

## НЕЙТРОНОВОДНАЯ СИСТЕМА ИСТОЧНИКА УХН ДЛЯ РК ПИК

*А. П. Серебров<sup>a</sup>, В. А. Лямкин<sup>a,1</sup>, А. К. Фомин<sup>a</sup>, А. О. Коптюхов<sup>a</sup>,  
Д. В. Прудников<sup>a</sup>, Г. О. Бородинов<sup>a</sup>, С. Н. Иванов<sup>a</sup>, А. Н. Мурашкин<sup>a</sup>,  
П. А. Хазов<sup>a</sup>, А. В. Сиротин<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова  
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,  
Гатчина, 188300, Россия

Работа посвящена оптимизации нейтроноводной системы нового источника ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия для исследований в области физики фундаментальных взаимодействий на реакторе ПИК. В текущей конфигурации планируется достичь плотности УХН  $950 \text{ см}^{-3}$  в закрытой камере конвертера. После модернизации, при замене стального теплообменника на медный, значение плотности УХН в закрытой камере конвертера может быть увеличено до  $3400 \text{ см}^{-3}$ . Для нового источника было произведено моделирование методом Монте-Карло для расчета плотностей УХН в закрытой камере конвертера и на выходе из сплиттера для будущих пользователей, планирующих эксперименты на этом источнике. Моделирование произведено с учетом всей геометрии и элементов нейтроноводной системы. Результаты моделирования показывают установившуюся плотность в 10-л ловушке на выходе из сплиттера в  $340 \text{ см}^{-3}$  после модернизации теплообменника.

This article describes optimization of the neutron guide system of a new ultracold neutron source based on superfluid helium for research of fundamental physics at the PIK reactor. The current configuration aims to achieve a UCN density of  $950 \text{ cm}^{-3}$  in the closed converter volume. After modernization, by replacing the steel heat exchanger with a copper one, the UCN density in the closed converter volume can be increased up to  $3400 \text{ cm}^{-3}$ . Monte Carlo simulations were performed for the new source to calculate UCN densities inside the closed converter volume and at the splitter output for future users planning experiments at this source. The simulations accounted for the full geometry and elements of the neutron guide system. The results show a steady-state density of  $340 \text{ cm}^{-3}$  in a 10-l trap at the splitter output after the heat exchanger upgrade.

PACS: 28.20.He; 28.20.Ka

### ВВЕДЕНИЕ

В ПИЯФ НИЦ «Курчатовский институт» завершаются работы по созданию высокопоточного источника ультрахолодных нейтронов (УХН) на основе сверхтекучего гелия [1, 2]. Необходимость развития новой технологии для производства ультрахолодных нейтронов обусловлена текущим отсутствием существенного прогресса

---

<sup>1</sup>E-mail: lyamkin\_va@npi.nrcki.ru

в увеличении плотности УХН в экспериментах по физике фундаментальных взаимодействий [3]. Новое поколение пучковых технологий с высокой плотностью УХН позволит значительно продвинуться в вопросах фундаментальных исследований, как, например, в поиске электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона [4] и прецизионном измерении времени жизни нейтрона [5].

Источник УХН будет установлен на самый большой из имеющихся экспериментальных каналов реакторного комплекса ПИК — горизонтальный экспериментальный канал ГЭК-4 диаметром 220 мм. Плотность потока тепловых нейтронов на выходе из канала ожидается на уровне  $5,7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . К каналу ГЭК-4 вплотную будет прижимать носовая внутриказематная часть источника УХН. В носовой части размещены свинцовый экран, графитовый замедлитель, жидкодейтериевый предзамедлитель и конвертер нейтронов из сверхтекучего гелия (рис. 1). Расчеты по оптимизации носовой части источника УХН показали следующие величины притока тепла от реактора к различным частям источника УХН: свинцовый экран — 267 Вт; жидкодейтериевый предзамедлитель — 10,7 Вт; сверхтекучий гелий — 3,85 Вт [6].

