

УДК 621.039

ИСТОЧНИК УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ ДЛЯ РЕАКТОРНОГО КОМПЛЕКСА ПИК

© 2024 г. В. А. Лямкин^а, *, А. П. Серебров^а, А. О. Коптюхов^а, С. Н. Иванов^а,
Э. А. Коломенский^а, А. В. Васильев^а

^аНИЦ “Курчатовский институт” — ПИЯФ, Гатчина, 188300 Россия

*e-mail: lyamkin_va@pnpi.nrcki.ru

Поступила в редакцию 11.01.2023 г.

После доработки 15.02.2024 г.

Принята к публикации 15.02.2024 г.

В НИЦ “Курчатовский институт” — ПИЯФ создают высокоинтенсивный источник ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия для научных исследований в области фундаментальной физики. Источник ультрахолодных нейтронов спроектирован для установки на самый большой из имеющихся экспериментальных каналов реакторного комплекса ПИК — горизонтальный экспериментальный канал ГЭК-4. Плотность потока тепловых нейтронов на выходе из канала составляет, согласно расчетам, $3 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. В новом источнике ультрахолодных нейтронов станет возможным достигнуть плотности ультрахолодных нейтронов $3.5 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ на выходе из каземата реактора и 200 см^{-3} в спектрометре, предназначенном для измерения электрического дипольного момента нейтронов. Разработанная нейтроноводная система ультрахолодных нейтронов сможет поочередно обслуживать пять экспериментальных установок. На начальном этапе источник ультрахолодных нейтронов запланировано оснастить экспериментальными установками: спектрометром электрического дипольного момента нейтронов и двумя установками по измерению времени жизни нейтронов (с гравитационной и магнитной ловушками). Для данного источника ультрахолодных нейтронов был спроектирован и реализован уникальный технологический криогенный комплекс для работы со сверхтекучим гелием в условиях реакторной установки. Комплекс включает в себя оборудование для получения температур вплоть до 1 К и отвод тепла от сверхтекучего гелия в количестве до 60 Вт.

Ключевые слова: источники нейтронов, ультрахолодные нейтроны, сверхтекучий гелий, электрический дипольный момент нейтрона, время жизни нейтрона.

DOI: 10.31857/S1028096024090012, **EDN:** EITVWJ

ВВЕДЕНИЕ

Для исследований фундаментальных свойств нейтрона использование ультрахолодных нейтронов (УХН) — с энергией ниже 10^{-7} эВ — открывает новые экспериментальные возможности. Эти нейтроны можно хранить в ловушках, что при их достаточной плотности существенно повышает чувствительность измерений. Поэтому разработка высокоинтенсивных источников УХН является исключительно важной задачей. Когда энергия нейтрона меньше граничной энергии проникновения в вещество, то происходит отражение нейтрона от поверхности

материала. Способность УХН к отражению от поверхности позволяет хранить их в замкнутом сосуде, как было отмечено в 1959 году [1]. Удержание УХН возможно также и в магнитных ловушках за счет взаимодействия магнитного момента нейтрона с магнитным полем ловушки [2, 3].

В настоящее время УХН в основном используют для фундаментальных исследований в физике элементарных частиц. Сюда относятся поиск электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона, измерения времени жизни нейтрона, исследования асимметрии β -распада нейтрона.

Производство нейтронов с низкой энергией обязательно требует использования самых современных криогенных технологий. Большой выход холодных нейтронов (ХН), с энергией 10^{-4} – 5×10^{-3} эВ, очень холодных нейтронов (ОХН), с энергией 10^{-7} – 10^{-4} эВ, и ультрахолодных нейтронов (УХН) можно получить, подвергая реакторные нейтроны термализации в низкотемпературных замедлителях, обычно состоящих из водорода или дейтерия. Плотность УХН зависит от начальной интенсивности нейтронного потока и эффективности криогенного замедлителя (или конвертора, если преобладают одиночные акты неупругого рассеяния). Однако размещение замедлителя с криогенной температурой в высоком нейтронном потоке на реакторе связано с проблемой отвода радиационного тепла. Чем ниже температура замедлителя, тем сложнее решить эту проблему.

Работы по созданию источников ультрахолодных нейтронов на реакторе в НИЦ “Курчатовский институт” — ПИЯФ носили пионерский характер [4] и некоторые из них были защищены авторскими патентами [5, 6]. К 1985 году были использованы практически все возможности увеличения плотности УХН, так как источники были размещены в максимально возможном потоке тепловых нейтронов — в центре активной зоны на реакторе “ВВР-М” [7] и на высокопоточном реакторе в ILL [8] при температуре жидкого водо-

рода и дейтерия. После успешных исследований начались активные попытки увеличить плотность УХН с использованием более низких температур. Однако использование очень низких температур и высоких нейтронных потоков находятся в очевидном противоречии. Тем не менее в настоящее время активно развивают два метода получения УХН при очень низких температурах: при температуре 4 К с использованием твердого дейтерия ($s\text{-D}_2$) и при температуре 1 К с использованием сверхтекучего гелия ^4He (на фазовой диаграмме [9] эти условия соответствуют области He-II). Общий прогресс развития источников УХН в мире представлен на рис. 1.

