

## Получение и наработка изотопно-чистого гелия-4 для источника ультрахолодных нейтронов

© В.А. Лямкин,<sup>1</sup> А.П. Серебров,<sup>1</sup> А.О. Коптюхов,<sup>1</sup> Д.В. Прудников,<sup>1</sup> Г.О. Бородинов,<sup>1</sup> А.А. Недоляк,<sup>1</sup> П.А. Хазов,<sup>1</sup> А.В. Сиротин,<sup>1,2</sup> А.Н. Салюк<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра „Курчатовский институт“, 188300 Гатчина, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет ИТМО, 197101 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 690041 Владивосток, Россия  
e-mail: lyamkin\_va@rpi.nrcsk.ru

Поступило в Редакцию 17 ноября 2024 г.

В окончательной редакции 6 февраля 2025 г.

Принято к публикации 9 февраля 2025 г.

В НИЦ „Курчатовский институт“-ПИЯФ на базе реакторного комплекса ПИК создается высокоинтенсивный источник ультрахолодных нейтронов для научных исследований в области физики фундаментальных взаимодействий. В источнике будет использоваться сверхтекучий гелий, который позволит достичь плотности ультрахолодных нейтронов  $2.2 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$ . Благодаря очистке (на три порядка) коммерческого гелия, используемого в качестве конвертора, удалось увеличить время хранения нейтронов в гелии с 3 до 39 с. Очистка гелия производилась с помощью фильтра из прессованного порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . В результате было наработано  $43 \text{ m}^3$  изотопно-чистого  $^4\text{He}$ .

**Ключевые слова:** ультрахолодные нейтроны, сверхтекучий гелий, электрический дипольный момент нейтрона, реактор ПИК, масс-спектрометрия.

DOI: 10.61011/JTF.2025.06.60477.423-24

### Введение

Ультрахолодные нейтроны (УХН, UCN) используются для изучения физики фундаментальных взаимодействий. Эти нейтроны, ввиду их малой энергии — порядка  $10^{-7} \text{ eV}$  — обладают уникальным свойством — их можно хранить в замкнутых материальных и/или магнитных ловушках [1,2]. Этот факт дает возможность изучать свойства самого нейтрона. В настоящее время с помощью УХН проводятся эксперименты по поиску электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона [3] и измерению времени жизни свободного нейтрона [4].

Точность экспериментов с использованием УХН во многом зависит от мощности источников этого типа нейтронов. За чуть более чем полувековую историю развития экспериментов с УХН было реализовано немало различных источников УХН, что позволило увеличить плотность нейтронов на 8 порядков [5]. Основным методом производства высоких потоков УХН было использование низкотемпературного конвертора: бериллия при 20 К, жидкого водорода или дейтерия при 20 К, твердого дейтерия при 5 К.

В настоящее время получение высоких плотностей УХН реализуется с использованием твердого дейтерия [6–7] или с использованием сверхтекучего гелия [8–10]. Твердый дейтерий используется преимущественно на так называемых spallation источниках ней-

тронов, главным образом из-за возможности охлаждения дейтерия при отсутствии теплопритоков от нейтронного пучка. Источник УХН на основе сверхтекучего гелия хорош для стационарных источников нейтронов, где в постоянном потоке нейтронов при отсутствии поглощения в сверхтекучем гелии можно генерировать большие плотности УХН.

В 2020 г. был дан старт реализации программы по созданию приборной экспериментальной базы для реакторного комплекса ПИК [11]. Реактор ПИК является одним из самых мощных в мире высокопоточных источников нейтронов. Максимальная проектная тепловая мощность реактора составляет 100 MW. На данном стационарном реакторе был предложен и в настоящее время реализовывается проект по созданию высокопоточного источника УХН на основе сверхтекучего гелия [12–14].

Хотя сверхтекучий гелий и является прозрачным для УХН, тем не менее в источнике присутствуют механизмы, приводящие к потерям нейтронов. В общем, время хранения УХН в камере источника можно оценить как  $\tau_{\text{UCN}}^{-1} = \tau_{4\text{He}}^{-1} + \tau_w^{-1} + \tau_n^{-1} + \tau_a^{-1}$ , где  $\tau_{4\text{He}}^{-1}$  — потери в сверхтекучем гелии из-за возбуждения фононов и ротонов,  $\tau_w^{-1}$  — потери при взаимодействии со стенками камеры источника,  $\tau_n^{-1}$  — потери, обусловленные временем жизни свободного нейтрона,  $\tau_a^{-1}$  — потери при поглощении нейтронов примесями, содержащимися в сверхтекучем гелии.

