



Научно-исследовательский институт
атомных реакторов им. В.И.Ленина

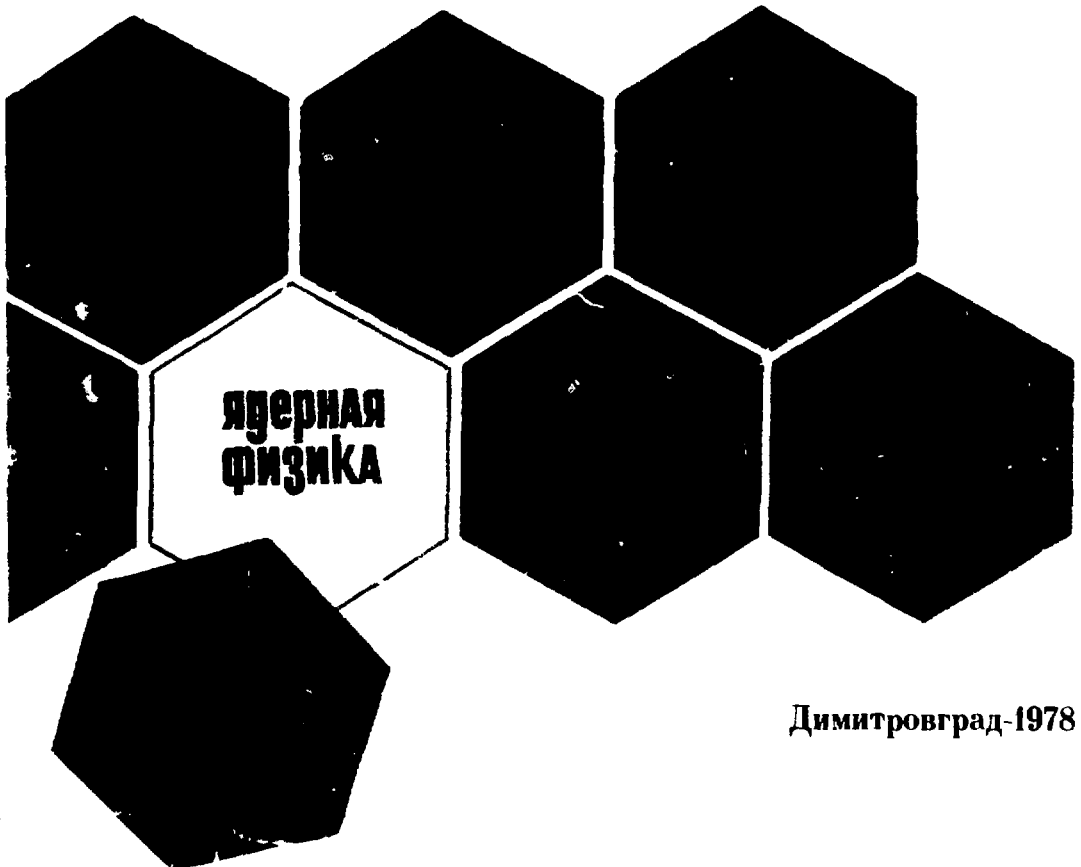
П-2(336)

Морозов
Ю.Ю.Косвинцев, Ю.А.Кушнир,
В.И.Морозов, И.А.Плотников

50 78 103.1

МАГНИТНАЯ ЛОВУШКА ДЛЯ УДЕРЖАНИЯ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

731



Димитровград-1978

Н А С Т О Я Ш Е Е И З Д А Н И Е Н И И А Р а

ЯВЛЯЕТСЯ самостоятельной, не всегда дублирующей в последствии в других изданиях ПУБЛИКАЦИЕЙ отдельных оригинальных научных трудов НИИАРа на которую можно сослаться в других публикациях, указывая при этом авторов, наименование, порядковый номер (НИИАР, П-...), год и место издания (Димитровград).

ИЗДАЕТСЯ с целью более быстрой или более полной информации по сериям:

1. Ядерные реакторы
2. Методика и техника облучения
3. Радиационное материаловедение
4. Радиохимия
5. Ядерная физика
6. Вычислительная техника и электроника
7. Вычислительная математика и программирование
8. Информатика и управление

ПЕЧАТАЕТСЯ на ротаприте НИИАРа тиражом 170 экз.

РАССЫЛАЕТСЯ в научные организации, научно-технические библиотеки и отдельным лицам на основе обмена и за плату.

Научно-исследовательский институт атомных реакторов
им. В.И.Ленина

П-2 (336)

Ю.Ю.Косвинцев, Ю.А.Кушнир,
В.И.Морозов, И.А.Плотников

МАГНИТНАЯ ЛОВУШКА ДЛЯ УДЕРЖАНИЯ
УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

Димитровград - 1978

УДК 621.039.572

Р е ф е р а т

Описаны первые эксперименты по хранению ультрахолодных нейтронов в замкнутой магнитной полости, а также принцип работы и конструкция магнитной ловушки, предназначенной для удержания ультрахолодных нейтронов с кинетической энергией от 0 до 9 нэВ. Время хранения нейтронов составило несколько десятков секунд.



Научно-исследовательский институт
атомных реакторов им. В.И. Ленина
(НИИАР) 1978г.

1. ВВЕДЕНИЕ

Впервые на возможность применения магнитных полей для удержания нейтронов в ограниченной области пространства указал В.В.Владимирский в 1960 г. [1]. В работе при анализе движения нейтронов в неоднородном магнитном поле было показано, что для нейтронов с спином, ориентированным вдоль поля, области с повышенной напряженностью могут оказаться классически недоступными, если энергия нейтронов достаточно мала. Подобрав специальным образом конфигурацию магнитного поля, можно ограничить движение нейтронов некоторой пространственной областью, т.е. создать магнитную ловушку для удержания нейтронов. В работе [1] было предложено несколько вариантов таких ловушек, а также были проанализированы возможные каналы утечки нейтронов из подобных систем.

После опубликования работы [1] вопросы магнитного удержания нейтронов в печати практически не обсуждались. Объясняется это не потерей интереса к проблеме, а слишком очевидными техническими трудностями, возникающими при создании таких систем, главная из которых — отсутствие интенсивных источников нейтронов с энергией $\sim 10^{-7}$ эВ (технически легко достижимыми полями 1 Т возможно удержание нейтронов с энергией $\sim 10^{-7}$ эВ).

Интерес к проблеме магнитного удержания нейтронов возобновился в 1969 г., после того как Ф.Л.Шапиро с сотрудниками [2] разработал метод извлечения из активной зоны реактора нейтронов с энергией $\sim 10^{-7}$ эВ. Открытие таких нейтронов, получивших название ультрахолодных (УХН), послужило новым толчком к обсуждению проблемы магнитного удержания нейтронов. В период с 1969 по 1976 гг.

был опубликован ряд работ, посвященных как теоретическому анализу задачи [3 - 7], так и описанию строящихся и проектируемых ловушек [8 - 10]. Главным стимулом работы в этом направлении стала возможность прямого измерения времени жизни свободного нейтрона методом удержания нейтронов в таких ловушках [11].