ПРОИЗВОДСТВО УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ В СВЕРХТЕКУЧЕМ ГЕЛИИ

Рассеяние нейтронов в сверхтекучем гелии было теоретически проанализировано еще в 1945 г. [10], что, возможно, вдохновило автора [1] на рассмотрение этой полностью свободной от поглощения нейтронов среды для образования УХН. Однако из-за сложности поддержания этой низкотемпературной жидкости вблизи активной зоны ядерного реактора эта идея не получила немедленного дальнейшего развития. Затем в 1977 г. была опубликована идея использования дисперсии когерентных возбуждений в сверхтекучем гелии для механизма образования УХН [11],

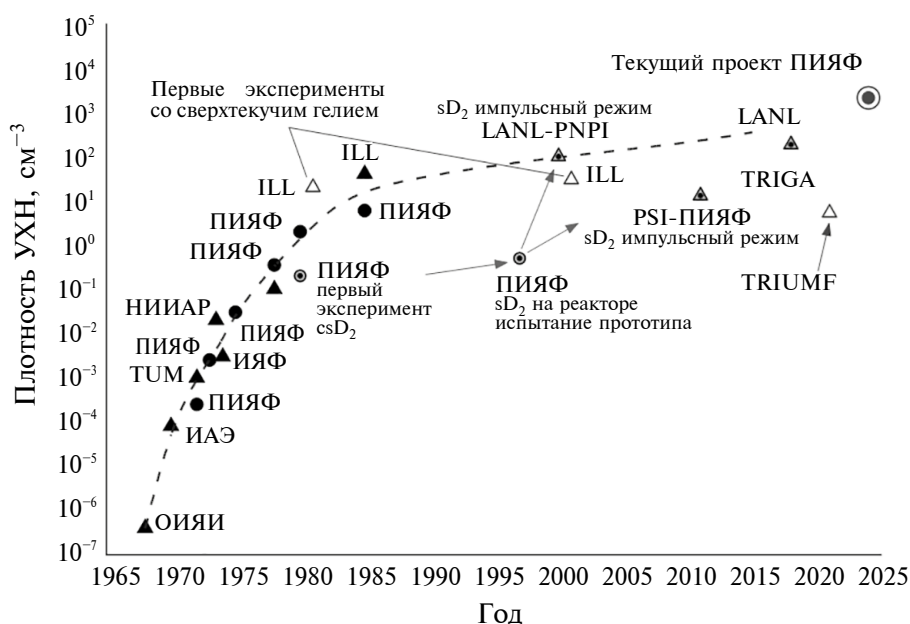


Рис. 1. Эволюция плотности УХН с течением времени в различных источниках УХН: • — ПИЯФ; ▲ — другие; пустые фигуры — на основе сверхтекучего гелия; фигуры с точкой внутри — на основе твердого дейтерия ($s\text{-D}_2$); полностью залившие черным фигуры — другие методы получения УХН. Текущий проект ПИЯФ источника УХН на основе сверхтекучего гелия отмечен точкой в кружке.

также была отмечена возможность получения больших плотностей УХН в сверхтекучем гелии, установленном на выведенном пучке холодных нейтронов.

При образовании УХН в сверхтекучем гелии используют дисперсионную кривую Ландау, связывающую энергию и импульс возбуждений (фононов, ротонов) сверхтекучего гелия. В точке, где она пересекается с параболической кривой дисперсии для свободного нейтрона, как показано на рис. 2, при длине волны нейтрона $8.9 \text{ \AA}$ нейтрон может превратиться в УХН в когерентном неупругом процессе, испустив одиночный фонон, тем самым передав большую часть своей энергии, равной 1 мЭВ , в квантовую жидкость. Нужно отметить, что, хотя некогерентных взаимодействий нейтрона с гелием нет, тем не менее, существуют процессы, которые приводят к нагреванию УХН внутри гелия. Это процессы, в которых участвует больше одной квазичастицы. Для таких процессов законы сохранения не носят строго избирательного характера, и потому возбуждение нескольких квазичастиц с низкой энергией могут приводить к нагреванию УХН, но с понижением температуры роль этих процессов быстро уменьшается. Например, при $T_c = 1 \text{ К}$ двухфононные процессы ограничивают время жизни УХН внутри гелия 130 с , а при 0.6 К — 4000 с .

Чтобы использовать такие большие постоянные времена, необходимо также подавить другие потери УХН. Это потери УХН на стенках корпуса источника, которые могут быть небольшими за счет правильного выбора материала. Кроме

того, необходимо удалить изотоп ^3He , сильно поглощающий нейтроны, из конвертера до содержания 10^{-12} . Такая чистота гелия достижима при использовании очистки методом постоянной прокачки сверхтекучего ^4He через специальный фильтр (superleak) [12–14].

