

15

Магнитный затвор ловушки из постоянных магнитов для хранения ультрахолодных нейтронов

© В.Ф. Ежов, В.Л. Рябов[¶], А.З. Андреев, Б.А. Базаров,
А.Г. Глушков, В.А. Князьков

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра „Курчатовский институт“,
Гатчина, Ленинградская обл., Россия

[¶] E-mail: ryabovvl@yandex.ru

Поступило в Редакцию 23 марта 2018 г.

Описана конструкция магнитного затвора для ловушки из постоянных магнитов, предназначенной для хранения ультрахолодных нейтронов для проведения эксперимента по измерению жизни нейтрона. Приводятся данные испытаний затвора и сравнение с результатами расчетов магнитного поля.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.13.46334.17306

Измерение времени жизни нейтрона имеет принципиальное значение для проверки стандартной модели электрослабых взаимодействий, оно также является одним из основных исходных данных для расчетов нуклеосинтеза в процессе большого взрыва и термоядерных реакций в звездах [1].

Сегодня среднее мировое значение времени жизни нейтрона $\tau_n = 880.2 \pm 1.0$ s [2] определяется в основном результатами, полученными с использованием хранения ультрахолодных нейтронов (УХН) в материальных ловушках. Эти результаты, в том числе наиболее точные из них, систематически ниже, чем полученные в экспериментах на нейтронных пучках. Таким образом, важность величины времени жизни нейтрона для физики частиц и космологии требует использования альтернативных методов измерений, имеющих высокую чувствительность и обладающих другими потенциальными источниками систематических эффектов.

Основным стимулом развития методики хранения УХН в магнитных ловушках является измерение времени жизни нейтрона. Использование

магнитного хранения дает возможность принципиально исключить основной систематический эффект в экспериментах по измерению времени жизни нейтрона, использующих хранение УХН в материальных ловушках. Увеличение точности в этих экспериментах затруднено систематическим эффектом, обусловленным наличием аномальных потерь УХН при их отражении от стенок сосудов. Для исключения неконтролируемых потерь нейтронов при их соударениях со стенками ловушки необходимо эти соударения исключить.

В 1961 г. Владимирский подробно рассмотрел все теоретические аспекты отражения нейтронов градиентом магнитного поля и предложил ряд возможных конструктивных решений для магнитных систем проводки нейтронных пучков [3]. При движении в градиенте магнитного поля на нейтрон, спин которого ориентирован противоположно направлению магнитного поля, действует сила, направленная в сторону убывания поля. При этом магнитный барьер величиной 1 Т отражает нейтроны, имеющие скорость 3.4 м/с, что эквивалентно ядерному барьеру алюминия. В магнитной ловушке с таким магнитным полем УХН определенной поляризации отражаются магнитным барьером и не испытывают соударений со стенками. Таким образом, в такой системе возможность аномальных потерь УХН при отражении от стенки исключена.

Задачей настоящей работы является разработка и исследование магнитного затвора для магнитной ловушки, создаваемой для эксперимента по измерению времени жизни нейтрона.

Одной из основных проблем при разработке магнитных ловушек является создание магнитного затвора для напуска и выпуска УХН. Магнитный затвор для каждой магнитной ловушки является по-своему уникальной системой, и его конструкция зависит как от конструкции ловушки, так и от конкретных физических задач данного эксперимента.

Рассмотрим требования к магнитному затвору в экспериментах по измерению времени жизни нейтрона. Очевидным требованием является его способность перекрывать проходное сечение нейтронного канала при хранении нейтронов в ловушке и открывать его при ее наполнении и опорожнении. Однако кроме этого очевидного требования желательно, чтобы при хранении нейтронов в ловушке барьер оставался прозрачным как для нейтронов противоположной поляризации, которые могут появляться в процессе хранения УХН при неадиабатическом перевороте спина нейтрона относительно направления магнитного поля, так и для

нейтронов, энергия которых превышает высоту магнитного барьера. При этом магнитный барьер становится для таких нейтронов потенциальной ямой, и нейтрон при движении в нем ускоряется. Однако если стенки ловушки покрыты материалом, способным отразить эти ускоренные нейтроны, то они будут продолжать храниться в магнитной ловушке, как в материальной. После нескольких соударений со стенками такой нейтрон соударяется с магнитным барьером, перекрывающим нейтроновод, и проникает в него, а затем такой нейтрон будет зарегистрирован. Таким образом, появляется уникальная возможность регистрации потерь в процессе хранения УХН в магнитной ловушке. Из отмеченного выше следует, что для экспериментов по измерению времени жизни нейтрона необходим магнитный барьер в виде градиента магнитного поля, перекрывающего вход впускного нейтроновода.

