

Кашукеев Н.Т. и Чиков Н.Ф.

СЗ46.2а+СЗ42.г3

К-316

Б2-3-12379.

2346/1979



+

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б2-3-12379

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1979

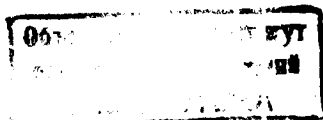
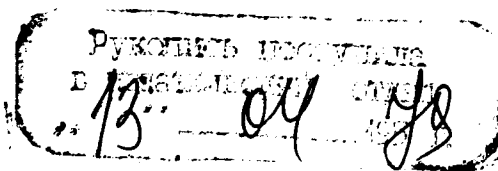
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория нейтронной физики

Н.Т.Кашукеев, Н.Ф.Чиков

Б2-3-12379

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ЗАРЯДА
НЕЙТРОНА ПРИ ПОМОЩИ УХН



Дубна, 1979

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ
ЗАРЯДА НЕЙТРОНА ПРИ ПОМОЩИ УХН

Н.Т.Кашукеев, Н.Ф.Чиков

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна (СССР)

В работе рассматривается возможность экспериментального определения верхней границы заряда нейтрона на уровне $10^{-19}e$ способом отклонения ультракоротких нейтронов (УХН) под действием поперечного электрического поля при их многократном отражении от плоского горизонтального зеркала /4/.

Показано, что для осуществления эксперимента на пучках УХН потоком ~ 50 н/см² сек можно пользоваться установкой типа "Китка" /5/ длиной зеркала $1 + 1,5$ м, работающей в непрерывном режиме.

METHOD OF DETERMINATION OF THE NEUTRON CHARGE UPPER
LIMIT WITH UCN

N.T.Kashukov, H.P.Chikov

SUMMARY

This paper considers a possibility of experimental determination of the upper limit of neutron charge within $10^{-19} e$ accuracy with UCN (ultracold neutrons) deflexion in the diametrical electrical field in the process of their repeated reflection from a horizontal mirror plate^{/4/}.

It is shown that for this purpose one may use for the $\sim 50 \text{ n/cm}^2$ UCN beam an installation of the "Kitka" type^{/5/} having a mirror length of 1 - 1.5 m and working in the permanent mode of operation.

I. ВВЕДЕНИЕ

Определение заряда нейтрона в так называемых "прямых" экспериментах /1-3/ сводится к поиску взаимодействия нейтронов с постоянным электрическим полем. Для этой цели узко сфокусированный нейтронный пучок пропускается через однородное поперечное электрическое поле напряженностью несколько десятков или сотен вольт/см, и по смещению пучка, которое оценивается тем или иным способом, определяется верхняя граница заряда нейтрона.

В самом точном эксперименте такого рода /3/ получено, что заряд нейтрона $\epsilon = (-1,9 \pm 3,7) \cdot 10^{-18} e$, где e - элементарный электрический заряд.

Смещение Δy нейтрона с предполагаемым зарядом ϵ под действием электрического поля напряженности E (в/см) дается зависимостью

$$\Delta y = \frac{\epsilon E t^2}{600 m}, \quad (I)$$

где t - время пролета нейтрона через электрическое поле, а m - его масса.

Здесь все величины, кроме напряженности E , заданы в системе $CGSE$.

Из зависимости (I) видно, что чувствительность этих методов сильно зависит от времени пролета (от времени пребывания) нейтрона в электрическом поле. Поэтому в работе /4/ было предложено для поиска заряда нейтрона использовать УХН. Из-за малой энергии этих нейтронов их высота подъема в гравитационном поле Земли не превышает 1,5 - 2 метра. Взлетая вверх, они снова возвращаются вниз, двигаясь по параболическим траекториям.

Путем многократного отражения УХН от горизонтального плоского зеркала их время пребывания в электрическом поле можно продлить и довести до нескольких десятков, а, в принципе, даже и до нескольких сотен секунд.

Таким способом чувствительность этой методики можно довести до $10^{-20} \text{e}^{-1/4}$.

