



ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

Ю.Г. АБОВ, С.П. БОРОВЛЕВ, В.В. ВАСИЛЬЕВ,  
В.В. ВЛАДИМИРСКИЙ, Е.Н. МОСПАН, В.К. РИССУХИН

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ХРАНЕНИЯ  
УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ  
В МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ

Измерено время хранения ультрахолодных нейтронов в аксиальной магнитной ловушке с простой односвязной областью удержания.

Показано, что хранение нейтронов обусловлено именно магнитным полем. Достигнуто время хранения  $T = 303 \pm 37$  с.

## I. Введение.

В предварительных экспериментах по хранению ультрахолодных нейтронов (УХН) в магнитной ловушке ИТЭФ /1/ было осуществлено комбинированное (магнитное + стеночное) удержание нейтронов со временем  $T_{\text{комб.}} = 141 \pm 60\text{с}$ . В результате анализа экспериментальных данных в той же работе было показано, что чисто магнитное удержание в этой ловушке характеризуется значительно большим временем.

Данная работа посвящена исследованию чисто магнитного хранения. Для исключения сколько-нибудь длительного хранения за счет материала стенок на дно вакуумной камеры ловушки была нанесена полиэтиленовая пленка. Параметры ловушки, определенные в предварительном эксперименте, были использованы для оптимизации измерительного цикла /2/ с целью сокращения его длительности при максимальной точности. В тех же целях уменьшен фон. В остальном была использована установка, достаточно подробно описанная в работах /1,3/, без каких-либо конструктивных изменений, влияющих на спектр нейтронов, поток и т.д. Поэтому в данной работе будут упомянуты только те подробности устройства установки, которые необходимы для сохранения целостности изложения.

## 2. Методика эксперимента

В данной работе использован вертикальный канал УХН /3/, который обеспечивал начальную шторочную разность<sup>\*)</sup>  $\sim 200$  нейтр/с. Однако из-за образования на поверхности вертикального нейтронотода масляной пленки (в результате временной неисправности вакуумной системы) утерял свои свойства, и шторочная разность в предварительном и данном экспериментах составляла лишь 86 нейтр/с.

Вакуум в камере ловушки на протяжении всего эксперимента был не хуже  $\sim 1 \cdot 10^{-3}$  мм рт.ст. (0,133 Па). По сравнению с предварительным экспериментом не предпринято никаких дополнительных мер борьбы с переменной компонентой магнитного поля и акустическими колебаниями ловушки.

В ходе эксперимента магнитная ловушка соединяется подвижным участком нейтронотода то с основным питающим нейтронотодом (положение 1 - "наполнение"), то с патрубком, ведущим на детектор УХН (положение 2 - "регистрация"). Переход из положения 1 в положение 2 длится 1,5-2 с. Центральная катушка электромагнита (рис.1) служит магнитным затвором при наполнении ловушки и при выпуске нейтронов на детектор.

Измерительный цикл организован следующим образом:

### 1.0 Исходное положение.

Основное поле электромагнита включено. Магнитный затвор

\*) Шторочная разность определяется как  $\Delta N = N_0 - N_3$ , где  $N_0$  - скорость счета детектора УХН с открытым окном,  $N_3$  - скорость счета того же детектора, перед окном которого установлена медная фольга.

открыт (т.е. центральная катушка выключена). Поворотный участок в положении 2 - "регистрация". Идут фоновые измерения.

### 1.1. Наполнение

По сигналу с ЭВМ поворотный участок приходит в положение 1 - "наполнение". Магнитный затвор открыт. Идет отсчет времени  $T_{\text{нап}}$ . Детектор регистрирует фон.

### 2. Хранение

В момент  $T_{\text{нап}} = T^0$  поступает сигнал на закрытие затвора и поворот нейтронотода в положение 2. Начинается отсчет времени  $T_{\text{хран}}$ . Детектор регистрирует фон и нейтроны, проникающие через закрытый затвор.

### 3. Регистрация

В момент  $T_{\text{хран}} = T_{\text{хран}}^1$  поступает сигнал открытия затвора, и детектор начинает дополнительно регистрировать и те нейтроны, которые ранее удерживались затвором. Идет отсчет времени  $T_{\text{рег}}$ .