В настоящее время разработки источников УХН на основе сверхтекучего гелия проводят в различных странах, включая Канаду [15], Францию [16], США [17] и Японию [18]. В то время как принцип образования УХН путем конверсии холодных нейтронов в сверхтекучем гелии был экспериментально подтвержден в нескольких лабораториях в масштабе прототипов, следующим важным шагом будет его реализация в условиях высокопоточного нейтронного реактора.

ПРОЕКТ ИСТОЧНИКА УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ НА РЕАКТОРНОМ КОМПЛЕКСЕ ПИК

В 2020 году был дан старт реализации программы по созданию приборной экспериментальной базы для реакторного комплекса ПИК. Одним из главных приборных комплексов в этой программе стал новый источник УХН для проведения исследований в области физики фундаментальных взаимодействий на основе сверхтекучего гелия [19]. Источник УХН на основе сверхтекучего гелия предназначен для проведения исследований в области физики фундаментальных взаимодействий. Согласно проекту, он будет установлен на самый большой из имеющихся эксперимен-

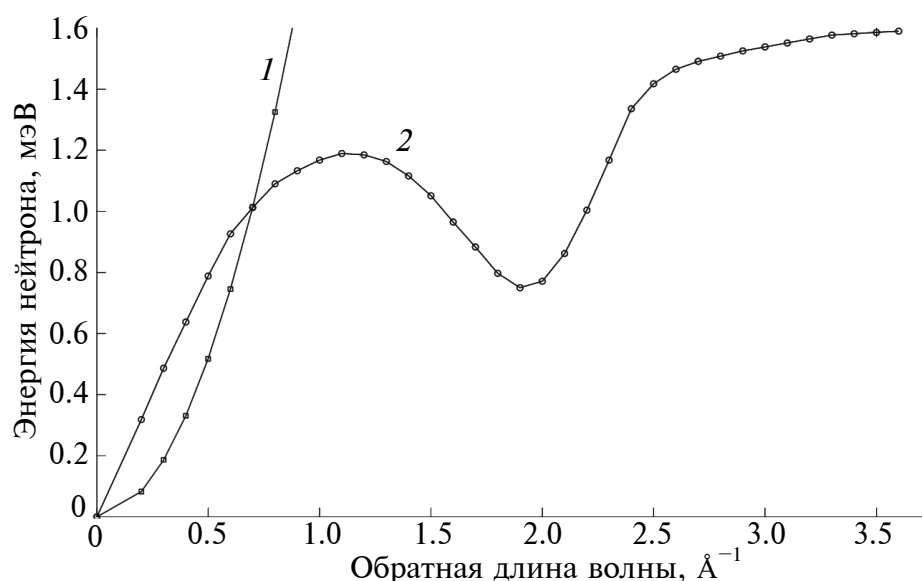


Рис. 2. Зависимости энергии возбуждения фонона (дисперсионные кривые) от волнового вектора в сверхтекучем гелии: для свободного нейтрона (1) и кривая Ландау (2).

тальных каналов реакторного комплекса ПИК — горизонтальный экспериментальный канал ГЭК-4 диаметром 220 мм (рис. 3). Носовая (внутриказематная) часть источника УХН, вплотную прилегает к фланцу канала ГЭК-4. В носовой части необходимо разместить свинцовый экран, графитовый замедлитель, жидкодейтериевый предзамедлитель и конвертор нейтронов из сверхтекучего гелия. Расчеты по оптимизации источника УХН показали следующие величины притока тепла от реактора к различным частям источника УХН: свинцовый экран — 267 Вт; жидкодейтери-

евый предзамедлитель — 10.7 Вт; сверхтекучий гелий — 3.85 Вт.

Для поддержания работы источника УХН потребовалось спроектировать большой и технологически сложный комплекс, который расположен в двух зданиях и на двух площадках. Принципиальная схема расположения частей этого комплекса приведена на рис. 4.

Для внутриказематной сборки источника УХН в нише разборной радиационной защиты реакторного комплекса ПИК необходимо сфор-