Сначала казалось, что для осуществления такого эксперимента необходимо пользоваться узко сфокусированным пучком УХН, что требует интенсивного потока УХН ($\phi = 10^5 - 10^6 \text{ н/см}^2 \cdot \text{сек}$). Позже, в работе /5/ было показано, что существует возможность проведения такого эксперимента, пользуясь широкими (несфокусированными) пучками УХН, в результате чего, сохраняя чувствительность этого метода, поток УХН можно снизить до $\sim 500 \text{ н/см}^2 \text{ сек}$.

Однако, такой поток УХН тоже трудно осуществим и пока не достигнут ни на одном из существующих источников УХН. Кроме того, предлагаемая в /5/ установка "Китка" имела довольно большие габариты и ее сооружение требовало больших затрат. Поэтому мы отказались от реализации этого первого варианта установки "Китки" и занялись разработкой нового упрощенного варианта, который назвали "Китка-М". В настоящей работе обсуждаются параметры этого варианта и возможности его реализации при использовании уже существующих источников УХН ($\phi \leq 50 \text{ н/см}^2 \text{ сек}$).

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка "Китка-М" спроектирована для работы с очень медленными нейтронами (высотой подъема УХН не больше 40 см) в непрерыв-

ном режиме. В связи с этим в рабочем положении она устанавливается на высоте около одного метра над уровнем подводящего нейтронного вода.

Установка (рис. I) состоит из плоского горизонтального зеркала УХН-1, вертикального цилиндрического зеркала - 2, плоского конденсатора - 3,4, создающего поперечное электрическое поле, входного отверстия (источник УХН) - 5, выходного отверстия (к детектору УХН) - 6, бокового поглотителя УХН - 7,8, верхнего поглотителя УХН - 9 и вакуумного кожуха (на рисунке не указан).

Поглотители 7,8 и 9 (из полиэтилена) используются для устранения фона, создаваемого УХН, вылетающими из щели - 5 и не попадающих на цилиндрическое зеркало - 2.

Длина рабочего участка горизонтального зеркала 100 см, расстояние между плоскостями конденсатора 10 см, а их высота - 40 см. Входное и выходное отверстия УХН выполнены в виде двух вертикальных прямоугольных щелей высотой 40 см с переменными ширинами и расстояниями между ними.

Подвод УХН к установке и их отвод к детектору производится с помощью двух "рупоров", создающих меньшее сопротивление для направленного пучка УХН.

Цилиндрическое круговое зеркало устанавливается в таком положении, что его ось - (O) находится посередине между входным и выходным отверстиями УХН.

Установка действует следующим образом. Ультрахолодные нейтроны, исходящие из какой-нибудь точки M входного отверстия, выполняющего роль источника УХН, после нескольких десятков или сотен отражений от горизонтального зеркала - 1 прыжками долетают до цилиндрического зеркала - 2 и, отражаясь от него, фоку-

сируются в точке M' , которая симметрична M относительно центра кривизны O . Точнее, после отражения УХН двигаются таким образом, что плоскости их траекторий проходят через вертикальную линию, которая пересекает горизонтальную плоскость в точке M' . В этом смысле точку M' можно рассматривать как "изображение" точки M .

Так как входное и выходное отверстия УХН одинаковы по форме и размерам и расположены симметрично относительно центра кривизны — O , то при отсутствии потерь при зеркальных отражениях все нейтроны, вылетающие из источника (из отверстия — 5) в направлении цилиндрического зеркала, после отражения от этого зеркала, двигаясь прыжками, фокусируются на отверстии — 6. Пролетая через это отверстие, они попадают на детектор и вызывают определенную скорость счета N .

Если нейтроны имеют электрический заряд, они будут отклоняться под действием поперечного электрического поля в ту или другую сторону, в результате чего "изображение" будет смещаться относительно отверстия — 6, что приведет к уменьшению скорости счета УХН. Из разности скоростей счета детектора при наличии поля и в отсутствии поля или просто при коммутации знака поля можно определить заряд нейтрона.

Чтобы заметить искомое изменение скорости счета на фоне статистических флуктуаций самого счета, надо набрать такую статистику чтобы полное изменение счета было не меньше одной статистической ошибки. С другой стороны, чтобы эксперимент был осуществим, время накопления такого изменения счета должно быть не больше нескольких десятков часов, а сам счет должен быть не очень малым по сравнению с фоном.