Экспериментальные работы по изучению взаимодействия УХН с магнитными полями впервые были проведены на реакторе СМ-2. В предварительных экспериментах было проверено явление полного отражения УХН от энергетического барьера, создаваемого магнитным полем [12], и проведено удержание УХН в сосуде с магнитной "стенкой" [13]. Результаты подтвердили возможность создания магнитной ловушки для удержания УХН. Это дало основание приступить к ее разработке.

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКИ ДЛЯ УДЕРЖАНИЯ УХН

Известно, что энергия взаимодействия W нейтрона с магнитным полем определяется как

$$W = \pm \mu H, \quad (1)$$

где H - напряженность поля; $\mu = 9,55 \cdot 10^{-27}$ А·м² - магнитный момент нейтрона; знак определяется направлением спина нейтрона относительно поля.

Рассмотрим движение нейтрона, влетающего из области с $H = 0$ в область, где напряженность поля является возрастающей функцией $H(\vec{r})$ координат \vec{r} . Если начальная энергия нейтрона $E \leq \mu H(\vec{r}_0)$ и спин нейтрона ориентирован вдоль направления поля, то независимо от направления движения нейтрон будет выталкиваться из данной точки \vec{r}_0 поля. Поэтому, если нейтрон ввести в замкнутую магнитную полость, у которой магнитное поле возрастает от центра к периферии (рис. 1), то он будет сво-

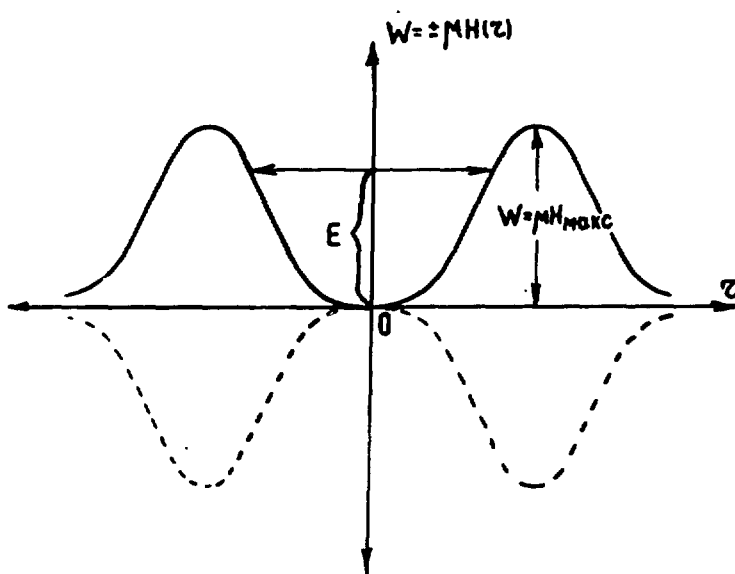


Рис. 1. Потенциальная энергия УХН в замкнутой магнитной полости

бодно двигаться во всех направлениях, не покидая ее, если энергия $E \leq \mu H_{\text{макс}}$ ($H_{\text{макс}}$ — максимальная напряженность поля).

Очевидно, что необходимым условием удержания является сохранение ориентации спина нейтрона относительно направления поля. Изменение проекции спина на направление поля (деполяризация) приведет также к изменению знака энергии взаимодействия нейтрона с полем и к выходу нейтрона из области удержания.

Проекция спина нейтрона на направление поля является адиабатическим инвариантом (при достаточно медленном изменении направления поля в системе координат, связанной с нейтроном, спин поворачивается за полем и деполяризации не происходит). Угловая скорость вращения вектора поля ω' при этом должна быть мала по сравнению с частотой прецессии магнитного момента:

$$\omega' \ll \omega_L = \frac{2\mu H}{\hbar}. \quad (2)$$

Из условия (2) видно, что нарушение условия адиабатичности может происходить главным образом в окрестности точек с $H = 0$ или в областях, где поле быстро переверачивается.

Оценка вероятности переворота спина нейтрона вблизи таких точек проводилась в работе [1]. При этом полагалось, что в достаточно малой области поле \vec{H} является линейной функцией времени. Выбрав точку, где $\vec{H} \perp \dot{\vec{H}}$, за начало отсчета и считая $H_x = \text{const}$, $H_y = 0$, $H_z = t \cdot \dot{H}$, $\dot{H} = \text{const}$, для спиновой волновой функции $\psi = \begin{pmatrix} \varphi \\ \chi \end{pmatrix}$ можно записать уравнение

$$i\dot{\psi} + \mu H_x \sigma_x \psi + \mu t \dot{H} \sigma_z \psi = 0, \quad (3)$$

где σ_x, σ_z - матрицы Паули.

Если при $t \rightarrow -\infty$ $|\varphi|^2 = 1$, $|\chi|^2 = 0$, то решение уравнения (3) при $t \rightarrow +\infty$ имеет вид

$$|\varphi|^2 = e^{-\pi\omega^2/a}, \quad |\chi|^2 = 1 - e^{-\pi\omega^2/a},$$

где $\omega = \frac{\mu H_x}{\hbar}$, $a = \frac{\mu \dot{H}}{\hbar}$.

Введя эффективное время переворота поля $\tau = \frac{H_x}{\dot{H}} = \frac{\omega}{a}$, можно записать вероятность переворота спина как

$$W = e^{-\pi\omega\tau}. \quad (4)$$

Когда нейтрон испытывает большое число проходов N_n вблизи точек поворота поля, то для минимального значения поля может быть получена оценка

$$\frac{\pi\mu H_{\text{min}}^2}{\hbar |\dot{H}|} > \ln N_n. \quad (5)$$

Другой возможной причиной деполаризации нейтронов может являться временная нестабильность магнитного поля ловушки. Как известно [14], если под прямым углом к направлению ведущего однородного поля H_0 приложено ос-

циллирующее поле $H_1 \cos \omega t$, то возможен резонансный переворот спина, вероятность которого становится равной 1, когда

$$\omega_1 = \omega_L, \quad \frac{\mu H_1 t}{2\hbar} = n \frac{\pi}{2}, \quad \text{где } n = 1, 3, 5 \dots \quad (6)$$

Наличие неустойчивости тока у генератора питания магнитов ловушки приводит к тому, что напряженность поля в любой точке объема можно записать как

$$\vec{H}(t) = \vec{H}_0 + \vec{h}(t), \quad (7)$$

где H_0 - не зависящая от времени компонента напряженности поля;

$\vec{h}(t)$ - изменяющаяся со временем компонента поля.

Существование возмущения $\vec{h}(t)$ не исключает, что при движении нейтрона в ловушке возможен резонансный переворот спина под действием одной из гармоник $\vec{h}(t)$. Необходимо отметить, что такая возможность существует, если электромагниты ловушки запитываются несколькими независимыми генераторами. Если генератор питания один, то направление меняющегося во времени поля $\vec{h}(t)$ всегда совпадает с направлением H_0 и резонансного переворота спина не произойдет.

