

ЗАТВОР НЕЙТРОНОВ НА НЕМАГНИТНОЙ СТЕНКЕ НАКОПИТЕЛЯ НЕЙТРОНОВ

Ю. В. Никитенко^{а, 1}, *Е. Д. Колупаев*^{а, б}, *В. В. Журавлёв*^а

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Предложен затвор для нейтронов в накопителе с немагнитными стенками. Затвор представляет собой участок стенки накопителя, на который накладывается магнитное поле на время импульса нейтронов при их напуске в накопитель. В это время действие затвора основано на компенсации ядерного потенциала взаимодействия нейтронов магнитным потенциалом. В интервалах между нейтронными импульсами вероятность поглощения нейтронов в затворе, как и во всем накопителе, определяется подбарьерным отражением нейтронов от стенки накопителя, она достаточно мала и может составлять 10^{-5} – 10^{-4} .

A gate for neutrons in accumulator with nonmagnetic walls is proposed. The gate is the section of accumulator wall on which a magnetic field is imposed during the neutron pulse at their lapping in accumulator. At this time, an action of the gate is based on mutual compensation of nuclear and magnetic potentials. In intervals between the neutron pulses, the absorption probability at the gate, as well as in the entire accumulator, is defined by underbarrier neutron reflection from accumulator wall, which is small enough and can be 10^{-5} – 10^{-4} .

PACS: 28.20.–v

ВВЕДЕНИЕ

В [1] предложен накопитель холодных и очень холодных нейтронов на импульсном источнике. В накопителе, подсоединенном к импульсному источнику нейтронов, возрастают значения двух принципиально важных для проведения экспериментальных исследований параметров, а именно времени удержания нейтронов и плотности потока нейтронов. При использовании накопителя можно повысить точность определения времени жизни нейтрона по отношению к β -распаду и увеличить экспериментально достижимые значения характерных времен преобразования нейтронов в антинейтрон и зеркальный нейтрон. Накопитель нейтронов, как показано в [1], является также источником нейтронов для конструирования спектрометров, применяемых в исследованиях конденсированных сред с высоким разрешением по переданному импульсу.

Основным элементом накопителя является импульсный затвор, который открывает входное окно на время напуска нейтронов в накопитель. Затвор впускает нейтроны в накопитель во время импульса нейтронов от источника, а на время между импульсами источника нейтронов препятствует выходу нейтронов из накопителя. Благодаря

¹E-mail: nikiten@nf.jinr.ru

работе затвора плотность нейтронов и плотность потока нейтронов в накопителе возрастают вплоть до их значений в импульсе нейтронов.

Были предложены затворы различного типа [2–6], сравнительный анализ их характеристик приведен в [1]. Важной характеристикой затвора является время срабатывания, которое для периодических источников нейтронов типа ИБР-2 [7] должно составлять несколько десятых долей миллисекунд. Таким требованиям удовлетворяет ферромагнитный затвор [2, 6]. В настоящее время испытан ферромагнитный затвор [6], который состоял из двух ферромагнитных пленок, отличающихся значениями коэрцитивной силы. Пленки затвора намагничиваются взаимно противоположно, что позволяет использовать его для неполяризованных нейтронов. Для перпендикулярной пленкам компоненты скорости нейтронов, равной 3–4 м/с, минимальное значение коэффициента потерь нейтронов при их отражении составляло $\mu = T = 0,02–0,04$, где T — пропускание затвора в закрытом состоянии. Данное значение на один-два порядка превышает необходимую величину, что в результате приводит к уменьшению плотности потока нейтронов в накопителе. В настоящей работе рассмотрен затвор, у которого значение μ достаточно мало, составляет порядка $10^{-5}–10^{-4}$ и определяется ядерным захватом нейтронов при их подбарьерном отражении от стенок накопителя.

ЯДЕРНО-МАГНИТНЫЙ ЗАТВОР (ЯМЗ) НА НЕМАГНИТНОЙ СТЕНКЕ НАКОПИТЕЛЯ НЕЙТРОНОВ

На рис. 1 приведена схема накопителя с ядерно-магнитным затвором. Накопитель представляет собой замкнутое кольцо прямоугольного сечения с тремя немагнитными стенками. Часть боковой стенки накопителя находится в зазоре между полюсами электромагнита. На время прохождения импульса нейтронов через боковую стенку