3. ВРЕМЯ НАКОПЛЕНИЯ ИЗМЕРИМОГО ИЗМЕНЕНИЯ СЧЕТА

Чувствительность предлагаемого способа определения верхней границы заряда нейтрона можно охарактеризовать с помощью времени, необходимого для накопления измеримого изменения счета детектора под действием электрического поля при заданной величине электрического заряда нейтрона. Чем меньше это время, тем меньший заряд можно измерить.

Пусть число нейтронов, излучаемых источником в единицу времени, будет N_0 . Часть из них kN_0 ($k < 1$) после многократного отражения и фокусировки попадает в отверстие - 6 и регистрируется детектором.

Если источник имеет форму прямоугольной щели шириной a , распределение интенсивности скользящего пучка по его поперечному сечению вблизи источника имеет вид прямоугольника шириной a . В результате несовершенства оптики и наличия малоуглового рассеяния УХН от шероховатостей отражающих поверхностей после многократного отражения пучок несколько уширяется, а распределение его интенсивности по его поперечному сечению после фокусировки на отверстие - 6 принимает форму "колокола". В случае, когда уширение пучка $\sigma \ll a$, высота колокола будет $h = kN_0/a$.

Если выходное отверстие - 6 расположить таким образом, что в него попадала бы только одна половина пучка, как это показано на рис.2, интенсивность счета детектора будет $N = kN_0/2$, а изменение счета при наличии электрического заряда будет

$$\Delta N = \frac{N \Delta y}{a_1} \quad (2)$$

где Δy задается выражением (I), а $a_1 = a/2$ - начальная полуширина пучка.

Изменение счета, как и сам счет, растет со временем и через какой-то интервал времени τ , задаваемый выражением

$$\tau = \frac{N}{(1-N)^2} \quad (3)$$

становится равным одной средней статистической ошибке.

Вычисление N и ΔN при использовании широких немонотонных пучков УХН требует знания их углового и энергетического или скоростного распределений. Кроме того, для точных расчетов необходимо знать коэффициент зеркального отражения УХН и степень шероховатости отражающих поверхностей *).

Для оценки величины τ мы будем пользоваться максвелловским распределением скоростей регистрируемых УХН

$$dN_v = \frac{4}{v_{max}^4 - v_{min}^4} v^3 dv \quad (4)$$

где v_{max} и v_{min} обозначают соответственно максимальную и минимальную величины скорости УХН в пучке и угловым распределением типа " $\cos^2 \varphi$ ".

*) Лучше всего знать спектр УХН по горизонтальной составляющей скорости УХН при конкретных условиях эксперимента.

В случае, когда входное и выходное отверстия УХН ориентированы вертикально и их взаимное расположение таково, как на рис. 2, количество УХН, излучающееся в угловом интервале $(\alpha, \alpha + d\alpha)$ и попадающее в рабочий пучок, выражается формулой

$$dN = \frac{N_0 b}{2\pi L} \cos^2 \alpha d\alpha, \quad (5)$$

а полная скорость счета будет

$$N = \frac{N_0 b}{4L}, \quad (6)$$

где b — длина дуги цилиндрического зеркала, а L — радиус его кривизны.

При этих же условиях на основании (2)

$$\Delta N = \int_{(v)} \int_{(\alpha)} \frac{dN_{v,\alpha}}{a_1} \Delta y \quad (7)$$

где $dN_{v,\alpha}$ — интенсивность счета УХН, излучаемыми в скоростном интервале $(v, v + dv)$ и угловом интервале $(\alpha, \alpha + d\alpha)$.

В соответствии с (4) и (5)

$$dN_{v,\alpha} = \frac{2N_0 b}{\pi L (v_{\max}^4 - v_{\min}^4)} v^3 \cos^2 \alpha dv d\alpha. \quad (8)$$

Подстановка выражений для Δy и $dN_{v,\alpha}$ из (1) и (8) в (7) приводит к

$$\Delta N = \frac{N_0 \varepsilon \varepsilon b}{300 \pi a_1 \pi L (v_{\max}^4 - v_{\min}^4)} \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} t^2 v^3 \cos^2 \alpha dv d\alpha \quad (9)$$

Имея ввиду, что $v^2 = 2gH$ и $t = \frac{2L}{v \cos \alpha}$, где $2L$ - база пролета УХН, после интегрирования получаем:

$$\Delta N = \frac{N_0 \varepsilon \varepsilon L \delta}{300 a, m g (H_{\max} + H_{\min})} \quad (10)$$

где H_{\max} и H_{\min} - максимальная и минимальная высоты, на которые могут подняться УХН в гравитационном поле Земли.

