УДК 539.125.5

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ С УЛЬТРАХОЛОДНЫМИ НЕЙТРОНАМИ НА РЕАКТОРЕ ПИК

© 2022 г. А. К. Фомин<sup>а,</sup> \*, А. П. Серебров<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, НИЦ "Курчатовский институт", Гатчина, 188300 Россия

\*e-mail: fomin\_ak@pnpi.nrcki.ru Поступила в редакцию 12.01.2022 г. После доработки 28.03.2022 г. Принята к публикации 28.03.2022 г.

Работа посвящена моделированию комплекса для исследования на базе высокоинтенсивного источника ультрахолодных нейтронов на реакторе ПИК. В качестве конвертора холодных нейтронов в ультрахолодные использован сверхтекучий гелий. Разработана модель в рамках метода Монте-Карло, включающая в себя источник, нейтроноводную систему и экспериментальные установки с учетом их реального расположения в главном зале реактора. В результате моделирования получено, что в закрытой камере источника можно получить плотность ультрахолодных нейтронов 3.5 × 10<sup>3</sup> n/см<sup>3</sup>. При помощи расчетов получены значения чувствительности измерительных установок по поиску электрического дипольного момента нейтрона и по измерению времени жизни нейтрона на реакторе ПИК. Для эксперимента по поиску электрического дипольного момента нейтрона получено, что плотность ультрахолодных нейтронов в камерах спектрометра может составить 200 n/см<sup>3</sup>, что в 50 раз лучше, чем на источнике в Институте Лауэ-Ланжевена. Для эксперимента по измерению времени жизни нейтрона получено, что показания нейтронного детектора могут быть увеличены в 16 раз по сравнению с аналогичными измерениями на реакторе в Институте Лауэ-Ланжевена. Это говорит о возможности достичь статистической точности результата измерения 0.2 с при аналогичной длительности измерений.

Ключевые слова: ультрахолодные нейтроны, электрический дипольный момент нейтрона, время жизни нейтрона.

DOI: 10.31857/S1028096022110085

#### введение

Настоящая работа посвящена развитию исследований с использованием ультрахолодных нейтронов (УХН) (с энергией ~10<sup>-7</sup> эВ). Благодаря этому их можно хранить в материальных и магнитных ловушках, что дает широкие возможности для осуществления ряда прецизионных экспериментов [1]. В НИЦ "Курчатовский институт" – ПИЯФ создается комплекс для проведения исследований с использованием УХН [2]. На канале ГЭК-4 реактора ПИК будет расположен высокоинтенсивный источник УХН на основе сверхтекучего гелия. На нем будет возможно проводить исследования фундаментальных взаимодействий, включающие в себя поиск электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона и эксперименты по измерению времени жизни нейтрона.

Поиск ЭДМ нейтрона является одной из первостепенных задач в фундаментальной физике. Первые эксперименты проводили на нейтронных пучках, дальнейшее продвижение в этой области связано с использованием УХН [1]. Важность задачи определяется тем, что она прямым образом связана с проблемой нарушений СР-инвариантности. Элементарные частицы могут обладать ЭДМ только в случае нарушения пространственной и временной симметрий. В настоящее время экспериментальный предел определения величины ЭДМ нейтрона составляет  $|d_n| < 1.8 \times 10^{-26} \ e \cdot cm$  (уровень достоверности 90%) [3].

Улучшение точности измерения времени жизни нейтрона позволит проверить справедливость теоретических моделей нуклеосинтеза в ранней Вселенной и справедливость Стандартной модели элементарных частиц. Данная проблема также связана с нейтринной физикой, так как эффективность нейтринных детекторов зависит от сечения реакции обратного бета-распада нейтрона. Среднемировое значение времени жизни нейтрона в 2020 году составило 879.4 ± 0.6 с [4].

