеяния УХН на стекле брадось из работы [7] (с учётом более поздних поправок сообщенных авторами этой работы) в предположении, что оно равно разности полных сечений при 2960К и 900К.

*** Трубы из боросодержащего стекла производства ЦСР имели состав (по весу): $SiO_2 - 75\% ; Al_2O_3 - 6\% ; B_2O_3 - 7\% ; Na_2O - 6\% ; CaO - 4,3\% ; CaO - 1,7\%$, плотность $2,35 \text{ г/см}^3$.

с отличием истинного спектра $N_0(E)$ от максвелловского /спектр УХН не измерялся в каждом эксперименте/ и с наличием энергетической зависимости эффективности детектора, тем не менее самое большое количественное расхождение между $\eta_{\text{эксп}}$ и $\eta_{\text{теор}}$ дает основание считать, что имеет место дополнительный механизм поглощения УХН в стенках сосуда, отличный от общепринятого механизма, изложенного выше.

Удовлетворительное согласие $\eta_{\text{эксп}}$ и $\eta_{\text{теор}}$, полученное для боросодержащего стекла, лишь подтверждает этот вывод, указывая на корректность теории для материалов с большим сечением захвата нейтронов.

Для выяснения механизма поглощения УХН в стенках сосудов представляется интересным изучение спектра нейтронов, вытекающих из ловушки. Такие эксперименты нами планируются.

Литература

1. Я.Б.Зельдович. ЖЭТФ, 36, 1952-/1959/.
2. Л.В.Грошев и др. Препринт ОИЯИ РЗ-5392, Дубна, 1970; Phys. Lett., 36B, 4, 293 (1971).
3. В.В.Голиков, В.И.Лушиков, Ф.Л.Шапиро. Препринт ОИЯИ РЗ-6556, Дубна, 1972.
4. R.Golub. Phys. Lett., 38A, 117 (1972).
5. В.И.Лушиков, Ю.Н.Покотиловский, А.В.Стрелков, Ф.Л.Шапиро. Письма ЖЭТФ 9, 40 /1969/.
6. Ф.Л.Шапиро. Конференция по исследованию структуры ядер с помощью нейтронов. Будапешт, 31 июля - 5 августа 1972 г.
7. A.Steyerl, H.Vonach. Z. Physik. 250, 166 (1972).

Рукопись поступила в издательский отдел
2 июля 1973 года.