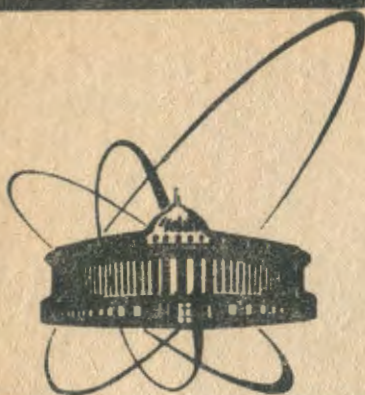


89-42



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

P3-89-42

В.В.Голиков, Е.Н.Кулагин, Ю.В.Никитенко

**ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОТЕРЬ  
УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ В БЕРИЛЛИИ**

**1989**

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В работе<sup>1,2</sup> описывается новый метод измерения коэффициента потерь УХН при их отражении от поверхности вещества и приведены экспериментальные результаты измерений, выполненных на меди, окиси меди и графите.

Метод основан на диффузии УХН в порошках и заключается в том, что о коэффициенте потерь  $\mu$  судят по коэффициенту отражения УХН от слоя порошка. Метод обладает высокой чувствительностью и позволяет проводить измерения коэффициента потерь УХН в диапазоне  $10^{-6} \div 10^{-3}$ .

Полученные новым методом данные для коэффициента потерь на необезгаженном порошке меди совпадают с результатами, полученными методикой хранения УХН в замкнутых ловушках<sup>1,2</sup>. На обезгаженных порошках меди и окиси меди впервые наблюдалось согласие экспериментальных данных по коэффициенту потерь УХН при комнатной температуре с теоретическими значениями, рассчитанными по известным сечениям захвата и неупругого рассеяния нейтронов в этих веществах.

Несколько неожиданными выглядят результаты измерений  $\mu$  на слабопоглощающем материале — графите. В отличие от меди и  $\text{CuO}$  после отжига порошка минимальное значение коэффициента потерь, согласующееся с расчетом, было получено при температурах образца выше 400 К, в то время как при понижении температуры до 293 К наблюдалось возрастание величины  $\mu$ , примерно в 7 раз превышающее расчетное значение.

В связи с этим представляется интересным провести измерения температурной зависимости коэффициента потерь УХН на другом слабопоглощающем материале. В качестве объекта исследований был выбран бериллий.

В настоящей работе кратко излагаются основы метода измерения коэффициента потерь УХН и рассматриваются его особенности для случая, когда свойства порошка являются неоднородными. Описывается установка, усовершенствованная для измерений коэффициентов отражения УХН, и сообщаются экспериментальные данные по коэффициентам потерь УХН в бериллии.

## 2. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПОТЕРЬ

Однородный слой порошка

Рассмотрим отражение падающих из вакуума моноэнергетических нейтронов со скоростью  $v$  от слоя порошка толщиной  $\ell$ . Будем считать, что вероятность потерь УХН на единице пути в порошке значительно меньше вероятности рассеяния. Тогда процесс распространения УХН в слое порошка можно описать уравнением диффузии

$$\frac{d^2 n(z)}{dz^2} = \frac{n(z)}{L^2}, \quad (1)$$

где  $n(z)$  — плотность нейтронов,  $z$  — координата по направлению нормали к поверхности раздела вакуум — порошок, отсчитываемая от этой поверхности в глубь слоя,  $L$  — длина диффузии УХН в порошке.

В результате решения (1) получим для коэффициентов отражения  $r$  и пропускания  $t$  УХН слоем порошка (в случае, когда скорость нейтронов меньше граничной скорости материала) следующие выражения<sup>1,3</sup>:

$$r = \rho(1 - e^2)(1 - \rho^2 e^2)^{-1}, \quad (2)$$

$$t = e(1 - \rho^2)(1 - \rho^2 e^2)^{-1},$$

где  $\rho = (1 - \omega)/(1 + \omega)$ ,  $\omega = 2\sqrt{\mu/3}$ ,  $e = \exp(-\ell/L)$ ,  $L = 4 \frac{1 - c}{c} \frac{V}{S} \frac{1}{\sqrt{3}\mu}$ ,

$c = \rho_1/\rho_2$ ;  $\rho_1$  — насыпная плотность порошка,  $\rho_2$  — плотность материала,  $V$  — объем зерна порошка,  $S$  — площадь поверхности зерна.