Впервые магнитная ловушка из постоянных магнитов была предложена и изготовлена в ПИЯФ РАН в 2001 г. [4]. Магнитно-гравитационная ловушка представляла собой цилиндрическую двадцатиполосную магнитную систему, расположенную вертикально, с конической нижней частью. Коническая часть сопрягалась с нейтроноводом. Вход в нейтроновод перекрывался полем магнитного затвора. Используемый объем определялся энергетическим спектром УХН, хранимых в ловушке, который мог изменяться как магнитным барьером затвора, так и поглотителем, расположенным внутри лифта, применяемого для наполнения ловушки. В реальном эксперименте используемый объем составлял около 8 л, была достигнута точность 1.9 с [5,6].

Основной проблемой первого эксперимента стала интерференция магнитного поля затвора и магнитной двадцатиполосной системы. Она приводила к тому, что при увеличении магнитного поля затвора до 1 Т на входе в нейтроновод появлялись „нули“ магнитного поля, ведущие к деполяризации УХН. Поэтому для исключения данного эффекта магнитное поле затвора при проведении эксперимента было уменьшено до 0.45 Т, что вдвое ограничило верхнюю границу спектра хранящихся нейтронов по энергии и соответственно количество нейтронов, хранящихся в объеме ловушки. Поэтому при проектировании магнитной ловушки для нового эксперимента геометрия магнитных полей стенок ловушки была изменена таким образом, что магнитное поле затвора стало одним из полюсов их магнитной системы. Расчеты новой магнитной системы показали, что нежелательная интерференция магнитных полей полностью исключена. Это позволяет поднять величину запирающего

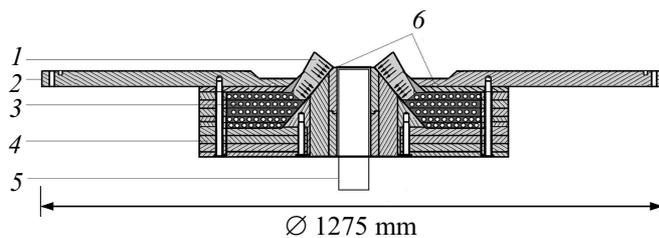


Рис. 1. Поперечный разрез магнитной системы затвора ловушки. 1 — основные магниты, 2 — нижний фланец вакуумной камеры ловушки, 3 — соленоид затвора, 4 — ярмо магнитной системы затвора, 5 — выходной нейтронный канал, 6 — вакуумные уплотнения затвора.

магнитного поля в затворе ловушки до возможного максимума энергии хранимых нейтронов, определяемой полем стенок ловушки 1 Т.

На рис. 1 представлен поперечный разрез магнитного затвора, который снизу крепится к нижнему фланцу вакуумной камеры ловушки, на этом же фланце размещается ловушка [4]. В затворе использована комбинация магнитных полей основных постоянных магнитов и соленоидальной обмотки. Система основных магнитов состоит из трех рядов постоянных магнитов по 16 магнитов в каждом ряду. Магниты изготовлены из сплава NdFeB со следующими характеристиками: остаточная магнитная индукция $B_r = 12.1 \text{ kG}$, коэрцитивная магнитная сила $H_c = 11.6 \text{ kOe}$.

Ярмо магнитной системы состоит из двух частей: внутренней, изготовленной из пермендюра 49КФ, и наружной, изготовленной из электротехнической стали. Оно находится практически в насыщении, а следовательно, влияние флуктуаций тока в соленоиде почти не вызывает флуктуаций в величине запирающего магнитного поля, которые могут приводить к резонансному перевороту магнитного момента относительно направления магнитного поля при хранении УХН в ловушке.