Временная неустойчивость магнитного поля может также привести к постепенному изменению энергии удерживаемых нейтронов (нагреву и охлаждению). Диффузия нейтронов в импульсном пространстве, связанная с флуктуациями поля, приведет к выходу нейтронов из ловушки, когда энергия их станет больше μH_{\max} . Характерное время хранения нейтронов в ловушке с вибрирующими стенками можно грубо оценить из следующих соображений. Максимальное изменение энергии нейтрона при ударе о вибрирующую магнитную стенку следует ожидать при частоте вибраций $\nu_0 = \frac{1}{\epsilon}$, где $\epsilon = H/\nu_0 \frac{dH}{dx}$, ν_0 - скорость нейтрона в ловушке. Действительно, когда частота вибрации $\nu < \nu_0$, то за время взаимодействия поле не успевает значительно измениться и переданная нейтрону энергия будет мала. Если частота вибраций $\nu > \nu_0$, то за

это время поле испытает большое число колебаний и в результате усреднения переданная нейтрону энергия будет также незначительна. Допустим, что напряженность поля в ловушке меняется по закону

$$H(r, t) = H(r)(1 + \alpha \sin \omega_0 t), \quad (8)$$

где α - амплитуда пульсаций с частотой $\omega_0 = 2\pi\nu_0$.

Скорость движения $v_{ст}$ магнитной стенки (скорость движения в пространстве эквипотенциальной поверхности поля) может быть выражена как

$$v_{ст} = \frac{dH}{dt} \cdot \frac{dr}{dH} \approx \frac{\alpha \omega_0 H(r) \cos \omega_0 t}{\frac{dH}{dr}}. \quad (9)$$

Среднее приращение квадрата скорости нейтрона при ударе о стенку будет составлять

$$\overline{\Delta v^2} = 4 \overline{v_{ст}^2} = \frac{2\alpha^2 \omega_0^2 H(r)^2}{\left(\frac{dH}{dr}\right)^2} \approx 2\alpha^2 \omega_0^2 \tau^2 v_0^2. \quad (10)$$

Для приближенной оценки можно считать, что распределение нейтронов по энергии $f(E)$ после большого числа ударов о стенки ловушки будет определяться функцией Гаусса:

$$f(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi} e^{-\frac{(E-E_0)^2}{2\xi^2}}, \quad (11)$$

где $\xi = 2\chi t$, $\chi = \frac{(\Delta E)^2}{2\Delta t}$ - коэффициент диффузии;
 $\Delta E = \frac{m\Delta v^2}{2} = 2\alpha^2 \omega_0^2 \tau^2 E_0$, $E_0 = \frac{m v_0^2}{2}$, $\Delta t = \frac{l}{v_0}$,
 l - линейный размер ловушки.

Отсюда характерное время хранения нейтронов в ловушке можно оценить как

$$\tau_{xp} \approx \frac{(\mathcal{M}H_{max} - E_0)^2}{(\Delta E)^2} \Delta t. \quad (12)$$

Прежде чем перейти к обсуждению конкретной конфигурации магнитного поля для удержания ультрахолодных нейтронов, предварительно рассмотрим предложенную в ра-

боте [1] конструкцию плоского магнитного зеркала для отражения нейтронов. Зеркало представляет периодическую структуру из равноотстоящих друг от друга проводников 1, расположенных в пазах между прямыми полюсами 2, замкнутыми между собой магнитопроводом 3 (рис. 2). В пространстве над плоскостью, совпадающей с поверхностью полюсов, абсолютная величина напряженности магнитного поля изменяется по закону

$$H_z = H_0 e^{-\kappa z}, \quad (13)$$

где H_0 - напряженность поля на поверхности полюсов;

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda};$$

λ - расстояние между одноименными полюсами.

Рассмотрим движение нейтрона в магнитном поле такого зеркала. Если зеркало установлено так, что поверхность полюсов перпендикулярна направлению поля тяжести, то потенциальная энергия $W(z)$ нейтрона со спином по полю может быть выражена как

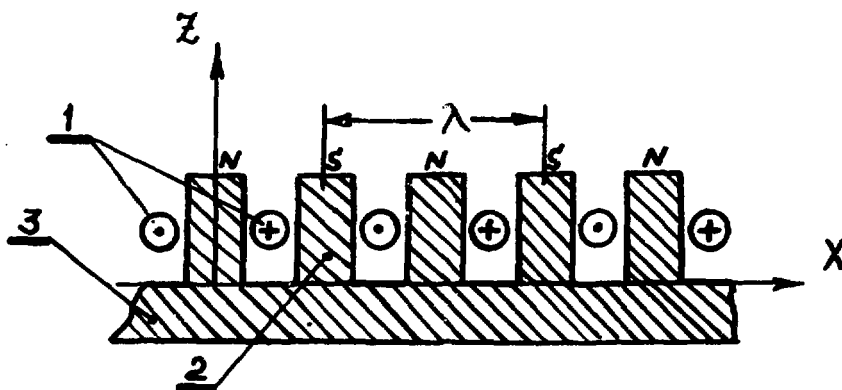


Рис. 2. Плоское магнитное зеркало: 1 - проводник с током; 2 - магнитный полюс; 3 - магнитопровод

$$W(z) = \mu H_0 e^{-Kz} + mgz. \quad (14)$$

Из уравнения (14) видно, что движение нейтрона в вертикальном направлении ограничено стенками потенциальной ямы, возникающей в результате сложения магнитного и гравитационного потенциалов. В горизонтальном направлении движение нейтрона не ограничено, если зеркало имеет бесконечно большую протяженность. Уравнения движения нейтрона в этом случае запишем

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = 0, \quad \frac{d^2 z}{dt^2} = g - \frac{K \mu H_0}{m} e^{-Kz}. \quad (15)$$

Из уравнения (15) видно, что нейтрон перемещается с постоянной скоростью по горизонтальному направлению, одновременно испытывая колебания в вертикальном направлении с периодом T , равным

$$T = \sqrt{2m} \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{\sqrt{E - \frac{mV_r^2}{2} - mgz - \mu H_0 e^{-Kz}}}, \quad (16)$$

где z_1 и z_2 - точки поворота, определяемые уравнением

$$\mu H_0 e^{-Kz} + mgz = E - \frac{mV_r^2}{2}, \quad (17)$$

V_r - горизонтальная составляющая скорости нейтрона.

Из выражения (16) следует, что плоское зеркало можно использовать для удержания нейтронов, кинетическая энергия которых при $H = 0$ на поверхности полюсов удовлетворяет условию

$$\mu H_0 > E_k > E_{\text{мин}}, \quad (18)$$

где $E_{\text{мин}} = \frac{mg}{K} \left(1 + \ln \frac{K \mu H_0}{mg} \right)$ - потенциальная энергия, соответствующая дну ямы.

Очевидно, что отражающие свойства такого зеркала можно использовать для ограничения движения и в горизон-

тальном направлении. Для этого зеркало надо расположить так, чтобы поверхность полюсов была параллельна направлению поля тяжести. Сочетанием вертикальных, горизонтальных и наклонных зеркал можно создавать самые различные конфигурации магнитных систем для удержания нейтронов.

Общая схема магнитной системы ловушки, построенной в НИИАРе, приведена на рис. 3. Для ограничения движения нейтронов в вертикальном направлении служит нижнее зеркало 1, представляющее систему равноотстоящих друг от друга концентрических полюсов, в кольцевых пазах которых уложены проводники с током. Центральная часть зеркала — магнитная пробка 3 удаляется, когда производится наполнение ловушки нейтронами, и устанавливается снова, когда происходит удержание нейтронов.

