

ВЫТЕКАНИЕ ГАЗА УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ  
ИЗ ЛОВУШКИ

А. В. Антонов, Б. И. Горячев, А. И. Исаков, Н. В. Лизькова

УДК 539.125.5

Методом Монте-Карло получены временные распределения (спектры утечки) моноэнергетических УХН, вытекающих из ловушки. Рассмотрены некоторые способы аппроксимации спектров утечки.

Число моноэнергетических нейтронов, вытекающих из ловушки в единицу времени  $N'(t)$  (спектр утечки), равно

$$N'(t) = \lambda_0 N_0 \exp(-\lambda_0 t) \quad (1)$$

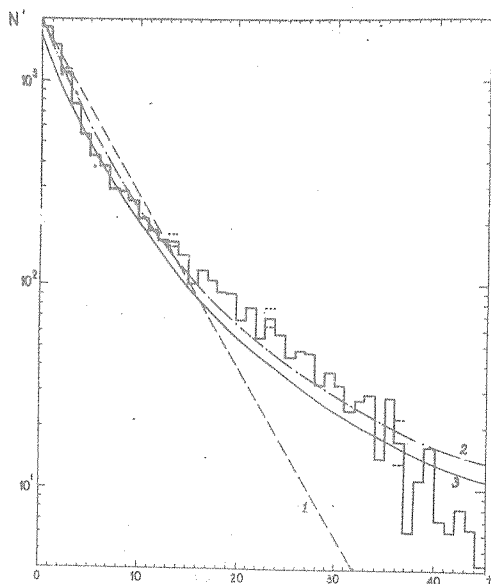
где  $N_0$  - начальное число нейтронов,  $t$  - время вытекания, а

$$\lambda_0 = sv/4V \quad (2)$$

- постоянная, определяемая газокинетической теорией в случае изотропного распределения нейтронов в ловушке в пространстве скоростей. Здесь  $v$  - скорость нейтрона,  $V$  - объем ловушки, а  $s$  - площадь отверстия. Анализ экспериментального спектра утечки позволяет определить среднюю скорость  $v$  нейтронов в ловушке, а значит, получить информацию об энергетическом спектре. В связи с повышением точности экспериментов интересно выяснить, насколько точно соотношения (1), (2) соответствуют реальной ситуации. Нестационарная задача о вытекании газа УХН из ловушки решается в настоящей работе методом статистических испытаний, в котором моделируется движение УХН и процессы их взаимодействия со стенками ловушки /1/. Основная цель работы - получение спектра утечки нейтронов. Расчеты выполнены для медной цилиндрической ловушки /2/ при  $v = 4,25$  м/с, что со-

ответствует средней скорости нейтронов в ней без учета гравитации. Для простоты полагалось, что отверстие радиуса  $R$  находится в центре одного из торцов цилиндра. Для выявления роли процесса вытекания УХН через отверстие в формировании спектра утечки в "чистом" виде в расчете не учитывались радиационное поглощение, неупругое рассеяние,  $\beta$ -распад нейтрона и гравитация. Упругое взаимодействие УХН со стенками ловушки рассмотрено в рамках модели диффузно-зеркального отражения /3/. Полагалось, что диффузное рассеяние происходит по закону  $\sim \cos^2 \theta$ ,  $\theta$  - угол между направлением скорости  $v$  нейтрона и нормалью к поверхности в точке падения /4,5/. При этом вероятность диффузного рассеяния  $\varepsilon = \varepsilon_0 \cos \theta$ . Выбор численных значений  $\varepsilon_0$  в расчетах ( $\varepsilon_0 = 0,07; 0,1$  и  $0,15$ ) определялся тем, что ловушка имеет высокую степень зеркальности ( $\varepsilon_0 \ll 1$ ). Параметр  $R$  принимал три значения: 1,5 см, 5 см и 15 см. Программа расчета соответствовала экспериментальной ситуации, когда наполнение ловушки нейтронами производится со стороны ее верхнего торца. Затем через время  $t_s$ , в течение которого устанавливается изотропное распределение нейтронов в ловушке, открывается отверстие в нижнем торце ловушки. С этого момента начинается счет вытекающих нейтронов. Нейтрон считался вылетевшим из ловушки, если его радиальная координата  $\rho$  в плоскости нижнего основания цилиндра ( $z = 0$ ) удовлетворяла условию  $0 \ll \rho \ll R$ . Выбывшие из ловушки нейтроны сортировались по времени  $t$ , в результате чего были получены спектры утечки  $N^*(t)$  в виде гистограмм с шагом по времени  $\delta t$ . Для построения каждой гистограммы разнытрывалось  $\sim 10^4$  историй. Расчеты выполнены на PDP-11/70.