Настоящее исследование посвящего разработке компьютерной модели движения нейтронов в рамках метода Монте-Карло, включающей в себя источник УХН и экспериментальные установки с



Рис. 1. Общий вид комплекса исследований с УХН на реакторе ПИК: *1* – источник УХН; *2* – установка для поиска ЭДМ нейтрона; *3* – установка для измерения времени жизни нейтрона.

учетом их реального расположения на реакторе (рис. 1). В модели рассчитана траектория каждого нейтрона от момента появления в источнике до прохода по нейтроноводной системе в установку для поиска ЭДМ нейтрона или установку для измерения времени жизни нейтрона. При перемещении нейтронов учтены все возможные потери: бета-распад, потери в сверхтекучем гелии, потери при соударениях со стенками. Благодаря расчетам, выполненным в настоящей работе, с использованием модели можно получить абсолютные значения плотности УХН в экспериментальных установках и определить чувствительность этих установок.

#### ИСТОЧНИК УХН НА ОСНОВЕ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ

Задача создания мощных источников УХН крайне важна, так как сейчас точность экспери-

ментов с УХН ограничена статистической точностью измерений [5]. Ранее измерения с использованием УХН проводили в Институте Лауэ-Ланжевена (ILL, Гренобль, Франция). Источник УХН на реакторе ILL был запущен в 1986 году [6]. На нем УХН были получены от источника холодных нейтронов с помощью замедления на турбине, где за счет отражения нейтрона от убегающей лопатки происходит процесс дополнительного уменьшения скорости частиц. Плотность УХН составила 40 см<sup>-3</sup> [6].

В качестве конвертора холодных нейтронов в ультрахолодные на источнике реактора ПИК используют сверхтекучий гелий [7–9]. Этот способ получения ультрахолодных нейтронов является очень перспективным из-за низкого поглощения нейтронов с малой энергией в <sup>4</sup>He. Это свойство сверхтекучего гелия позволяет не только замедлить нейтроны, но и осуществлять длительное хранение УХН [10].

Объем камеры источника составляет 35 л. Камера изготовлена из нержавеющей стали, внутренняя стенка покрыта сплавом <sup>58</sup>NiMo. Внутреннее покрытие камеры служит для удерживания нейтронов со скоростями ниже граничной внутри камеры. Значение граничной скорости зависит от материала покрытия. Граничная скорость нейтронов, соответствующая выбранному сплаву <sup>58</sup>NiMo, равна 7.8 м/с; коэффициент потерь составляет 3 × 10<sup>-4</sup> [11].

Время хранения нейтронов в сверхтекучем гелии падает с увеличением его температуры и составляет 100 с при температуре 1 К. УХН получаются в сверхтекучем гелии из холодных нейтронов с длиной волны 9 Å. Нейтроны со скоростью ниже граничной накапливаются в камере до плотности, определяемой временем хранения в камере, и могут быть выведены через нейтроновод. При плотности потока холодных нейтронов  $\Phi =$  $= 10^9 \text{ n/cm}^2 \text{ c} \text{ Å}$  количество УХН, получаемых за 1 с в сверхтекучем гелии, составляет 100 n/см<sup>3</sup> [12]. В результате моделирования получено, что в закрытой камере источника при температуре 1 К и коэффициенте потерь на внутреннем покрытии стенок камеры 3 × 10<sup>-4</sup> можно получить плотность УХН  $3.5 \times 10^3$  см<sup>-3</sup>.

Комплекс для исследований с УХН на реакторе ПИК будет оснащен гравитационным спектрометром с опускаемым поглотителем. Принцип его действия основан на следующем. УХН подвержены воздействию гравитации и двигаются по параболическим траекториям с максимальной высотой подъема ограниченной их начальной энергией. Меняя положение поглотителя нейтронов с определенным шагом можно получить интегральный и дифференциальный энергетические спектры УХН. На рис. 2 представлены



**Рис. 2.** Интегральный (а) и дифференциальный (б) энергетические спектры нейтронов при измерениях при помощи гравитационного спектрометра: при сплошном напылении на внутреннюю поверхность камеры источника (■) и при напылении с пробелами в размере 1% площади поверхности (○).