Ограничение движения нейтронов в горизонтальном направлении производится боковыми магнитными стенками ловушки 2, представляющими собой зеркало, магнитопровод которого выполнен в виде цилиндра, охватывающего нижнее зеркало. Для увеличения рабочего объема ловушки величина токов в кольцевых зазорах бокового зеркала линейно уменьшается с увеличением высоты подъема z .

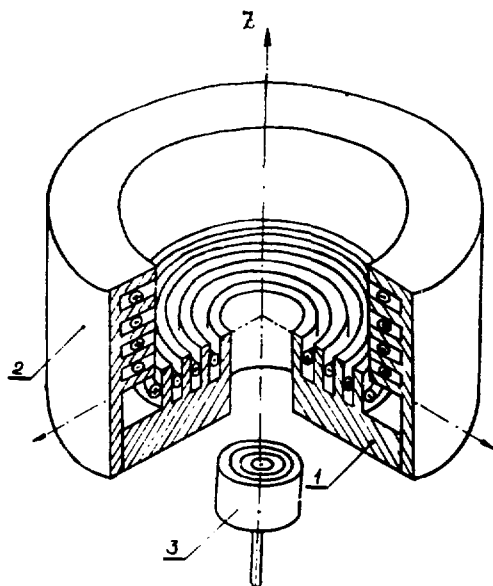


Рис. 3. Принципиальная схема магнитной ловушки: 1 — нижнее магнитное зеркало; 2 — вертикальное зеркало; 3 — магнитная пробка

3. МАГНИТНАЯ ЛОВУШКА ДЛЯ УДЕРЖАНИЯ УХН

Построенная на реакторе СМ-2 магнитная ловушка предназначена для удержания УХН с кинетической энергией внутри объема удержания от 0 до 9 нэВ. Она включает системы:

- . электромагнитных зеркал,
- . электрического питания,
- . охлаждения обмоток электромагнитов.
- . вакуумную,
- . наполнения ловушки и регистрации УХН.

3.1. Система электромагнитных зеркал

Основной частью ловушки является электромагнитная система, представляющая сочетание горизонтального и вертикального зеркал (рис. 4). Нижнее зеркало изготовлено из стали 10 в виде плоского диска 1 ϕ 80 см и толщиной 2,9 см, на котором укреплено семь концентрических полюсов 2 высотой 8,3 см и толщиной 2,5 см. Ширина кольцевого зазора между полюсами 2,5 см. Обмотки зеркала 3 выполнены медной шиной сечением 2x6 мм² с хлопчатобумажной изоляцией, пропитанной эпоксидной смолой. Между полюсами зеркала и обмотками установлены вертикальные текстолитовые изолирующие прокладки 4. Полное число витков в одной обмотке 88. Центральная часть зеркала, включающая два полюса и две обмотки, представляет автономный узел, играющий роль магнитной пробки 5. При наполнении ловушки пробка опускается вертикально вниз, открывая в центре зеркала отверстие ϕ 16,5 см для входа нейтронов. После окончания цикла накопления пробка возвращается в верхнее положение и магнитная полость ловушки замыкается.

Вертикальное зеркало ловушки, изготовленное из стали 3, состоит из цилиндрического панциря 6, диаметром

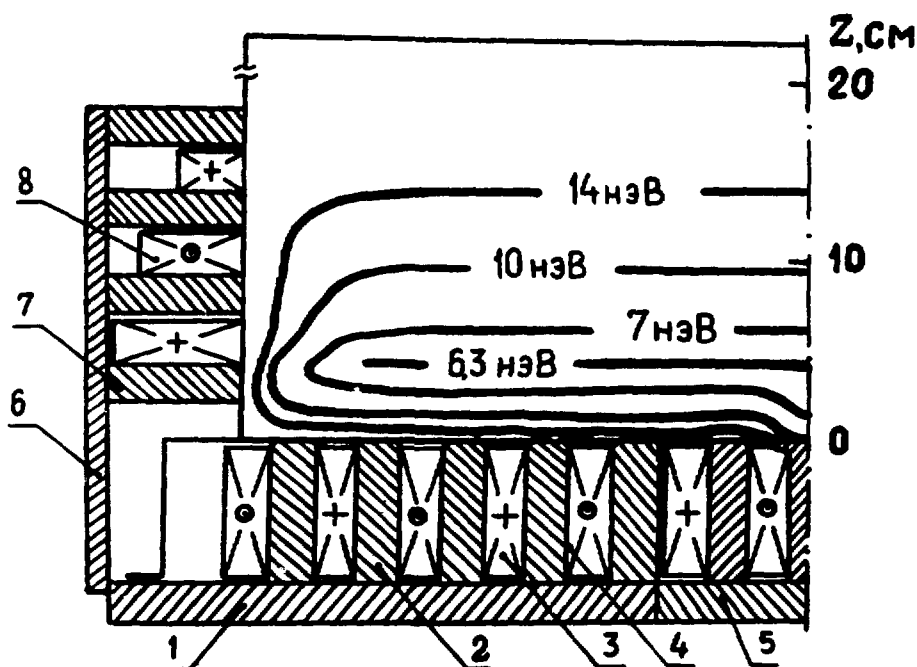


Рис. 4. Электромагнитная система ловушки: 1 - магнитопровод нижнего зеркала; 2 - полюс; 3 - обмотка; 4 - изолирующая прокладка; 5 - магнитная пробка; 6 - цилиндрический панцирь; 7 - полюс вертикального зеркала; 8 - обмотка вертикального зеркала

80 см, толщиной 1,2 см и четырех полюсов 7, выполненных в виде колец с внешним и внутренним диаметрами соответственно 80 и 64 см (толщина колец 2,2 см). Для обмоток вертикального зеркала использовалась такая же шина, как и на нижнем зеркале. В пазах между полюсами уложены три обмотки. Полное число витков в нижней обмотке 110, в средней 64, в верхней 36.

Обмотки вертикального и нижнего зеркал включены между собой последовательно (за исключением обмоток магнитной пробки, имеющих автономное питание). При токе 110 А минимальная магнитная индукция поля на расстоянии 2 мм от плоскости полюсов нижнего зеркала составляла 0,25 Т. Как видно из рис. 5, при достигнутой напряженности поля энергия взаимодействия нейтрона с магнитным полем составляет 15 нэВ. С увеличением высоты подъема Z энергия взаимодействия экспоненциально уменьшается по закону (14) с $K \approx 0,5 \text{ см}^{-1}$. Когда $Z > 8 \div 10 \text{ см}$, энергия уменьшается несколько медленнее, чем по закону (13). Из формы потенциальной ямы, возникающей при сложении магнитного и гравитационного потенциалов, можно заключить, что в ловушке должны удерживаться нейтроны с кинетической энергией от 0 до 9 нэВ.

На рис. 4 и 6 сплошными линиями показаны сечения плоскостью, проходящей через ось ловушки, эквипотенциальных поверхностей удержания для нейтронов различных энергий. Из рисунков видно, что в результате линейного спада тока с увеличением высоты в обмотках вертикального зеркала сечения эквипотенциальных поверхностей по форме близки к прямоугольникам с длиной, незначительно отличающейся от диаметра полюсных колец. Это свидетельствует о достаточно эффективном использовании рабочего пространства ловушки для накопления нейтронов.

