

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

94

1205/2-81

9/III-81

P3-80-761

В.П.Алфименков, А.Д.Стойка, А.В.Стрелков

ИССЛЕДОВАНИЕ ХРАНЕНИЯ УХН
В ГЕРМЕТИЧНЫХ СОСУДАХ

1980

ВВЕДЕНИЕ

Ультрахолодные нейтроны /УХН/ - нейтроны с энергиями $\sim 10^{-7}$ эВ^{/1/} - обладают свойством, многократно отражаясь от поверхности, удерживаться в вакуумных полостях большинства обычных веществ. Эта возможность сравнительно долгой локализации нейтронов в некотором экспериментальном объеме должна позволить намного повысить точность ряда фундаментальных экспериментов^{/1,2/}, что в значительной мере стимулировало экспериментальные исследования с УХН^{/2/}. Первые же опыты показали, что УХН действительно удерживаются в замкнутых сосудах, однако время их удержания оказалось ограничено более или менее одинаковым пределом, независимо от выбора материала отражающей стенки. Для меди и нержавеющей стали этот предел в 2-4 раза, а для бериллия, стекла, графита даже в ~ 20 раз оказался меньше значения, рассчитанного по теории оптического потенциала с использованием экспериментальных значений сечений захвата и неупругого рассеяния. Рассеяние на остаточном газе, акустические вибрации стенок и просачивание УХН через конструкционные щели в сосудах, как показали даже беглые эксперименты, не объяснили наблюдаемой утечки УХН. Причиной такой утечки предполагался нагрев УХН на стенках, поскольку температура газа УХН $\sim 10^{-3}$ К намного ниже температуры стенок удерживающего сосуда $\sim 10^2$ К. Достаточно эффективно УХН должны нагреваться только на атомах водорода, поэтому нагрев УХН на водородсодержащих загрязнениях поверхности первоначально считался наиболее вероятной причиной, объясняющей большую разницу в расчетном и наблюдаемом времени удержания УХН^{/8/}. В противовес этому опыт показал, что предел, ограничивающий время хранения УХН в сосуде, не зависит от температуры его стенок^{/3-6/}, а это противоречило гипотезе нагрева УХН на водородсодержащих пленках.

Однако немного спустя был непосредственно обнаружен процесс разогрева УХН до тепловых энергий^{/7,8/}, который, как утверждалось, и определял предел времени хранения УХН. Вскоре методикой ядерных реакций на поверхностях образцов из меди, стекла и пирографита были обнаружены атомы водорода в количествах, необходимых для объяснения наблюдаемой интенсивности нагрева УХН на стенках сосуда из этих материалов^{/9,10,11/}. Существованием таких поверхностных примесей авторы работы^{/12/} объяснили свои

результаты эксперимента по отражению УХН от поверхности, в котором наблюдалось слишком большое размытие потенциала на границе вещество - вакуум. С другой стороны, эксперименты^{/13/} с сосудами, на стенках которых непрерывно конденсировались пары металлов, показали независимость времени хранения УХН от скорости конденсации, что в некоторой мере противоречило предположению о существовании на поверхностях значительных количеств водородсодержащих загрязнений. Такой же вывод делается и в работе^{/14/}, где наблюдалось незначительное уменьшение пропускания УХН медной трубой при ее нагреве. В противовес этим экспериментам, в работе^{/15/} была наблюдена довольно значительная температурная зависимость хранения УХН в алюминиевом сосуде.

В такой, довольно противоречивой ситуации, сложившейся вокруг экспериментальных результатов по хранению УХН, стало важно надежно установить - существует ли температурная зависимость времени хранения? Дело в том, что во всех ранее выполненных экспериментах не было исключено влияния некоторого аппаратного эффекта, который мог внести разнородные результаты. Таким аппаратным эффектом является массоперенос и перераспределение на поверхности летучих водородсодержащих соединений, поскольку использованные до сих пор системы сосудов для хранения УХН не были герметично отделены от общей вакуумной системы, имели значительные температурные градиенты и работали при недостаточном вакууме. Таких недостатков лишена конструкция сосуда, использованная для хранения УХН в нижеописанном эксперименте.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

УХН хранились в медном сосуде /1/ /рис.1/ диаметром 50 см, высотой 24 см и толщиной стенки 2 мм. Внутренняя полость сосуда герметично отделялась от остальной вакуумной системы окном /2/ из алюминиевой фольги /чистоты 99,99%/ толщиной 60 мкм, по краю зажатой между двумя алюминиевыми прокладками. Герметизация привода входной заслонки /3/ выполнена с помощью сильфонов /4/ из нержавеющей стали. Охлаждение сосуда осуществлялось прокачкой по наружному змеевику /5/ жидких N_2 /до 80 К/ и He /ниже 80 К/, а нагрев - электрическими спиралями /6/, опоясывающими сосуд. Специальный нагреватель имело и входное окно /2/. Для теплоизоляции сосуд окружен двумя экранами, пассивным /7/ и охлаждаемым /8/, по змеевику которого пропускался жидкий N_2 /при охлаждении сосуда жидким He / или вода /при нагреве сосуда до высоких температур/. Температура сосуда и ее градиенты в нескольких точках на поверхности сосуда контролировались