Система доставки ультрахолодных нейтронов от источника до экспериментальных станций играет существенную роль в итоговой плотности УХН в экспериментах. Для начала нейтроны необходимо вывести из каземата, внутри которого размещена камера со сверхтекучим гелием. При этом для обеспечения приемлемой дозовой нагрузки на персонал поток  $\gamma$ -квантов и быстрых нейтронов нужно уменьшить до приемлемых уровней. Далее пучок УХН необходимо эффективно развести на четыре экспериментальные установки, две из которых находятся в соседнем помещении.

Целью работы ставились оптимизация нейтронородной системы и определение плотностей УХН на выходе из сплиттера для будущих пользователей, планирующих эксперименты на нашем источнике.

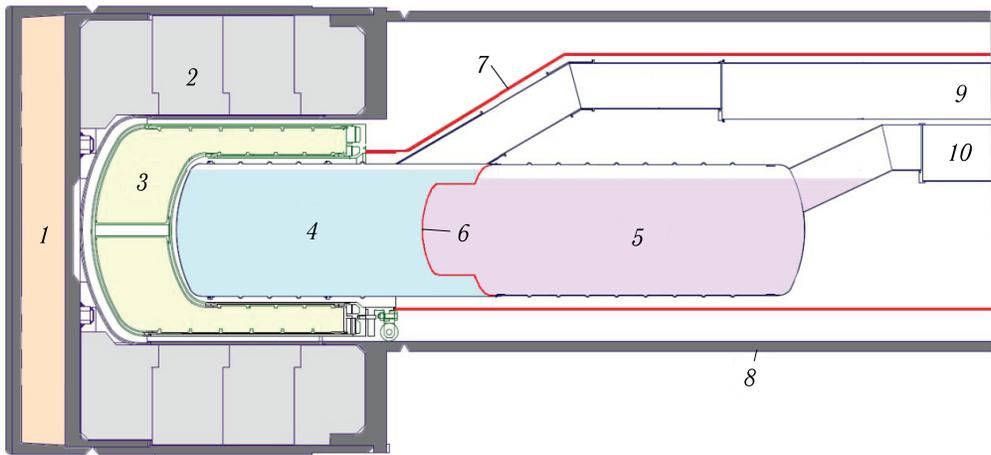


Рис. 1. Главная головная часть источника УХН на РК ПИК: 1 — свинцовый экран; 2 — графитовый замедлитель; 3 — жидкодейтериевый предзамедлитель; 4 — камера конвертера УХН со сверхтекучим гелием; 5 — камера теплообменника с жидким гелием; 6 — поверхность теплообмена; 7 — тепловой экран при  $T = 20 \text{ K}$ ; 8 — вакуумный кожух; 9 — нейтронород; 10 — трубопровод откачки паров гелия

## ПЛОТНОСТЬ УХН В ЗАКРЫТОЙ КАМЕРЕ ИСТОЧНИКА

Плотность потока тепловых нейтронов в камере конвертера УХН, в 50 см от фланца канала ГЭК-4, будет равна  $6,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Однако УХН в нашем источнике образуются из холодных нейтронов в результате одно- или многофононного рассеяния на сверхтекучем гелии в камере конвертера. Для уменьшения теплопритоков от  $\gamma$ -квантов установлен свинцовый экран. Для увеличения плотности холодных нейтронов камера конвертера окружена слоем графитового замедлителя при температуре 300 К и жидкодейтериевого предзамедлителя при температуре 20 К и толщиной 16 см спереди, 6 см по бокам. Таким образом, плотность потока  $8,9 \text{ \AA}$  нейтронов в камере конвертера составит  $1,1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{\AA}^{-1}$  [7–9]. Объем камеры источника составляет 43 л. Камера источника и нейтронотводы имеют внутри напыление  $^{58}\text{Ni}$  с граничной скоростью 8,1 м/с и коэффициентом потерь  $3 \cdot 10^{-4}$ . Температура гелия в камере источника УХН поддерживается с помощью теплообменника. При использовании теплообменника из нержавеющей стали 12Х18Н10Т температура гелия в камере конвертера установится на уровне  $T_{\text{He}} = 1,33 \text{ К}$ . Уменьшить температуру можно, использовав другие материалы для изготовления стенки теплообменника, например медь. Однако замена материалов приведет к усложнению технологии изготовления всей конструкции в целом. При этом температура гелия в камере конвертера будет равной  $T_{\text{He}} = 1,07 \text{ К}$ .