результаты моделирования процедуры измерения спектра в источнике УХН. Шаг перемещения поглотителя составлял 10 см. Рассмотрены варианты, когда напыление на внутреннюю поверхность камеры источника проведено без пробелов и для сравнения — вариант напыления с пробелами в размере 1% площади поверхности. Видно, что при несплошном напылении происходит излом спектра вблизи граничной скорости, соответствующей нержавеющей стали (6.2 м/с). Таким образом, при помощи спектрометра можно оперативно отслеживать работу источника во времени, в частности, целостность внутреннего покрытия камеры.

#### ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ПОИСКУ ЭДМ НЕЙТРОНА

Первые эксперименты по измерению ЭДМ нейтрона с использованием УХН были проведены в ПИЯФ [13, 14]. Тогда же была впервые предложена двухкамерная схема спектрометра с реверсируемым электрическим полем. В дальнейшем измерения были продолжены в ILL и был получен предел определения величины ЭДМ нейтрона  $|\dot{d_n}| < 5.5 \times 10^{-26} \, e \cdot cm$  (уровень достоверности 90%) [15]. После этого конструкция спектрометра была модернизирована. Новая схема спектрометра, описанная ниже, позволяет заполнять камеры хранения нейтронами, а также осуществлять их выпуск после удержания через центральный электрод. Это сокращает количество участков нейтроновода с изгибом и, следовательно, уменьшает потери нейтронов на этих участках (рис. 3). Разработана модель заполнения нейтронами камер ЭДМ-спектрометра на реакторе ПИК для оценки абсолютного значения плотности УХН в рамках метода Монте-Карло.

Согласно модели, УХН попадают из источника в ЭДМ-спектрометр при помощи прямого нейтроновода диаметром 140 мм, который при подходе к камерам переходит в 2 нейтроновода сечением 25 × 85 мм. Обшая длина нейтроноводной системы составляет около 13 м. На внутренней стенке камеры источника и нейтроноводов напылен сплав <sup>58</sup>NiMo, которому соответствует граничная скорость нейтронов 7.8 м/с и коэффициент потерь 3 × 10<sup>-4</sup>. Цилиндрические ловушки спектрометра радиусом 263 мм и высотой 76 мм покрыты бериллием (граничная скорость нейтронов 6.8 м/с; коэффициент потерь  $1.2 \times 10^{-4}$ ). На рис. 4 показана динамика заполнения камер ЭДМ-спектрометра с установкой в нейтроноводе одной или двух алюминиевых мембран, которые предназначены для разделения объемов таким образом, чтобы нарушение вакуума в одном из них не повлияло бы на вакуум в другом. В процессе работы один источник может обеспечивать УХН несколько экспериментальных установок. Перенаправление потоков нейтронов происходит с помощью разветвителя пучка. Соответственно, необходима установка двух мембран для каждой экспериментальной установки: перед (относится к источнику УХН) и после разветвителя (к установке). Толщина алюминиевых мембран составляла 100 мкм (граничная скорость 3.2 м/с). В результате расчетов методом Монте-Карло получено, что на источнике УХН на реакторе ПИК



**Рис. 3.** Схема нового варианта ЭДМ-спектрометра: *1* – нейтроновод металлический, *2* – держатель нейтроновода, *3* – нейтроновод стеклянный, *4* – изолятор верхний, *5* – электрод "высоковольтный" верхний, *6* – шторки, *7* – привод шторок, *8* – электрический контакт, *9* – кольцо (изолятор) верхнее, *10* – электрод "земляной", *11* – кольцо (изолятор) нижнее, *12* – опора, *13* – изолятор нижний, *14* – центровка и экран, *15* – электрод "высоковольтный" нижний, *16* и *17* – контакты электрические.

может быть достигнута плотность УХН в камерах ЭДМ-спектрометра ~200 n/см<sup>3</sup>.