Сечения эквипотенциальных поверхностей построены по результатам измерений абсолютной напряженности магнитного поля в рабочем объеме ловушки. Измерения проводились однокомпонентным датчиком Холла (2,5x6 мм), не позволявшим выявить тонкую структуру поля (в частности, надежно обнаружить нулевые линии и точки), поэтому сечения лишь грубо показывают форму объемов удержания для нейтронов различных энергий.

Из рис. 4 видно, что в центральной части магнитной пробки магнитное поле существенно ослаблено; это связано с насыщением центрального полюса пробки при больших токах. При попадании нейтрона в эту область отражение происходит не только из-за наличия магнитного потенциала, но и ядерного.

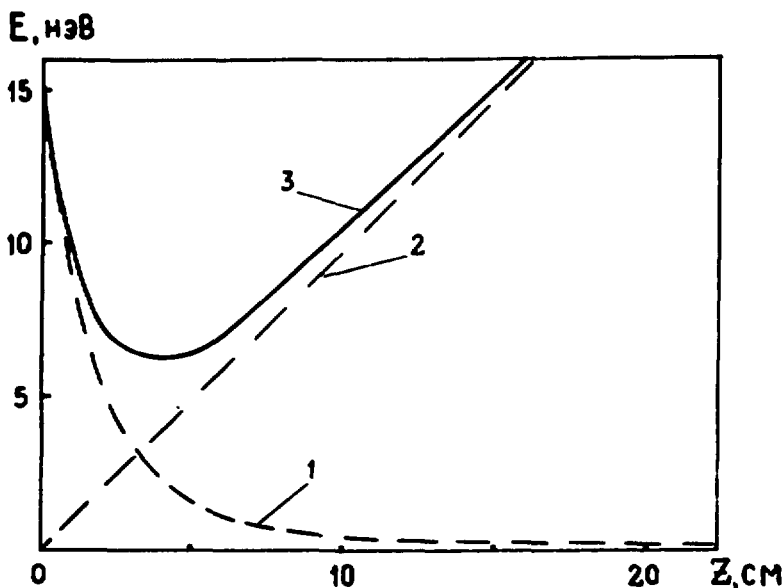


Рис. 5. Потенциальная энергия взаимодействия нейтрона с магнитным и гравитационным полями: 1 – энергия взаимодействия нейтрона с магнитным полем; 2 – энергия взаимодействия нейтрона с гравитационным полем; 3 – полная энергия взаимодействия. Зависимость $W = \mu H(z)$ приведена для $r = 18$ см

3.2. Система электрического питания магнитов

Общая схема электрического питания ловушки приведена на рис. 7. Для питания обмоток зеркал использовался генератор G_3 постоянного тока, с самовозбуждением, работающий от двигателя D_1 . Изменение тока в обмотке возбуждения OB_1 генератора производится реостатами тонкой P_1 и грубой P_2 регулировки. При оптимальном токе через

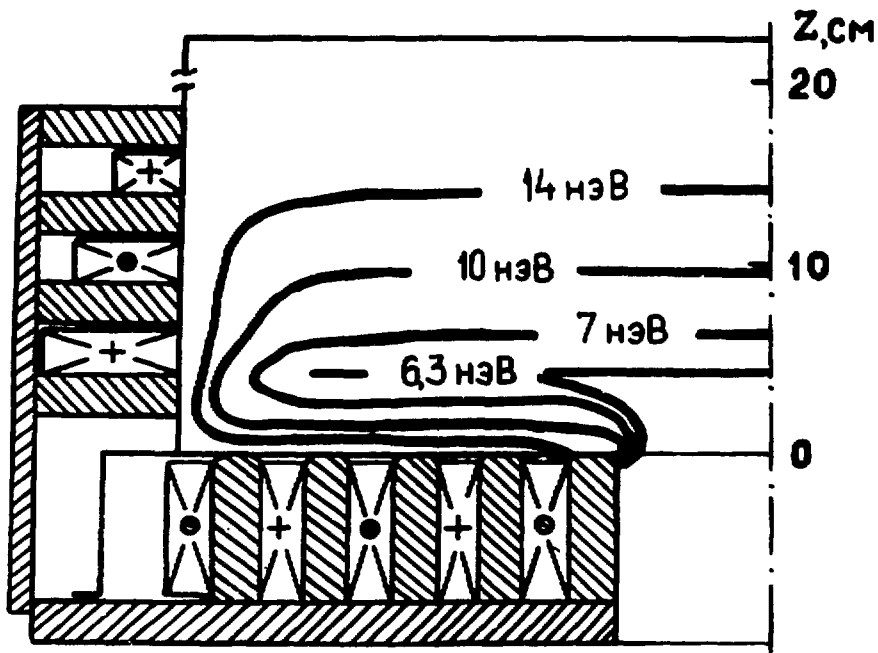


Рис.. 6. Электромагнитная система ловушки (без магнитной пробки)

обмотки магнитной ловушки ≈ 110 А полная мощность, выделяющаяся в обмотках, составляет 28 кВт. Питание магнитной пробки производится от автономного генератора Г1 с независимой обмоткой возбуждения. Регулировка постоянного тока в обмотках возбуждения производится реостатом R_3 , подключенным на выход выпрямителя ВС. Генератор приводится во вращение двигателем D_2 . Обмотки магнитной пробки запитывались током 120 А. Электрическая мощность, выделявшаяся при этом в обмотках, составляла 1,5 кВт.

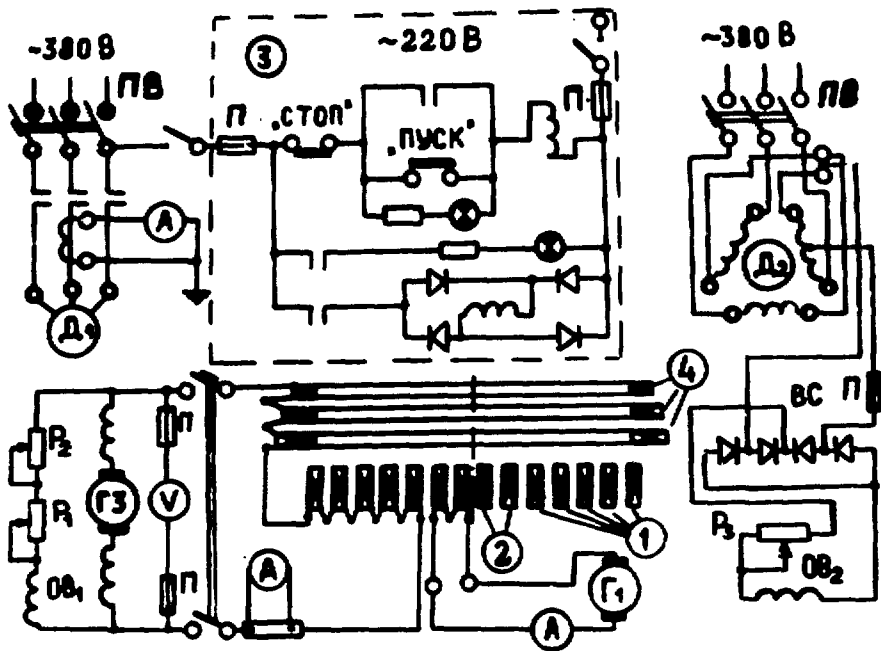


Рис. 7. Схема электрического питания ловушки: 1 - обмотки нижнего зеркала и 2 - магнитной пробки; 3 - блок управления двигателем Д1; 4 - обмотки вертикального зеркала; Д1 - двигатель генератора Г3; R₁, R₂ - регулировочные реостаты; Г3 - генератор питания нижнего зеркала; ОВ₁ - обмотка возбуждения генератора Г3; П - предохранитель; ПВ - пакетный переключатель; Д2 - двигатель генератора Г1; Г1 - генератор питания магнитной пробки; R₃ - регулировочный реостат; ОВ₂ - обмотки возбуждения генератора Г1; ВС - селеновый выпрямитель