Соленоид магнитной системы затвора наматывался медной трубкой с наружным диаметром 8 мм и внутренним диаметром 5 мм для возможности охлаждения водой. Трубка изолировалась термостойкой слюдяной лентой с последующей пропиткой эпоксидной смолой К-115. Соленоид состоит из четырех обмоток по 26, 24, 27 и 15 витков. Об-

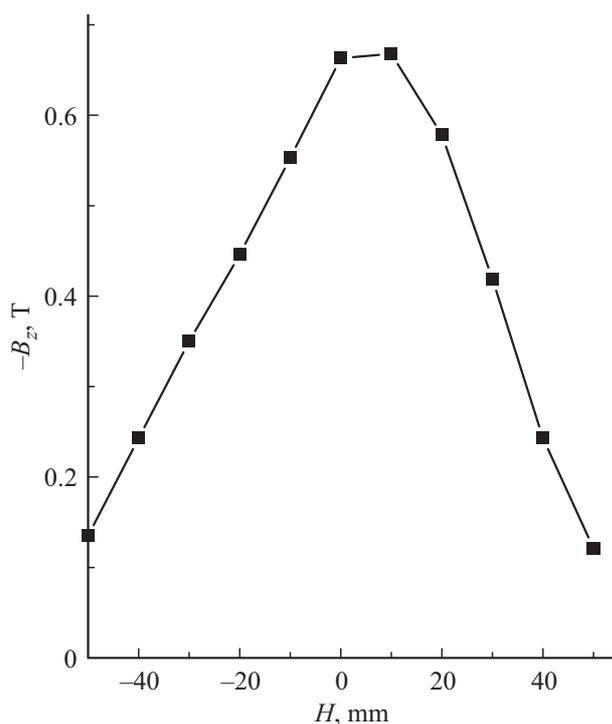


Рис. 2. Распределение магнитного поля вдоль центральной оси затвора. $H = 0$ соответствует уровню „горловины“ ловушки.

мотки соединены последовательно для питания током, но охлаждение каждой обмотки производится независимо. Для контроля за состоянием соленоида во время работы в обмотки были заложены термодатчики типа LM35DZ с чувствительностью 10 mV/deg для определения температуры, а для контроля протока охлаждающей воды — датчики протока воды SF800-B. Давление охлаждающей воды на входе 22 bar с протоком примерно 4 l/min по каждой обмотке. Температура в обмотках при токе 500 А не поднималась выше 30°C. Перед окончательной фиксацией обмоток соленоида в яре контролировались межобмоточное сопротивление и сопротивления обмоток на землю, минимальное из которых превышало 3 МΩ при нагрузочном напряжении 1000 V.

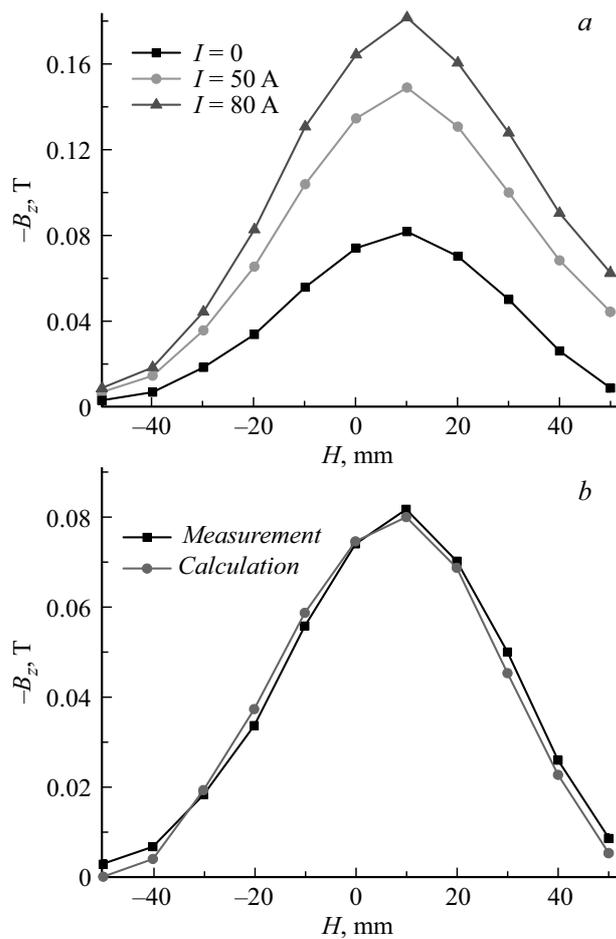


Рис. 3. Распределение магнитного поля по оси затвора ловушки: *a* — измеренное для разных токов соленоида, *b* — сравнение расчетного и измеренного в реальном затворе полей для нулевого тока.