Статистическая точность измерений ЭДМ определяется формулой

$$\delta d_{\rm n} = h/4\pi a ET \sqrt{N}$$

где  $\alpha$  — параметр качества резонансной кривой; E — напряженность электрического поля; T — время хранения нейтронов в резонансных усло-



**Рис. 4.** Динамика заполнения камер ЭДМ-спектрометра: пунктирная линия — нейтроновод с одной разделительной мембраной, сплошная линия — нейтроновод с двумя мембранами.

виях; *N* – полный счет нейтронов за время эксперимента. Чувствительность установки во время измерений на реакторе в ILL составила  $\delta d_n \sim 1.7 \times$  $\times 10^{-25} e \cdot см/день при плотности УХН на входе в$ спектрометр 4 п/см<sup>3</sup>. Далее была разработана новая методика подготовки рабочих поверхностей высоковольтных камер удержания УХН, которая позволяет увеличить напряженность электрического поля от 12-14 до 27 кВ/см [16]. После этого чувствительность установки улучшается до  $\delta d_n \sim$  $\sim 1 \times 10^{-25} e \cdot cm/день$  на реакторе в ILL. При плотности УХН в камерах спектрометра 200 n/см<sup>3</sup> на реакторе ПИК может быть достигнута чувствительность  $\delta d_{\rm n} \sim 1 \times 10^{-27} \, e \cdot {\rm см/год.}$  Обнаружение ЭДМ нейтрона или выявление нового экспериментального предела его величины на таком уровне может стать решающим фактором при выборе теории, адекватно описывающей явления нарушения СР-симметрии.

#### ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕЙТРОНА

В настоящее время интерес к измерениям времени жизни нейтрона велик, в том числе, из-за того, что результаты экспериментов по измерению времени жизни нейтронов, выполненных при разных условиях, расходятся [17]. Существует два принципиально разных способа изменить время жизни нейтрона. В "пучковых" экспериментах регистрируют продукты распада нейтрона при пролете сквозь экспериментальную установ-

ПОВЕРХНОСТЬ. РЕНТГЕНОВСКИЕ, СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ № 11 2022



**Рис. 5.** Принципиальная схема установки для измерения времени жизни нейтрона: *1* – ловушка УХН; *2* – вставка в нижнем положении; *3* – внутренний вакуумный сосуд; *4* – клапан откачки внутреннего сосуда; *5* – внешний вакуумный сосуд; *6* – нейтроновод от источника УХН; *7* – нейтроновод к детектору.

ку. В экспериментах с хранением УХН измеряют количество нейтронов после хранения в ловушке в течение фиксированного времени. Однако эксперименты с хранением в магнитных ловушках [18, 19] находятся в согласии с экспериментами с хранением УХН в материальных ловушках. Для разрешения противоречия необходимо повторение "пучкового" эксперимента [20, 21], а так же проведение новых экспериментов с применением различных методик [22–24].

Одной из возможностей измерения времени жизни нейтрона на реакторе ПИК является применение большой гравитационной ловушки [25]. Измерения на этой установке уже проводили на реакторе в ILL, было получено значение времени жизни нейтрона  $\tau_n = 881.5 \pm 0.7_{\text{стат}} \pm .6_{\text{сист}}$  с. Схема экспериментальной установки, которая представляет собой вакуумную криогенную гравитационную ловушку УХН, с указанием основных элементов представлена на рис. 5. Для получения абсолютных показаний детектора нейтронов разработана модель эксперимента на реакторе ПИК, которая включает в себя всю экспериментальную процедуру от заполнения ловушки нейтронами до их "слива" на детектор после удержания.