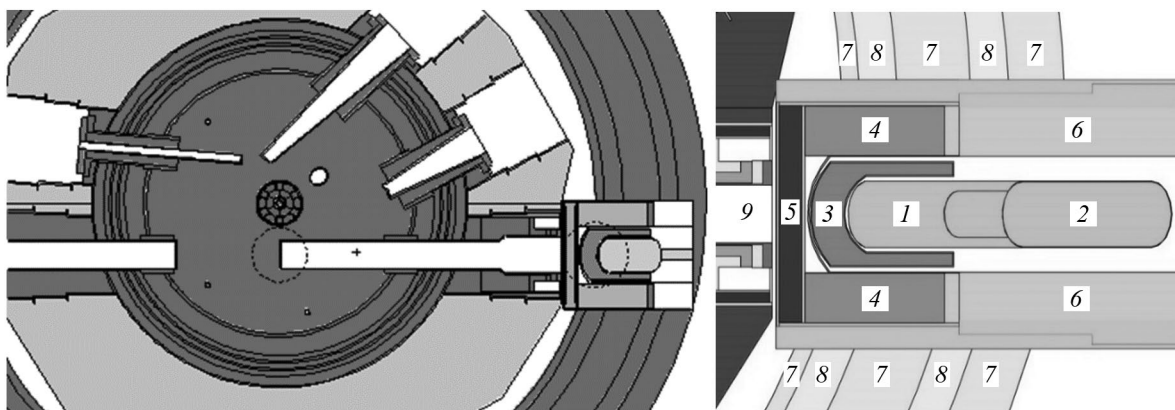


Рис. 3. Расположение источника УХН со сверхтекучим гелием на реакторе ПИК. Слева —реализация на канале ГЭК-4. Справа — схема источника УХН: 1 — изотопно-чистый сверхтекучий ^4He ; 2 — природный гелий в теплообменнике при температуре 1 К; 3 — предзамедлитель (жидкий D_2); 4 — графит; 5 — свинцовый экран; 6 — биологическая защита источника УХН; 7, 8 — многослойная биологическая защита реакторного комплекса; 9 — канал ГЭК-4.

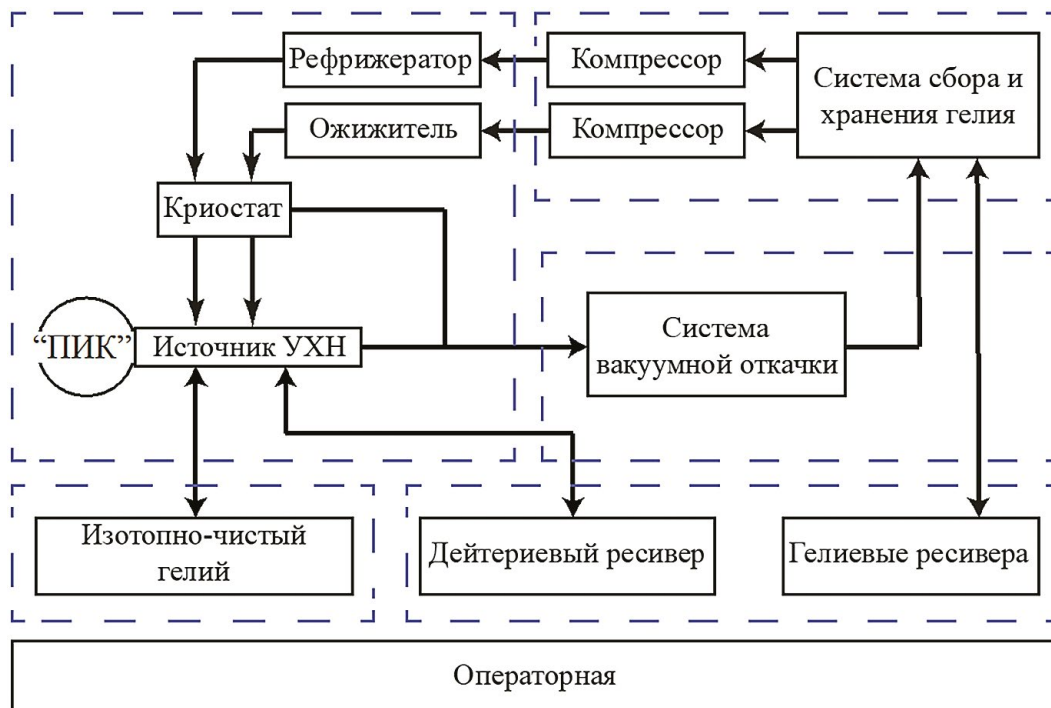


Рис. 4. Принципиальная схема расположения источника УХН.

мировать канал диаметром 1000 мм, а криогенное оборудование разместить в непосредственной близости от головной части и УХН.

Систему вакуумной откачки паров гелия необходимо разместить как можно ближе к камере источника УХН. Это связано с тем, что температура гелия в камере источника УХН зависит от давления насыщенных паров гелия в камере теплообменника — чем ниже давление паров, тем ниже температура гелия. Более низкая температура гелия, в свою очередь, увеличивает время хранения нейтронов в сверхтекучем состоянии [20].

Общий вид расположения оборудования представлено на рис. 5.

Для проверки работоспособности данного комплекса источника УХН была создана и запу-

щена полномасштабная модель с учетом всех условий работы реакторного комплекса ПИК. Эта модель включала в себя все криогенные и вакуумные установки, которые запланированы к размещению в комплексе. Температурные исследования проводили с использованием электрического нагревателя, который имитировал тепловой поток от излучения реактора. Чтобы сделать эти исследования максимально реалистичными, всю низкотемпературную часть модели окружал тепловой экран с рабочей температурой 20 К.