### 4. Окончание цикла

В момент  $T_{\text{рег}} = T_{\text{рег}}^1$  поступает сигнал на поворот в положение 1, и цикл повторяется с необходимыми изменениями временных интервалов, которые задаются с пульта ЭВМ.

В течение интервалов  $T_{\text{хран}}^1$  и  $T_{\text{рег}}^1$  информация с детектора считывается через каждые  $t^{\text{сч}}$ , а длительность этого интервала считывания зависит от величины  $T_{\text{хран}}^1$  и  $T_{\text{рег}}^1$ . Таким образом, с детектора на ЭВМ поступает информация о зависимости счета от времени и общий счет за полный интервал.

Для доказательства отсутствия стеночного хранения проводились измерения по приведенному циклу, но с постоянно выключенным основным полем и постоянно открытым затвором. Фон в ходе эксперимента составлял  $G = 0,008 \pm 0,001$  нейтр/с.

Как указывалось в работах /1,4/, магнитное поле ловушки имеет три узловые линии, т.е. линии на которых поле обращается в ноль. Координаты этих линий приведены в табл. I. Известно, что при прохождении нейтронов вблизи узловых линий условие адиабатического переворота спина нарушается и возможен переворот спина /5/.

Существует возможность преобразовать узловые линии в совокупность узловых точек и уменьшить тем самым вероятность деполаризации нейтронов на улах. Это можно сделать при помощи дополнительных токовых элементов, устанавливаемых вблизи области хранения нейтронов. Такой элемент - корректирующая обмотка - была установлена в верхней части вакуумной камеры ловушки. Вид корректирующей обмотки и ее расположение показаны на рис. I и рис. 2. Обмотка изготавливается из единой полый медной шины, которая вакуумно уплотняется в крышке камеры. Охлаждение шины осуществляется водой. По обмотке протекает ток 1100А. Для питания корректирующей обмотки использован преобразовательный агрегат с генератором НД 750/1500 А, 6/12 В. Эксперимент проводился при постоянно включенной корректирующей обмотке.

### 3. Обсуждение результатов

На рис. 3 приведены данные по вытеканию нейтронов из камеры ловушки без включения магнитного поля и при открытом магнитном затворе, т.е. данные по "стеночному" хранению. При рассмотрении этих результатов надо учесть, что поглотитель УХН занимает лишь часть площади дна камеры (~ 20%). Кроме того, после поворота подвижного участка нейтронновода в положение 2 возможно попадание на детектор нейтронов, накопленных в этом участке.

Приведенные графики соответствуют двум наборам данных по I8 и I7 серий. Первые три точки графика, явно превышающие фон, обработаны в соответствии с гипотезой 
$$N_i = -t/\tau_{ст} + B$$
, где  $\tau_{ст}$  - время хранения на стенках (без поля),  $t$  - соответствует времени удержания, т.е. отсчитывается от момента окончания наполнения,  $N_i$  - счет в  $i$ -м интервале считывания. По всем 35 сериям (каждая серия по 10 циклов) получен результат  $\tau_{ст} = 2,1 \pm 0,1$  с.

В таблице 2 приведены данные по вытеканию нейтронов при номинальном режиме (т.е. с магнитным полем). На рис.4 показана зависимость счета детектора в интервалах считывания от времени (т.е. номера интервала) для  $T^{хран} = 280$  с (третья строка табл.2). Величина интервалов считывания выбрана  $t^{сч} = T^{хран}/10$ . Вид этой зависимости в начале интервала хранения объясняется "стеночным" хранением, а с третьего интервала считывания характер кривой меняется и, как видно из сравнения с рис.3, обусловлен магнитным полем. Точки с 15 по 40-й интервал обработаны по методу наименьших квадратов (без вычитания фона) в соответствии с экспонентой (прямая 3 на рис.4). После вычитания вкладов, обусловленных участками 1 ("стеночное хранение") и 3, счет в интервалах считывания со второго по восьмой описывается экспонентой  $\tau_{с} = 17$ с, которой соответствует прямая 2 на рис.4. Таким образом, время окончания "быстрых" процессов ухода нейтронов можно оценить как  $t_{с} = 3\tau_{с} \approx 50$ с. На участке 3 поинтервальный счет изменяется со временем наиболее медленно. М.н.к. - оценка даст время убывания