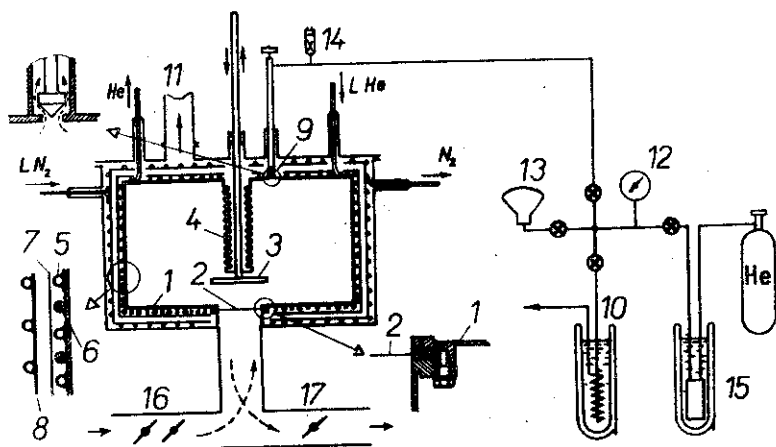


Рис. 1. Схема экспериментальной установки /объяснения в тексте/.

дифференциальными термопарами, а в области низких температур - германиевым резисторным датчиком. Конструкция вентиля откачки /9/ позволяла производить запираение откачкой магистрали непосредственно на стенке сосуда, фиксируя тем самым количество остаточного газа в объеме хранения УХН. Откачка сосуда происходила через азотную ловушку /10/, соединенную с общей вакуумной системой /11/, в которой поддерживался вакуум $\sim 10^{-4} - 10^{-5}$ / Торр. Давление в сосуде измерялось образцовым вакуумметром /12/, оптическим микроманометром /13/ и термопарным датчиком /14/. Для увеличения эффективности откачки применялись частые промывки сосуда в вязкостном режиме /16/ газообразным He высокой чистоты /содержащим не более $5 \cdot 10^{-6}$ H_2 , 10^{-6} CH_4 и H_2O /, поступающим от баллона через ловушку с палладированным силикагелем /15/.

В такой сравнительно простой системе хранения УХН осуществлялось в условиях сверхвакуумной гигиены, достигнутых применением а/ температурного обезгаживания, б/ наружного вакуума, в/ большой скорости откачки с использованием балластного газа He, остаточное давление которого /менее 10^{-2} Торр/ заметно не влияет на хранение УХН. Последнее утверждение было непосредственно проверено в специально поставленном опыте, который показал, что среднее время жизни УХН в используемом нами гелии $\tau_{\text{He}} = 330 \cdot P^{-1}$ с, где P - давление He в Торр.

Придавая различные комбинации положению заслонок /3, 16 и 17/, полость сосуда можно было бы последовательно соединять

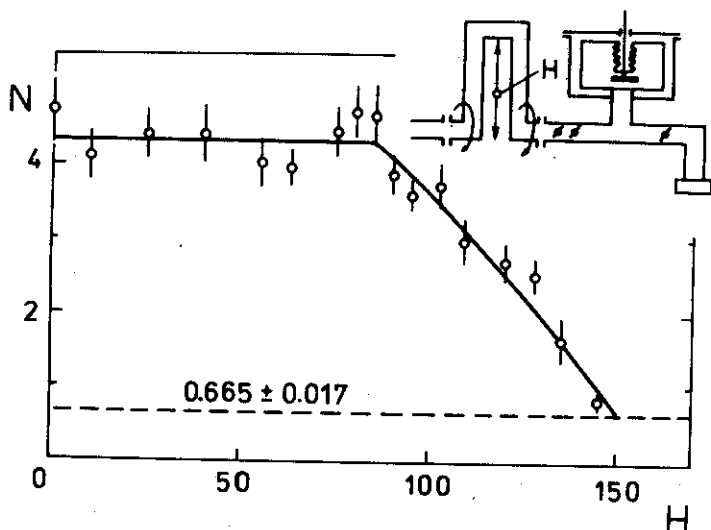


Рис.2. Схема и результат измерений спектра УХН, наполненных в сосуде, интегральным гравитационным спектрометром. N - число нейтронов, зарегистрированных после 20-секундной выдержки УХН в сосуде /время наполнения - 100 с, время регистрации - 40 с/, H - высота в см гравитационного барьера, устанавливаемая подъемом колена спектрометра. Пунктирная линия соответствует фону /количеству зарегистрированных нейтронов за 40 с при постоянно закрытых входных заслонках /16//.

