

ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЙТРОНОВОДНОЙ СИСТЕМЫ ИСТОЧНИКА УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ НА РЕАКТОРЕ ПИК

*А. К. Фомин *, А. П. Серебров*

Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального
исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

Разработано программное обеспечение для моделирования экспериментов с ультрахолодными нейтронами (УХН) на реакторе ПИК (Гатчина, Россия). С его помощью проведена оптимизация нейтроноводной системы, по которой нейтроны поступают от источника УХН в экспериментальные установки. В расчетах рассмотрены два варианта: с прямым нейтроноводом и нейтроноводом, имеющим изгиб вниз. В случае изогнутого нейтроновода при размещении разделительных мембран в нижней его части нейтроны проходят через эти мембраны с увеличенной скоростью из-за гравитационного ускорения. За счет этого удастся уменьшить потери нейтронов. Расчеты методом Монте-Карло показали, что в эксперименте по поиску электрического дипольного момента нейтрона может быть получена точность $1 \cdot 10^{-27} \text{ е} \cdot \text{см/год}$, а в эксперименте по измерению времени жизни нейтрона статистическая неопределенность может быть улучшена до 0,1 с.

Software has been developed to simulate experiments with ultracold neutrons (UCN) at the PIK reactor (Gatchina, Russia). Using this software, the neutron guide system was optimized, through which neutrons are supplied from the UCN source to the experimental installations. The calculations considered two options: with a straight neutron guide and a neutron guide with a downward bend. For a bent neutron guide, when separating membranes are placed at the bottom of the neutron guide, neutrons pass through them at increased velocity due to gravitational acceleration. Due to this, it is possible to reduce neutron losses. Monte Carlo calculations showed that in an experiment to search for the electric dipole moment of a neutron, an accuracy of $1 \cdot 10^{-27} \text{ е} \cdot \text{см/у}$ can be obtained, and in an experiment to measure the neutron lifetime, the statistical uncertainty can be improved to 0.1 s.

PACS: 14.20.Dh

ВВЕДЕНИЕ

Ультрахолодные нейтроны (УХН) — нейтроны низких энергий, которые могут отражаться от вещества. Благодаря этому их можно хранить в материальных ловушках и транспортировать по трубам (нейтроноводам). Это дает широкие методические возможности для проведения

* E-mail: fomin_ak@npni.nrcki.ru

прецизионных экспериментов: наилучшие точности в экспериментах по поиску электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона и по измерению времени жизни нейтрона получены с УХН [1]. На реакторе ПИК (Гатчина, Россия) в настоящее время создается комплекс исследований с УХН [2]. В его основе лежит источник УХН на основе сверхтекучего гелия [3]. Нейтроны рождаются в камере источника и затем по нейтроноводам поступают в экспериментальные установки. Запланированная экспериментальная программа включает в себя эксперименты по поиску ЭДМ нейтрона с двухкамерным магниторезонансным спектрометром [4], а также по измерению времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой [5], которые до этого проводились в Институте им. Лауэ–Ланжевена (ИЛЛ). В результате измерений ЭДМ-спектрометром был получен предел на ЭДМ нейтрона $|d_n| < 5,5 \cdot 10^{-26} \text{ е} \cdot \text{см}$ (уровень достоверности 90 %) [4]. В результате измерений на установке с большой гравитационной ловушкой было получено время жизни нейтрона $\tau_n = (881,5 \pm 0,7(\text{стат.}) \pm 0,6(\text{сист.})) \text{ с}$ [5]. Для оценки увеличения чувствительности этих установок на реакторе ПИК проведено моделирование методом Монте-Карло с разработанным для этих целей программным обеспечением [6–8].

НЕЙТРОНОВОДНАЯ СИСТЕМА

Так как на источнике планируется установить несколько экспериментальных установок, то УХН перенаправляются из нейтроновода источника к установкам через разветвитель пучка. Соответственно, в нейтроноводе устанавливаются две разделительные мембраны, которые предназначены для разделения объемов таким образом, чтобы нарушение вакуума в одном из них не повлияло бы на вакуум в другом: первая мембрана относится к источнику УХН, а вторая — к экспериментальной установке. Толщина алюминиевых мембран составляет 100 мкм, граничная скорость 3,2 м/с. Наличие мембран приводит к снижению плотности УХН в экспериментальных объемах. В связи с этим предложена схема с изогнутым вниз нейтроноводом и расположением разветвителя пучка и мембран в его нижней части (рис. 1). При спуске вниз нейтроны