Полагая $\varepsilon = 4,8 \cdot 10^{-29} \text{ CGSE}$ $N_0 = 4 \cdot 10^2$ н/сек, $\delta = 10$ см, $L = 10^2$ см, $a_r = 0,5$ см, $\varepsilon = 10^4$ в/см, $H_{\max} = 34,5$ см, $H_{\min} = 5$ см, имея ввиду, что $m = 1,67 \cdot 10^{-24}$ г, $g = 9,81 \cdot 10^2$ см/сек² и выполняя вычисления по (7) и (10), получаем $N = 10$ имп/сек, $\Delta N = 2 \cdot 10^{-2}$ имп/сек, что на основании (3) дает для $\tau = 2,56 \cdot 10^4$ сек $\approx 7,1$ час.

При выводе формул (7) и (10) не было учтено, что коэффициент отражения $\eta < 1$ и что уширение пучка из-за малоуглового рассеяния на шероховатостях приведут к уменьшению как скорости счета N , так и его изменения ΔN под действием электрического поля.

Учитывая эти факторы, получаем следующие выражения:

$$N = \frac{N_0 \delta}{\pi L g^2 (H_{\max}^2 - H_{\min}^2)} I_1 \quad (11)$$

$$\Delta N = \frac{N_0 \varepsilon \varepsilon L \delta}{150 \pi m a, g^2 (H_{\max}^2 - H_{\min}^2)} I_2$$

где
$$I_1 = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} \int_{\beta}^{\pi/2 - \beta} \eta^n v^3 \cos^2 \alpha \, dv \, d\alpha,$$

$$I_2 = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} \int_{\beta}^{\pi/2 - \beta} \eta^n \Phi\left(\frac{a_1}{\sigma}\right) v \, dv \, d\alpha.$$

$$\Phi\left(\frac{a_1}{\sigma}\right) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{a_1/\sigma} e^{-\frac{z^2}{2}} dz,$$

$$n = \frac{Lg}{v^2 \sin \alpha \cos \alpha} \quad - \text{число отражений}$$

$\sigma = 2 \theta_m v \sin \alpha \sqrt{\frac{2L}{3g} \operatorname{tg} \alpha}$ — средне-квадратическое уширение /6/ узкого моноэнергетического пучка УХН, излучающегося под углом α относительно горизонтальной поверхности зеркала, θ_m — максимальный наклон граней шероховатостей.

В данном случае полагалось $\theta_m = 0,1^\circ$.

Интегралы I_1 и I_2 и соответствующие им величины \mathcal{N} и $(\Delta \mathcal{N})^2$ были вычислены при помощи ЭВМ при $\beta = 5^\circ$ для нескольких значений η в интервале (96 + 100)% при $L = 100$ см и $L = 150$ см. Результаты этих вычислений и соответствующие им значения $\bar{\tau}$ представлены в следующей таблице:

η %	$L = 100$ см			$L = 150$ см		
	$N_{\text{сек}^{-1}}$	$(\Delta N)^2_{3600}$ сек ⁻²	\bar{t} часов	$N_{\text{сек}^{-1}}$	$(\Delta N)^2_{3600}$ сек ⁻²	\bar{t} часов
100,0	8,78	1,06	8,3	5,85	2,34	2,5
99,5	8,40	0,95	8,8	5,48	1,98	2,8
99,0	8,04	0,85	9,5	5,15	1,70	3,0
98,5	7,72	0,77	10,0	4,84	1,46	3,3
98,0	7,41	0,70	10,6	4,56	1,27	3,6
97,5	7,11	0,63	11,3	4,31	1,10	3,9
97,0	6,84	0,57	12,0	4,07	0,96	4,2
96,5	6,57	0,52	12,3	3,85	0,84	4,6
96,0	6,33	0,48	13,2	3,65	0,74	4,9

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛЕНИЙ И ВЫВОДЫ

Формула (2) выведена для случая, когда $\Delta y/a_1 \ll 1$. При $L = 100$ см для всей рассматриваемой области скоростей и углов $\Delta y/a_1 \leq 0,25$. Условие применимости формулы выполняется довольно хорошо.