$\tau = 330 \pm 120$ с. Поскольку уровень фона ( $G = 0,008 \pm 0,001$ имп/с) оказался достаточно высоким, время ухода на этом участке определить не удалось, хотя принципиальных ограничений для

этого нет. На рис.4 показан также счет детектора после открытия магнитного затвора в интервалах считывания  $t^{ст} = 5с.$  Поскольку эти интервалы короче, чем во время хранения, то и фон в интервале регистрации пропорционально меньше. Эффект магнитного хранения очевиден из этого графика. Счет (поинтервальный) в интервале регистрации хорошо описывается зависимостью  $\ln N_i =$   

$$= -t/\tau^{pec} + b \quad \text{при } \tau^{pec} = 19,6 \pm 4,3 \text{ для } T^{хран} = 280 с,$$
а средневзвешенное значение по данным, приведенным в табл.2, составляет  $\tau_{\omega}^{pec} = 23 \pm 2с.$ , что хорошо согласуется с результатами предварительных измерений.

На рис.5 и в табл.3 приведены результаты измерения полного количества нейтронов, попадающих на детектор в интервале регистрации  $T^{рег}$  после выдержки в ловушке длительностью  $T^{хран}$ , в зависимости от величины  $T^{хран}$ . Из графика видно, что первые две точки соответствуют "быстрому" процессу ухода нейтронов из ловушки. Вклад этого процесса становится достаточно малым к  $T^{хран} \approx 50с.$  Обработка по методу наименьших квадратов пяти точек 50, 100, 160, 240, 280 с в соответствии с гипотезой  $\ln N^{хран} =$   

$$= -\lambda t + \ln N_0 \text{ дает } \tau^{хран} : \tau^{хран} = 1/\lambda = 303 \pm 37с,$$

$$N_0 = 2,7 \pm 0,2.$$

Таким образом, осуществлено чисто-магнитное хранение ультрахолодных нейтронов с  $\tau^{хран} = 303 \pm 37с.$  Этот результат находится в хорошем согласии с оценками работы /1/ для чисто магнитного удержания, что свидетельствует о надежности полученных результатов.

В заключение авторы благодарят А.С.Алпеева, В.Ф.Белкина, А.А.Белоноженко, Н.И.Козлова, А.Ю.Карпова, А.М.Соломатина, В.А.Сушинова, В.Г.Франковскую за участие в подготовке экспери-

мента и обеспечение круглосуточной работы установки, И.Л.Карпихина за предоставленную аппаратуру, И.Б.Рожкина за помощь в обработке результатов, а также персонал реактора ИТЭФ.

Таблица 1

## Координаты узловых линий

Номер линии	Радиус, см	Высота над уровнем дна, см
1	9,5	15,5
2	34,5	13,4
3	44,7	12,2

Таблица 2

## Вытекание нейтронов из ловушки

№	Время удержания $T_{\text{хран}}$ , с	Время вытекания, с	Среднекв. отклонение $\sigma_c$
1	160	23,6	5,3
2	240	23,3	2,3
3	280	19,6	4,3
Средневзвешенное значение		23	2

Таблица 3

Зависимость  $\ln N = f(T_{\text{хран}})$ 

№	Интервал хранения $T_{\text{хран}}$ , с	Количество оставшихся нейтронов	Среднекв. отклонен.	$\ln N \pm \sigma$	Оценка по мн. к. $\hat{y}$
1	50	2,29	0,14	$0,826 \pm 0,060$	0,890
2	100	1,90	0,23	$0,641 \pm 0,121$	0,666
3	160	1,58	0,18	$0,454 \pm 0,114$	0,468
4	240	1,34	0,096	$0,294 \pm 0,072$	0,204
5	280	0,94	0,095	$0,067 \pm 0,102$	0,073
$\hat{y} = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot T_{\text{хран}}$ $\alpha_1 = 0,995 \pm 0,071$			$\alpha_2 = (-0,329 \pm 0,04) \cdot 10^{-2}$ $\chi^2 = 3,5$		