с нейтроноводом УХН ¹⁷/ и детектором УХН - пропорциональным счетчиком с ³He. Рабочий фон детектора (заслонки : /16/ - закр., /17/ - откр.) $\sim 8 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ определялся главным образом УХН, просачивающимися через конструкционные щели в сдвоенной входной заслонке /16/ при фоне от тепловых нейтронов $\sim 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Из нейтроновода сосуд наполнялся УХН до равновесной плотности, соответствующей содержанию ~ 50 шт. УХН в объеме сосуда. Среднее время наполнения /и опорожнения/ составляло 20 с. Время хранения τ_{ex} находилось из подсчета детектором числа УХН, оставшихся в сосуде спустя некоторое варьируемое время выдержки.

Спектр находящихся в сосуде УХН определялся путем измерения зависимости числа УХН, накопленных в сосуде, от высоты подъема колена интегрального гравитационного спектрометра ³/, расположенного перед входом в сосуд /рис.2/. Сплошная линия соответствует постоянной плотности УХН в фазовом пространстве

в диапазоне скоростей $/3,43 \div 4,95/$ м·с⁻¹, а пунктирная - фону. Нижняя граница спектра определяется граничной скоростью для алюминиевого окна и высотой его расположения, а верхняя - высотой положения дна сосуда над уровнем транспортного нейтрона /25 см/ и его граничной скоростью $/6$ м·с⁻¹ /.

ЭКСПЕРИМЕНТ. РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Внутренняя поверхность медного сосуда предварительно обрабатывалась электрополировкой в растворе H_2PO_4 с последующей промывкой водопроводной водой. Аналогично были обработаны поверхности сифона и входной заслонки. При охлаждении в таком сосуде наблюдалась сильная температурная зависимость τ_{ex} : $28,7 \pm 1,8$ с при 300 К, $38,2 \pm 5,6$ с при 170 К и $52,8 \pm 3,2$ с при 80 К /рис.3а/.

Затем сосуд нагревался выше 300 К и откачивался с применением частых промывок гелием. С ростом температуры по мере обезгаживания стенок наблюдалось существенное возрастание $\tau_{ex} /300$ К/ /измеряемое при $T = 300$ К/, что, вероятно, связано с очисткой поверхности от адсорбированных молекул, причем наиболее эффективно этот процесс происходил до температур $\sim /450 \div 470/$ К. При нагреве свыше 600 К начинается газовыделение абсорбированных газов /особенно водорода/ из металла стенки с глубин ~ 100 мкм¹⁸/ значительно превышающих глубину проникновения УХН в стенку при отражении ~ 100 А/. Вероятно, по этой причине не замечалось дальнейшего увеличения $\tau_{ex} /300$ К/. Обезгаживание происходило при температуре ~ 700 К, поддерживаемой в течение ~ 6 ч и с применением частых промывок гелием. После обезгаживания τ_{ex} приняло значения: $94,0 \pm 8,6$ с при 300 К и $115,0 \pm 8,4$ с при 80 К /рис.3б/.

После повторной электрополировки медного сосуда в растворе H_2PO_4 с последующей промывкой дистиллированной водой $\tau_{ex} /300$ К/ = $24 \pm 1,5$ с. При нагреве с закрытым вентилем /9/ /предварительно откачанного сосуда до $\sim 10^{-2}$ Торр/ по мере роста температуры было замечено повышение давления, достигшего 0,95 Торр при 700 К, при этом τ_{ex} уменьшилось настолько, что стало значительно меньше времени наполнения, и его невозможно было измерить. После нагрева до $T = 700$ К в течение 2 ч при непрерывной откачке $\tau_{ex} /300$ К/ = $94,8 \pm 4,4$ с. Затем вентиль /9/ закрывался и измерялась зависимость τ_{ex} от температуры. С увеличением температуры τ_{ex} уменьшалось до значений: $\tau_{ex} /543$ К/ = $80,0 \pm 5,0$ с; $\tau_{ex} /600$ К/ = $59,0 \pm 4,0$ с; $\tau_{ex} /673$ К/ = $47,0 \pm 6,0$ с, причем в промежуток времени, необходимый для измерения τ_{ex} /2 \div 3 ч/, не было замечено изменения τ_{ex} . После увеличения температуры обезгаживания до $T = 820$ К /пре-

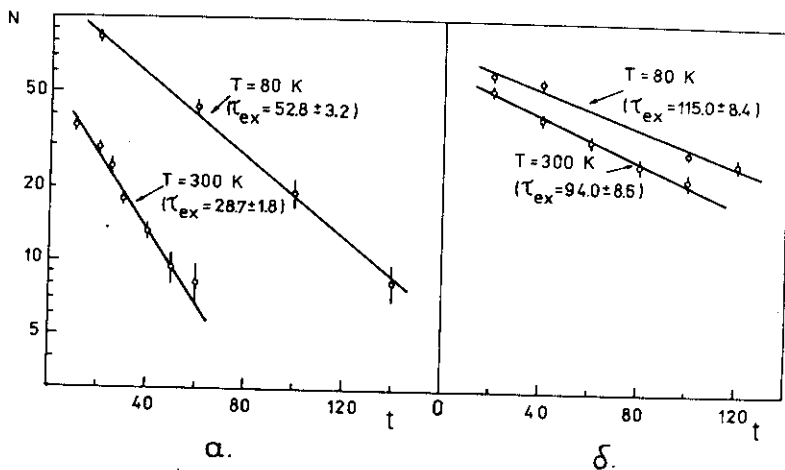


Рис.3. Кривые хранения УХН для медного сосуда: а - не обезгаженного, б - обезгаженного. N - число УХН в сосуде спустя время выдержки t /с/.