Согласно [15], для оценки влияния возможных взаимодействий при температуре ниже 1.95 К может быть использована зависимость  $\tau_{\text{He}}^{-1} = VT_{\text{He}}^7$ , где  $V \approx 7.6 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-7}$  — коэффициент учета двухфононного рассеяния. В таком случае, при  $T = 1.1 \text{ K}$   $\tau_{\text{He}}^{-1} = 68 \text{ s}$ .

Потери при взаимодействии со стенками камеры источника можно оценить как  $\tau_w = \tau_l / \delta$ , где  $\tau_l$  — время между двумя соударениями, а  $\delta = 3 \cdot 10^{-4}$  — вероятность потерь УХН при взаимодействии со стенкой камеры источника с напыленным  $^{58}\text{Ni}$ . Для нашей конфигурации камеры источника УХН получаем  $\tau_w = 0.032/3 \cdot 10^{-4} = 107 \text{ s}$ .

Определение времени жизни свободного нейтрона по-прежнему является предметом ряда экспериментов, в том числе и планируемых на РК ПИК. Тем не менее, согласно PDG, это значение составляет  $\tau_n = (878.4 \pm 0.5) \text{ s}$  [16].

Единственным источником поглощения нейтронов в сверхтекучем гелии является изотоп гелий-3, который естественным образом содержится в промышленном гелии марки А. Несмотря на то что доля изотопа  $^3\text{He}$  в коммерческом гелии очень мала — порядка  $10^{-6}$  процента, сечение поглощения УХН гелием-3 очень высоко. Все дело в том, что сечение любой ядерной реакции, вызванной достаточно медленными нейтронами, обратно пропорционально их скорости (это соотношение называется „законом  $1/v^2$ “). Таким образом, для УХН  $\sigma_{\text{abs}}(\text{UCN}) = (5300 \text{ barn} \cdot 2200 \text{ m/s}) / 6 \text{ m/s} = 1.94 \cdot 10^6 \text{ barn}$ , где 5300 barn — сечение поглощения для тепловых нейтронов, а 2200 и 6 m/s — скорости тепловых и ультрахолодных нейтронов соответственно.

Таким образом, потери на поглощение в  $^3\text{He}$  можно оценить как  $\tau_a^{-1} = N\sigma_{\text{abs}}(\text{UCN})v(\text{UCN})$ , где  $N = 2.5 \cdot 10^{28} R_{\text{He}}$  — ядерная концентрация  $^3\text{He}$  в камере,  $[m^{-3}]$ , а  $R_{\text{He}}$  — доля гелия-3 в смеси (абсолютная). Отсюда имеем:  $\tau_a = 3.4 \text{ s}$  при  $R = 10^{-8}$ ;  $\tau_a = 344 \text{ s}$  при  $R = 10^{-10}$ ;  $\tau_a = 34000 \text{ s}$  при  $R = 10^{-12}$ .

Суммируя все вышеописанное, имеем следующую оценку времени жизни УХН в камере источника УХН:

- $\tau_{\text{UCN}} = 3 \text{ s}$  для  $R = 10^{-8}$ ;
- $\tau_{\text{UCN}} = 35 \text{ s}$  для  $R = 10^{-10}$ ;
- $\tau_{\text{UCN}} = 40 \text{ s}$  для  $R = 10^{-12}$ .

Становится очевидным, что использовать природный гелий для производства УХН нельзя, так как наличие изотопа гелий-3 в нем ведет к потере большей части нейтронов. Для эффективной работы источника УХН коммерческий гелий должен быть очищен от  $^3\text{He}$  на 2–4 порядка от исходной величины. Дальнейшая очистка гелия не имеет большого практического смысла, так как на передний план выходят потери, связанные с нагревом УХН в гелии при температуре 1.1 К.