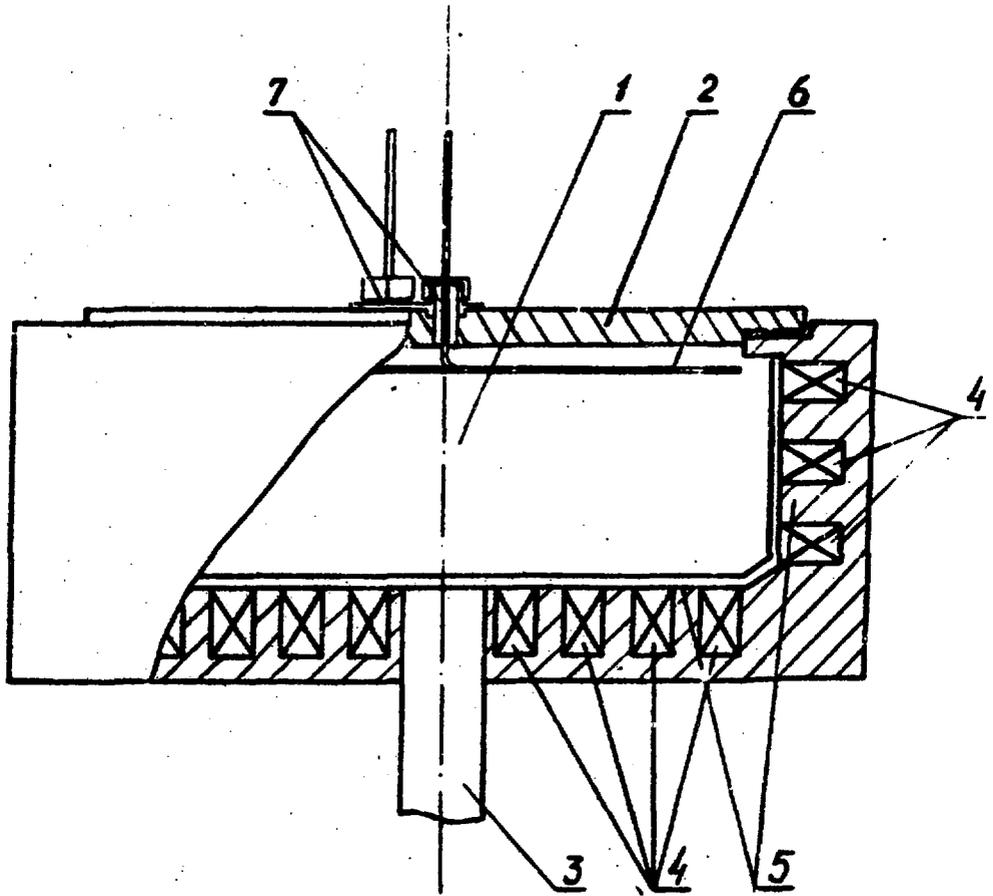


Рис. I. Расположение корректирующей обмотки в камере ловушки:  
 1 - вакуумная камера; 2 - крышка камеры; 3 - патрубок  
 инъекции; 4 - обмотки основные; 5 - полоса; 6 - обмотка  
 корректирующая; 7 - вакуумные вводы.