При наличии подложки с коэффициентом отражения  $q$  коэффициент отражения  $R$  слоя можно представить формулой

$$R = r + \frac{t^2 q}{1 - rq}. \quad (3)$$

Как следует из (2) и (3), для определения интересующего нас коэффициента потерь  $\mu$  достаточно знать коэффициент отражения от слоя бесконечной толщины  $R_\infty = R(\ell \rightarrow \infty)$ :

$$\mu = \frac{3}{4} \left( \frac{1 - R_\infty}{1 + R_\infty} \right)^2. \quad (4)$$

## Неоднородный слой порошка

Рассмотрим теперь случай диффузии УХН в порошке, свойства которого меняются по толщине слоя в направлении оси  $z$ . Конкретно это имеет место, например, при существовании градиента температуры вдоль  $z$ . Тогда, из-за зависимости сечения неупругого рассеяния УХН от температуры, коэффициент потерь  $\mu$  также оказывается зависимым от  $z$ .

В этом случае коэффициент отражения УХН от порошка можно определить следующим образом. Разобьем весь слой порошка толщиной  $\ell$  на такое как минимум количество  $n$  подслоев порошка толщиной  $\Delta\ell = \ell/n$ , чтобы с необходимой точностью вычисления коэффициента отражения можно было бы считать коэффициенты потерь  $\mu_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) в пределах толщины подслоев постоянными. Для коэффициентов отражения  $r_j$  и пропускания  $t_j$  УХН  $j$ -подслоем имеют место выражения, аналогичные (2),

$$\begin{aligned} r_j &= \rho_j (1 - e_j^2)(1 - \rho_j^2 e_j^2)^{-1}, \\ t_j &= e_j (1 - \rho_j^2)(1 - \rho_j^2 e_j^2)^{-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Коэффициенты отражения  $R_j$  и пропускания  $T_j$  слоя толщиной  $\ell_j = j\Delta\ell$ , представляющего совокупность из  $j$ -подслоев, могут быть определены с помощью рекуррентных соотношений<sup>14</sup>

$$\begin{aligned} R_j &= R_{j-1} + T_{j-1}^2 r_j (1 - R_{j-1} r_j)^{-1}, \\ T_j &= T_{j-1} t_j (1 - R_{j-1} r_j)^{-1}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $j = 2, \dots, n$ .

Наконец, с учетом подложки с коэффициентом отражения  $q$  для коэффициента отражения  $R$  всего слоя порошка имеем

$$R = R_n + T_n^2 q (1 - R_n q)^{-1}. \quad (7)$$

Далее, будем считать, что коэффициент потерь определяется как  $\mu(z) = \mu_0 f(z)$ , где  $f(z)$  — известная функция. Тогда для определения  $\mu_0$ , как и в случае однородного порошка, достаточно знать коэффициент отражения  $R_\infty = R_n$ .

## 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования проведены на канале УХН реактора ИБР-2. К выходу канала, по которому поступают нейтроны в интервале скоростей  $0 \div 5,67 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , через S-образное колено 1 подсоединена установка для измерения интегрального по углу коэффициента отражения УХН (рис. 1). S-образное колено может вращаться вокруг

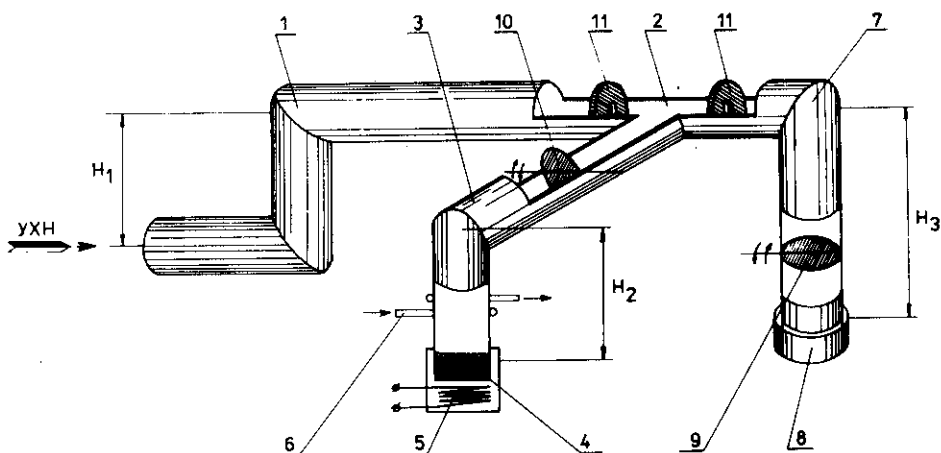


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – S-образное колено; 2 – разветвленный нейтронотвод; 3 – нейтронотвод на образец; 4 – образец; 5 – нагреватель образца; 6 – охлаждающий водяной контур; 7 – нейтронотвод на детектор; 8 – детектор; 9 и 10 – поворотные шторки; 11 – диафрагмы.