## 1. Сверхтекучий фильтр superleak

Коммерческий гелий, представленный на рынке, содержит в себе два изотопа:  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$ . Эти два изотопа

имеют крайне низкие точки кипения при атмосферном давлении: 3.19 К для  $^3\text{He}$  и 4.22 К для  $^4\text{He}$ . В целом, в жидкой фазе они проявляют себя как обыкновенные жидкости с малой вязкостью, но при температуре 2.17 К жидкий  $^4\text{He}$  претерпевает переход в так называемое сверхтекучее состояние. Стоит отметить, что гелий-3 тоже способен переходить в сверхтекучее состояние, однако для него теплофизические параметры перехода более труднодостижимы: при давлении 34 кПа переходу соответствует температура ниже 2.6 мК. Таким образом, при температурах 1–2 К в сверхтекучем состоянии находится только изотоп гелий-4, в то время как изотоп гелий-3 находится в нормальном состоянии. На этом факте основан метод изотопной очистки гелия с помощью так называемого сверхтекучего фильтра (superleak) [17].

Сверхтекучий фильтр представляет собой стальной цилиндр с прессованным ультрадисперсным порошком из оксида алюминия фракцией 50 nm. При этом фильтр получается настолько плотным, что пропускает сквозь себя только сверхтекучую компоненту гелия. Таким образом, установив фильтр перед некой емкостью, и направив поток гелия при температуре 1–2 К сквозь него, мы можем заполнять емкость исключительно изотопно-чистым гелием-4 (ИЧГ).

Сверхтекучий фильтр был изготовлен путем послышной прессовки малых порций порошка внутрь толстостенного цилиндрического корпуса из нержавеющей стали 12X18H10T внешним диаметром 22 mm и высотой 79 mm. Прессовка порошка тонкими слоями (высотой 2–3 mm) в сочетании с пошаговым контролем плотности в слое преследовала цель обеспечить однородность плотности фильтра по высоте. Диаметр фильтра в нашем случае составлял 8 mm.

Типичная операция по запрессовке одного слоя выглядит следующим образом: производится замер массы и высоты забитого фильтра, фильтр размещается на поддон и засыпается порошком  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , порошок прессуется гидравлическим прессом с усилием в три тонны (рис. 1), производится замер массы и высоты фильтра после запрессовки.

Данный цикл повторяется до тех пор, пока корпус не будет полностью заполнен порошком. В результате изготовления сверхтекучего фильтра было произведено 24 операции по прессовке в нем порошка из оксида алюминия. Средняя плотность слоев оксида алюминия в сверхтекучем фильтре составила  $(2.39 \pm 0.08) \text{ g/cm}^3$ .

## 2. Технологический комплекс для наработки и хранения ИЧГ-4

Принципиальная схема и фото экспериментальной установки по наработке ИЧГ приведены на рис. 2,3 соответственно. Двухлитровая емкость 1 со сверхтекучим фильтром 2, установленным с использованием индиевого уплотнения, помещена внутрь гелиевой ванны криостата 3. Гелиевая ванна 3 окружена тепловым



Рис. 1. Процесс прессовки одного слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

экраном 4, заполненным жидким азотом. Излучательный теплоприток к жидкому гелию от теплой крышки криостата снижается за счет многослойной теплоизоляции 5. В емкость и ванну криостата введены контрольно-измерительные приборы (КИП) в составе гелиевого NbTi уровнемера AMI и термодатчика CERNOX CX-1030-AA — 6 и 7 соответственно. Помимо КИП, в емкости установлен нагреватель — резистор ТВО с сопротивлением  $100\ \Omega$ . Подача жидкого гелия и отвод паров осуществляется с помощью криогенного трубопровода 8. К криостату подключены два турбомолекулярных насоса: для откачки вакуумного кожуха криостата 9 и для откачки рабочих гелиевых объемов 10. Снижение температуры жидкого гелия с 4.2 до 1.3 К происходит за счет откачки паров гелия с помощью системы вакуумных насосов EDWARDS HV30000 11 общей производительностью 3 g/s. Для сбора и хранения ИЧГ к системе подключены четыре ресивера РД-10 объемом  $10\ \text{m}^3$  каждый 12. Перед началом работы ресивера откачаны до давления 0.2 Па. На схеме также представлены основные ручные вентили: V1, V2, V3, V4 и датчики давления P1, P2, P3, P4.