3.3. Система охлаждения магнитов ловушки

Для охлаждения обмоток была применена комбинированная система охлаждения (рис. 8). Охлаждение обмоток

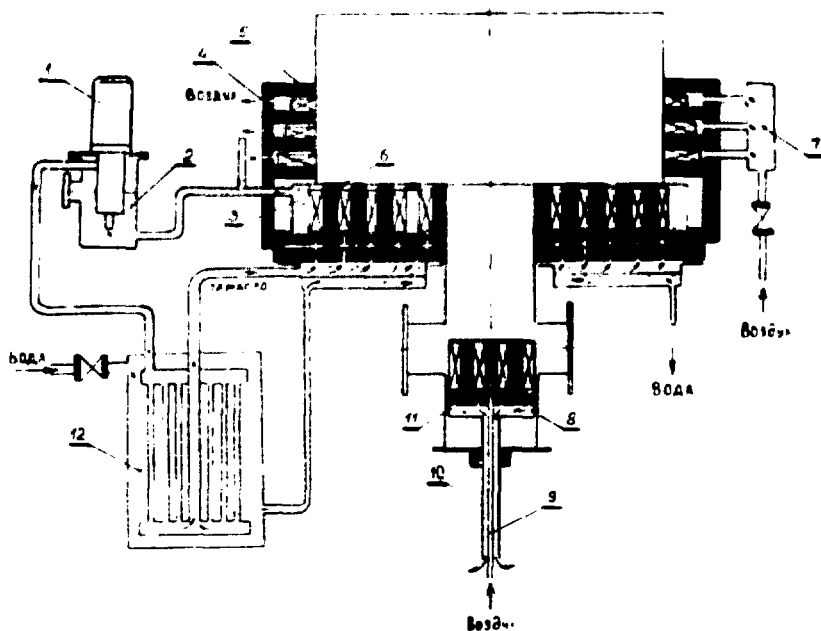


Рис. 8. Система охлаждения электромагнитов ловушки: 1 - центробежный насос; 2 - маслосборный объем; 3 - масляный бак; 4 - выходные отверстия для воздуха; 5 - панцирь вертикального зеркала; 6 - радиальные отверстия в полюсах; 7 - распределитель сжатого воздуха; 8 - вакуумный кожух пробки; 9 - цилиндрический канал; 10 - шток; 11 - отверстия для охлаждения пробки; 12 - теплообменник

нижнего зеркала производится трансформаторным маслом, поступающим под давлением 0,05 МПа из масляного бака 3 в пазы между полюсами через отверстия в опорном диске зеркала. Поднимаясь по межполюсным пазам, масло омывает обмотки магнитов и нагревается. Достигнув верхнего конца полюсов, нагретое масло вытекает через радиальные отверстия 6 полюсов в масляный бак 3. Из бака масло по-

ступает в маслосборный объем 2, откуда центробежным насосом 1 подается в теплообменник 12. Проходя по трубкам теплообменника, масло охлаждается технической водой, после чего снова поступает в масляный бак 3. Дополнительное охлаждение масла происходит непосредственно в масляном баке, дно которого также омывается технической водой (расход воды 20 л/мин).

Центробежный насос обеспечивал циркуляцию масла со скоростью 8 л/мин. При такой скорости циркуляции и электрической мощности ~20 кВт температура обмоток поднималась с 25 до 100°C в течение 5 мин. После отключения тока в обмотках температура понижалась до 25 - 30°C через 15 - 20 мин.

Охлаждение обмоток магнитной пробки производится сжатым воздухом, поступающим под давлением 0,2 МПа по цилиндрическому каналу 9. Через зазор между полюсами и вакуумным кожухом пробки воздух проходит в межполюсные пазы, охлаждая обмотки. Нагретый воздух выходит через отверстие 11 в основании пробки по трубе 10, одновременно являющейся штоком для движения пробки. При мощности, выделяющейся в обмотках пробки ~1,5 кВт, и входном давлении воздуха 0,2 - 0,3 МПа разогрев обмоток до 100°C наступал через 5 - 7 мин.

Охлаждение обмоток вертикального зеркала производится также сжатым воздухом, поступающим под давлением 0,3 - 0,5 МПа через распределитель 7 в кольцевые пазы между обмотками. Нагретый воздух выходит из пазов через отверстия 4 в панцире 5 зеркала. При мощности в обмотках зеркала ~10 кВт разогрев проводов до 100°C наступал через 20 - 30 мин.

Система охлаждения магнитов ловушки позволяет вести циклическую эксплуатацию ловушки с рабочим временем ~3 мин и паузами для охлаждения 10-15 мин. При этом разогрев проводов обмоток не превышает 75°C.

3.4. Вакуумная система

Основной частью вакуумной системы ловушки (рис. 9) является камера удержания 3, изготовленная из электропо-

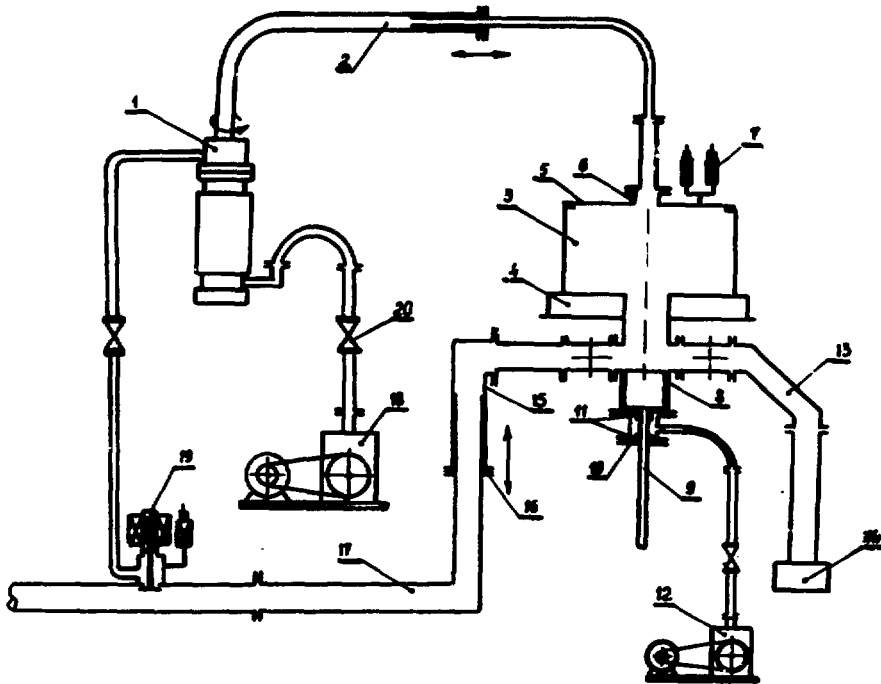


рис. 9. Вакуумная система ловушки: 1 - высоковакуумный агрегат; 2 - вакуумный трубопровод; 3 - камера удержания; 4 - масляный бак; 5 - верхний фланец камеры; 6 - патрубок откачки; 7 - лампы контроля вакуума; 8 - вакуумный узел; 9 - шток; 10 - промежуточная камера; 11 - уплотнение штока; 12 - форвакуумный насос; 13 - ускорительное колено детектора; 14 - детектор; 15 - нейтроновод; 16 - телескопическое вакуумное соединение; 17 - выходной патрубок установки получения УХН; 18 - форвакуумный насос; 19 - электромагнитный клапан; 20 - вакуумный вентиль.