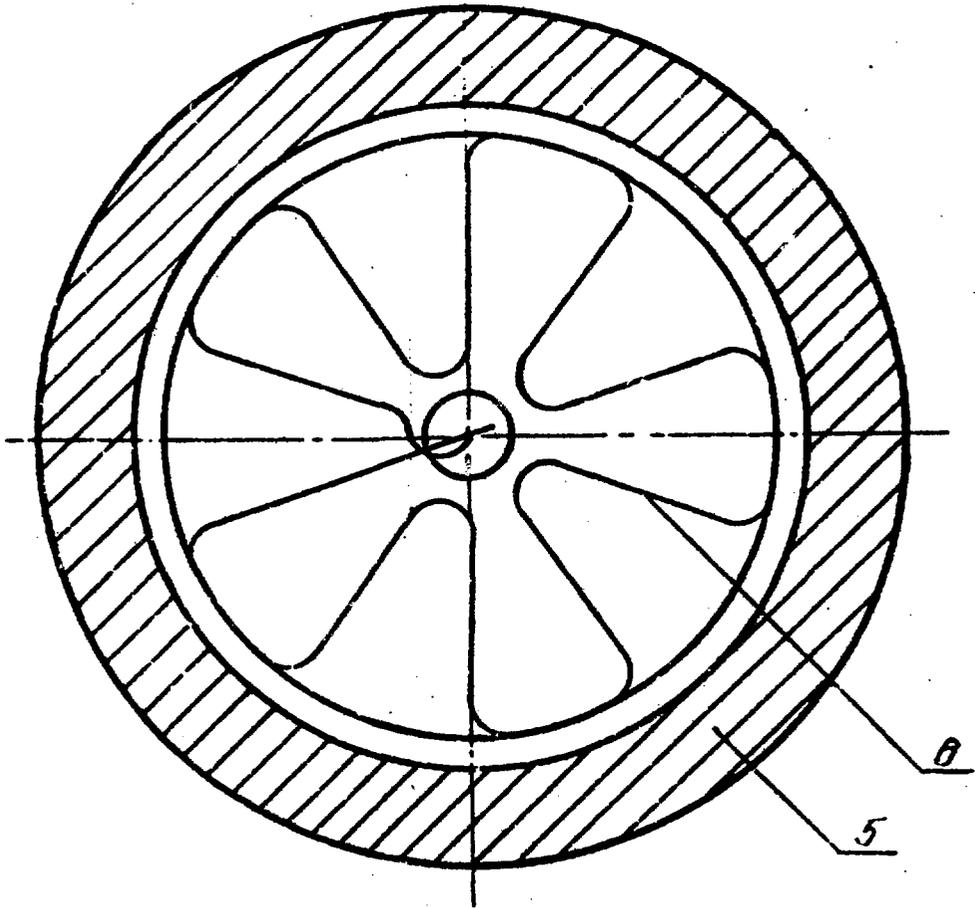


Рис.2. Форма корректирующей обмотки.