При измерениях УХН хранятся в ловушке 1, которая представляет собой часть цилиндра со стенками на торцах. Для изменения частоты соударений УХН в ловушке используют опускаемую вставку 2, которая представляет собой часть цилиндрической поверхности. Цилиндрические поверхности ловушки и вставки имеют общую горизонтальную ось, вокруг которой осуществляют независимые повороты ловушки и вставки. Низкий коэффициент поглошения нейтронов стенками обеспечен при помощи покрытия поверхностей ловушки и вставки безводородным фторполимером с низким сечением захвата нейтронов. Параметры процесса измерений представлены в табл. 1. Внешний вакуумный сосуд 5 создает защитный вакуум. Внутренний вакуумный сосуд 3 заполняется нейтронами из источника через нейтроновод *6* в течении 200 с. В это время ловушка УХН *1* находится в повернутом положении (угол поворота

Цикл	<i>t</i> , c	$\theta_{trap}$ , град	$\theta_{abs}$ , град	$E_{ m trap}$ , нэВ
Наполнение	200	90	5	0
Мониторирование	300	5	5	65.4
Удержание	300; 1600	0	0	71.7
Слив 1	300	15	0	53.2
Слив <i>2</i>	300	24	0	42.5
Слив <i>3</i>	400	90	0	0

Таблица 1. Параметры измерительного процесса

 $\theta_{trap} = 90^{\circ}$ ). Затем ловушку поворачивают в положение  $\theta_{trap} = 5^{\circ}$  (вниз) для захвата УХН. После этого закрывают затвор нейтроновода наполнения 6 и открывают затвор нейтроновода к детектору УХН 7. Затем начинается мониторирование. которое длится 300 с. Во время мониторирования ловушку покидают нейтроны с энергией превышающей ее гравитационный барьер Е<sub>trap</sub> при удержании. Для удаления таких нейтронов также используют титановый поглотитель, установленный на оси вставки и который можно поворачивать вместе с ней. При наполнении и мониторировании он повернут на угол  $\theta_{abs} = 5^\circ$ . После мониторирования происходит поворот ловушки в положение удержания  $\theta_{trap} = 0^{\circ}$  и поглотителя в положение  $\theta_{abs} = 0^{\circ}$ . Для определения времени хранения УХН в ловушке удержание проводили с временами  $t_1 = 300$  с или  $t_2 = 1600$  с. После удержания ловушку последовательно поворачивают три раза для "слива" УХН через нейтроновод 7, ведущий к детектору.

В результате моделирования получена временная диаграмма показаний нейтронного детектора



**Рис. 6.** Временна́я диаграмма показаний нейтронного детектора при измерениях без вставки в большой гравитационной ловушке. Сплошная линия — расчет для реактора ПИК; О — экспериментальные данные, полученные на ректоре в ILL.

(рис. 6). Для сравнения на ней также показаны показаня нейтронного детектора, полученные при проведении аналогичного эксперимента на реакторе в ILL. Как видно, счет детектора при "сливах" на реакторе ПИК больше в 16 раз, что говорит о возможности достичь статистической точности результата измерения 0.2 с при одинаковой длительности измерений.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана компьютерная модель комплекса для исследований с УХН на реакторе ПИК. В результате моделирования методом Монте-Карло получено, что в закрытой камере источника при температуре сверхтекучего гелия 1 К и коэффициенте потерь для материала напыления внутренних стенок камеры 3 × 10<sup>-4</sup> можно получить плотность УХН  $3.5 \times 10^3$  п/см<sup>3</sup>. Для эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона с помощью двухкамерного магниторезонансного спектрометра получено, что плотность УХН в камерах спектрометра может составить 200 п/см<sup>3</sup>, что в 50 раз лучше, чем на источнике УХН в ILL. При такой плотности является достижимой чувствительность измерений  $1 \times 10^{-27} e \cdot cm/год$ , что улучшит существующий предел измерений ЭДМ нейтрона более чем на порядок. Для эксперимента по измерению времени жизни нейтрона на установке с большой гравитационной ловушкой УХН получено, что показания нейтронного детектора при "сливах" больше в 16 раз по сравнению с экспериментом на реакторе в ILL, что является показателем возможности достичь статистической точности результата измерения 0.2 с при равной длительности измерений.