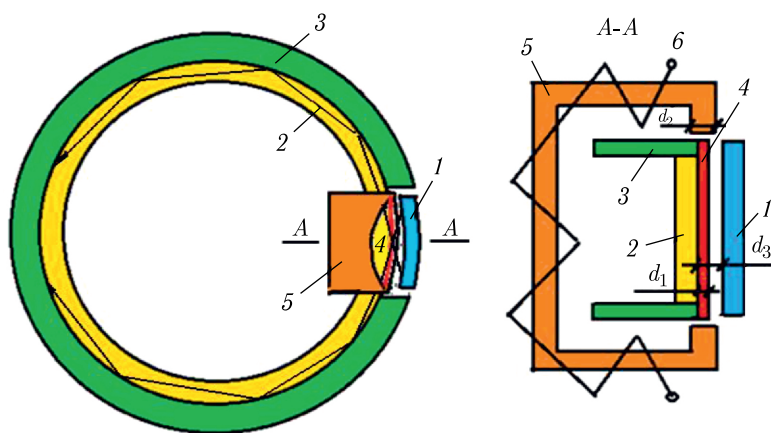


Рис. 1. Схема накопителя с затвором: 1 — холодный замедлитель; 2 — накопительный канал; 3 — боковая стенка накопителя; 4 — пленка затвора; 5 — магнитопровод электромагнита; 6 — катушка электромагнита

накопителя в катушке электромагнита генерируется электрический ток. В результате на стенке накопителя создается магнитное поле, и для противоположно направленной магнитному полю проекции спина нейтронов (отрицательно ориентированных нейтронов) потенциал взаимодействия уменьшается и составляет разность $V = V_n - V_m$ ядерного V_n и магнитного V_m потенциалов. Нейтроны с данной ориентацией спина и перпендикулярной компонентой импульса $p_{\perp} > (2mV)^{1/2}$ проходят в накопитель, где m — масса нейтрона. На время между импульсами нейтронов магнитное поле снимается и потенциал взаимодействия становится равным ядерному. В накопителе удерживаются нейтроны, для которых для перпендикулярной стенке компоненты импульса нейтронов выполняется соотношение $p_{\perp} < (2mV_n)^{1/2}$. Для параллельной магнитному полю проекции спина нейтронов в накопитель входят нейтроны с импульсом $p_{\perp} > (2m(V_n + V_m))^{1/2}$. Такие нейтроны не удерживаются накопителем и не накапливаются в нем. Нейтроны же с импульсом $p_{\perp} < (2m(V_n + V_m))^{1/2}$ отражаются от затвора. Таким образом, в накопитель захватываются нейтроны с одной антипараллельной магнитному полю проекцией спина. Однако поскольку в интервалах времени между нейтронными импульсами потенциал стенок ядерный, в накопителе могут накапливаться неполяризованные нейтроны. неполяризованными нейтроны могут становиться, если конфигурация магнитного поля в накопителе не соответствует адиабатическому слежению спина (магнитного момента) за изменяющим направление магнитным полем.

Минимальная толщина стенки накопителя в месте расположения затвора составляет 1000 Å. По причине механической прочности выберем ее равной $d_1 = 0,1$ мм, при этом для толщины магнитопровода используем значение $d_2 = 0,5$ мм.

Рассмотрим вопрос о желательном соотношении потенциалов V_n и V_m . Введем три значения перпендикулярной компоненты скорости нейтронов. Минимальное значение $v_{1\perp}$, которое может определяться потенциалом материала корпуса замедлителя $V_k = mv_{1\perp}^2/2$ (например, для алюминия $v_{1\perp} = 3,2$ м/с). Значение $v_{2\perp} > v_{1\perp}$ определяется потенциалом $V = mv_{2\perp}^2/2$, значение $v_{3\perp} > v_{2\perp}$ — ядерным потенциалом стенки $V_n = mv_{3\perp}^2/2$. Для отношения χ потока j_1 в интервале $v_{2\perp} - v_{3\perp}$ к потоку j_2 в интервале $v_{1\perp} - v_{3\perp}$ в замедлителе имеем

$$\chi = \frac{j_1}{j_2} = \frac{v_{3\perp}^3 - v_{2\perp}^3}{v_{3\perp}^3 - v_{1\perp}^3} = \frac{V_n^{3/2} - V^{3/2}}{V_n^{3/2} - V_k^{3/2}}. \quad (1)$$

Имеем $V(\text{нэВ}) = V_n - (V_m = 6H(\text{кЭ}))$. Пусть стенка накопителя выполнена из меди с $V_n = 172$ нэВ. При $H = 10$ кЭ и $V_k = 0$ (стенка замедлителя из ванадия) получим $V = 112$ нэВ и $\chi = 0,47$. При $H = 15$ и 20 кЭ имеем $\chi = 0,67$ и $0,83$ соответственно. Видно, что при магнитном поле 15–20 кЭ более 2/3 потока из замедлителя проходит через затвор в накопитель.