лированной нержавеющей стали толщиной 2 мм. Диаметр камеры 64 см, высота 32 см. В верхнем фланце 5 камеры установлен вакуумный патрубок откачки 6. В дне ка-

меры, одновременно являющемся крышкой масляного бака 4, имеется отверстие ϕ 16,5 см, к которому герметично прикреплен вакуумный узел 8, где происходит движение магнитной пробки (посредством штока 9, проходящего через уплотнение 11 в нижнем фланце вакуумного узла). К нижнему фланцу герметично присоединена промежуточная вакуумная камера 10 с патрубком для откачки и вторым уплотнением 11. Откачка промежуточной камеры осуществляется форвакуумным насосом 12.

К фланцам вакуумного узла присоединены нейтроновод 13 с детектором УХН 14 и нейтроновод 15 для ввода УХН в ловушку. Нейтроновод, имеющий телескопическое вакуумное соединение 16, подключен к выходному патрубку 17 установки для получения УХН.

Откачка камеры удержания, вакуумного узла и нейтроновода осуществляется диффузионным вакуумным агрегатом 1 производительностью 500 л/с одновременно по трубопроводу 2, соединенному с выходным патрубком 6 камеры удержания и через электромагнитный клапан 19 на выходе установки для получения УХН. Предельный вакуум, достигаемый в камере, составляет ~ 10 мПа.

3.5. Система наполнения ловушки нейтронами и регистрации

УХН широкого спектра 50 – 170 нэВ, получаемые на установке для их извлечения, поступают в ловушку по нейтроноводу 2 из электрополированных нержавеющей труб ϕ 9 см (рис. 10). Ловушка заполняется нейтронами через двойную поворотную заслонку 3, управляемую электромагнитами. Изменение спектра нейтронов, заполняющих ловушку, производится регулировкой высоты подъема h ловушки относительно выходного патрубка 1.

Перед началом цикла заполнения ловушки входная заслонка 3 открывается и закрывается выходная заслонка 5, предназначенная для вытекания на детектор удержанных УХН. Магнитная пробка 6 при этом находится в самом нижнем положении, и УХН наполняют камеры вакуумного узла и удержания 4. После окончания цикла заполнения

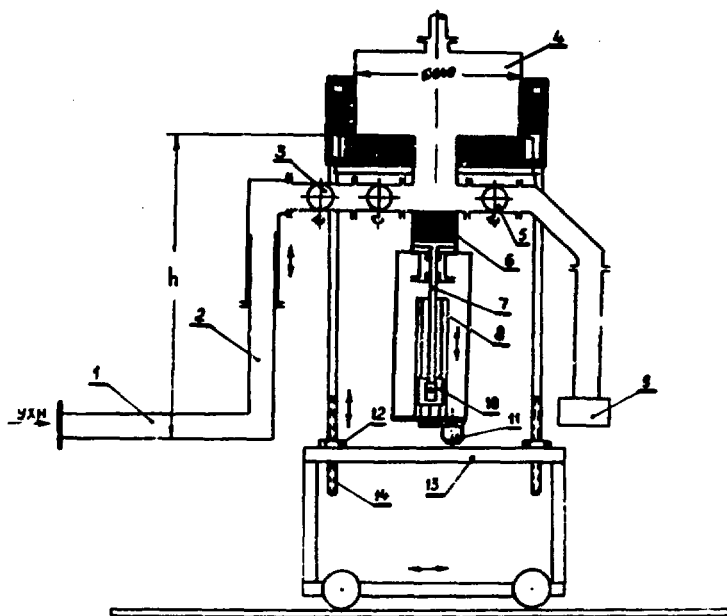


Рис. 10. Общая схема магнитной ловушки: 1 - выходной патрубок установки для получения УХН; 2. - нейтроновод; 3 - двойная поворотная заслонка; 4 - вакуумная камера; 5 - выходная заслонка; 6 - магнитная пробка; 7 - шток; 8 - направляющие полозья; 9 - детектор; 10 - каретка; 11 - двигатель пробки; 12, 13, 14 - платформа с опорными балками

включается поле магнитной пробки, заслонка 3 закрывается, и одновременно начинается движение магнитной пробки вверх, через шток 7, нижний конец которого закреплен в каретке 10, перемещающейся вертикально по направляющим полозьям 8. Каретка перемещается электродвигателем 11 со скоростью ~ 5 см/с. При подходе пробки к верхнему положению электродвигатель отключается. Нейтроны, накопившиеся в камере вакуумного узла, при этом вытес-

няются в полость магнитной ловушки пробкой, и полость за-
мыкается.

По окончании цикла удержания электродвигатель вклю-
чается в обратном направлении и пробка перемещается вниз.
После остановки пробки открывается заслонка 5 и нейтроны
вытекают на детектор 9.

Для регистрации нейтронов применен двухкамерный
газовый пропорциональный счетчик на основе He^3 с вход-
ным окном из алюминиевой фольги площадью 60 см^2 и тол-
щиной 100 мк. Наполнение детектора (кПа):

$Ar - 98,$

$He^3 - 1,$

$CO_2 - 4.$

К детектору УХН подключен спектрометрический тракт,
состоящий из двух предварительных и двух основных усили-
телей с амплитудными дискриминаторами, а также двух пе-
речетных приборов.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКИ

Перед экспериментом по хранению УХН в магнитной
ловушке предварительно были исследованы основные пара-
метры системы накопления и регистрации нейтронов. Ло-
вушка была подключена к выходному патрубку установки
для извлечения УХН так, что высота подъема плоскости
полосов относительно выходного патрубка установки состав-
ляла 151 см (поток УХН широкого спектра на выходе ус-
тановки для извлечения ~ 400 нейтр./с, а счет УХН при
открытых входной и выходной заслонках $\sim 7,3$ нейтр./с
в случае, когда магнитная пробка была отключена и нахо-
дилась в крайнем нижнем положении). Фон тепловых нейт-
ронов при закрытом выходном патрубке установки для из-
влечения УХН $0,36 \pm 0,01$ нейтр./с. Счет нейтронов при
закрытой входной заслонке и открытом входном патрубке
установки УХН (условия, при которых должна идти регист-

рация удержанных нейтронов) практически точно совпадал с тепловым фоном ($\sim 0,36 \pm 0,01$ нейтр./с).