Таблица 1

Зависимость τ_{ex} /с/ и $\bar{\mu}$ от температуры для обезгаженного медного сосуда

T(K)	$\tau_{ex}(c)$	$\bar{\mu} \times 10^4$
80	115.0 ± 8.4	3.27 ± 0.27
170	112.0 ± 8.6	3.37 ± 0.30
220	91.5 ± 5.8	4.22 ± 0.30
300	94.8 ± 4.4	4.06 ± 0.21
460	88.0 ± 4.4	4.41 ± 0.24
550	86.2 ± 7.3	4.51 ± 0.42
800	74.0 ± 12.0	4.77 ± 0.94

дельно возможной для данной конструкции и ограниченной температурой плавления Al-окна/ в течение 6 ч температурная зависимость τ_{ex} , измеренная при закрытом вентиле /9/, стала менее выраженной: $\tau_{ex}/550 K/ = 86,2 \pm 7,3$ с; $\tau_{ex}/800 K/ = 74,0 \pm 12,0$ /см. табл.1/. Допуская, что такое изменение τ_{ex} связано с процессом неупругого рассеяния УХН на газе, выделившемся из стенок сосуда при его нагреве, и, принимая $P_r = 4,5$ Торр-с для спектра газов, растворенных в меди /H₂ 39,6%; CO₂ 49,7%; O₂ 10,9%/

с учетом $T^{1/2}$ - температурной зависимости неупругого рассеяния на газе, получаем равновесное давление выделившегося газа $P \sim 3 \cdot 10^{-2}$ Торр /приведено к 300 К/. Такое количество газа соответствует полному обезгаживанию поверхностного слоя толщиной ~ 4 мкм. /Содержание газа в необезгаженной меди $\sim 2 \cdot 10^{-2}$ %/атом./^{16/}/. С больших глубин газ можно извлечь только за большее время и при больших температурах. При охлаждении этот поверхностный слой остается обезгаженным, поскольку коэффициент диффузии газа в стенке сильно падает с уменьшением температуры.

Напуск воздуха /до 1 атм/ в обезгаженный сосуд на 2 недели при 300 К не изменил заметным образом τ_{ex} /300 К/. Не было замечено изменения τ_{ex} /300 К/ и после операции напуска в обезгаженный сосуд при 700 К 30 Торр водорода на 2 ч с последующей откачкой водорода после охлаждения сосуда до 300 К.

2. После окончания измерения температурной зависимости τ_{ex} для медного сосуда, на его внутреннюю стенку и поверхность сильфона и заслонки в вакууме $\sim 10^{-5}$ Торр методом термического испарения с вольфрамовых спиралей наносился слой бериллия толщиной 0,35 мкм /исходной чистоты 99,7%/. По технологическим обстоятельствам, связанным со сложностью сборки конструкции, свеженанесенный слой бериллия около двух суток находился в контакте с атмосферой. В таком сосуде без предварительного нагрева τ_{ex} /300 К/ = 65 ± 5 с. При прогреве сосуда, по мере обезгаживания наблюдалось значительное увеличение τ_{ex} /300 К/ вплоть до температуры ~ 800 К, что, вероятно, связано с более сильной адсорбцией газов на такой поверхности. Увеличение температуры с 300 К по ступеням: /480, 600, 700, 800/ К приводит к ступенчатому росту давления /равновесного для данной температуры/ /2,2; 3,8; 5,3; 6,9/ 10^{-1} Торр соответственно. Обезгаживание продолжалось 12 ч при $T = 800$ К до остаточного газо-выделения стенок, не превышающего значения $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ Торр литр/мин. После обезгаживания τ_{ex} /300 К/ = $116,7 \pm 10,7$. Зависимость от температуры сосуда в диапазоне /20-700/ К измерялась при постоянно закрытом вентиле /9/ /см. табл.2/. Минимальная температура 20 К в течение 2 ч была достигнута путем продувки по трубкам охлаждения сосуда ~ 100 л жидкого гелия. После двухсуточного контакта с атмосферой τ_{ex} в обезгаженном бериллиевом сосуде уменьшилось \sim в 2 раза и восстановилось после следующего обезгаживания.