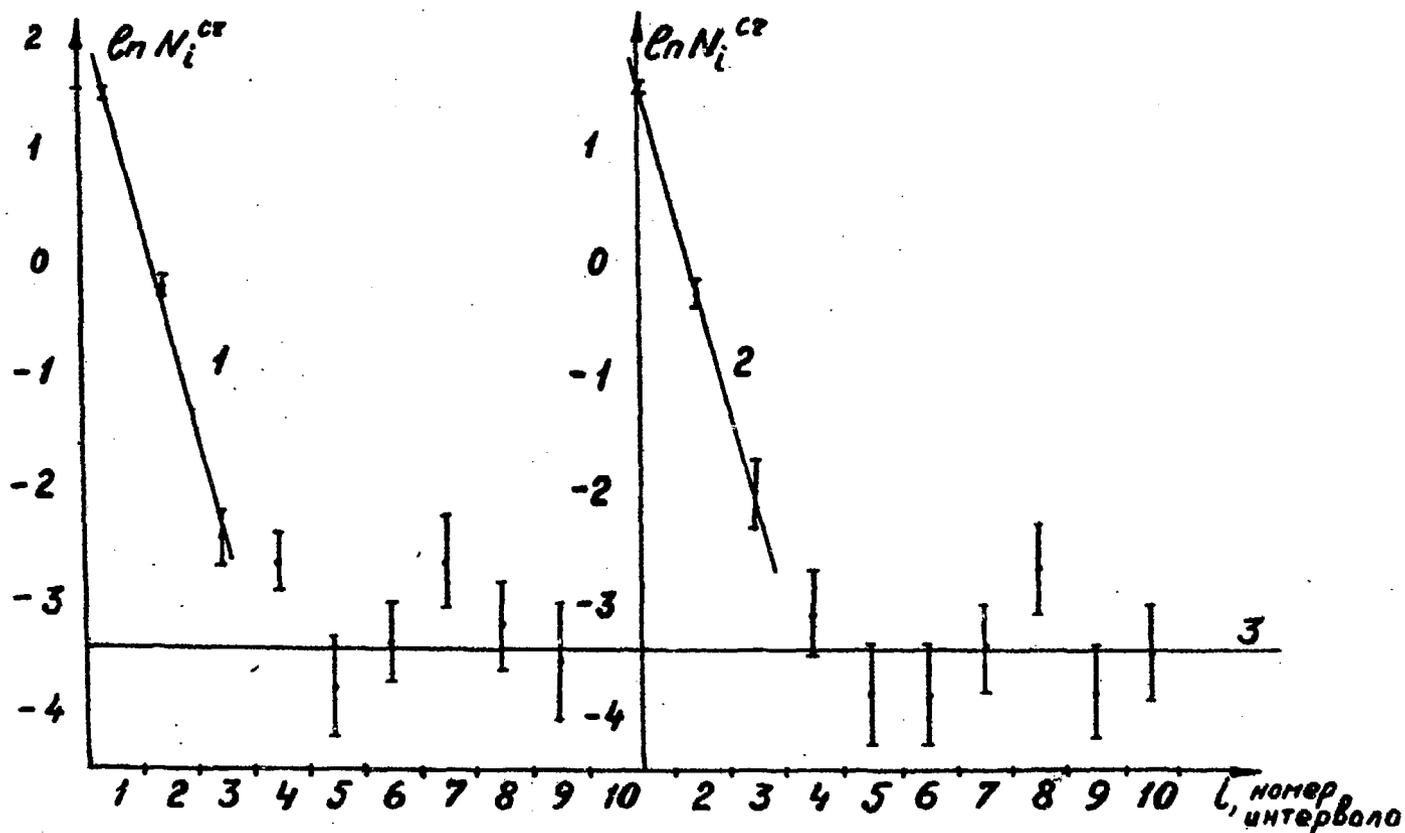


Рис.3. График логарифма поинтервального счета ( $t^{cp} = 4$ ) при измерениях "стационарного" хранения и фона (поле включено): 1 -  $\tau_{cp} = (2,03 \pm 0,08)$ с; 2 -  $\tau_{cp} = (2,25 \pm 0,12)$ с; 3 - уровень фона ( $G = 0,008 \pm 0,001$  имп/с).