Далее при отключенном поле зеркал и магнитной пробки была изучена зависимость числа накопленных нейтронов от времени в объеме вакуумного узла 8 (см. рис.9). Характерное время τ накопления нейтронов в объеме вакуумного узла составило ~ 20 с, максимальное количество накопленных в одном цикле нейтронов 10. Исходя из этого, в эксперименте по хранению УХН в магнитной ловушке время накопления было выбрано $3\tau = 60$ с. Характерное время вытекания нейтронов из пространства вакуумного узла на детектор составило 5-7 с, поэтому время регистрации УХН, вытекающих из магнитной ловушки, было выбрано равным 20 с.

Чтобы отделить эффект магнитного удержания от обычного стеночного хранения УХН в вакуумной камере, вся ее поверхность была покрыта поглотителем УХН (полиэтиленом). Непокрытой оставалась лишь кольцевая полоса шириной 3 см в области центрального отверстия горизонтального зеркала. В экспериментах с ловушкой измерения проводились для двух случаев, когда поле зеркал и магнитной пробки

- . отключено,
- . включено.

При отключенном магнитном поле число накопленных в одном цикле нейтронов составило $0,36 \pm 0,06$. Поскольку фон при регистрации вытекающих из ловушки УХН составляет $0,36 \pm 0,01$, можно сделать вывод, что все нейтроны, попавшие в камеру удержания, поглощены полиэтиленом. Поэтому эффект обычного стеночного хранения в камере можно считать исключительным. Результаты эксперимента с включенным магнитным полем зеркал и пробки приведены на рис. 11.

За один цикл наполнения в ловушке накапливается $1 \pm 0,15$ нейтр., среднее время удержания которых составляет 35 ± 10 с. Полученные результаты свидетельствуют о хранении нейтронов в магнитной ловушке.

На рис.12 показана зависимость числа накопленных в ловушке нейтронов от величины её поля, измеренного на расстоянии 2 мм от плоскости полюсов нижнего зеркала. Изменение поля производилось синхронным увеличением тока в обмотках зеркал и пробки. Максимальное число нейтронов, накопленных в ловушке при $B = 0,25$ Т, составило $\sim 0,6$, что несколько меньше, чем в первом эксперименте. Связано это с уменьшением потока УХН на выходном патрубке установки для извлечения УХН.

В дальнейшем на построенной ловушке предполагается провести исследование влияния различных факторов на величину времени хранения (стабильности поля, наличия областей с нулевой напряженностью в объеме ловушки, столкновений нейтрона с ядерными стенками).

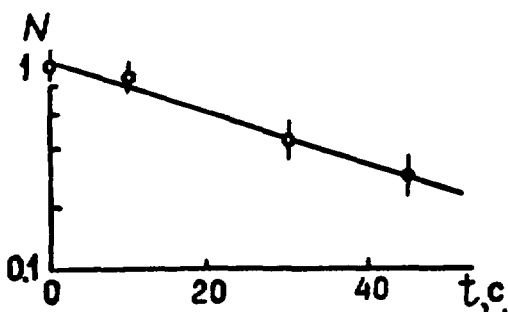


Рис.11. Кривая хранения УХН в магнитной ловушке

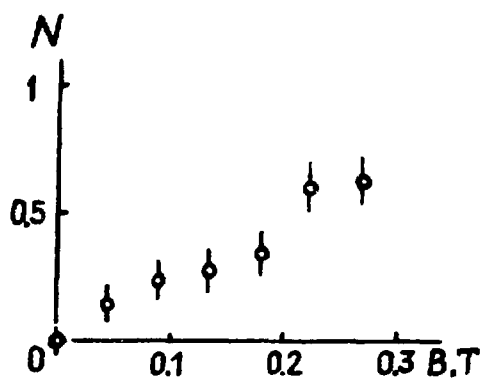


Рис.12. Зависимость числа нейтронов, накопленных в ловушке, от магнитного поля

ЛИТЕРАТУРА

1. Владимирский В.В. Магнитные зеркала, каналы и бутылки для холодных нейтронов. "Журнал экспериментальной и теоретической физики", 1960, т. 39, с. 1062.
2. Шапиро Ф.Л. Ультрахолодные нейтроны. Сообщение ОИЯИ, РЗ-7135, Дубна, 1973.
3. Матора И.М., Стрелина О.А. Магнитные системы для транспортировки и накопления медленных нейтронов. Препринт ОИЯИ, РЗ-5904, Дубна, 1971.
4. Матора И.М. О вероятности переворота спина нерелятивистских частиц в неоднородном магнитном поле. "Ядерная физика", 1972, т. 16, с. 624.
5. Ignatovich V.K. On the storage of ultracold neutrons in magnetic traps. Preprint JINR, E4-8404, Dubna, 1974.
6. Игнатович В.К., Терехов Г.И. Удержание УХН в плоской гравимагнитной ловушке. Сообщение ОИЯИ, Р4-10102, Дубна, 1976.
7. Игнатович В.К., Покотиловский Ю.Н. Удержание УХН магнитным полем прямого провода с током. Сообщение ОИЯИ, Р4-10145, Дубна, 1976.
8. Martin B. Dissertation, Bonn Universität, 1975.
9. Kugler K.I. Diplomarbeit, Bonn Universität, 1975.
10. Абов Ю.Г., Белкин В.Ф., Васильев В.В., Владимирский В.В., Крупчицкий П.А., Риссухин В.К. Об одной конфигурации магнита для удержания ультрахолодных нейтронов. Препринт ИТЭФ-44, М., 1976.

-
11. Косвинцев Ю.Ю., Кушнир Ю.А., Морозов В.И., Терехов Г.И. О возможности применения стеночных и магнитных ловушек ультрахолодных нейтронов для измерения времени жизни свободного нейтрона. "Приборы и техника эксперимента", 1977, № 1, с. 42.
 12. Косвинцев Ю.Ю., Кушнир Ю.А., Морозов В.И. Отражение ультрахолодных нейтронов от энергетического барьера, создаваемого магнитным полем. "Письма в ЖТФ", 1976, т. 2 (7), с. 293.
 13. Косвинцев Ю.Ю., Кушнир Ю.А., Морозов В.И. Хранение ультрахолодных нейтронов в сосуде с магнитной стенкой. "Письма в ЖТФ", 1976, т. 23 (2), с. 135.
 14. Абов Ю.Г., Гулько Г.К., Крупчицкий П.А. Поляризованные медленные нейтроны. М., Атомиздат, 1964.

Рукопись поступила в ОПИНТИ
10.06.77. Обработана 10.11.77.
Окончательно подготовлена
авторами 26.01.78.



Редактор З.В.Бодрова .

Корректор Л.Н.Кривошеева .

Подписано к печати 20.02.78. Т-04640. Формат 60x90 1/16.

Бумага писчая № 0. 1,6 печ.л. 1,4 уч.-изд.л.

Тираж 170 экз. Индекс 3624. Заказ 402. Цена 14 коп.

Отпечатано на ротапринтере НИИАРа, март, 1977 г.

г. Димитровград

Цена 14 коп.

Индекс 3624