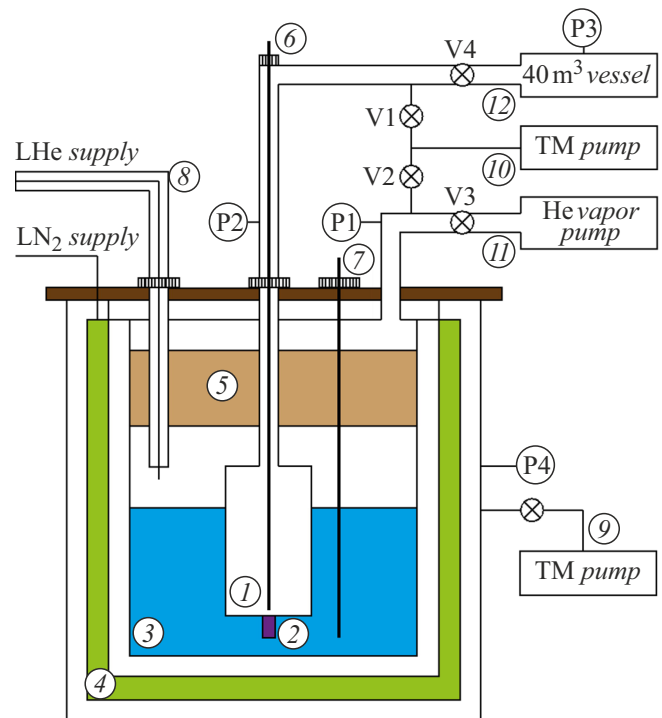


Рис. 2. Принципиальная схема установки (пояснения в тексте).

В целом, суть заключается в том, что предварительно откачанная емкость 1 находится в ванне со сверхтекучим гелием 3 и сквозь сверхтекучий фильтр заполняется изотопно-чистым гелием-4. В дальнейшем этот гелий можно испарить и направить в ресиверы РД-10.

Далее по тексту емкость с изотопно-чистым гелием-4 1 будет называться SOURCE, а ванна криостата 3 — HEX.

### 3. Получение ИЧГ

#### 3.1. Подготовительные работы

Предварительно ресиверы РД-10, SOURCE, HEX и сообщающиеся трубопроводы откачиваются до  $P_2 = P_3 = 0.2\ \text{Pa}$  с помощью турбомолекулярного насоса 10. Вакуумный кожух криостата откачивается до  $P_4 = 0.02\ \text{Pa}$ . Далее в азотный экран заливается и в течение всего эксперимента поддерживается на максимальном уровне жидкий азот, обеспечивающий охлаждение теплового экрана криостата до 80 К. После остановки откачки HEX/SOURCE (закрыв V1/V2) в емкость HEX заливается 301 жидкого гелия.

#### 3.2. Заполнение ресиверов до $P = 90\ \text{Pa}$

При включении системы откачки паров гелия 11, температура гелия в HEX снижается до 1.3 К. При переходе через  $\lambda$ -точку (при  $T = 2.71\ \text{K}$ ) в HEX начинает появляться компонента сверхтекучего гелия. Сверх-



Рис. 3. Емкость SOURCE (слева) и криостат для получения ИЧГ в работе (справа).

текущий гелий, проходя сквозь superleak, попадает в сильно откачанную емкость с давлением ниже давления насыщенных паров гелия. Как следствие, этот гелий мгновенно испаряется и его пары охлаждают термодатчик, который находится непосредственно на выходе сверхтекучего фильтра. Это фиксируется температурным датчиком в емкости SOURCE — снижение с 80 до 2–4 К. Через 40 min температура в HEX фиксируется на уровне 1.23 К, и уровень показывает прирост уровня жидкого гелия в SOURCE. Давление в SOURCE в это время составляет  $P_2 = 90$  Pa, что соответствует давлению насыщенных паров гелия при температуре 1.21 К. Таким образом, в момент, когда давление в ресиверах сравнивается с давлением насыщенных паров при текущей температуре гелия, начинается процесс накопления жидкого гелия в SOURCE.

### 3.3. Заполнение ресиверов до $P = 52.5$ kPa

Согласно теоретическим представлениям, подтвержденным многочисленными экспериментами, протекание гелия сквозь сверхтекучий фильтр возможно под действием градиента температуры (термомеханический

эффект). При малых градиентах производительность фильтра описывается линейной зависимостью потока массы от выделяемой мощности  $m = \frac{Q}{ST}$ , где  $m$  — массовый поток,  $Q$  — выделяемая мощность,  $T$  — температура жидкого гелия,  $S$  — его энтропия при температуре  $T$ . При достижении некоторого критического значения  $Q$ , зависящего от индивидуальных характеристик фильтра, наступает закритический (турбулентный) режим. При этом наблюдается увеличение скорости потока  $m$  с ростом  $Q$ , связанное с достижением критической скорости сверхтекучей компоненты в порах фильтра.