Мы исходим из соображений максимальной надежности источника УХН. В связи с этим в конструкции были использованы решения, которые не дают максимальной возможной плотности УХН, но при этом существенно повышают надежность установки. В будущем, при освоении и подтверждении надежности тех или иных технологических решений, конструкция источника УХН будет подвергаться модернизации с целью увеличения плотности УХН в экспериментальных установках.

Плотность УХН в источнике зависит от двух факторов: плотности исходного нейтронного потока и потерь УХН в камере конвертера. Первый фактор зависит от пара-

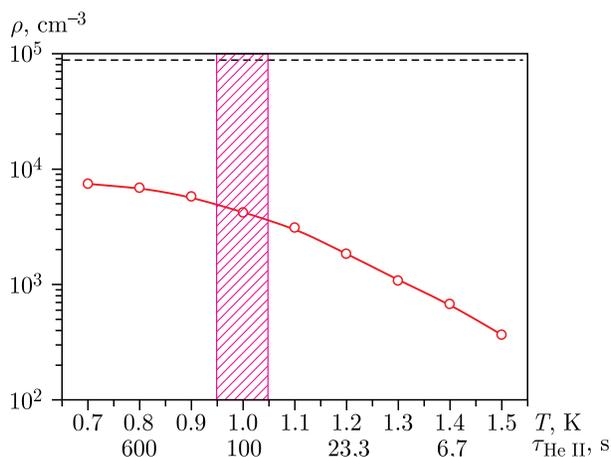


Рис. 2. Плотность УХН в закрытой камере источника в зависимости от температуры сверхтекучего гелия в камере источника

метров реактора, на котором установлен источник, и места расположения источника относительно реактора. Вторым же параметром является температура сверхтекучего конвертера и вероятности потерь на соударениях со стенками камеры, так как потери на поглощение с изотопом  $^3\text{He}$  были исключены при изотопной очистке используемого гелия [10].

Было произведено моделирование методом Монте-Карло для расчета плотности УХН в закрытой камере конвертера в установившемся режиме с внутренним напылением  $^{58}\text{Ni}$  с граничной скоростью 8,1 м/с и коэффициентом потерь  $3 \cdot 10^{-4}$ . При  $\Phi(\lambda = 9 \text{ \AA}) = 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{\AA}^{-1}$  скорость производства УХН в сверхтекучем гелии составляет  $100 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ . Результаты моделирования приведены на рис. 2. Плотность УХН в закрытой камере источника УХН будет 3400 и 950  $\text{см}^{-3}$  при температуре конвертера, равной 1,07 и 1,33 К соответственно.

## НЕЙТРОНОВАЯ СИСТЕМА УХН

Выход УХН из камеры конвертера в нейтронный канал осуществляется с поверхности сверхтекучего гелия. Диаметр нейтронного канала из камеры конвертера УХН — 100 мм. Впоследствии нейтронный канал переходит к диаметру 125 мм. Диаметр нейтронного канала ограничен внутренним объемом вакуумного модуля, внутрь которого помещена гелиевая часть источника УХН. Нейтронные каналы УХН изготовлены из полированной нержавеющей стали 12X18H10T с граничной скоростью 6,2 м/с. Внутренняя поверхность нейтронных каналов отполирована до  $Ra = 0,025$  и напылена 3000- $\text{\AA}$  слоем  $^{58}\text{Ni}$ .