Вакуумное уплотнение затвора производится в двух местах. Магнитная система затвора сверху накрывается алюминиевой мембраной толщиной от 1.5 mm, и они вместе присоединяются к нижней поверхно-

сти фланца камеры с вакуумным уплотнением по мембране. Второе вакуумное уплотнение находится в верхней „горловине“ затвора — соединение мембраны и выходного нейтроновода. Оно герметизируется специальным вакуумным компаундом TorrSeal. Нейтроновод плотно посажен во внутреннюю часть яма затвора и фиксируется относительно него хомутом, поэтому никаких нагрузок на уплотнение нет.

Основной параметр затвора — распределение магнитного поля в „горловине“ ловушки. Расчеты магнитного поля затвора магнитной ловушки проводились с использованием программы ELCAT для решения плоских и осесимметричных задач магнитостатики методом конечных элементов. На рис. 2 приведено распределение вертикальной составляющей поля вдоль центральной оси затвора. Оптимизацией конструкции затвора удалось добиться величины вертикальной составляющей магнитной индукции на уровне 0.7 Т при плотности тока в соленоиде затвора 6.3 A/mm^2 , что согласовано с имеющимся источником тока 500 А/30 В.

Для проверки правильности расчетов были проведены испытания затвора для тока, не требующего подведения охлаждающей воды: для 50 и 80 А (рис. 3, *a*). Расчеты показали хорошее (с точностью 2%, рис. 3, *b*) совпадение результатов с измерениями магнитного поля. В случае нулевого тока (рис. 3, *b*) видно, что остаточное поле затвора составляет примерно 0.1 Т, что соответствует барьеру по скорости нейтрона около 1 м/с. Дополнительные измерения при испытаниях затвора показали, что для зануления этого барьера (чтобы нейтроны со скоростями меньше 1 м/с могли попасть в ловушку, а после хранения покинуть ее) необходимо подавать на обмотку соленоида обратный основному ток — 65 А.

Таким образом, результатом работы является создание магнитного затвора, удовлетворяющего требованиям проведения эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с использованием хранения УХН в магнитной ловушке.

Работа выполнена в рамках проведения эксперимента по измерению времени жизни свободного нейтрона в магнитной ловушке из постоянных магнитов.

Авторы выражают искреннюю признательность Н.Н. Дмитриеву и Г.Б. Крыгину за участие в создании и сборке магнитного затвора ловушки, а также Н.А. Коврижных, принимавшему участие в конструировании затвора на начальном этапе.

Список литературы

- [1] *Dubbers D., Schmidt M.G.* // Rev. Mod. Phys. 2011. V. 83. N 4. P. 1111–1172.
- [2] *Patrignani C. et al. (Particle Data Group)* // Chin. Phys. C. 2016. V. 40. N 10. P. 100001.
- [3] *Владимирский В.В.* // ЖЭТФ. 1961. Т. 39. В. 4. С. 1062–1068.
- [4] *Базаров Б.А., Ежов В.Ф., Коврижных Н.А., Рябов В.Л., Андреев А.З., Глушков А.Г., Князьков В.А., Крыгин Г.Б.* // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 13. С. 1–8.
- [5] *Ежов В.Ф., Андреев А.З., Бан Ж., Базаров Б.А., Гельтенборт П., Глушков А.Г., Князьков В.А., Коврижных Н.А., Крыгин Г.Б., Навилиат-Кансик О., Рябов В.Л.* // Препринт ПИЯФ № 2964. Гатчина, 2014. 11 с.
- [6] *Ezhov V.F., Andreev A.Z., Ban G., Bazarov V.A., Geltenbort P., Glushkov A.G., Knyazkov V.A., Kovrizhnykh N.A., Krygin G.B., Naviliat-Cuncic O., Ryabov V.L.* // <https://arxiv.org/abs/1412.7434>