Технологический комплекс со сверхтекучим гелием для полномасштабного моделирования источника УХН включает в себя: модель источника УХН, криостат, гелиевый ожижитель L-280, гелиевый рефрижератор TCF-50, систему вакуумной откачки паров гелия, систему сжатия и хра-

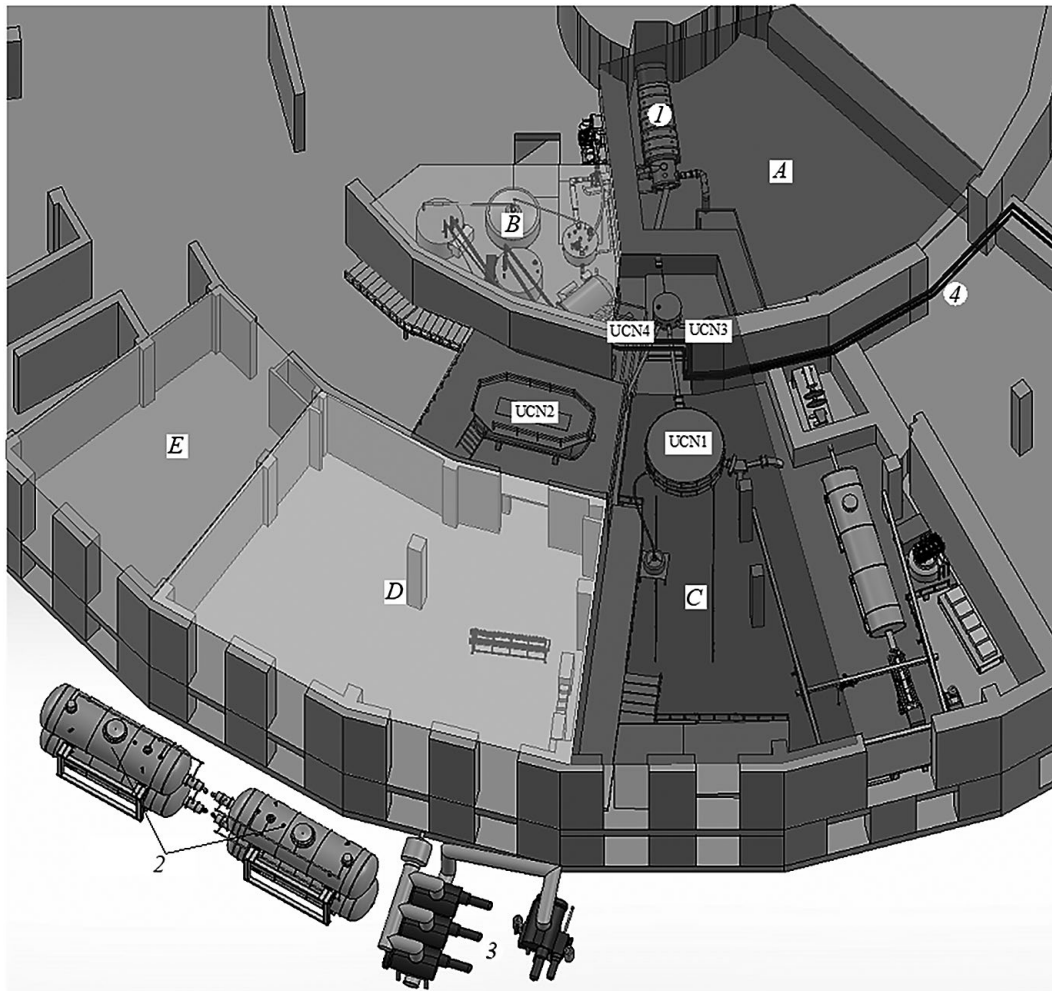


Рис. 5. Общий вид оборудования технологического комплекса источника УХН на реакторном комплексе ПИК. *A* — защитный каземат канала ГЭК-4, *B* — зона криогенного оборудования источника УХН, *C* — зона экспериментальных установок на пучках УХН, *D* — мастерская для экспериментов на пучках УХН, *E* — комната оператора источника УХН. *1* — внутриказематная часть источника УХН, *2* — сосуды с изотопно-чистым ^4He , *3* — система вакуумной откачки паров гелия, *4* — гелиевые и дейтериевые трубопроводы.

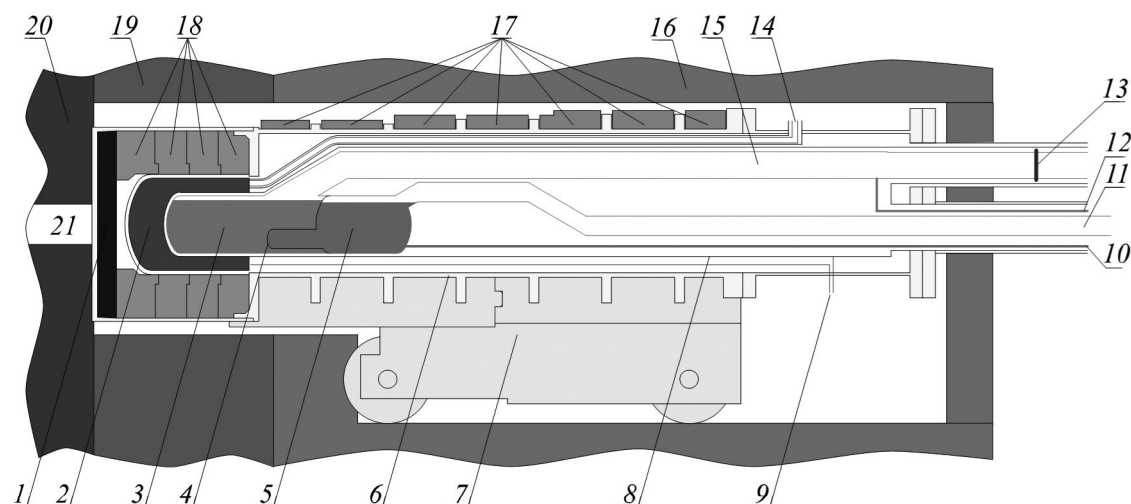


Рис. 6. Конструктивная схема источника УХН (описание узлов далее по тексту).