При проектировании нейтронного канала внутри каземата УХН необходимо отсеять весь спектр  $\gamma$ -квантов и быстрых нейтронов, идущих напрямую из реактора. Для этого ось источника УХН была отклонена на  $7^\circ$  относительно канала ГЭК-4. Отклонить источник на больший угол не представляется возможным ввиду расположения коллимационной системы далее на канале ГЭК-3. Более того, нейтронным каналам необходимо «попасть» в дверной проем, отделяющий гермообъем реакторной установки от зоны с экспериментальными установками. Получение приемлемой радиационной обстановки за пределами каземата предполагается за счет изгиба нейтронного канала УХН и установки массивной многослойной защиты из полиэтилена и свинца на пути прямого пучка  $\gamma$ -квантов из ГЭК-4. Была произведена серия расчетов для определения углов отклонения нейтронного канала УХН и толщины дополнительной защиты, при которых вне каземата будет получен приемлемый радиационный фон за счет минимальных потерь ультрахолодных нейтронов.

В результате оптимизации принята схема, изображенная на рис. 3, с двумя изгибами нейтронного канала УХН по  $20^\circ$ . Вторым изгибом нужен для того, чтобы вернуть направление нейтронного канала в сторону зоны экспериментальных станций с УХН. Расчеты мощности эквивалентной дозы на выходе из каземата в таком случае показывают приемлемые для персонала значения МЭД на уровне ниже 1 мкЗв/ч.

После каземата нейтронная система попадает в сплиттер, изображенный на рис. 4, в котором поток УХН от источника распределяется по экспериментальным установкам. В сплиттере организован разрыв нейтронного канала, в который пневмоцилиндром подставляются различные нейтронные каналы, отклоняющие пучок от исходной оси на  $-30^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  или  $50^\circ$ . Разрыв нейтронного канала приводит к появлению как минимум

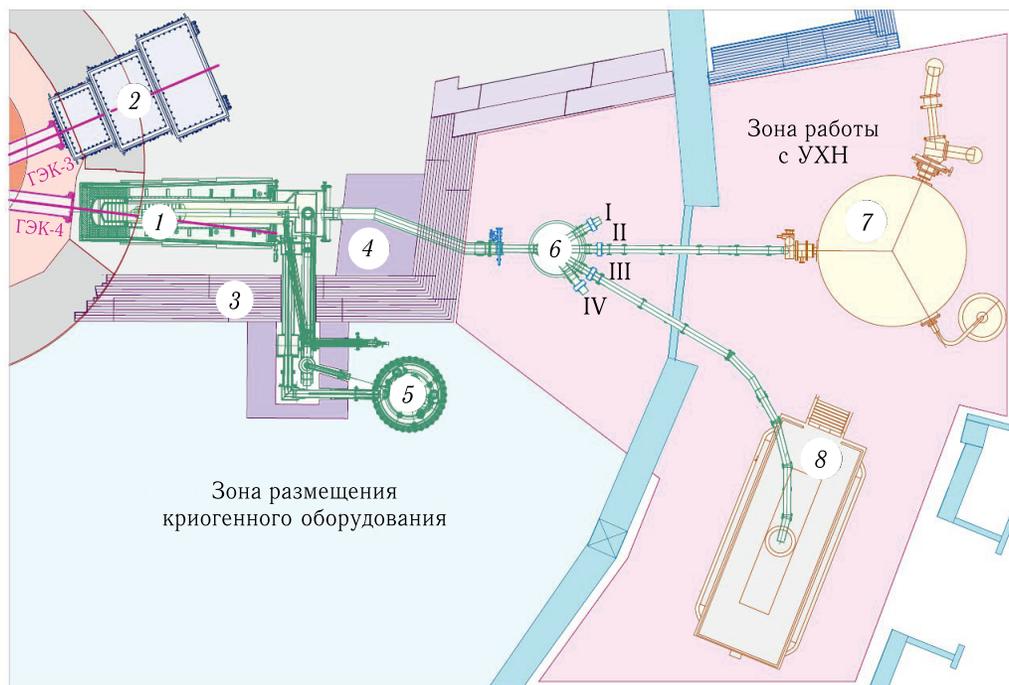


Рис. 3. Расположение источника УХН на РК ПИК: 1 — источник УХН; 2 — коллиматор источника холодных нейтронов ГЭК-3; 3 — защитный каземат; 4 — локальная защита для нейтронов УХН; 5 — криостат со сверхтекучим гелием; 6 — сплиттер-распределитель потока УХН; 7 — установка по поиску ЭДМ нейтрона; 8 — гравитационный спектрометр УХН