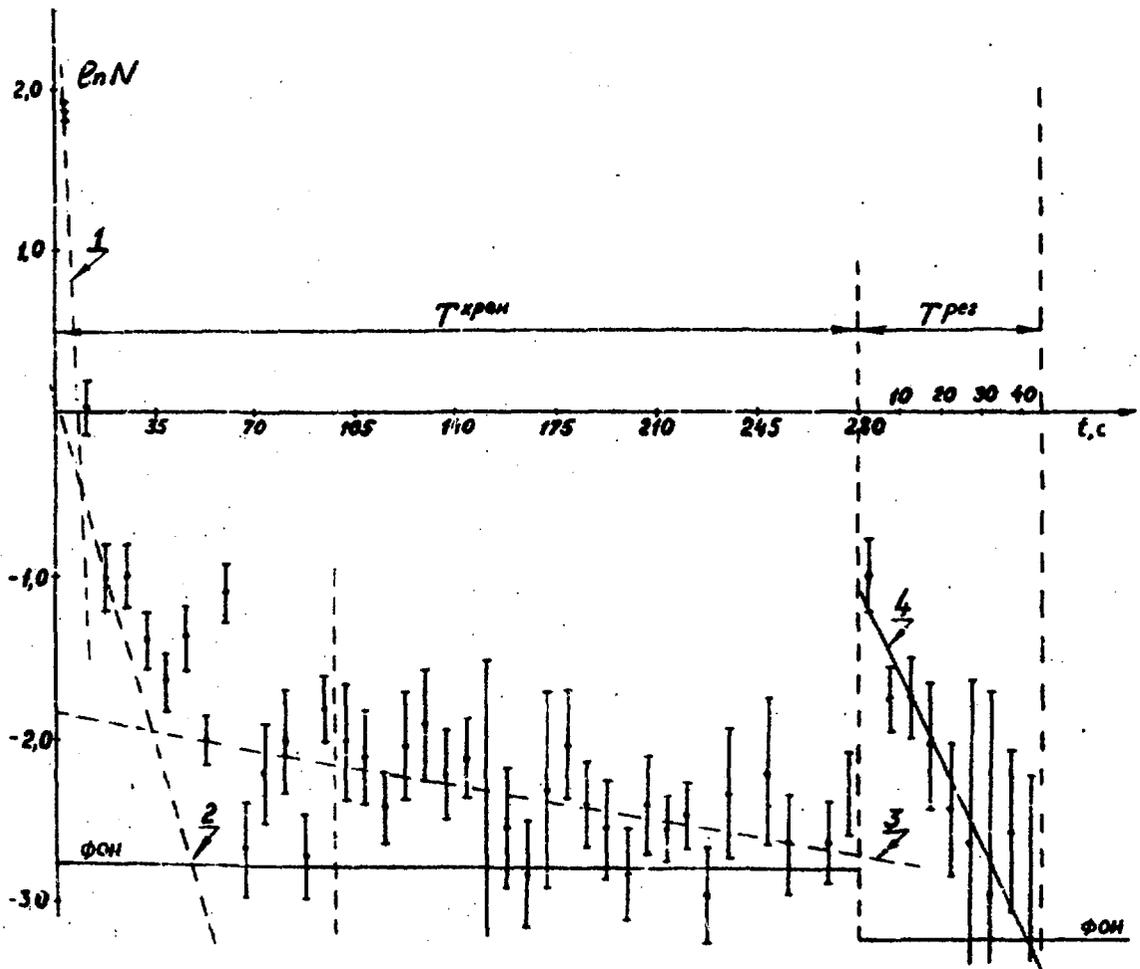


Рис. 4. График логарифма поинтервального счета детектора. Случай  $T_{\text{хран}} = 280$ с: 1 - вклад "стеночного" хранения; 2 - оценка "быстрых" процессов ухода; 3 - оценка ухода в интервале (101,5+280)с; 4 - поинтервальный счет за T<sub>рег</sub>.