На рис. 2 приведены зависимости от времени потока нейтронов $J(t)$ и электрического тока $I(t)$ в катушке электромагнита. Катушка на магнитопроводе обладает индуктивностью L , что приводит к конечному времени нарастания/спада τ тока в катушке после подключения I_u и отключения I_d ЭДС

$$I_u = I_{\max}(1 - \exp(-t/\tau)), \quad I_d = I_{\max} \exp(-t/\tau), \quad (2)$$

где $\tau = L/R$, R — активное сопротивление в цепи катушки и источника ЭДС.

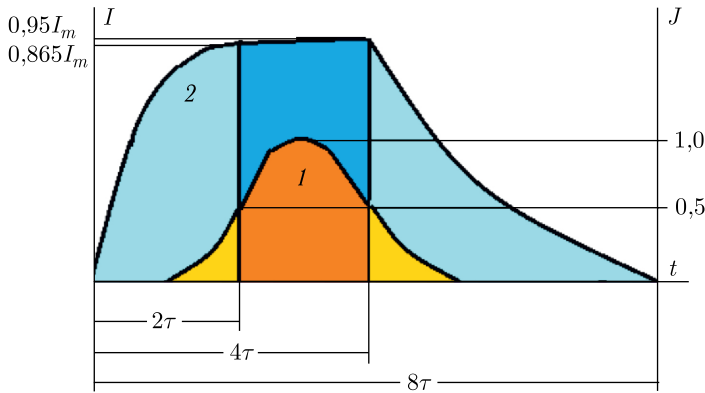


Рис. 2. Зависимости потока нейтронов J (1) и электрического тока в катушке электромагнита I (2) от времени с момента подачи $t = 0$ напряжения на катушку электромагнита и снятия напряжения при $t = 4\tau$: I_m — максимальное значение тока, реализующееся при $t \rightarrow \infty$

Величина среднего тока относительно его максимального значения в последовательных интервалах времени протяженностью 2τ начиная с первого составляет: 0,57, 0,9575, 0,43 и 0,0585. Для отношения значений мощности, выделяемой электрическим током в активном сопротивлении, получим 0,35 : 1 : 0,2 : 0,0037, при этом суммарная мощность составляет 1,55. Если импульсная мощность на интервале от 2τ до 4τ есть $P_{\text{имп}}$, то средняя мощность на интервале $T = 1/f$ есть $P_{\text{непр}} = P_{\text{имп}}(1,55/(T/2\tau))$. При $\tau = 0,25$ мс и $f = 10$ Гц получим $P_{\text{непр}} = 0,00775P_{\text{имп}}$. Примем среднее поле в интервале от 2τ до 4τ равным 20 кЭ, тогда максимальное поле (его значение необходимо для дальнейших расчетов) есть $H_{\text{макс}} = 20,9$ кЭ. Оценим долю нейтронного потока на интервале от 2τ до 4τ . Полагаем, что нейтронный импульс имеет форму Гаусса $\exp(-t^2/2\sigma^2)$. Из $\exp(-\tau^2/2\sigma^2) = 1/2$ имеем $\sigma^2 = 0,716\tau^2$ и $\sigma = 0,846\tau$. Для доли потока в интервале от 2τ до 4τ получим $\eta = \int \exp(-t^2/2\sigma^2) dt|_{2\tau}^4 / \int \exp(-t^2/2\sigma^2) dt|_0^\infty = 0,763$. Определим, исходя из площади затвора, требуемые параметры электрической цепи электромагнита. Из циркуляции вектора напряженности магнитного поля по контуру из магнитопровода и зазора между полюсами имеем соотношение

$$H_1 h_1 + H_2 h_2 = NI, \tag{3}$$

где H_1 и H_2 — напряженность магнитного поля в магнитопроводе и зазоре между полюсами магнита соответственно; h_1 и h_2 — длина магнитопровода и зазора соответственно; N и I — число витков и ток в катушке электромагнита.