оси транспортного нейтронотвода и позволяет размещать экспериментальную установку над осью на высоте  $H_1$ . Использование замедления УХН в гравитационном поле позволяет изменить спектр УХН в установке путем изменения высоты ее подъема.

Основным элементом установки является разветвленный нейтронотвод 2. В вертикально расположенном участке нейтронотвода 3 длиной  $H_2$  размещен исследуемый образец 4 площадью  $S_0$ . В большинстве экспериментов порошок толщиной  $1 \div 20$  мм засыпался в открытую со стороны объема установки цилиндрическую кассету с отражающей УХН подложкой (медь или нержавеющая сталь). В отдельных случаях слой порошка помещался на поглотителе — УХН-полиэтилене. Максимальная площадь образца составляла  $\sim 300$  см<sup>2</sup>. Нагреватель 5 обеспечивает нагрев образца в вакууме установки до температуры 800 К. Для исключения нагрева элементов установки осуществлялось охлаждение нейтронотвода 3 проточной водой 6. В вертикальном участке нейтронотвода 7 установлен детектор УХН 8 — пропорциональный счетчик на основе <sup>3</sup>He. Для регистрации всего спектра УХН используется их ускорение в гравитационном поле, для чего детектор располагается ниже центра разветвленного нейтронотвода на расстоянии  $H_3 \approx 70$  см. Аппаратурное выделение УХН и исключение влияния изменения фона обеспечивались использованием традиционной методики "шторочной разности"<sup>1,2</sup> — для этой цели перед детектором установлена поворотная медная шторка 9. Аналогичная шторка 10 размещена перед образцом

в горизонтальной части нейтроновода 3. Шторка 10 ("стандартный образец") предназначена для учета возможного дрейфа аппаратуры. Это обеспечивается проведением попеременных измерений счета УХН с используемым образцом и шторкой 10. Диафрагмы 11 обеспечивают режим частичного накопления УХН в нейтроноводе 3, что приводит к увеличению чувствительности измерения поглощения УХН в слое порошка и, в конечном счете, к сокращению времени измерений. В установке системой безмасляной откачки поддерживается вакуум  $\sim 10^{-6}$  Торр. Для управления установкой, сбора и предварительной обработки информации использовался модуль на базе ЭВМ МЕРА-60.

Установка работает в циклическом режиме. Один цикл занимает несколько минут и содержит измерения в четырех состояниях установки, которые реализуются двумя шторками 9 и 10. Каждая из шторок может независимо от другой занимать два положения. В одном положении плоскость шторки направлена вдоль оси нейтроновода (состояние 1), и УХН свободно перетекают в нейтроноводе. В другом положении (состояние 2) шторка перекрывает сечение нейтроновода и не пропускает УХН. Из-за хорошей отражательной способности порошка ( $\sim 95 \div 99\%$ ) потоки УХН на детекторе, соответствующие двум положениям шторки 10, отличаются незначительно. Поэтому время реализации первого и второго состояний шторки 9 выбиралось пропорциональным корню квадратному из отношения потока УХН к фону. При этом скорость счета УХН детектором площадью  $32,5 \text{ см}^2$  при диафрагмах с диаметром отверстий 5 см составляла  $0,1 \text{ с}^{-1}$ , в то время как фон —  $0,015 \text{ с}^{-1}$ . На все измерения, включая калибровочные, было затрачено 40 суток.