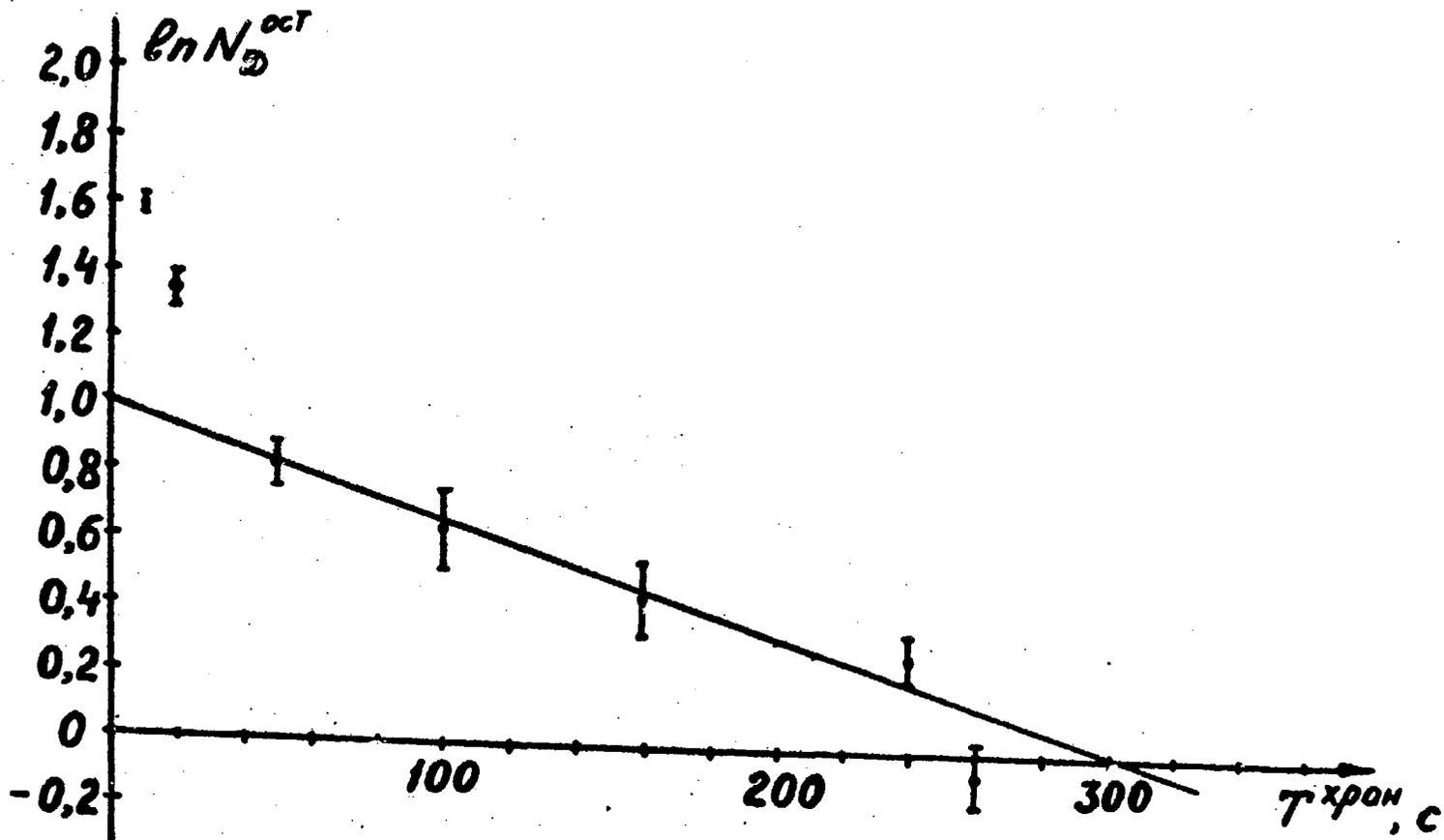


Рис.5 Зависимость счета нейтронов, оставшихся в ловушке после выдержки, от времени выдержки.

— результат обработки по М.н.к.  $\hat{y} = \alpha_0 - \alpha_1 T_{\text{хран}}$   
 $T_{\text{хран}} = 1/\alpha_1 = 303 \pm 37 \text{c.}$

## ЛИТЕРАТУРА

1. А б о в Ю.Г., Б е л к и н В.Ф., Б о р о в л е в С.П. и др. Экспериментальная оценка времени удержания ультрахолодных нейтронов в магнитной ловушке. М., Препринт ИТЭФ, 1981, № 16.
2. В а с и л ь е в В.В. Оптимизация цикла хранения ультрахолодных нейтронов в магнитной ловушке. М., Препринт ИТЭФ, 1981, № 58.
3. А б о в Ю.Г., Б е л к и н В.Ф., В а с и л ь е в В.В. и др. Вывод ультрахолодных нейтронов на реакторе ИТЭФ. М., Препринт ИТЭФ, 1981, № 17.
4. А б о в Ю.Г., Б е л к и н В.Ф., В а с и л ь е в В.В. и др. Об одной конфигурации магнита для удержания ультрахолодных нейтронов. М., Препринт ИТЭФ, 1976, № 44.
5. В л а д и м и р с к и й В.В. Магнитные зеркала, каналы и бутылки для холодных нейтронов. - ЖЭТФ, 1960, т.39, с.1062.
6. К о с в и н ц е в Ю.Ю., К у ш н и р Ю.А., М о р о з о в В.И., Т е р е х о в Г.И. Взаимодействие ультрахолодных нейтронов с газообразной средой. В сб.: Нейтронная физика. Материалы 5-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике. Киев, 1980, ч.1, М., 1980, с.130-137.



**В.Г.Абов и др.**

**Измерение времени хранения ультралоудных нейтронов в магнитной ловушке**

**Редактор И.Н.Ломакина**

**Корректор О.Ю.Ольховникова**

**Работа поступила в ОНТИ 30.11.81**

---

Подписано к печати 29.01.82

T05517

Формат 60x90 1/16

Офсетн.печ. Усл.-печ.л.1,0.

Уч.-изд.л.0,7.

Тираж 210 экз.

Заказ 21

Индекс 3624

Цена 10 коп.

---

Отпечатано в ИТЭФ, П17259, Москва, Б.Черемушкинская, 25

ЛОКОП

ИНДЕКС 3624