На границе магнитопровод–зазор перпендикулярная границе компонента магнитной индукции B непрерывна. Используя в системе единиц СИ соотношения $H_1 = B/(\mu_0\mu)$ и $H_2 = B/\mu_0$ для H_2 , где B — индукция магнитного поля, μ — магнитная проницаемость материала магнитопровода, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гс/м, получим

$$H_2 = \frac{NI}{h_1/\mu + h_2}. \tag{4}$$

Для индуктивности при достаточно большом значении $\mu \approx 100$ имеем

$$L = \mu_0 \mu N^2 (h_3 d_2) / h_1, \quad (5)$$

где h_3 и d_2 — размер магнитопровода в направлении по окружности и радиусу накопителя соответственно. Отметим, что площадь затвора есть $S_{\text{зат}} = h_2 h_3$. Для коэффициента поглощения нейтронов в пленке затвора при подбарьерном отражении нейтронов, падающих со стороны вакуума (канала накопителя), имеем

$$\mu = 2\eta_{\text{зат}} k_{\perp} / (k_v^2 - k_{\perp}^2)^{1/2}, \quad (6)$$

где $U = V - iW$ — потенциал взаимодействия нейтрона со средой стенки затвора; $\eta = W/V$, $k_v^2 = (2mV/\hbar^2)$, k_{\perp} — перпендикулярная поверхности компонента волнового вектора нейтрона в вакууме, \hbar — постоянная Планка. При $k_{\perp} = k_v/5^{1/2}$ $\mu = \eta$, а при $k_{\perp} \rightarrow 0$ вероятность $\mu \rightarrow 0$. Например, для меди $\eta = 1,45 \cdot 10^{-4}$, для бериллия — $2 \cdot 10^{-6}$.

На рис. 3 приведены зависимости плотности потока в накопителе при площади затвора 100, 300 и 1000 см² и вероятности поглощения накопленных нейтронов в затворе, равной 10^{-2} и 10^{-4} . Видно, что выигрыш в плотности потока в накопителе от

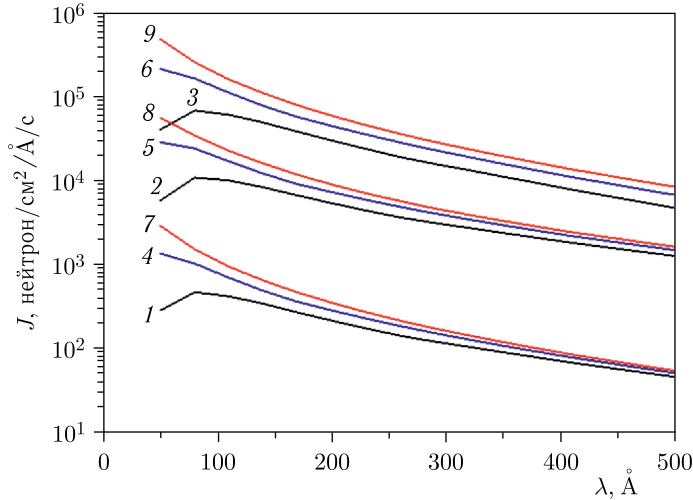


Рис. 3. Зависимость плотности потока нейтронов J от длины волны нейтронов λ : захватываемый накопителем поток в телесном угле, определяемом скользящими к боковой стенке накопителя $\theta = 0 - \theta_c$ и к верхней (нижней) стенке $\varphi = 0 - \theta_c / \cos \theta$ при $S_{\text{зат}} = 100$ (1), 300 (4) и 1000 см² (7), накапливаемый поток при $\eta_{\text{зат}} = 10^{-2}$ и $S_{\text{зат}} = 100$ (2), 300 (5) и 1000 см² (8), накапливаемый поток при $\eta_{\text{зат}} = 10^{-4}$ и $S_{\text{зат}} = 100$ (3), 300 (6) и 1000 см² (9). Остальные значения параметров: частота источника нейтронов $f = 10$ Гц, расстояние между водяным и холодным замедлителями $L_{12} = 0,1$ м, температура водяного замедлителя $T_{m1} = 293$ К, температура холодного замедлителя $T_{m2} = 25$ К, радиус накопителя $R_a = 0,5$ м, высота накопителя $H_a = 0,1, 0,17$ и $0,3$ м при $S_{\text{зат}} = 100, 300$ и 1000 см² соответственно, W/V для материала стенок накопителя $\eta_W = 10^{-5}$, длительность открытого состояния затвора $\tau_{\text{ен}} = 0,5$ мс, расстояние от поверхности холодного замедлителя до внутренней поверхности затвора $d_3 = 2$ мм, площадь выходного отверстия $S_{\text{ex}} = 0$