нения гелия, вспомогательные технологические системы, контрольно-измерительные приборы и автоматику.

В результате работ на полномасштабной модели источника УХН были достигнуты следующие результаты [21]: обоснована выбранная технология получения сверхтекучего гелия при 1.2 К; подтверждена возможность снятия с сверхтекучего гелия тепловых нагрузок до 60 Вт; проведен тестовый эксперимент по очистке гелия от сильно поглощающего нейтроны изотопа ^3He ; накоплен опыт эксплуатации данного комплекса перед его перемещением на действующий реактор.

Центральной частью источника УХН является внутриказематная часть, в которой находится конвертер объемом 35 л со сверхтекучим гелием при температуре 1 К. Принципиальная схема внутриказематной части (в реальных пропорциях) представлена на рис. 6. В передней части внутриказематной части источника УХН находятся свинцовый экран (1) для снижения теплопритоков к низкотемпературным конструкциям источника УХН от гамма-излучения, блоки графитового замедлителя (18), камера с жидкодейтериевым предзамедлителем (2) и камера со сверхтекучим гелием (3).

Отвод теплопритоков от сверхтекучего гелия осуществляется через теплообменник (5) через стенку (4). Хладагентом в этой схеме выступает жидкий ^4He . Для получения температур ^4He на уровне 1 К необходимо поддерживать давление насыщенных паров на уровне 50 Па. Откачку паров ^4He осуществляют через трубопровод (11). Для уменьшения теплопритоков к низкотемпера-

турным элементам источника УХН предусмотрен и тепловой экран (8) с рабочей температурой 20 К.

Низкотемпературная часть источника УХН заключена в вакуумный модуль, состоящий из вакуумного контейнера (6), свинцового экрана и графитового блока. Вакуумный модуль размещен на опорной тележке (7), оборудованной колесами для передвижения по рельсам. Сверху уложены алюминиевые блоки (17), повторяющие форму выреза разборной защиты реакторного комплекса.

Охлаждение теплового экрана (8) и процесс конденсации дейтерия в дейтериевой камере (2) осуществляют с помощью гелия при температуре 20 К через трубопровод (9). Подача жидкого ^4He в камеру теплообменника (5) происходит от криостата через трубопровод (10). Дейтерий в камеру предзамедлителя подают через трубопровод (14) от дейтериевого ресивера. Трубопровод (14) имеет двойные стенки, в зазоре которых находится газообразный гелий для предотвращения возможности образования водородно-воздушной взрывоопасной среды.

По аналогии с дейтериевой камерой (2) гелий в камеру источника УХН (3) подается через трубопровод (12). Трубопровод (12) напрямую соединен с ресивером, заполненным изотопно-чистым ^4He . При получении рабочей температуры 1 К в теплообменнике (5) гелий начинает перетекать и конденсироваться в камере источника УХН. По величине остаточного давления в ресивере можно судить об уровне гелия в камере источника УХН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе реактора ПИК в НИЦ “Курчатовский институт” — ПИЯФ создают высокоинтенсивный источник ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия для научных исследований в области фундаментальной физики. Производство УХН в гелии позволит достичь плотности нейтронов вплоть до $3.5 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ в камере со сверхтекучим гелием и 200 см^{-3} в спектрометре, предназначенном для измерения электрического дипольного момента нейтронов, на выведенном нейтроноводе УХН [22]. Описанный выше источник позволит существенно увеличить плотность УХН по отношению к существующему мировому уровню. За счет высокоинтенсивных потоков ультрахолодных нейтронов станет возможным значительно повысить качество исследований по таким вопросам как поиск электрического дипольного момента нейтрона и измерение времени жизни нейтрона.

Ключевым элементом источника УХН является, разработанная в ПИЯФ, внутриказематная часть, которая будет установлена на горизонтальный канал реактора ГЭК-4. Внутри этого элемента расположены емкость со сверхтекучим гелием при температуре 1 К и емкость с жидким дейтерием при температуре 20 К. Для штатной работы источника УХН был спроектирован большой технологический комплекс с криогенным и вакуумным оборудованием, способный поддерживать рабочую температуру 35 литров сверхтекучего гелия и 53 литров жидкого дейтерия в условиях теплопритоков от реактора ПИК.