### БЛАГОДАРНОСТИ

При проведении расчетов был использован Центр обработки данных реактора ПИК.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Серебров А.П.* // УФН. 2015. Т. 185. № 11. С. 1179. https://doi.org/10.3367/UFNr.0185.201511c.1179  Kovalchuk M.V., Voronin V.V., Grigoriev S.V., Serebrov A.P. // Crystallography Reports. 2021. V. 66. P. 195.

https://doi.org/10.1134/S1063774521020061

- 3. Abel C., Afach S., Ayres N.J., Baker C.A., Ban G., Bison G., Bodek K., Bondar V., Burghoff M., Chanel E., Chowdhuri Z., Chiu P.-J., Clement B., Crawford C.B., Daum M., Emmenegger S., Ferraris-Bouchez L., Fertl M., Flaux P., Franke B., Fratangelo A., Geltenbort P., Green K., Griffith W.C., van der Grinten M., Grujić Z.D., Harris P.G., Hayen L., Heil W., Henneck R., Hélaine V., Hild N., Hodge Z., Horras M., Iaydjiev P., Ivanov S.N., Kasprzak M., Kermaidic Y., Kirch K., Knecht A., Knowles P., Koch H.-C., Koss P.A., Komposch S., Kozela A., Kraft A., Krempel J., Kuźniak M., Lauss B., Lefort T., Lemiére Y., Leredde A., Mohanmurthy P., Mtchedlishvili A., Musgrave M., Naviliat-Cuncic O., Pais D., Piegsa F.M., Pierre E., Pignol G., Plonka-Spehr C., Prashanth P.N., Ouéméner G., Rawlik M., Rebreyend D., Rienäcker I., Ries D., Roccia S., Rogel G., Rozpedzik D., Schnabel A., Schmidt-Wellenburg P., Severijns N., Shiers D., Tavakoli Dinani R., Thorne J.A., Virot R., Voigt J., Weis A., Wursten E., Wyszynski G., Zejma J., Zenner J., Zsigmond G. // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 124. P. 081803. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.081803
- Zyla P.A. et al. (Particle Data Group) // Prog. Theor. Exp. Phys. 2020. V. 2020. P. 083C01.
- Bison G., Daum M., Kirch K., Lauss B., Ries D., Schmidt-Wellenburg P., Zsigmond G., Brenner T., Geltenbort P., Jenke T., Zimmer O., Beck M., Heil W., Kahlenberg J., Karch J., Ross K., Eberhardt K., Geppert C., Karpuk S., Reich T., Siemensen C., Sobolev Y., Trautmann N. // Physical Review C. 2017. V. 95. P. 045503. https://doi.org/10.1103/PhysRevC.95.045503
- 6. Steyerl A., Nagel H., Schreiber F.-X., Steinhauser K.-A., Gähler R., Gläser W., Ageron P., Astruc J.M., Drexel W., Gervais G., Mampe W. // Phys. Lett. A. 1986. V. 116. P. 347.
  - https://doi.org/10.1016/0375-9601(86)90587-6
- Serebrov A.P., Fomin A.K. // Tech. Phys. 2015. V. 60. P. 1238.
  - https://doi.org/10.1134/S106378421508023X
- Serebrov A.P., Fomin A.K., Onegin M.S., Kharitonov A.G., Prudnikov D.V., Lyamkin V.A., Ivanov S.A. // Tech. Phys.s Lett. 2014. V. 40. P. 10. https://doi.org/10.1134/S1063785014010118
- Serebrov A.P., Vassiljev A.V., Varlamov V.E., Geltenbort P., Gridnev K.A., Dmitriev S.P., Dovator N.A., Egorov A.I., Ezhov V.F., Zherebtsov O.M., Zinoviev V.G., Ivochkin V.G., Ivanov S.N., Ivanov S.A., Kolomensky E.A., Konoplev K.A., Krasnoschekova I.A., Lasakov M.S., Lyamkin V.A., Martemyanov V.P., Murashkin A.N., Neustroev P.V., Onegin M.S., Petelin A.L., Pirozhkov A.N., Polyushkin A.O., Prudnikov D.V., Ryabov V.L., Samoylov R.M., Sbitnev S.V., Fomin A.K., Fomichev A.V., Zimmer O., Cherniy A.V., Shoka I.V. // Phys. Atomic Nuclei. 2016. V. 79. P. 293.