После того как в SOURCE начал появляться жидкий гелий, на нагреватель в емкости подается тепловая мощность 1–12.5 W. Под действием термомеханического эффекта гелий из HEX перетекает в SOURCE, где вследствие этой же тепловой нагрузки испаряется и заполняет ресиверы РД-10. Поток гелия в нашем случае не зависит от величины тепловой нагрузки — таким образом мы имеем дело с закритическим режимом работы superleak. Поток гелия сквозь данный фильтр составил 1.25 g/s, что при диаметре фильтра 8 mm соответствует удельному потоку 2.5 g/(cm<sup>2</sup>·s).

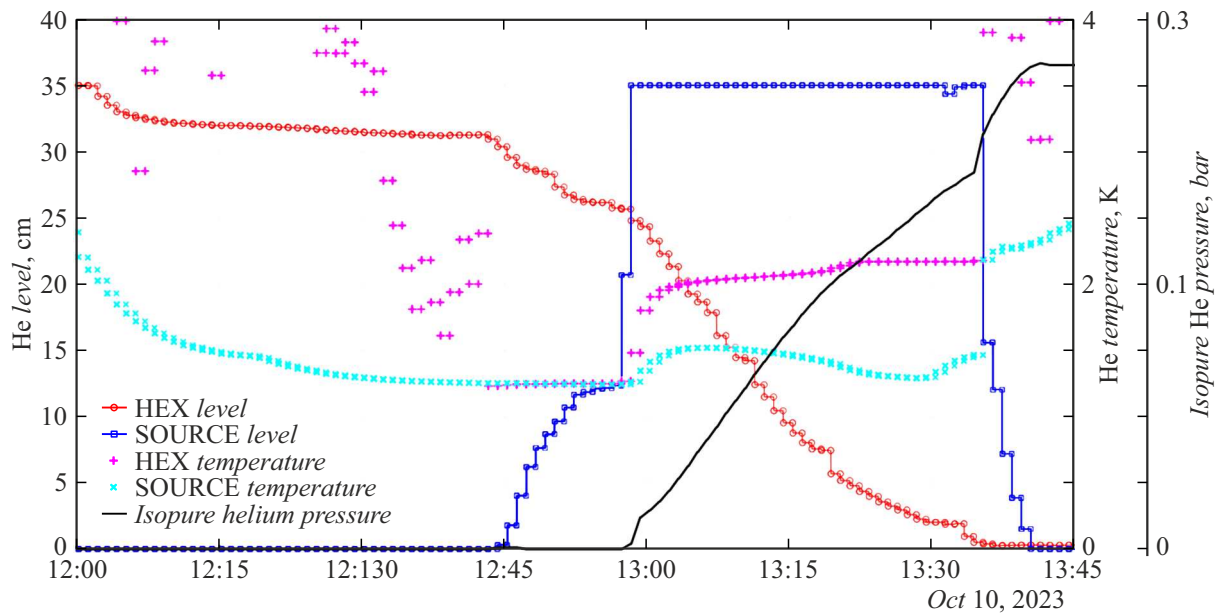


Рис. 4. Первый ИЧГ в ресивере РД-10.

График работы установки в течение первого запуска и наработки первого ИЧГ приведены на рис. 4. Показания от уровнемеров ограничены длиной сенсора — 35 см.

В соответствии с моделью Ленгмюра поток газа при конденсации определяется выражением  $G_{con} = \frac{N_a P}{\sqrt{2\pi MRT}} AkT$ , где  $P$  — давление над поверхностью жидкости,  $A$  — площадь поверхности гелия,  $T$  — температура гелия,  $M$  — молярная масса гелия,  $N_a$ ,  $k$ ,  $R$  — физические константы. Поток испарившегося газа равняется  $G_{ev} = r \cdot Q_{heater}$ , где  $r$  — теплота испарения гелия, а  $Q$  — мощность на нагревателе. Для заполнения ресиверов необходимо, чтобы  $G_{ev} > G_{con}$ , иначе происходит обратный процесс — конденсация гелия из ресиверов в SOURCE. При заполнении ресиверов растет давление  $P_2$  в системе, и для дальнейшего испарения гелия необходимо повышать мощность на нагревателе. Отвод тепла от SOURCE происходит через ограниченную площадь поверхности в HEX, где это тепло отводится откачкой паров гелия. Соответственно повышение мощности нагревателя приводит к повышению температуры гелия в SOURCE. При определенной мощности температура поднимается выше  $\lambda$ -точки, что приводит к „закрытию“ сверхтекучего фильтра — в гелии отсутствует сверхтекучая компонента. В нашем случае это произошло при  $Q = 12.5$  W и  $P = 52.5$  kPa.