При $L = 150$ см для скоростей $V = 99 + 150$ см/сек и углов $\alpha = 83^\circ + 85^\circ$ $\Delta y/a_1 = 0,22 + 0,57$. Для этой узкой области вместо (2) лучше было бы использовать выражение

$\Delta N = N/2 \Phi(\Delta y/a_1)$. Однако расчет показывает, что ошибка в определении ΔN , связанная с применением формулы (2) ко всей рассматриваемой области, в этом случае не превышает 2%.

Из таблицы видно, что при указанных параметрах установки накопление изменения счета, равное одной статистической ошибке, про-

исходит за реальные времена длительности эксперимента. Эти времена сильно зависят от величины базы пролета и сравнительно слабо меняются с изменением коэффициента зеркального отражения УХН.

Установка для экспериментального определения верхней границы заряда нейтрона с точностью 10^{-19} от элементарного заряда сравнительно проста по устройству и ее сооружение не вызовет больших затрат.

Эксперимент осуществим на уже существующих источниках УХН, потоком порядка $50 \text{ н/см}^2 \text{ сек.}$

Авторы выражают глубокую благодарность И.М.Франку, В.И.Лушикову, В.В.Голикову, А.В.Стрелкову, Ю.Н.Пскотилловскому, В.К.Игнатовичу, Ю.В.Тарану и А.И.Франку за интерес к работе и полезные обсуждения, С.А.Тошкову за помощь при составлении программы для ЭВМ.

И.М. Франк
В.И. Лушиков

Литература

1. И.С.Шапиро, И.В.Эстулин. ЖЭТФ, 30, 1956, 579.
2. J. S. Zorn, G. C. Chamberlain, *Bull. Amer. Phys. Soc.*
5, 1960, 36.
3. C. G. Shull, K. W. Ballman, F. A. Wedgwood, *Phys. Rev.*
153, 1967, 1415.
4. Н.Т.Кашукеев. Докл. БАН, 24, 1914, 717.
5. Н.Т.Кашукеев, Н.Б.Янева. БЖ, 5, 3, 1978, 243.
6. Н.Т.Кашукеев. Ядрена енергия – БАН, 1979 (в печати).

Подписи к рисункам

Рис.1 Схема устройства установки "Китка-М":

а - вертикальный разрез,

б - горизонтальный разрез.

1 - горизонтальное зеркало, 2 - вертикальное цилиндрическое зеркало; 3,4 - обкладки плоского электрического конденсатора, 5 - входное отверстие (источник УХН), 6 - выходное отверстие (к детектору УХН); 7,8 - боковые поглотители УХН, 9 - верхний поглотитель УХН, 0 - центр кривизны цилиндрического зеркала.

Рис.2 Схема расположения пучка УХН у входного и у выходного отверстий:

1 - передняя панель, 2 - входное отверстие, 3 - выходное отверстие, 4 - поперечное распределение интенсивности пучка у входного отверстия, 5 - поперечное распределение интенсивности пучка у выходного отверстия, 0 - ось цилиндрического зеркала.