двух щелей, в которых будут потери УХН. На входе и выходе сплиттера установлены мембраны, которые разделяют объемы экспериментальных установок и источника УХН, разделение идет и по шиберу-затвору гильотинного типа, который, в случае разгерметизации соответствующей установки, автоматически закрывается, защищая остальные установки, в том числе и источник УХН.

Весь участок нейтроновода от сверхтекучего гелия до фольги будет заполнен парами гелия, дополнительным фактором потерь УХН. В работе [11] для гелиевого газа была экспериментально получена постоянная при фиксированной комнатной температуре величина  $P\tau = (46700 \pm 3300) \text{ Па} \cdot \text{с}$ , где  $P$  — давление гелия, а  $\tau$  — время хранения УХН. Соответственно для  $P = 200 \text{ Па}$  (давление насыщенных паров гелия при  $T = 1,7 \text{ К}$  — взято с большим запасом) и  $T = 85 \text{ К}$  (средняя температура газа в этом нейтроновом) имеем  $\tau = (66 \pm 5) \text{ с}$ , что сравнимо с тем, что имеем в камере конвертера УХН (там  $\tau_k = 15 \text{ с}$  и  $\tau_k = 40 \text{ с}$  в зависимости от теплообменника). С этими потерями в этой части нейтроноводной системы придется смириться. Дальнейшие расчеты выполнены с учетом этого остаточного гелия.

Исследовалось влияние щелей и мембран при сборке нейтроноводной системы на плотность УХН в эксперименте. Щели в нейтроноводной системе необходимы в подвижных местах. Таких мест на пути от источника УХН до научной станции три шту-

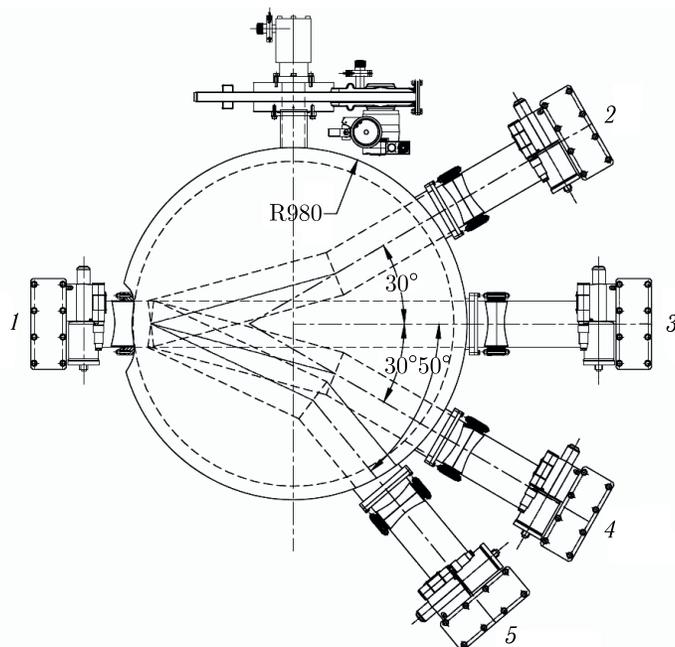


Рис. 4. Сплиттер-распределитель потока УХН на 4 экспериментальные станции: 1 — вход пучка УХН от источника; 2 — резерв; 3 — на ЭДМ-спектрометр; 4 — на гравитационную ловушку УХН; 5 — резерв

ки: два шибера и разрыв нейтронорода в сплиттере. То есть минимальное количество щелей оценивается в 6 единиц. Величина щели, в первую очередь, будет оцениваться с точки зрения надежной эксплуатации, а величину потерь УХН в этом случае придется принять как данность. На данный момент технология изготовления сплиттера и шибера включает наличие щелей в 0,5 мм. Такие щели, согласно расчету методом Монте-Карло, приводят к снижению плотности УХН в ЭДМ-спектрометре на 15%.