Методика измерения интегрального коэффициента отражения газа УХН  $R$  от исследуемого образца сводится к следующему<sup>15</sup>. Скорость счета детектора в разветвленном нейтроноводе зависит от вероятности потерь УХН в образце  $M = 1 - R$ . Чтобы определить потери УХН в исследуемом образце, необходимо предварительно измерить калибровочную кривую с образцами, имеющими известное поглощение. Калибровка установки осуществлялась путем проведения измерений с полиэтиленовыми поглотителями различной площади, устанавливаемыми на месте образца. Вероятность потерь УХН в калибровочном образце площадью  $S_k$  равна  $M_k = S_k/S_n$ , где  $S_n$  — площадь поперечного сечения слоя порошка. На рис. 2 для примера приведена калибровочная зависимость  $\gamma(M_k) = J/J_k$  установки в измерениях с бериллиевым порошком, где  $J_k$  и  $J$  — "шторочные разности" скоростей счета детектора при наличии полиэтилена площадью  $S_k$  и от "стандартного образца" соответственно. Чувствительность установки характеризуется тем, что изменение коэффициента отражения на 1% приводит к изменению счета детектора на 3,5%. При измерениях с исследуемым об-

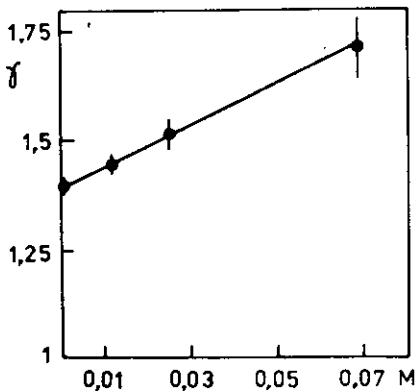


Рис. 2. Калибровочная кривая установки при проведении экспериментов с бериллиевым порошком.

разцом вероятность потерь УХН в порошке  $M_x$  полагалась равной  $M_k$ , если выполнялось соотношение

$$\gamma(M_k) = \gamma(M_x). \quad (8)$$

Формирование потока УХН на образце в интервале скоростей  $\Delta v = v_2 \div v_1$  осуществлялось путем изменения высот подъема экспериментальной установки  $H_1$  и образца  $H_2$  над уровнем транспортного нейтронотода ( $v_2$  и  $v_1$  — максимальная и минимальная скорости УХН на образце). При обработке результатов измеренное значение  $M_x$  отождествлялось со значением  $M_k$  при средней по спектру скорости  $v$  УХН. Из-за малых отклонений коэффициента отражения  $R$  от единицы форма спектра УХН считалась неизменной для всех образцов и предполагалась максвелловской. Как показывают расчеты, из-за довольно узкого интервала скоростей УХН при измерениях ( $\Delta v = 1,2 \div 2,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ) значение средней скорости  $v$  слабо зависит от вида спектра. К тому же ошибка определения коэффициента потерь, обусловленная неточностью знания средней скорости УХН, мала по сравнению со статистической ошибкой измерений. Так, даже в таком крайне гипотетическом случае, когда спектр нейтронов имеет вид  $\delta$ -функции при  $v_1$  или  $v_2$ , ошибка определения коэффициента потерь не превышает 50%.

Обычно при расчете коэффициента потерь полагают, что потенциал взаимодействия УХН с веществом в первом приближении является прямоугольным<sup>12</sup>. Возможное наличие примесных атомов на поверхности, изменение плотности и т.д. искажает форму потенциала взаимодействия. Однако и в этом случае при извлечении коэффициента потерь принималось, что потенциал взаимодействия имеет прямоугольную форму.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ

Для изотропного потока нейтронов усредненный по углам падения коэффициент потерь УХН  $\mu$  определяется известным выражением<sup>12</sup>

$$\mu = \frac{2\eta}{y^2} [ \arcsin y - y(1 - y^2)^{1/2} ], \quad (9)$$

где  $y = v/v_{гр}$ ,  $v_{гр}$  — граничная скорость нейтронов для данного вещества,

$$\eta = \frac{b_i}{b_o} = \frac{\kappa(\sigma_a + \sigma_s)}{4\pi b_o} \quad \text{— приведенный коэффициент потерь УХН;}$$

$b_i$  и  $b_o$  — мнимая и реальные части амплитуды рассеяния;  $\sigma_a$  и  $\sigma_s$  — сечения захвата и неупругого рассеяния нейтрона с волновым вектором  $\kappa$ .

Теоретическая величина  $\eta$  в бериллии при комнатной температуре равна  $5 \cdot 10^{-6/2}$ . Ранее<sup>16</sup> при хранении УХН в сосудах с напыленными бериллиевыми стенками, обезгаженными прогревом, полученные значения  $\eta$  при  $T = 300$  К составили  $(1,75 \pm 0,25) \cdot 10^{-4}$ .