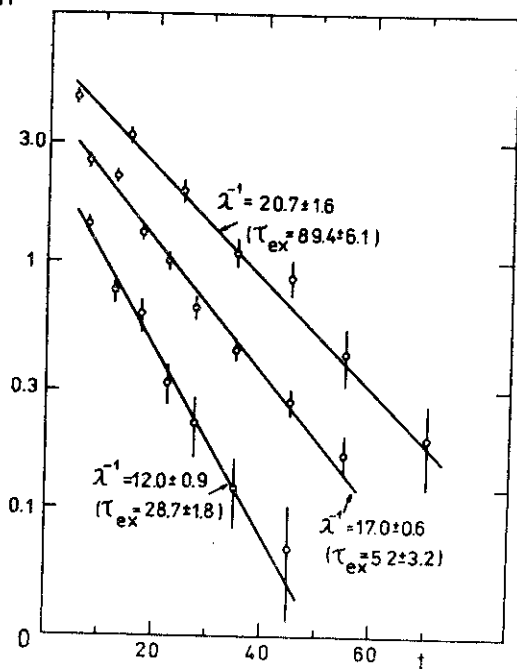
3. Одновременно с измерением τ_{ex} изучался и процесс вытекания УХН на детектор после их хранения в сосуде. На рис.4 показаны некоторые кривые вытекания УХН из сосуда /зависимости интенсивности регистрации УХН от времени с момента открытия заслонки /3//, измеренные при высоте подъема заслонки на высоту

Таблица 2

Зависимость τ_{ex}/c и $\bar{\mu}$ от температуры для обезгаженного бериллиевого сосуда

T(K)	$\tau_{ex}(c)$	$\bar{\mu} \times 10^4$
20	110.0 ± 21.0	2.63 ± 0.78
40	131.0 ± 32.0	2.45 ± 0.85
80	121.0 ± 8.2	2.15 ± 0.20
150	113.6 ± 21.0	2.64 ± 0.48
210	115.8 ± 16.3	2.44 ± 0.64
300	116.7 ± 10.7	2.76 ± 0.30
400	105.0 ± 16.0	2.68 ± 0.56
500	102.5 ± 13.8	3.11 ± 0.54
600	101.8 ± 15.1	3.48 ± 0.66
700	110.3 ± 19.7	3.42 ± 0.69

n



$h = 3,5$ см. Наблюдаемая постоянная спада интенсивности регистрации вытекающих УХН λ зависит от τ_{ex} :

$$\lambda = \tau_s^{-1} + \tau_{ex}^{-1}$$

Среднее время вытекания - τ_s для разных τ_{ex} оказалось одинаковым во всех случаях, показанных на рис.4. Экспериментально было показано, что τ_s не зависит от температуры Al-фольги окна /рис.5/, не наблюдалось также и зависимости τ_{ex} от температуры Al-фольги при фиксированной температуре всего остального сосуда. Это указывает на постоянство спектра УХН во время хранения, поскольку τ_s и τ_{ex} сильно зависят от средней скорости УХН \bar{V} . Через выходное отверстие УХН вытекают из сосуда подобно разреженному идеальному газу, поэтому из очевидных газокинетических соображений $\tau_s = T_0 + \tau_h$, где T_0 - время вытекания УХН из сосуда в отсутствие системы "заслонка - фольга", а $\tau_h = [2\pi R h \gamma(\bar{V})]^{-1}$ - время прохождения системы "заслонка - фольга".

Рис.4. Кривые вытекания УХН из медного сосуда для разных τ_{ex} . n - интенсивность регистрации УХН /в обратных секундах/ спустя время t /с/ с момента открытия заслонки /з/ в сосуде.

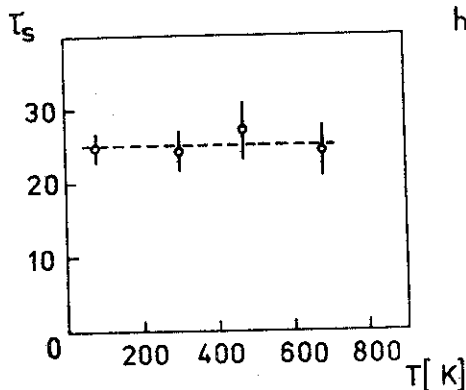


Рис.5. Зависимость среднего времени вытекания τ_s /с/ от температуры сосуда T /К/.

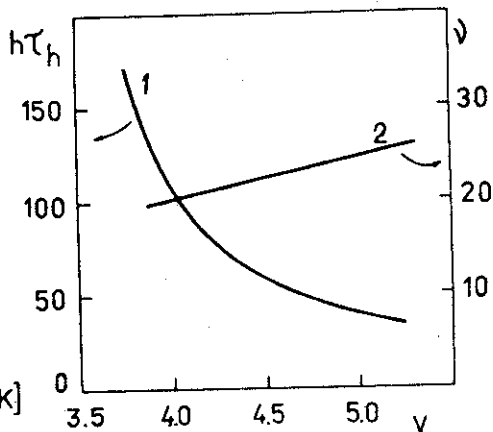


Рис.6. Расчетные зависимости от скорости V /м·с⁻¹ / УХН для $h\tau_h$ /см·с/ /кривая 1/ и частоты ударов УХН о стенки ν /с⁻¹ /.