В результате численного эксперимента были получены гистограммы  $N^*(t)$  и угловые распределения нейтронов, соударяющихся с нижним основанием в течение полного времени  $t_f$  прослеживания спектров  $N^*(t)$ . На рис. 1 приведена гистограмма  $N^*(t)$  для  $R = 15$  см и  $\varepsilon_0 = 0,1$ . Из рис. 1 видно, что спектр утечки  $N^*(t)$  не может быть описан экспоненциальной кривой, в частности, формулой (1). Отличие спектров  $N^*(t)$  от экспоненциального распределения уменьшается по мере уменьшения радиуса отверстия  $R$  /6/. Рассмотрены простые однопараметрические модели для описания спектров  $N^*(t)$ . Реальную ловушку можно приближенно рассматривать как суперпозицию "чисто зеркальной" и "чисто диффузной"



Р и с. 1. Гистограмма спектра утечки УХН при  $R = 15$  см и  $\epsilon_0 = 0,1$ . Цена деления по оси абсцисс 0,13 с. 1 - аппроксимация по газокинетической теории, 2 - аппроксимация для случая "чисто зеркальной" ловушки, 3 - аппроксимация первой производной формулы (4). Пунктиром показаны статистические ошибки

ловушек, понимая под последней ловушкой, для которой справедливо соотношение (1). Под "чисто зеркальной" будем понимать такую ловушку, в которой не происходит диффузного рассеяния. Нетрудно показать, что в такой ловушке число нейтронов будет убывать по закону

$$N_m(t) = N_0(1 - \exp(-\lambda_m t)) / \lambda_m t. \quad (3)$$

где  $\lambda_m = sv/2V = 2\lambda_0$ . Рассмотрим первую модель, в которой весовой фактор зеркальной ловушки равен  $B$  и неизменен во времени. Тогда число нейтронов в ней в момент  $t$  есть

$$N_1(t) = BN_0 [1 - \exp(-2\lambda_0 t)] / 2\lambda_0 t + (1 - B)N_0 \exp(-\lambda_0 t). \quad (4)$$

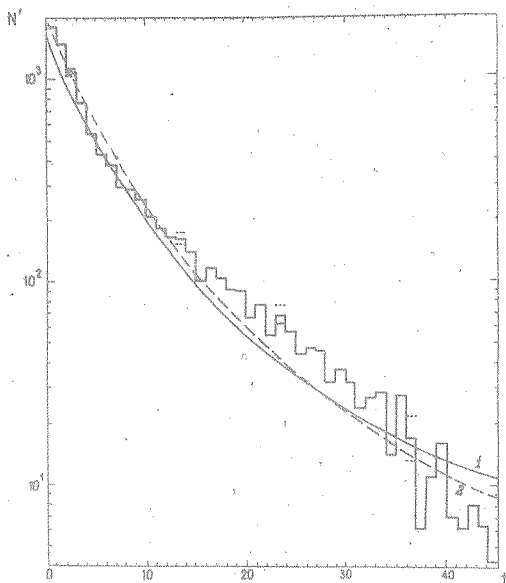
Таблица I

$\varepsilon_0$	0,07		0,1		0,15
$R_1$ см	5	1,5	5	15	5
$\beta$	0,019 ± 0,002	0,0083 ± 0,0012	0,0275 ± 0,002	0,0687 ± 0,009	0,038 ± 0,003
$B$	0,53 ± 0,03	0,065 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,87 ± 0,03	0,23 ± 0,02
$B_a$	0,5122	2,43 · 10 <sup>-5</sup>	0,3806	0,8711	0,2288

С помощью метода наименьших квадратов для каждой гистограммы  $N^*(t)$  находилась наилучшая аппроксимация  $N_1^*(t)$ . Полученные при этом значения  $B$  представлены в табл. I, откуда видно, что степень зеркальности ловушки растет с увеличением размеров отверстия, а также с уменьшением параметра  $\varepsilon_0$ . Из рис. I видно, что модельная кривая  $N_1^*(t)$  более соответствует численному эксперименту, чем аппроксимация по формуле (I) ("чисто диффузная" ловушка) или аппроксимация в случае "чисто зеркальной" ловушки. Была рассмотрена вторая однопараметрическая модель, в которой весовые факторы зеркальной и "диффузной" ловушек плавно менялись с течением времени  $t$ :

$$N_2(t) = \exp(-\beta t) N_0 [1 - \exp(-2\lambda_0 t)] / 2\lambda_0 t + [1 - \exp(-\beta t)] \times \\ \times N_0 \exp(-\lambda_0 t). \quad (5)$$