https://doi.org/10.1134/S1063778816030145

10. Golub R., Pendlebury J.M. // Phys. Lett. A. 1977. V. 62. P. 337.

https://www.doi.org/10.1016/0375-9601(77)90434-0

11. Ignatovich V.K., The Physics of Ultracold Neutrons. Clarendon, Oxford, 1990.

- Serebrov A.P., Mityuklyaev V.A., Zakharov A.A., Erykalov A.N., Onegin M.S., Fomin A.K., Ilatovskiy V.A., Orlov S.P., Konoplev K.A., Krivshitch A.G., Samsonov V.M., Ezhov V.F., Fedorov V.V., Keshyshev K.O., Boldarev S.T., Marchenko V.I. // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 611. P. 276.
- Altarev I.S., Borisov Yu.V., Brandin A.B., Egorov A.I., Ezhov V.F., Ivanov S.N., Lobashov V.M., Nazarenko V.A., Porsev G.D., Ryabov V.L., Serebrov A.P., Taldaev R.R. // Nucl. Phys. A. 1980. V. 341. P. 269. https://doi.org/10.1016/0375-9474(80)90313-9
- Altarev I.S., Borisov Yu.V., Borovikova N.V., Brandin A.B., Egorov A.I., Ezhov V.F., Ivanov S.N., Lobashev V.M., Nazarenko V.A., Ryabov V.L., Serebrov A.P., Taldaev R.R. // Phys. Lett. B. 1981. V. 102. P. 13. https://doi.org/10.1016/0370-2693(81)90202-1
- Serebrov A.P., Kolomenskiy E.A., Pirozhkov A.N., Krasnoschekova I.A., Vassiljev A.V., Polyushkin A.O., Lasakov M.S., Murashkin A.N., Solovey V.A., Fomin A.K., Shoka I.V., Zherebtsov O.M., Geltenbort P., Ivanov S.N., Zimmer O., Alexandrov E.B., Dmitriev S.P., Dovator N.A. // Phys. Rev. C. 2015. V. 92. P. 055501. https://doi.org/10.1103/PhysRevC.92.055501
- Lasakov M.S., Pirozhkov A.N., Serebrov A.P. // Tech. Phys. 2019. V. 64. P. 436. https://doi.org/10.1134/S1063784219030162
- 17. Serebrov A.P., Fomin A.K. // Phys. Procedia. 2011. V. 17. P. 199.
  - https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.06.037
- Ezhov V.F., Andreev A.Z., Ban G., Bazarov B.A., Geltenbort P., Glushkov A.G., Knyazkov V.A., Kovrizhnykh N.A., Krygin G.B., Naviliat-Cuncic O., Ryabov V.L. // JETP Lett. 2018. V. 107. P. 671. https://doi.org/10.1134/S0021364018110024
- Pattie R.W., Callahan N.B., Cude-Woods C., Adamek E.R., Broussard L.J., Clayton S.M., Currie S.A., Dees E.B., Ding X., Engel E.M., Fellers D.E., Fox W., Geltenbort P., Hickerson K.P., Hoffbauer M.A., Holley A.T., Komives A., Liu C.-Y., MacDonald S.W.T., Makela M., Morris C.L., Ortiz J.D., Ramsey J., Salvat D.J., Saunders A., Seestrom S.J., Sharapov E.I., Sjue S.K., Tang Z., Vanderwerp J., Vogelaar B., Walstrom P.L., Wang Z., Wei W., Weaver H.L., Wexler J.W., Womack T.L., Young A.R., Zeck B.A. // Science. 2018. V. 360. P. 627. https://doi.org/10.1126/science.aan8895
- Yue A.T., Dewey M.S., Gilliam D.M., Greene G.L., Laptev A.B., Nico J.S., Snow W.M., Wietfeldt F.E. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111. P. 222501.
- Hoogerheide S.F., Caylor J., Adamek E.R., Anderson E.S., Biswas R., Chavali S.M., Crawford B., DeAngelis C., Dewey M.S., Fomin N., Gilliam D.M., Grammer K.B., Greene G.L., Haun R.W., Ivanov J.A., Li F., Mulholland J., Mumm H.P., Nico J.S., Snow W.M., Valete D., Wietfeldt F.E., Yue A.T. // EPJ Web Conf. 2019. V. 219. P. 03002. https://doi.org/10.1051/epjconf/201921903002
- Materne S., Picker R., Altarev I., Angerer H., Franke B., Gutsmiedl E., Hartmann F.J., Müller A.R., Paul S., Stoepler R. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2009. V. 611. P. 176. https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.07.055
- 23. Leung K.K.H., Geltenbort P., Ivanov S., Rosenau F., Zimmer O. // Phys. Rev. C. 2016. V. 94. P. 045502. https://doi.org/10.1103/PhysRevC.94.045502