Еще один технологический момент, который нельзя исключить при проектировании нейтронородной системы, это наличие фольг для разделения сред и вакуума. Материал мембран — алюминий, толщина составляет 100 мкм, граничная скорость 3,2 м/с. Как минимум одна фольга должна быть установлена на выходе из нейтронорода внутриказематной части источника УХН. Эта фольга отделяет объем с изотопно-чистым гелием в камере конвертера от вакуума в общей нейтронородной системе (сплиттере). Вторая фольга должна быть установлена при наличии нескольких научных станций на источнике УХН. Такая фольга будет установлена на каждой станции для разделения вакуума в различных экспериментах.

Хотя наличие фольг в нейтронородной системе исключить нельзя, их влияние на плотность УХН в экспериментах можно уменьшить, увеличив энергию нейтронов непосредственно перед фольгой. При спуске вниз нейтроны разгоняются за счет гравитации и проходят через фольги с более высокой скоростью, а затем при подъеме вверх обратно замедляются. Более высокая скорость позволит нейтронам с малой энергией превзойти граничную энергию фольги, а нейтроны с высокой энергией бу-

дуг иметь меньшие потери при прохождении через фольгу. Поэтому разветвитель пучка и фольги располагается в нижней части нейтроновода. Рассматривался нейтроновод с изгибом вниз, глубиной 1 м и с уклоном после прямой части, равным  $38^\circ$ . Эти значения определяются, в первую очередь, расположением оборудования на РК ПИК: изгиб нейтроновода необходимо уместить в 3 м, в промежуток от заднего фланца вакуумного модуля источника УХН до мембранного узла на сплиттере.

Метод разгона нейтрона непосредственно перед фольгой положительно показал себя при моделировании первой очереди экспериментов с использованием УХН на РК ПИК. Так, для установки по поиску ЭДМ нейтрона выигрыш в плотности УХН составил 15 %, а для установки по измерению времени жизни нейтрона 25 %. Результаты этого моделирования — в работе [12].

Наконец, после оптимизации всей нейтроноводной системы и учета всех элементов и «дефектов» этой системы, таких как щели и мембраны, с использованием метода Монте-Карло были рассчитаны плотность и спектр УХН на выходе из сплиттера для будущих пользователей, планирующих эксперименты на нашем источнике. Моделирование произведено для температуры гелия в камере конвертера, равной  $T_{\text{He}} = 1 \text{ K}$  (сплошная линия) и  $T_{\text{He}} = 1,3 \text{ K}$  (штриховая линия) (рис. 6, а). Расчетная схема и результаты моделирования приведены на рис. 5 и 6 соответственно. Установивши-

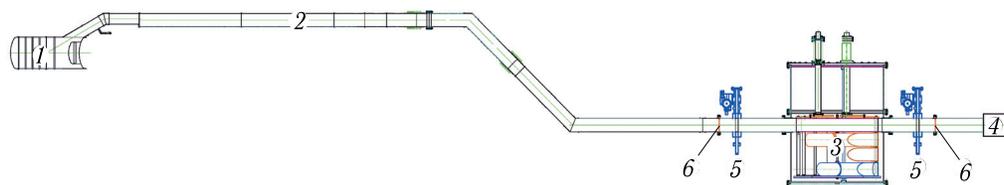


Рис. 5. Расчетная схема нейтроноводной системы источника УХН: 1 — камера источника УХН; 2 — нейтроновод УХН; 3 — сплиттер; 4 — ловушка объемом 10 л (см. рис. 4) на выходе 3; 5 — шибер УХН; 6 — разделительная Al-мембрана