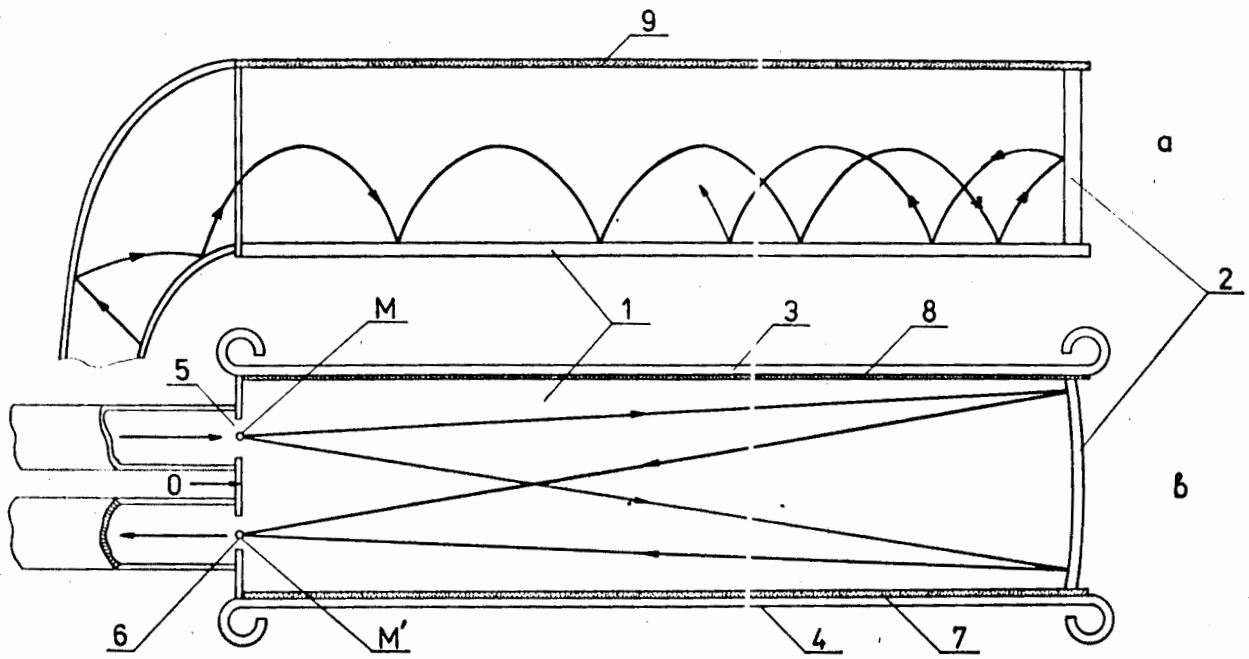


Рис. 1

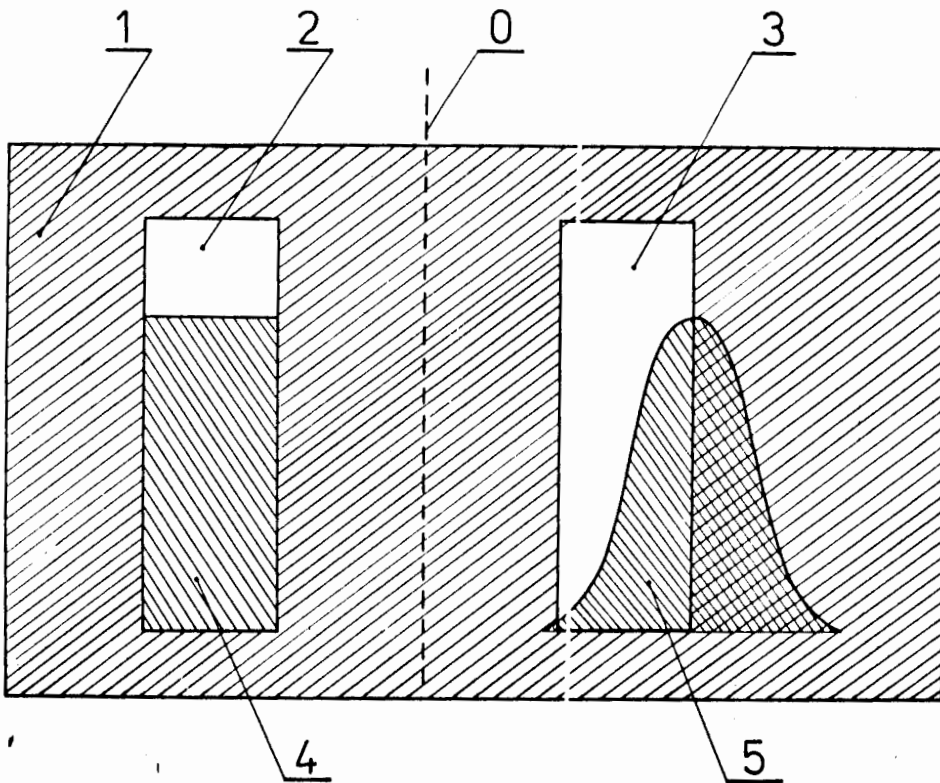


Рис. 2