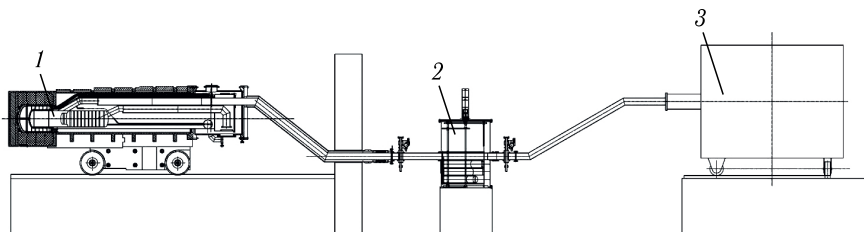


Рис. 1. Эксперимент по измерению ЭДМ нейтрона с изогнутым вниз нейтроноводом: 1 — источник УХН; 2 — разветвитель пучка; 3 — ЭДМ-спектрометр

разгоняются за счет гравитации и проходят через мембраны с более высокой скоростью, а затем при подъеме навверх снова замедляются. Более высокая скорость позволяет нейтронам с малой энергией превысить граничную скорость мембран, а нейтроны с высокой энергией имеют меньшую вероятность потерь при прохождении через них.

Планируемые эксперименты имеют разную конфигурацию объемов хранения и используют различные диапазоны энергий УХН: 0–235 нэВ в эксперименте по поиску ЭДМ нейтрона; 0–70 нэВ в эксперименте по измерению времени жизни нейтрона. Соответственно, их оптимизация должна проводиться отдельно и в результате расчетов должна быть определена высота платформ, на которых будут размещаться установки.

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ПОИСКУ ЭДМ НЕЙТРОНА

Для эксперимента на реакторе ПИК рассмотрены варианты нейтронно-водной системы с прямым нейтронотводом и изогнутым вниз. Временные диаграммы плотности УХН в камерах спектрометра, полученные в результате расчетов, приведены на рис. 2, а. Штриховой линией показана динамика заполнения в случае, когда нейтроны начинают рождаться в источнике в момент времени $t = 0$ с. Сплошной линией показана динамика заполнения, когда источник начинает работать заранее и нейтроны заполняют камеру источника и нейтронотвод до закрытого затвора. Затем затвор открывается (на графике это соответствует моменту времени $t = 0$ с) и нейтроны начинают поступать в камеры ЭДМ-спектрометра. Видно, что предварительная накачка нейтронотвода от источника дает более быстрое заполнение ЭДМ-спектрометра и позволяет его заполнить не более чем за 100 с, как это было в эксперименте на реакторе ИЛЛ [4]. Далее пунктирной линией показана ситуация, когда затворы камер ЭДМ-спектрометра закрываются в момент времени $t = 100$ с и УХН хранятся в камерах в течение еще 100 с. Цилиндрические ловушки спектрометра радиусом 263 мм и высотой 76 мм покрыты бериллием (граничная скорость 6,8 м/с, коэффициент потерь $1,2 \cdot 10^{-4}$). Время хранения составляет ~ 100 с, что соответствует экспериментально измеренному значению [4]. На рис. 2, б показаны результаты расчетов, при которых менялась высота платформы ЭДМ-спектрометра так, что уровень входного нейтронотвода в спектрометр менялся по отношению к уровню нейтронотвода от источника в диапазоне Δh от –100 до 75 см с шагом 25 см. Вариация положения камер спектрометра по высоте дает разную жесткость спектра УХН в камерах после заполнения, что влияет на его хранение. Приведены плотности УХН в спектрометре после заполнения ($t = 100$ с), а также после заполнения и удержания ($t = 200$ с). Штриховой линией показаны аналогичные плотности УХН для варианта с прямым нейтронотводом. Видно, что если по результатам заполнения более выигрышным является вариант с прямым нейтронотводом, то после хранения преимущество переходит к нейтронотводу