Значения параметра  $\beta$  в каждом случае находились методом наименьших квадратов и даны в табл. I. На рис. 2 модельные кривые  $N_1^*(t)$  и  $N_2^*(t)$  сравниваются с "экспериментальной" гистограммой  $N^*(t)$  в случае  $R = 15$  см. Видно, что вторая модель предпочтительна, хотя они обе лишь приближенно передают ход  $N^*(t)$ . ( $B$

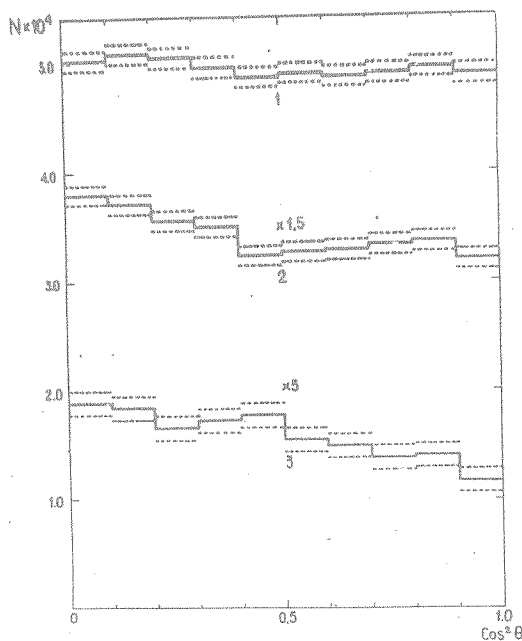


Р и с. 2. Гистограмма спектра утечки УХН при  $R = 15$  см и  $\epsilon_0 = 0,1$ . Цена деления по оси абсцисс 0,13 с. 1 - аппроксимация первой производной формулы (4), 2 - аппроксимация первой производной формулы (5). Пунктиром показаны статистические ошибки

задачу не входила точная подгонка моделей под эксперимент.) В рамках первой модели была получена полумпирическая формула для коэффициента  $B$  в виде

$$B_a = (1 - \bar{\epsilon})^n, \quad (6)$$

где  $\bar{\epsilon} = (2/3)\epsilon_0$  в случае углового распределения нейтронов, близкого к изотропному, а  $n = S_0/7e$ , где  $S_0$  - площадь поверхности ловушки. Эффекты отклонения спектра утечки нейтронов от (1) и углового распределения нейтронов в ловушке от изотропного можно в хорошем приближении считать не зависящими от скорости нейтронов /6/. Проведенный анализ показывает, что спектр утечки УХН из ловушки может заметно отличаться от экспоненциального при



Р и с. 3. Угловые распределения УХН в плоскости  $z = 0$  при  $R = 1,5$  см (гистограмма 1),  $R = 5$  см (гистограмма 2),  $R = 15$  см (гистограмма 3). Пунктиром обозначены статистические ошибки

$s/S_0 \geq 10^{-2}$ . На рис. 3 представлены угловые распределения нейтронов, просуммированные по времени вытекания для  $\epsilon_0 = 0, 1$  и  $R = 15$  см. Полученные угловые распределения были использованы для уточнения расчетной эффективности детектора УХН, которая обычно определяется при условии изотропного распределения нейтронов в ловушке. Оценки показали /6/, что в случае, наиболее интересном для эксперимента ( $R = 5$  см,  $s/S_0 \approx 10^{-2}$ ), отличие не превышает 4%.

Авторы благодарны В. К. Игнатовичу за стимулирующее обсуждение.

Поступила в редакцию  
10 мая 1982 г.

## Л и т е р а т у р а

1. А. В. Антонов, Б. И. Горячев, А. И. Исаков, Н. В. Линькова, Препринт ФИАН № 260, М., 1981 г.
2. А. В. Антонов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН № 10, 3 (1978).
3. В. К. Игнатович, ОИЯИ, Р4-7055, Дубна, 1973 г.
4. A. Steyerl, Z. Phys., 254, 169 (1972).
5. И. Берчану, В. К. Игнатович, ОИЯИ, Р4-7331, Дубна, 1973 г.
6. А. В. Антонов, Б. И. Горячев, А. И. Исаков, Н. В. Линькова, Препринт ФИАН № 133, М., 1982 г.