### 3.4. Заполнение ресиверов до $P = 107.5$ kPa

При достижении давления в ресиверах значения  $P = 52.5$  kPa оказались невозможными одновременная подача гелия из HEX в SOURCE и испарение этого гелия из SOURCE в ресиверы. В связи с этим было

решено перейти к двухэтапному режиму заполнения ресиверов:

1) ресиверы РД-10 изолируются от SOURCE путем закрытия V4. Гелий из HEX заливается в SOURCE с помощью термомеханического эффекта при малых  $Q$  на нагревателе;

2) открывается V4 и повышается мощность на нагревателе до  $Q = 12.5$  W. Гелий начинает испаряться из SOURCE в ресиверы. Температура гелия в SOURCE поднимается выше 2.71 K — фильтр superleak „закрывается“, гелий из HEX больше не поступает в SOURCE;

3) возвращаемся к первому пункту: закрываем V4 и снижаем тепловую нагрузку на нагревателе. Температура в SOURCE опускается ниже  $\lambda$ -точки, фильтр superleak „открывается“, гелий из HEX поступает в SOURCE.

В результате девяти таких итераций ресиверы были заполнены изотопно-чистым гелием до давления  $P_3 = 107.5$  kPa. Общее количество ИЧГ составляет  $43$  m<sup>3</sup>. Последние 4 итерации (заполнение/испарение гелия в/из SOURCE) приведены на рис. 5.

В нашем случае отсутствовала возможность пополнять гелий в HEX в процессе заполнения ресиверов. Для заливки используется штатный гелиевый ожижитель Linde L-280, работающий при давлении 0.12 MPa, в то время как во время заполнения ресиверов в HEX поддерживается давление насыщенных паров гелия порядка  $P_2 = 200$  Pa. Таким образом, после того, как гелий в HEX заканчивался, мы останавливали работу, закрывали ресиверы и начинали сначала: откачивали SOURCE и HEX, заливали гелий в HEX. Для получения  $43$  m<sup>3</sup> ИЧГ понадобилось 6 таких итераций. Суммарно в HEX было залито 176 l жидкого гелия.

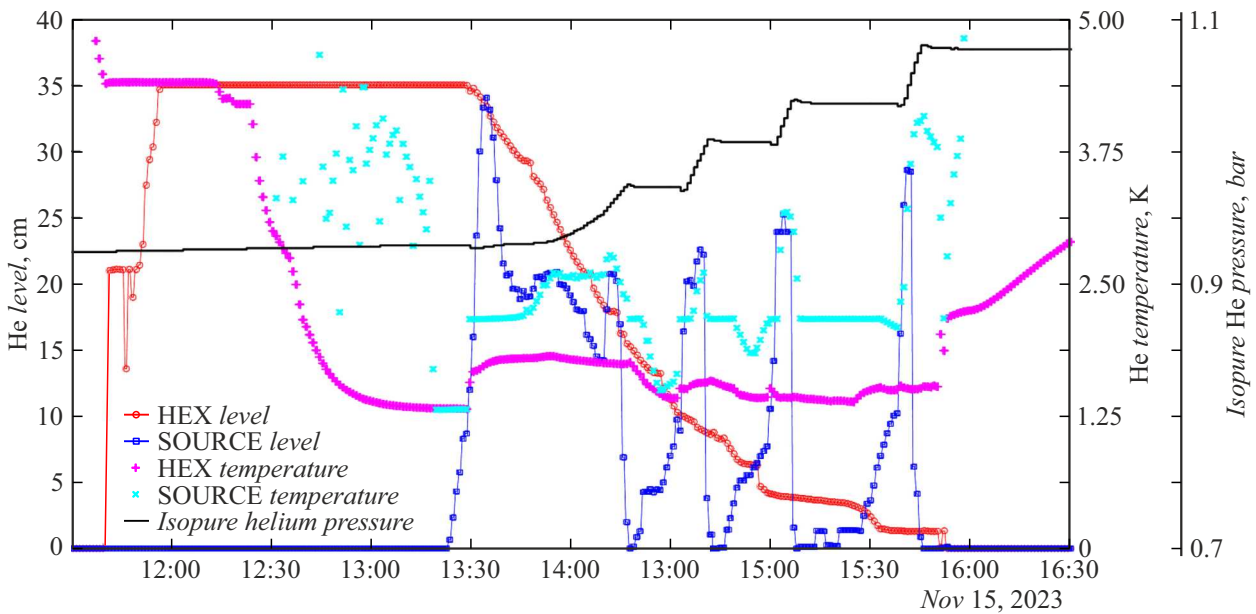


Рис. 5. Процесс заполнения ресиверов ИЧГ до  $P = 1.075$  bar.