Измерения с бериллиевым порошком со средним размером зерна 36 мкм проведены с УХН в интервале скоростей  $2,8 \div 5,6$  м · с<sup>-1</sup>. Содержание бериллия в порошке составляло 98,7%. Основным примесным элементом в образце являлся кислород — 1,2%.

Результаты измерений со слоем порошка толщиной 18 мм, расположенного на медной подложке, приведены в таблице.

Таблица

Условия приготовления образца	Температура образца, К (T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub> )	Вероятность потерь УХН в образце, М	Приведенный коэффициент потерь в бериллии $\eta$ (300 К)
Неотожженный порошок после пребывания на воздухе	293	0,0155 ± 0,004	$(4,2 \pm 2,0) \cdot 10^{-5}$
Первоначальный нагрев порошка в течение 40 часов при 383 К — 523 К	383-523	0,0315 ± 0,010	—
Отжиг порошка в течение 100 часов при 453 К — 633 К	453-633	0,009 ± 0,008	$(5,4_{-5,2}^{+14,6}) \cdot 10^{-6}$
Отжиг порошка в течение 100 часов при 453 К — 633 К	383-523	0,004 ± 0,005	$(1,80_{-1,8}^{+6,6}) \cdot 10^{-6}$



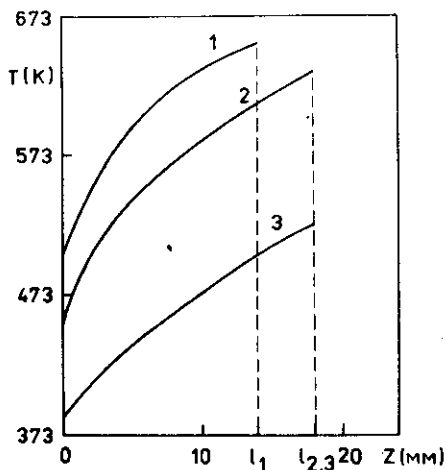


Рис. 3. Распределение температуры по толщине слоя графита (кривая 1, толщина порошка  $l_1 = 14$  мм) и бериллия (кривые 2 и 3; толщина порошка  $l_{2,3} = 18$  мм).

В первых двух колонках таблицы указаны условия приготовления образца и его температура ( $T_1, T_2$ ) во время измерений. При проведении отжига порошка как непосредственно в экспериментальной установке в вакууме  $5 \cdot 10^{-6}$  Торр, так и в ходе экспериментов с нагретыми образцами было установлено наличие градиента температуры по толщине слоя порошка.

В таблице приведены значения двух температур  $T_1$  и  $T_2$ , где  $T_1$  — температура поверхностного слоя порошка, обращенного к падающему потоку УХН;  $T_2$  — температура поверхностного слоя, соприкасающегося с подложкой. Более детально распределения температуры по толщине слоя графита (кривая 1) и бериллия (кривые 2 и 3) даны на рис. 3. Эти кривые использовались при расчетах значений  $\eta$  по формулам (5)–(7). В третьей колонке приведены экспериментальные данные по вероятности потерь УХН  $M$  в образце. Температурная зависимость коэффициента потерь  $\eta(T)$  в бериллии определяется температурной зависимостью сечения неупругого рассеяния нейтронов  $\sigma_s(T)$ . Зависимость  $\sigma_s(T)$  рассчитывалась в некогерентном приближении по дебаевской модели<sup>77</sup> с температурой Дебая для бериллия  $\theta_d = 1440 \text{ K}^{87}$ , при этом имеющиеся в области низких энергий экспериментальные данные по полным сечениям взаимодействия нейтронов с бериллием при  $T = 300 \text{ K}$  и  $T = 440 \text{ K}^{91}$  использовались как эталонные. В четвертой колонке даны приведенные к температуре 300 К значения  $\eta(300 \text{ K})$  для бериллия, описывающие экспериментальные данные по вероятности потерь УХН в образце  $M$ .

Как видно из таблицы, для неотожженного порошка бериллия после пребывания на воздухе для вероятности потерь  $M$  при  $T = 293 \text{ K}$  получено значение  $0,0155 \pm 0,0040$ , что соответствует довольно малому значению  $\eta = (4,2 \pm 2,0) \cdot 10^{-5}$ .

Первоначальный нагрев порошка до температуры (383 К, 523 К) приводит к росту вероятности потерь: после 40 часов прогрева при этой температуре  $M = 0,0315 \pm 0,010$ . Это возрастание  $M$ , по-видимому, связано с ростом сечения неупругого рассеяния (нагрева) УХН на водо-

родсодерживших примесях не обезгаженного при этой температуре порошка.