Прогресс в точности измерений электрического дипольного момента нейтрона представлен рис. 7. С первого результата по поиску электрического дипольного момента нейтрона с помощью УХН в ПИЯФ в 1980 году [18] верхний предел величины электрического дипольного момента нейтрона был понижен на два порядка величины. Проект эксперимента по определению электрического дипольного момента нейтрона с использованием нового источника УХН, представленный в [24], предполагает увеличение точности измерения на порядок величины, до уровня 10^{-27} е·см (e — элементарный электрический заряд), по отношению к лучшему на данный момент результату [25], полученному с твердодейтериевым источником УХН.

Что касается измерений времени жизни нейтрона, использование УХН сыграло определяющую роль в точности этих измерений, и дальнейшее улучшение качества таких измерений представляется вполне возможным.

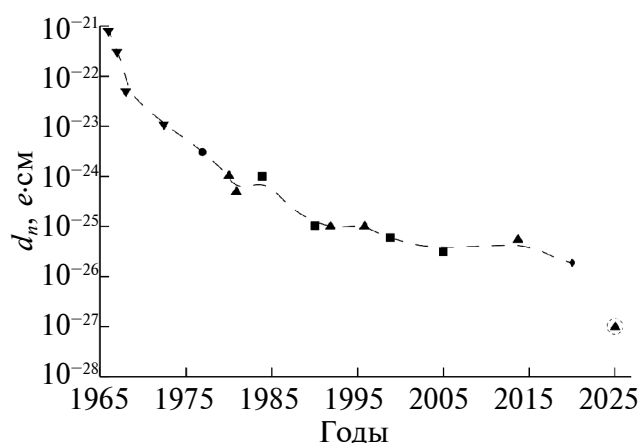


Рис. 7. Прогресс в понижении верхнего предела величины электрического дипольного момента нейтрона d_n . ∇ — ORNL-Harvard, $\bullet$ — ORNL-ILL, $\blacksquare$ — ILL-sussex-RAL, $\blacklozenge$ — PSI, $\blacktriangle$ — ПИЯФ. Результаты до 1980 года получены с использованием холодных нейтронов. Последняя точка — прогноз результата, который будет получен к 2025 году на новом источнике УХН на реакторе ПИК.

Предварительные расчеты показывают фактор выигрыша в счете детектора установки по измерению времени жизни в гравитационной ловушке для реактора ПИК не менее 16 раз по отношению к эксперименту на реакторе в ILL [24].