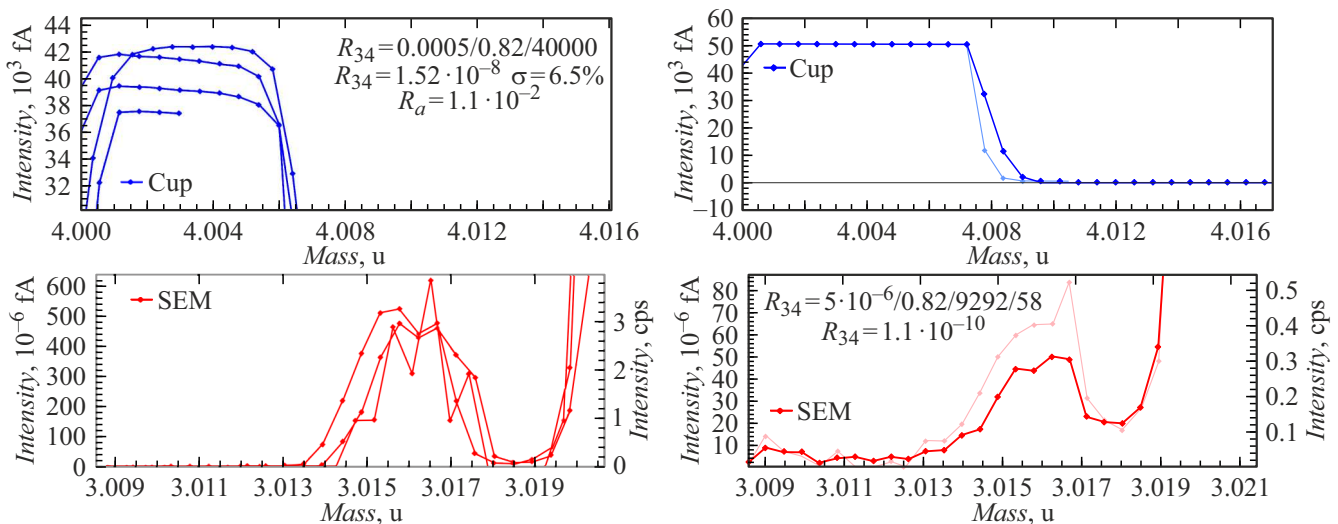


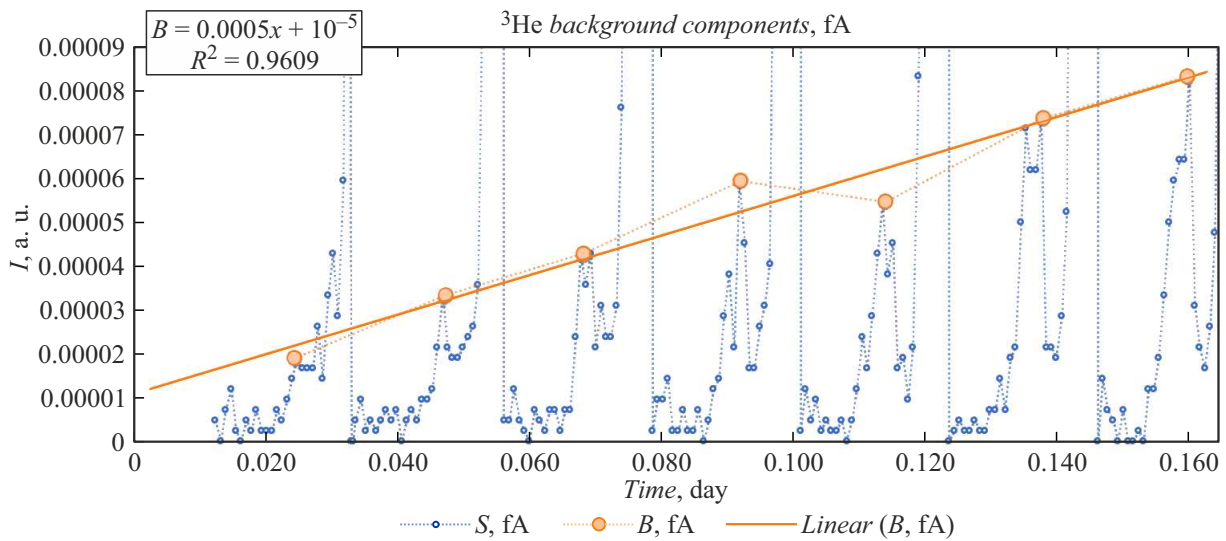
Рис. 6. Анализ гелия на масс-спектрометре HELIX SFT (слева — КГ, справа — ИЧГ).