Значения параметров электромагнита

$S_{\text{зат}} = h_2 h_3, \text{ см}^2$	μ	N	n	$L, \text{ мГн}$	$R_k, \text{ Ом}$	$R, \text{ Ом}$	$U, \text{ кВ}$	$P_{\text{и}}, \text{ кВт}$	$P_{\text{и}}, \text{ кВт}$
$25 = 5 \times 5$	200	10^3	1	3,14	0,27	12,5	1,25	0,98	125
$100 = 10 \times 10$	100	$2 \cdot 10^3$	2	12,55	2,16	50,2	5,02	3,9	502
$200 = 14 \times 14$	70	$2,8 \cdot 10^3$	2,8	25	4,32	100	10	7,8	1000
$300 = 17 \times 17$	60	$3,4 \cdot 10^3$	3,4	37,65	6,48	150	15	11,7	1500
$400 = 20 \times 20$	50	$4 \cdot 10^3$	4	50,2	8,64	200	20	15,6	2000

Примечание. Значения параметров электромагнита при условии $h_1/\mu = 0,2h_2$, площади затвора $S_{\text{зат}} = 25, 100, 200, 300$ и 400 см^2 и фиксированных значениях $I = 100 \text{ А}$, $H_2 = 20,9 \text{ кЭ}$, $d_2 = 0,5 \text{ мм}$, $h_1 = 2 \text{ м}$, $f = 10 \text{ Гц}$, диаметр провода $d_{\text{пр}} = 2 \text{ мм}$ и $\tau = 0,25 \text{ мс}$, $S_{\text{зат}}$ — площадь затвора; μ — магнитная проницаемость материала магнитопровода; N — число витков в катушке; n — число рядов провода в катушке; L — индуктивность катушки; R_k — сопротивление катушки; R — общее сопротивление (катушки и добавочного) в цепи источник–катушка; U — выходное напряжение источника; $P_{\text{н}}$ — непрерывная мощность; $P_{\text{и}}$ — импульсная мощность источника.

использования $\eta_{\text{зат}} = 10^{-4}$ вместо 10^{-2} наибольший при наибольшем значении площади затвора $S_{\text{зат}} = 1000 \text{ см}^2$ и составляет 10. При наименьшем значении $S_{\text{зат}} = 100 \text{ см}^2$ этот фактор достигает значения 7. При этом фактор увеличения плотности потока в накопителе при $\eta_{\text{зат}} = 10^{-4}$ составляет 170, 140 и 130 для $S_{\text{зат}} = 1000, 300$ и 100 см^2 соответственно.

В таблице приведены значения параметров электромагнита при различных значениях площади затвора. С ростом площади затвора пропорционально увеличивается требуемая мощность.

При $H_2 = 15 \text{ кЭ}$ необходимая мощность источника по сравнению с $H_2 = 20 \text{ кЭ}$ будет в 1,78 раз меньше значений, указанных в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные оценки и расчеты показывают, что электромагнит с блоком питания средней мощностью 4–12 кВт может быть применен для ядерно-магнитного затвора площадью 100–300 см^2 . Такой затвор может использоваться на накопителях нейтронов, генерируемых импульсными источниками нейтронов периодического действия типа ИБР-2 с частотой следования и шириной нейтронных импульсов 5–10 Гц и 0,5–1 мс соответственно. Благодаря небольшой вероятности поглощения нейтронов в затворе плотность потока нейтронов в накопителе радиусом 0,5–2,0 м возрастает на два порядка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитенко Ю. В. Сообщ. ОИЯИ Р13-2023-28. Дубна, 2023; Патент на изобретение № 2772969 от 30.05.2022. Накопитель холодных нейтронов / Никитенко Ю. В.; Патент на изобретение № 2803544 от 15.09.2023. Кольцевой накопитель нейтронов / Никитенко Ю. В., Аксенов В. Л.
2. Покотилковский Ю. Н., Таран Ю. В., Шапиро Ф. Л. // ПТЭ. 1976. Т. 3. С. 32; Препринт ОИЯИ Р3-9185. Дубна, 1975.

3. Новопольцев М. И., Покотиловский Ю. Н. Сообщ. ОИЯИ РЗ-80-398. Дубна, 1980.
4. Никитенко Ю. В., Таран Ю. В. Сообщ. ОИЯИ Р13-11320. Дубна, 1978; А. с. № 663233 от 22.01.1979 / Никитенко Ю. В.; А. с. № 668010 от 24.10.1979 / Никитенко Ю. В., Таран Ю. В.
5. А. с. № 1356862 от 1.08 1987 / Алексеев Н. А., Воронов Б. И., Голиков В. В., Константинов В. И., Кулагин Е. Н., Никитенко Ю. В.
6. Pokotilovski Yu. N., Novopol'tsev M. I., Geltenbort P. JINR Commun. E3-2008-139. Dubna, 2008.
7. Аксенов В. Л., Рзянин М. В., Шабалин Е. П. // ЭЧАЯ. 2021. Т. 52, № 6. С. 1349.

Получено 31 октября 2023 г.