После увеличения температуры нагрева порошка до величины (453 К, 633 К) с течением времени происходило уменьшение вероятности потерь УХН, и после  $\sim 100$  часов прогрева было получено значение  $M = 0,009 \pm 0,008$ . Увеличение продолжительности нагрева порошка до 200 часов в этих температурных условиях не привело к изменению величины  $M$ .

Чтобы убедиться в том, что порошок обезгажен, после его прогрева при температуре (453 К, 633 К) было проведено повторное измерение при температуре (383 К, 523 К). При этом для  $M$  получено значение  $0,004 \pm 0,005$ .

Соответствующее обезгаженному порошку суммарное значение  $\eta$  (300 К) =  $(2,3 \pm 1,7) \cdot 10^{-6}$  в пределах ошибки измерений согласуется с теоретической величиной коэффициента потерь  $\eta$  в бериллии при этой температуре.

Вместе с тем заметим, что охлаждение порошка бериллия после его отжига до комнатной температуры в вакууме экспериментальной установки снова приводило к увеличению  $M$  до значений, с точностью  $\sim 30\%$  совпадающих с данными для неотожженного порошка. Аналогичный эффект ранее наблюдался и при измерениях с другим слабопоглощающим образцом — графитом<sup>11</sup>. По-видимому, это связано с тем, что порошок непосредственно связан с 450-литровым вакуумным объемом канала УХН. Во время отжига образца нагревается практически только порошок, а температура остальных узлов установки остается неизменной. В результате при охлаждении обезгаженного образца происходит адсорбция на поверхности зерен порошка водородсодержащих веществ, поступающих из объема канала УХН.

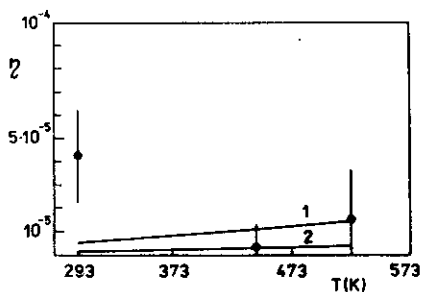
Интересно было определить средний размер зерен порошка бериллия из результатов измерений вероятности потерь УХН<sup>11</sup> и сравнить полученный результат с паспортным значением 36 мкм. Для этого был приготовлен образец в виде слоя порошка толщиной 1 мм, помещенного на подложку из полиэтилена. Измерения дали для вероятности потерь величину  $M = 0,0365 \pm 0,0065$ , что соответствует среднему диаметру зерен  $37,5 \pm 7,5$  мкм. Это значение, как видно, хорошо согласуется с паспортными данными.

Как указано выше, основным примесным элементом в порошке бериллия являлся кислород — 1,2%. Согласно литературным данным<sup>18</sup> растворимость кислорода в бериллии мала, и, как правило, кислород находится в виде окиси бериллия  $\text{BeO}$ , особенно когда бериллий используется в виде порошка. Если предположить, что в нашем образце весь кислород находится в виде окиси бериллия на поверхности зерен, то для толщины пленки  $\text{BeO}$  получаем значение  $\sim 690$  А. Непосредствен-

ное определение толщины окисной пленки было проведено в измерениях, в которых путем отжига порошка при температуре 520 К производилось дополнительное наращивание окисной пленки. Величина изменения толщины окисной пленки определялась взвешиванием. С использованием данных по скорости окисления бериллия<sup>8/</sup> было установлено, что в исходном материале толщина пленки составляет 740 А. Дополнительное окисление порошка, возможно, происходило и при его отжиге в течение нескольких суток в экспериментальной установке при давлении  $\sim 5 \cdot 10^{-6}$  Торр, поскольку скорость окисления бериллия слабо зависит от давления<sup>8/</sup>. Таким образом, с большей достоверностью следует ожидать, что на поверхности зерен порошка находится пленка бериллия толщиной несколько сотен ангстрем. В окиси бериллия при  $T = 300$  К расчетное значение коэффициента потерь  $\eta = 1,6 \cdot 10^{-6}$  (необходимое для расчета  $\eta$  сечение неупругого рассеяния в ВеО взято из работы<sup>10/</sup>). Поэтому при наличии на поверхности зерен бериллия окисной пленки коэффициент потерь УХН в материале порошка при 300 К должен быть меньше коэффициента потерь в чистом бериллии.