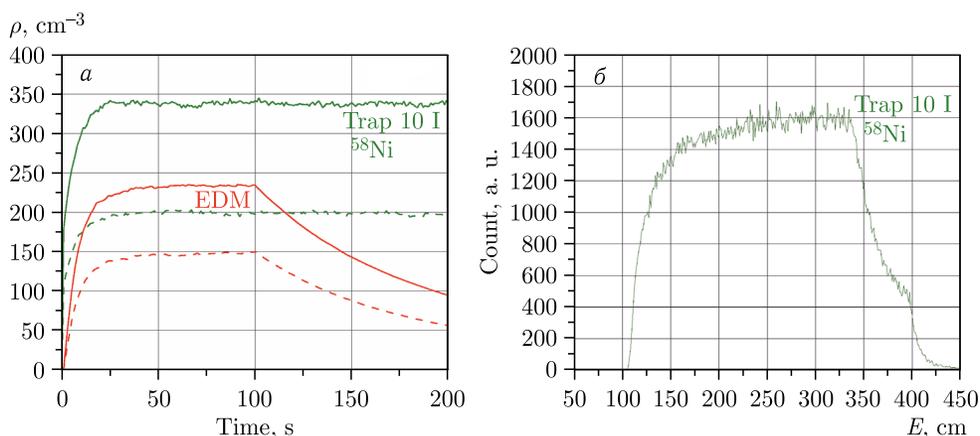


Рис. 6. Результаты моделирования плотности (а) (сплошная линия — при  $T_{\text{He}} = 1,0 \text{ K}$ , штриховая — при  $T_{\text{He}} = 1,3 \text{ K}$ ) и спектра УХН (б) в ловушке 10 л на выходе из сплиттера и в камере ЭДМ-спектрометра

еся плотности в ловушке 10 л и ЭДМ-спектрометре при  $T_{4\text{He}} = 1,0$  К равны 340 и  $235 \text{ см}^{-3}$  соответственно, а при  $T_{4\text{He}} = 1,3$  К — 200 и  $150 \text{ см}^{-3}$  соответственно. При расчете плотностей в ловушке 10 л и ЭДМ-спектрометре участвовали нейтроны с энергиями 0–335 и 0–235 нэВ соответственно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная нейтронородная система источника ультрахолодных нейтронов сможет поочередно обслуживать до четырех экспериментальных установок. Это позволит иметь современный нейтронный центр коллективного пользования с уникальным высокоинтенсивным источником УХН. На начальном этапе источник ультрахолодных нейтронов запланировано оснастить экспериментальными установками по поиску электрического дипольного момента нейтронов [13] и установкой по измерению времени жизни нейтронов в гравитационной ловушке [14, 15].

Произведены оптимизационные расчеты по выводу ультрахолодных нейтронов в экспериментальные установки. Вывод УХН из защитного каземата был спроектирован таким образом, чтобы отсечь весь спектр  $\gamma$ -квантов и быстрых нейтронов, идущих напрямую из реактора, и при этом минимизировать потери УХН. В результате оптимизации принята схема с двумя изгибами нейтронорода на  $20^\circ$ . Расчеты мощности эквивалентной дозы на выходе из каземата в таком случае показывают значения МЭД на уровне ниже  $1 \text{ мкЗв/ч}$ .

Произведена оценка влияния щелей и мембран при сборке нейтронородной системы на плотность УХН в эксперименте. Наличие мембран является обязательным для разделения сред в камере ИУХН (гелий) и научных установках (вакуум). Влияние мембран на плотность УХН в экспериментах было уменьшено при увеличении энергии нейтронов непосредственно перед мембранным узлом опусканием нейтронорода вниз на 1 м. При спуске вниз нейтроны разгоняются за счет гравитации и проходят через фольги с более высокой скоростью, а затем при подъеме вверх обратно замедляются. Более высокая скорость позволит нейтронам с малой энергией преодолеть граничную энергию фольги, а нейтроны с высокой энергией будут иметь меньшие потери при прохождении через фольгу.