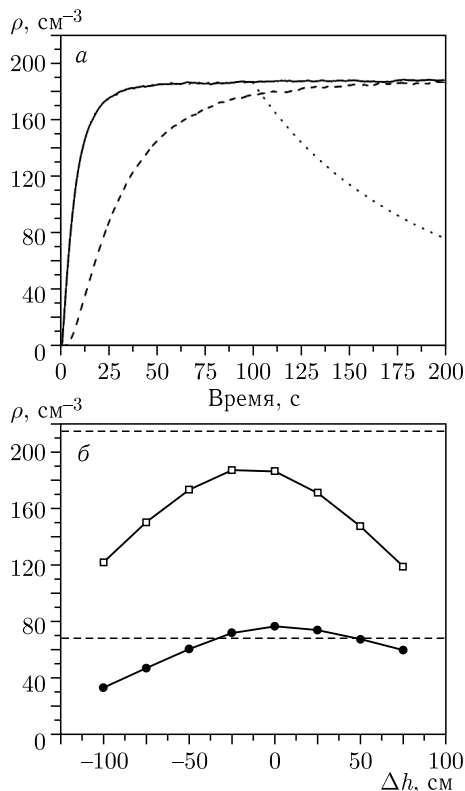


Рис. 2. а) Плотность УХН в ЭДМ-спектрометре для варианта нейтроновода с изгибом вниз и $\Delta h = 0$: штриховая линия — без предварительной накачки нейтроновода, сплошная — с предварительной накачкой, пунктирная — с предварительной накачкой и временем заполнения 100 с. б) Плотность УХН в ЭДМ-спектрометре в зависимости от его положения по высоте для варианта нейтроновода с изгибом вниз: квадраты — после заполнения 100 с, кружки — после заполнения 100 с и удержания 100 с. Штриховые линии — аналогичные значения плотности УХН для варианта с прямым нейтроноводом

с изгибом. Таким образом, оптимальным является вариант с изгибом нейтроновода и положением входного нейтроновода ЭДМ-спектрометра на уровне выходного нейтроновода источника УХН ($\Delta h = 0$). При таком расположении установки по высоте целесообразно использовать платформу для ЭДМ-спектрометра высотой 0,9 м.

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕЙТРОНА

Высота платформы (2,5 м) для эксперимента на реакторе ПИК определяется высотой пучка от источника УХН и высотой крана для монтажа

установки. В расчете рассмотрены две схемы: с прямым нейтроноводом и с нейтроноводом, имеющим изгиб вниз. На рис. 3, *а* показана временная диаграмма счета детектора. Из нее видно, что при прямом нейтроноводе происходит обрезка спектра мембранами, особенно его нижней части. Эта проблема может быть решена за счет поднятия уровня установки увеличением высоты платформы. Но в данном случае это невозможно из-за ограничения по высоте монтажного крана. Проблема может быть решена за счет использования нейтроновода с изгибом вниз, так же как и в случае с ЭДМ-спектрометром. Из рис. 3, *а* видно, что использование изогнутого нейтроновода дает выигрыш в счете детектора 1,8 для первого слива, 2,2 — для второго и 4,0 — для третьего.

Время заполнения в эксперименте с большой гравитационной ловушкой на реакторе ИЛЛ составляло 200 с. На реакторе ИЛЛ УХН получают от источника холодных нейтронов с помощью замедления на турбине, где за счет отражения нейтрона от убегающей лопатки происходит процесс дополнительного уменьшения скорости частиц [9]. Таким образом, если нейтрон при заполнении возвращается в источник, то он пропадает. В случае источника на основе сверхтекучего гелия нейтрон, попавший обратно в источник, может с некоторой вероятностью выйти обратно и вернуться в экспериментальный объем. При этом происходит дополнительная накачка экспериментального объема нейтронами и время заполнения может быть увеличено. На рис. 3, *б* представлено количество нейтронов в первом сливе на реакторе ПИК в зависимости от времени заполнения. Видно, что является целесообразным выбрать время заполнения ~ 800 с. Это не скажется существенным образом на увеличении времени измерительного цикла, который составлял на реакторе ИЛЛ порядка 3000 с при длинном времени удержания.