Здесь R - радиус заслонки/отверстия/, h - высота ее подъема, а $y(V)$ - коэффициент пропускания системы "заслонка - фольга", зависящий от средней скорости \bar{V} спектра УХН. На рис.6 /кривая 1/ показана расчетная зависимость $h\tau_h$ от V . Экспериментально измеренная зависимость τ_s от h /рис.7/ позволила определить T_0 , откуда $\bar{V} = 4,7^{+0,36}_{-0,25}$ м·с⁻¹. В дальнейших расчетах использовалось именно это значение \bar{V} . Оно довольно хорошо согласуется с предыдущим измерением \bar{V} гравитационным спектрометром. Из расчетной зависимости ν от \bar{V} / ν - средняя частота ударов УХН о стенку сосуда/, изображенной на рис.6 /кривая 2/ в пренебрежении влиянием гравитации/, получаем $\nu = 23,3$ с⁻¹ для нашего значения \bar{V} . Средний коэффициент потери УХН при одном столкновении $\bar{\mu} = (\tau_{ex}^{-1} - \tau_{\beta}^{-1}) \cdot \nu^{-1}$, где $\tau_{\beta} = 918$ с - время жизни нейтрона до β -распада.

В некоторых измерениях во время хранения наблюдалось "просачивание" УХН из сосуда через щель /вызванную термическими деформациями/ между заслонкой /3/ и дном сосуда. Так как просочившиеся УХН через эту щель затем с подавляющей вероятностью попадали в детектор, то можно ввести коррекцию τ_{ex} на такую утечку: $\tau_{ex}^{cor} = \tau_{ex} (1 - \bar{a})^{-1}$, где \bar{a} - среднее значение отношения числа УХН, регистрируемых детектором за время хранения УХН, к полному числу УХН, убывающих из сосуда за это время. Максимальное значение \bar{a} не превышало - 0,15. На рис.8 приведены данные для $\mu(T)$ с учетом такого "просачивания".

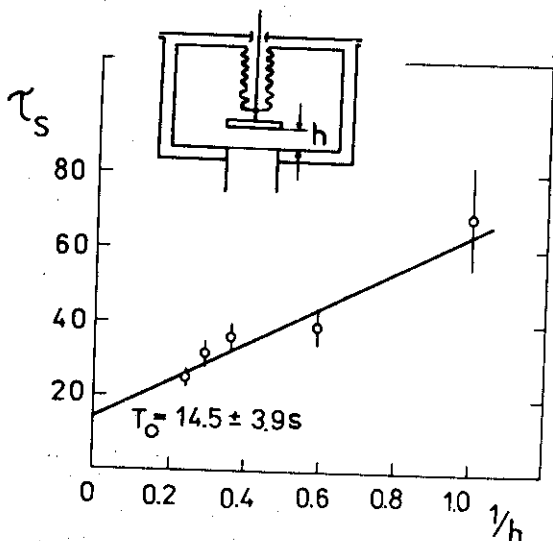
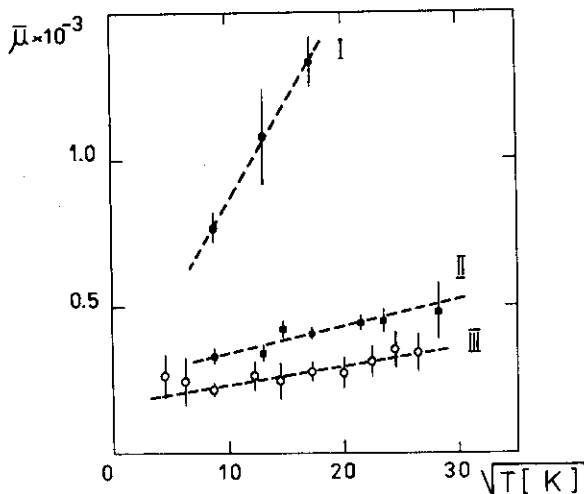


Рис.7. Зависимость среднего времени вытекания τ_s /с/ УХН от высоты открытия заслонки h /см/.