Произведены оптимизационные расчеты для определения наиболее подходящего места установки имеющихся экспериментальных станций на пучках УХН. Моделирование произведено с учетом всей геометрии нейтронородной системы (щели, мембраны, изгибы, напыление и т. д.)

Рассчитаны плотность и спектр УХН на выходе из сплиттера для будущих пользователей, планирующих эксперименты на нашем источнике. Расчетные установившиеся плотности в ловушке 10 л и ЭДМ-спектрометре при температуре сверхтекучего конвертера  $T_{4\text{He}} = 1,0$  К равны 340 и  $235 \text{ см}^{-3}$  соответственно, а при  $T_{4\text{He}} = 1,3$  К — 200 и  $150 \text{ см}^{-3}$ .

**Финансирование.** Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-72-10007, <https://rscf.ru/project/23-72-10007/>.

**Конфликт интересов.** Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ковальчук М. В., Воронин В. В., Григорьев С. В., Серебров А. П.* Приборная база реактора ПИК // Кристаллография. 2021. Т. 66. С. 191–231.
2. *Serebrov A. P. et al.* Program for Studying Fundamental Interactions at the PIK Reactor Facilities // Phys. At. Nucl. 2016. V. 79, No. 3. P. 293–303.
3. *Serebrov A. P., Lyamkin V. A.* Development of UCN Sources at PNPI // J. Neutron Res. 2022. V. 24. P. 145.
4. *Abel C. et al.* Measurement of the Permanent Electric Dipole Moment of the Neutron // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 124. P. 081803.
5. *Gonzales F. M. et al. (UCN $\tau$  Collab.)*. Improved Neutron Lifetime Measurement with UCN $\tau$  // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 127. P. 162501.
6. *Серебров А. П., Лямкин В. А., Фомин А. К., Онегин М. С.* Источник ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия для реактора ПИК // ЖТФ. 2022. Т. 92. С. 899–906.
7. *Fomin A. K., Serebrov A. P.* Simulation of the Ultracold Neutron Source at the Reactor PIK // Techn. Phys. 2023. V. 68. P. S424.
8. *Fomin A. K., Serebrov A. P.* Simulation of the Experimental Program with Ultracold Neutrons at the PIK Reactor // J. Surf. Invest. 2022. V. 16. P. 1012.
9. *Serebrov A. P. et al.* The Project of Ultracold Neutron Sources at the PIK Reactor with Superfluid Helium as a Moderator // Techn. Phys. Lett. 2014. V. 40. P. 10.
10. *Лямкин В. А., Серебров А. П., Коптюхов А. О., Прудников Д. В., Бородинов Г. О., Недоляк А. А., Хазов П. А., Сиротин А. В., Салюк А. Н.* Получение и наработка изотопно-чистого гелия-4 для источника ультрахолодных нейтронов // ЖТФ. 2025. Т. 95. С. 1251–1258.
11. *Косвинцев Ю. Ю. и др.* Взаимодействие ультрахолодных нейтронов с газообразной средой // Нейтронная физика: Материалы 5-й Всесоюз. конф. по нейтронной физике. Ч. 1. 1980. С. 130–137.
12. *Fomin A. K., Serebrov A. P.* Optimization of the Neutron Guide System of the Ultracold Neutron Source at the PIK Reactor // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56, No. 3. P. 928–931.
13. *Serebrov A. P. et al.* New Measurements of the Neutron Electric Dipole Moment // JETP Lett. 2014. V. 99. P. 4.
14. *Serebrov A. P. et al.* New Measurement of the Neutron Lifetime with a Large Gravitational Trap // JETP Lett. 2017. V. 106. P. 623.
15. *Serebrov A. P. et al.* Rotating Magnetic Gravitational Trap for Storing Ultracold Neutrons // J. Surf. Invest. 2024. V. 18. P. 913.

Получено 9 июля 2025 г.