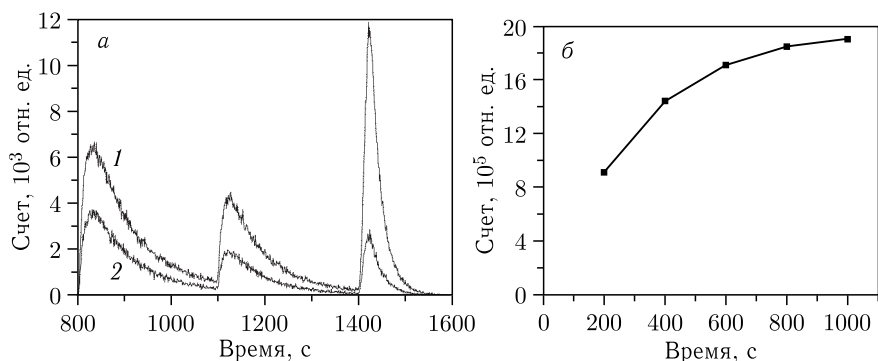


Рис. 3. *а*) Временная диаграмма счета детектора в эксперименте по измерению времени жизни нейтрона: 1 — нейтроновод с изгибом вниз; 2 — прямой нейтроновод. *б*) Количество нейтронов в первом сливе в зависимости от времени заполнения для варианта нейтроновода с изгибом вниз

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате оптимизации нейтроноводной системы получено, что оптимальным вариантом является конфигурация с изгибом нейтроновода вниз и размещением разветвителя пучка и мембран в его нижней части. При этом высота платформы для ЭДМ-спектрометра получается 0,9 м, а для экспериментальной установки по измерению времени жизни нейтрона — 2,5 м. На рис.4 приведена схема главного зала РК ПИК с платформами указанных экспериментов, расположенными на выбранных высотах.

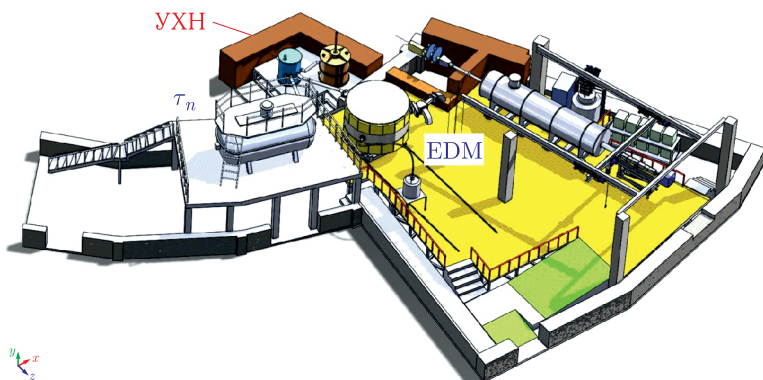


Рис. 4. Схема главного зала РК ПИК в месте расположения комплекса исследований с УХН: EDM — эксперимент по поиску ЭДМ нейтрона; τ_n — эксперимент по измерению времени жизни нейтрона

В эксперименте по поиску ЭДМ нейтрона плотность УХН в установке на реакторе ПИК будет в 50 раз больше, чем на реакторе ИЛЛ. С учетом этого, а также проведенной модернизации установки на ней может быть достигнута точность $1 \cdot 10^{-27}$ е·см/год. В эксперименте по измерению времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой при времени заполнения 800 с счет детектора при сливах на реакторе ПИК получается больше, чем на реакторе ИЛЛ, также в 50 раз, что говорит о возможности достичь статистической точности результата измерения 0,1 с при одинаковой длительности измерений.

Финансирование. Работа выполнена в рамках работ по созданию приборной базы реактора ПИК.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Navas S. et al. (Particle Data Group) // Phys. Rev. D. 2024. V. 110. P. 030001.
2. Kovalchuk M. V. et al. // Crystallogr. Rep. 2021. V. 66. P. 195.

3. *Serebrov A. P. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 611. P. 276.
4. *Serebrov A. P. et al.* // Phys. Rev. C. 2015. V. 92. P. 055501.
5. *Serebrov A. P. et al.* // Phys. Rev. C. 2018. V. 97. P. 055503.
6. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018660577, 24.08.2018. Программа для моделирования источника ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия / Фомин А. К.
7. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020660414, 03.09.2020. Программа моделирования ЭДМ спектрометра на реакторе ПИК / Фомин А. К.
8. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021612184, 12.02.2021. Программа моделирования гравитационного спектрометра на реакторе ПИК / Фомин А. К.
9. *Steyerl A. et al.* // Phys. Lett. A. 1986. V. 116. P. 347.