4. Для проверки утверждения, что на поверхности сосудов после обезгаживания не оставалось загрязнений, наличием которых в принципе можно было бы объяснить аномально большую утечку УХН из сосудов /нагрев, захват/, в качестве вещества, отражающего УХН, использовались тонкие слои D_2O и CO_2 , конденсированные на стенки медного сосуда при 80 К. Наличие возможных градиентов температуры на поверхности сосуда может привести к неравномерности в толщине слоя конденсированных веществ. При 80 К перепад температуры по стенкам сосуда не превышал /1-2/ К. Для получения равномерных конденсированных слоев пары D_2O и CO_2 подавались в сосуд в смеси с гелием /~50 Торр/, который откачивался после вымораживания используемого пара. Плотность потока конденсируемых атомов из гелиевой смеси на стенку постоянна по всей площади сосуда, а равновесное давление конденсируемых паров при $T = 80$ К очень низкое / CO_2 - 10^{-8} Торр, D_2O ~ 10^{-19} Торр/. Эти обстоятельства позволяют надеяться на достаточную равномерность в толщине намораживаемых паров по всей внутренней поверхности сосуда, за исключением Al-фольги входного окна, температура которой намного превышает температуру сосуда. Для конденсированных слоев с толщинами 2000 Å D_2O и 3000 Å CO_2 при температуре 80 К полученные значения $\bar{\mu}$ соответственно /2,57±0,52 и 2,73±0,33/· 10^{-4} не отличаются в пределах ошибок от $\bar{\mu}$ для Cu и Be при такой же температуре.

Рис. 8. Зависимость среднего коэффициента потери УХН при одном отражении $\bar{\mu}$ от температуры T/K для: I - не обезгаженного медного сосуда; II - обезгаженного медного сосуда и III - обезгаженного бериллиевого сосуда.



5. Для проверки влияния предполагаемых водородсодержащих загрязнений поверхности на значение $\bar{\mu}$ в сосуде осуществлялись условия для изотопного замещения водорода на дейтерий. Для этого парами D_2O /~25 Торр/ обрабатывалась обезгаженная медная поверхность сосуда в течение 30 мин при $T=600$ К. После остывания сосуда и последующей откачки паров D_2O изменения $\tau_{ex} / 300$ К/ не наблюдалось. Не было замечено эффекта изменения $\tau_{ex} / 300$ К/ и после обработки этой поверхности парами D_2O в присутствии добавок щелочи NaOD / pH ~ 11 для раствора NaOD в D_2O / или кислот DNO_3 и D_2SO_4 (pH ~ 1 ÷ 2), значительно интенсифицирующих процессы изотопного замещения. Однако окончательная интерпретация этих результатов затруднена по причине того, что поверхность сосуда в этих случаях, вероятно, покрыта существенными количествами продуктов химических реакций меди с вводимыми реактивами.

Здесь следует отметить, что было бы весьма интересно провести этот процесс в электрополированном, не обезгаженном сосуде, где ожидаемое действие изотопного замещения (H → D) было бы эквивалентно действию термического обезгаживания стенок сосуда.

ОБСУЖДЕНИЯ. ВЫВОДЫ

1. Наблюдается сильный эффект возрастания τ_{ex} при термическом обезгаживании электрополированного медного сосуда и сосуда с напыленными бериллиевыми стенками. Ранее прогрев электро-

полированного медного сосуда не влиял на значение τ_{ex} . Причиной этого может служить разброс в параметрах применяемых процессов электрополировки, либо тот факт, что в работе ^{16/} в медном сосуде отдельные части его не прогревались, и на них могли конденсироваться примеси, возгоняемые с нагретых областей поверхности, тем самым общее количество примесей в сосуде при его нагреве не менялось.

2. Во всех предыдущих экспериментах /за исключением ^{19/}*/ применяемая вакуумная гигиена была недостаточной, чтобы гарантировать отсутствие на поверхностях сосудов присутствия летучих водородсодержащих веществ, неупругое рассеяние на которых считалось наиболее вероятной причиной аномально большого наблюдаемого $\bar{\mu}$. Сверхвакуумная система для хранения УХН достаточно сложна. В настоящей работе сверхвакуумная гигиена достигнута, хотя сверхвакуум внутри сосуда непосредственно не измерялся. Можно утверждать, что "эффективный вакуум" /вакуум без учета атомов He / был не хуже 10^{-8} Торр. Этот "эффективный вакуум" определялся только степенью чистоты используемого для промывки He и остаточным газовыделением после обезгаживания, которое достаточно мало. Отметим, что скорость газовыделения при 300 K понижается на ~10 порядков после обезгаживания даже только при 400 K ^{20/}; поэтому в подвергнутых температурному обезгаживанию /T ~500 K/ изолированных от откачки сосудах в течение недели вакуум сохраняется не хуже 10^{-7} Торр ^{21/}.

Несмотря на радикальное улучшение гигиены откачки в нашем эксперименте, в нем, как и в ранних экспериментах, минимально достигнутое $\bar{\mu}$ для меди -- в 2 раза больше расчетного значения, что можно было бы в принципе объяснить наличием шероховатостей у реальной отражающей поверхности ^{22/}. Однако для бериллиевой поверхности по этой причине уже нельзя связать концы с концами, поскольку полученное $\bar{\mu}$ отличается от расчетного ~ в 20 раз. Маловероятным кажется и предположение о ~20%-ом загрязнении напыленного бериллия вольфрамом /материал распылителей/, захват на ядрах которого объяснил бы низкое достижимое значение $\bar{\mu}$ и независимость его от температуры.