ПОВЕРХНОСТЬ. РЕНТГЕНОВСКИЕ, СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ № 11 2022

 Hirota K., Ichikawa G., Ieki S., Ino T., Iwashita Y., Kitaguchi M., Kitahara R., Koga J., Mishima K., Mogi T., Morikawa K., Morishita A., Nagakura N., Oide H., Okabe H., Otono H., Seki Y., Sekiba D., Shima T., Shimizu H.M., Sumi N., Sumino H., Tomita T., Uehara H., Yamada T., Yamashita S., Yano K., Yokohashi M., Yoshioka T. // Prog. Theor. Exp. Phys. 2020. V. 2020. P. 123C02.

https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa169

 Serebrov A.P., Kolomensky E.A., Fomin A.K., Krasnoshchekova I.A., Vassiljev A.V., Prudnikov D.M., Shoka I.V., Chechkin A.V., Chaikovskiy M.E., Varlamov V.E., Ivanov S.N., Pirozhkov A.N., Geltenbort P., Zimmer O., Jenke T., Van der Grinten M., Tucker M. // Phys. Rev. C. 2018. V. 97. P. 055503. https://doi.org/10.1103/PhysRevC.97.055503

# Simulation of an Experimental Program with Ultracold Neutrons at the PIK Reactor

A. K. Fomin<sup>1, \*</sup>, A. P. Serebrov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of National Research Centre "Kurchatov Institute", Gatchina, Leningradskaya oblast, 188300 Russia

\*e-mail: fomin\_ak@pnpi.nrcki.ru

The work is devoted to simulation a complex of research with ultracold neutrons at the PIK reactor. The complex is being built on the basis of a high-intensity source of ultracold neutrons at the GEK-4 channel. Superfluid helium is used as a converter of cold neutrons into ultracold ones. A program of fundamental research is planned at the source. A Monte Carlo model has been developed, which includes a source, a neutron guide system and experimental installations, taking into account their real location in the main hall of the reactor. As a result of simulation, it was found that in a closed source chamber it is possible to obtain an ultracold neutron density of  $3.5 \times 10^3 n/\text{cm}^3$ . With the help of calculations, the sensitivities of measuring installations for the search for the electric dipole moment of the neutron and for the measurement of the neutron lifetime at the PIK reactor were obtained. For the experiment on the search for the electric dipole moment of the neutrons in the chambers of the spectrometer can be 200 n/cm<sup>3</sup>, which is 50 times better than at the source at the Institut Laue-Langevin. For the experiment on measuring the neutron lifetime, it was found that the count of the neutron detector during emtyings can be increased by a factor of 16 compared to measurements at the reactor at the Institut Laue-Langevin.

Keywords: ultracold neutrons, neutron electric dipole moment, neutron lifetime.