Анализ приведенных выше экспериментальных данных по вероятности потерь УХН в образце М показывает, что предположение о наличии толстой пленки ВеО дает малое изменение приведенных в таблице значений  $\eta$ . Так, соответствующее обезгаженному порошку ВеО значение  $\eta(300 \text{ К}) = (2,4^{+6,6}_{-1,8}) \cdot 10^{-6}$  (как и в случае бериллия, зависимость  $\sigma_s(T)$  рассчитывалась в некогерентном приближении по дебаевской модели с температурой Дебая для ВеО,  $\theta_d = 1075 \text{ К}^{11/}$ ). Как видно из сравнения полученных данных по  $\eta$  для Ве и ВеО, ошибка определения  $\eta(300 \text{ К})$  такова, что экспериментальный результат можно считать согласующимся как с расчетами для бериллия, так и для окиси бериллия.

На рис. 4 экспериментальные результаты представлены традиционной зависимостью  $\eta(T)$ , когда при определении  $\eta(T)$  предполагалось, что слой порошка нагрет равномерно до эффективной температуры  $T_{\text{эфф}}$ . Эффективная температура определялась как средняя температура, действующая на УХН, распределенные в соответствии с коэффициентом потерь с плотностью  $n(z)$  в порошке,



в соответствии с коэффициентом потерь с плотностью  $n(z)$  в порошке,

Рис. 4. Температурная зависимость приведенного коэффициента потерь УХН  $\eta$  для бериллия. 1 — расчет для бериллия; 2 — расчет для окиси бериллия.

$$T_{эфф.} = \int T(z)n(z)dz / \int n(z)dz,$$

где  $T(z)$  — распределение температуры в слое порошка. При этом измерению (383 К, 523 К) соответствует  $T_{эфф.} = 443$  К, а измерению (453 К, 633 К) —  $T_{эфф.} = 523$  К. На рис. 4 приведены также расчетные кривые 1 и 2 величины  $\eta(T)$  для бериллия и окиси бериллия соответственно.

## ВЫВОДЫ

Измерения на порошке бериллия в целом подтвердили результаты, полученные при исследовании другого слабопоглощающего вещества — графита<sup>11</sup>. Отжиг порошка бериллия в течение десятков часов при сравнительно низкой температуре  $\sim 600$  К позволяет снизить потери УХН. При этом измеренное значение коэффициента потерь согласуется с расчетом, основанным на известных сечениях неупругого рассеяния и захвата УХН материалом порошка. С достоверностью 90% можно утверждать, что, возможно, присутствующие избыточные потери УХН в материале обезгаженного порошка не превышают  $1,3 \cdot 10^{-5}$ .

Результаты приведенных исследований указывают, что для определения коэффициента потерь на уровне  $10^{-6}$  методом диффузии УХН в порошках требуется дальнейшее повышение статистической обеспеченности измерений.

Авторы выражают искреннюю признательность В.К.Игнатовичу за полезные обсуждения вопросов, изложенных в работе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Голиков В.В., Кулагин Е.Н., Никитенко Ю.В. — ОИЯИ, P3-87-20, Дубна, 1987.
2. Игнатович В.К. — Физика ультрахолодных нейтронов. М.: Наука, 1986, с.116-166.
3. Игнатович В.К., Никитенко Ю.В. — ОИЯИ, P3-87-832, Дубна, 1987.
4. Ignatovich V.K. — JINR, E4-87-880, Dubna, 1987.
5. Голиков В.В., Кулагин Е.Н., Никитенко Ю.В. — ОИЯИ, P3-85-286, Дубна, 1985.
6. Морозов В.И. — Хранение ультрахолодных нейтронов в замкнутых сосудах. Обзор. Димитровград: Изд. НИИАР, 1982.
7. Binder K. — PTHM-FPM-110, Munchen, 1970.
8. Дарвин Дж., Баддери Дж. — Бериллий. М.: Изд. иностранной литературы, 1962, с. 203-254.
9. Hughes D.J., Schwarts R.B. — Neutron Cross Sections, N.Y., 1958, p.87.
10. 5 Meeting of the Study Group on the Extraction of UCN from the ILL Reactor. 13-14 December, 1973, Grenoble, p.5.
11. Беляев Р.А. — Окись бериллия. М.: Атомиздат, 1980, с.41.

Рукопись поступила в издательский отдел  
24 января 1989 года.