3. Для обезгаженного медного сосуда наблюдается возрастание $\bar{\mu}$ с ростом температуры в диапазоне /80-800/K. Эта зависимость слишком слабая, если допустить, что аномальная утечка УХН из сосуда связана с процессами неупругого рассеяния на неких поверхностных загрязнениях, не устранимых термическим обезгаживанием. Даже для наиболее слабой из известных $T^{1/2}$ -

*В работе ^{19/} не приводится надежных данных для $\bar{\mu}$.

температурной зависимости неупругого рассеяния на газе, в этом диапазоне температур $\bar{\mu}$ должно измениться ~ в 3 раза. Но эта зависимость слишком велика для неупругого рассеяния УХН на чистой меди, на которой расчетная доля неупругих процессов не должна превышать $\sim 10^{-6}$ /23/. Пожалуй, не следует придавать большого значения наблюдаемой слабой зависимости $\bar{\mu}(T)$, поскольку в нашем случае она может быть вызвана зависимостью формы спектра наполняющих сосудов УХН от температуры входного окна /увеличение \bar{V} с ростом температуры происходит за счет возрастания неупругих процессов в алюминиевом окне, подчиняющихся закону V^{-1} /. Оценки показали, что такой эффект относительно мал, однако достигнутая точность в эксперименте /рис.5/ недостаточна, чтобы непосредственно в этом убедиться.

4. Наблюдаемая и в обезгаженных сосудах слишком большая утечка УХН, слабо зависящая от температуры и практически не зависящая от процессов дейтерирования и покрытия стенок конденсированными D_2O и CO_2 , ставит под сомнение существование нагрева УХН на водородсодержащих поверхностных загрязнениях как причины аномально малого времени хранения УХН в замкнутых сосудах. В эту ситуацию внесет ясность планируемый нами в настоящее время эксперимент по обнаружению процесса разогрева УХН и на обезгаженных поверхностях и результаты эксперимента со сверхвысоковакуумным сосудом для хранения УХН, описанном в /10/.

Авторы благодарны за помощь при выполнении эксперимента Ю.Ю.Косвинцеву, Ю.А.Кушнису, В.И.Морозову, Г.И.Терехову и персоналу реактора СМ-2, на котором проделана эта работа. Особо обязаны мы Е.Н.Кулагину за организацию охлаждения жидким гелием. Мы также признательны В.С.Демину, В.К.Игнатовичу, В.И.Луцикову, И.М.Франку и В.А.Халкину за внимание к этой работе, советы и дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шапиро Ф.Л. Нейтронные исследования. "Наука", М., 1976, с.195.
2. Шапиро Ф.Л. УФН, 1968, 95, с.145.
3. Groshev L.V. et al. Phys.Lett., 1971, 34B, 4, p.293; ОИЯИ, РЗ-5392, Дубна, 1970.
4. Егоров А.И. и др. ЯФ, 1974, 19, с.300.
5. Luschikov V.I. Physics Today, 1977, 30,, 6, p.42.
6. Луциков В.И. и др. Препринт ИАЗ-3066, М., 1978.
7. Стрелков А.В., Хетцельт М. ЖЭТФ, 1978, 74, с.23.
8. Stoica A.D., Strelkov A.V., Hetszelt M. Z.Phys.B., 1978, 29, p.349.

9. Lanford W.A., Golub R. Phys.Rev.Lett., 1977, 39, p.1509.
10. Bugeat J.P., Mame W. Z.Phys.B., 1979, 35, p.273.
11. Lanford W.A. Nucl.Instr. and Meth., 1978, 149, p.1.
12. Schekenhofer H., Steyerl A. Phys.Rev.Lett., 1977, 39, p.1310.
13. Косвинцев Ю.Ю. и др. Письма в ЖЭТФ, 1978, 28, 3, с.164.
14. Франк И.М. ОИЯИ, РЗ-12829, Дубна, 1979.
15. Косвинцев Ю.Ю., Кушнир Ю.А., Морозов В.И. ЖЭТФ, 1979, 77, 4/10/, с.1277.
16. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. ИЛ, М., 1950.
17. Kosvintsev Y.Y. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1977, 143, p.133; ОИЯИ, РЗ-10238, Дубна, 1976.
18. Малев М.Д. ЖТФ, 1972, 42, 12, с.2589.
19. Trustedt W.-D., Steyerl A., Koester L. Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft. Forschungsbericht K 72-07, Jahresbericht 1970, Mai 1972, s.108.
20. Трендленбург Э. Сверхвысокий вакуум. "Мир", М., 1966.
21. Агеев В.Н., Ионов Н.И., Устинов Ю.К. ЖТФ, 1964, 34, 12, с.2056.
22. Игнатович В.К., Лушиков В.И. ОИЯИ, РЗ-8795, Дубна, 1975.
23. Holas A. phys.stat.sol.(b), 1977, 81, p.K107.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 ноября 1980 года.