На базе этого источника запланировано выделить четыре участка под размещение различных экспериментальных установок по физике фундаментальных взаимодействий. Предлагаемый проект позволит создать современный нейтронный центр коллективного пользования с уникальным высокоинтенсивным источником ультрахолодных нейтронов. В работе центра коллективного пользования могут принять участие многие институты и университеты России.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-72-10007.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зельдович Я.Б. // ЖЭТФ. 1959. Т. 36. С. 1952.
2. Владимирский В.В. // ЖЭТФ. 1960. Т. 39. С. 1062.
3. 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.
4. *Serebrov A.P., Lyamkin V.A.* // J. Neutron Res. 2022. V. 24. № 2. P. 145.
<https://www.doi.org/10.3233/JNR-220007>
5. А.с. 1178243 (СССР). Устройство для получения холодных и ультрахолодных нейтронов. / Ленинградский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова. *Алтарев И.С., Ефимов Н.А., Лобашев В.М., Серебров А.П.* // 1983. С. 4.
6. А.с. 1414197 (СССР). Устройство для получения холодных и ультрахолодных нейтронов. / Ленинградский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова. *Алтарев И.С., Ерозолимский Б.Г., Кирсанов С.Г., Кузнецов И.А., Серебров А.П.* // 1986. С. 4.
7. *Алтарев И.С., Боровикина Н.В., Булкин А.П., Весна В.А., Гарусов Е.А., Григорьева Л.А., Егоров А.И., Ерозолимский Б.Г., Ерыкалов А.И., Захаров А.А., Иванов С.Н., Кезерашвили В.Я., Кирсанов С.Г., Коломенский Э.А., Коноплев К.А., Кузнецов И.А., Лобашев В.М., Маслов Н.Ф., Митюхляев В.А., Окунев И.С., Песков Б.Г., Петров Ю.В., Пикулик Р.Г., Пирожков А.Н., Порсев Г.Д., Серебров А.П., Соболев Ю.В., Тальдаев Р.Р., Шустов В.А., Щебетов А.Ф.* // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 44. В. 6. С. 269.
8. *Steyerl A., Nagel H., Schreiber F.X., Steinhauser K.A., Gähler R., Gläser W., Ageron P., Astruc J.M., Drexel W., Gervais G., Mampé W.* // Phys. Lett. A. 1986. V. 116. № 7. P. 347.
[https://www.doi.org/10.1016/0375-9601\(86\)90587-6](https://www.doi.org/10.1016/0375-9601(86)90587-6)
9. *Swenson C.* // Phys. Rev. 1950. V. 79. № 4. P. 626.
<https://www.doi.org/10.1103/PhysRev.79.626>
10. *Ахуезер А.И., Померанчук И.Я.* // ЖЭТФ. 1945. Т. 16. С. 391.
11. *Golub R., Pendlebury J.M.* // Phys. Lett. A. 1977. V. 62. P. 337.
[https://www.doi.org/10.1016/0375-9601\(77\)90434-0](https://www.doi.org/10.1016/0375-9601(77)90434-0)
12. *McClintock P.V.* // Cryogenics. 1978. V. 18. P. 201.
[https://www.doi.org/10.1016/0011-2275\(78\)90002-4](https://www.doi.org/10.1016/0011-2275(78)90002-4)
13. *Yoshiki H., Nakai H., Gutmiedl E.* // Cryogenics. 2005. V. 45. P. 399.
<https://www.doi.org/10.1016/j.cryogenics.2005.01.007>
14. *Zimmer O.* // Europ. Phys. J. C. 2010. V. 67. P. 589.
<https://www.doi.org/10.1140/epjc/s10052-010-1327-1>
15. *Martin J., Franke B., Hatanaka K., Kawasaki S., Picker R.* // Nucl. Phys. News. 2021. V. 31. № 2. P. 19.
<https://www.doi.org/10.1080/10619127.2021.1881367>
16. *Piegsa F.M., Fertl M., Ivanov S.N., Kreuz M., Leung K.K.H., Schmidt-Wellenburg P., Soldner T., Zimmer O.* // Phys. Rev. C. 2014. V. 90. P. 015501.
<https://www.doi.org/10.1103/PhysRevC.90.015501>
17. *Leung K.K.H., Muhrer G., Hügler T., Ito T.M., Lutz E.M., Makela M., Morris C.L., Pattie Jr. R.W., Saunders A., Young A.R.* // J. Appl. Phys. 2019. V. 126. P. 224901.
<https://www.doi.org/10.1063/1.5109879>
18. *Kawasaki S., Okamura T.* // EPJ Web of Conf. 2019. V. 219. P. 10001.
<https://www.doi.org/10.1051/epjconf/201921910001>
19. *Ковальчук М.В., Воронин В.В., Григорьев С.В., Серебров А.П.* // Кристаллография. 2021. Т. 66. № 2. С. 191.
<https://www.doi.org/10.31857/S0023476121020065>
20. *Leung K.K.H., Ivanov S., Piegsa F.M., Simson M., Zimmer O.* // Phys. Rev. C. 2016. V. 93. P. 025501.
<https://www.doi.org/10.1103/PhysRevC.93.025501>
21. *Серебров А.П., Лямкин В.А., Прудников Д.В., Кешинцев К.О., Болдарев С.Т., Васильев А.В.* // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 2. С. 301.
<https://www.doi.org/10.21883/JTF.2017.02.44142.1941>
22. *Серебров А.П., Лямкин В.А., Фомин А.К., Онегин М.С.* // ЖТФ. 2022. Т. 92. Вып. 6. С. 327.
<https://www.doi.org/10.21883/JTF.2022.06.52522.21-22>
23. *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://www.doi.org/10.1016/0375-9474\(80\)90313-9](https://www.doi.org/10.1016/0375-9474(80)90313-9)
24. *Фомин А.К., Серебров А.П.* // ЖТФ. 2022. Т. 92. Вып. 2. С. 15.
<https://www.doi.org/10.21883/JTF.2022.02.52025.261-21>
25. *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., et al* // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 124. P. 081803.
<https://www.doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.081803>

Ultracold Neutron Source Based on Superfluid Helium for the PIK Reactor

V. A. Lyamkin¹ *, A. P. Serebrov¹, A. O. Koptuyhov¹, S. N. Ivanov¹, E. A. Kolomenskiy¹,
A. V. Vasilev¹

¹NRC “Kurchatov Institute” — PNPI, 188300, Gatchina, Russia

*e-mail: lyamkin_va@pnpi.nrcki.ru

A high density ultracold neutron source based on superfluid helium is going to be created in NRC “Kurchatov Institute” — PNPI for scientific research in fundamental physics. The ultracold neutron source is to be installed on the Horizontal Experimental Channel 4 (HEC-4), which is the biggest of available experimental channels of PIK Reactor Complex. Thermal neutron flux density at the channel outlet is expected to be around $3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. The new ultracold neutron source at the PIK Reactor is planned to achieve a density of $2.2 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ at ultracold neutron neutron guide exit and 200 cm^{-3} at neutron electric dipole moment spectrometer facility. The designed ultracold neutron guide system is going to support five experimental facilities alternately. At the initial stage the ultracold neutron source is planned to be equipped with already existing PNPI experimental plants: a neutron electric dipole moment spectrometer and neutron lifetime measuring facilities (with a gravitational and magnetic trap). A unique technological cryogenic complex with superfluid helium was designed and realized for this ultracold neutron source. Said complex includes equipment for achieving temperatures down to 1 K and removal of up to 60 W of heat from superfluid helium.

Keywords: neutron source, ultracold neutrons, superleak helium, neutron electric dipole moment, neutron lifetime.