#### 4. Анализ полученного в результате работы гелия

Анализ ИЧГ был произведен в ФГБУ „Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева“ на масс-спектрометре HELIX SFT Static Vacuum Mass Spectrometer (Thermo Scientific, USA). Были сняты зависимости тока детектора Фарадея (ДФ) и тока электронного умножителя (ЭУ) в процессе измерения проб коммерческого гелия (КГ) и ИЧГ (рис. 6). Цифры на графике демонстрируют отношение пиков  $R_{34} = {}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  с учетом эффективности регистрации ЭУ ионов  ${}^3\text{He}$   $\varepsilon = 0.82$ . Для КГ получено изотопное отношение  $R_{34} = 1.52 \cdot 10^{-8}$

( $\sigma = 6.5\%$ ), что соответствует атмосферному отношению  $R_a = ({}^3\text{He}/{}^4\text{He})/({}^3\text{He}/{}^4\text{He})_{\text{atm}} = 0.011$ .

Для ИЧГ (рис. 6, справа) показана суммарная кривая усреднения нескольких пиков (толстая линия) и текущее сканирование (тонкая светлая линия). Для повышения чувствительности проба ИЧГ была увеличена на порядок по объему, а для измерения низких скоростей счета ионов  ${}^3\text{He}$  время интегрирования составляло 67 s при очень большом общем времени анализа пробы — более 240 min. Каждый из этих параметров и минимальный фон и очень большое время работы в статическом режиме обеспечиваются уникальными характеристиками нашего МС. Дальнейшее увеличение размера пробы ИЧГ приводит к полному перекрытию пика  ${}^3\text{He}^+$  с

Рис. 7. Временной ход измерения  $^3\text{He}$  ИЧГ.

центром масс  $3.016\text{ u}$  и левым краем растущего комбинированного пика ( $\text{HD}^+ + \text{H}_3^+$ ) и потере разрешения.

Ток ионов  $^4\text{He}^+ = 9292 \cdot 58 \approx 539\,000\text{ fA}$  из-за перегрузки ДФ при токе более  $50\,000\text{ fA}$  оценен по повторному измерению  $1/58$  доли гелия, содержавшегося в масс-анализаторе.

Временной ход измерения  $^3\text{He}$  сверхчистого гелия (рис. 7) показывает, что практически весь  $^3\text{He}$ , зарегистрированный в МС, возникает в процессе натекания при измерении, и вероятное значение тока  $^3\text{He}$  в пробе ИЧГ на момент начала напуска в МС составляет  $\sim 10 \cdot 10^{-6}\text{ fA}$ , а изотопное отношение  $R_{34} = 10^{-5}/539\,000/0.82 = 2.26 \cdot 10^{-11}$  (в 5 раз ниже тока усредненного сигнала  $^3\text{He} = 50 \cdot 10^{-6}\text{ fA}$  на рис. 6, которому соответствует величина  $R_{34} = 1.1 \cdot 10^{-10}$ ). Более подробно наша масс-спектрометрическая методика измерения низких изотопных отношений гелия будет описана в отдельной статье, которая готовится к печати.

Таким образом, содержание  $^3\text{He}$  в очищенном гелии составляет  $2 \cdot 10^{-11}$ , что дает  $\tau_a = 1718\text{ s}$ , что существенно выше времени жизни свободного нейтрона. Время жизни УХН, в свою очередь, достигнет значения  $\tau_{\text{UCN}} = 38.6\text{ s}$ .

## Заключение

Новый источник УХН для реакторного комплекса ПИК на основе сверхтекучего гелия потребовал разработки технологии и создания комплекса для очистки коммерческого гелия от примеси изотопа  $^3\text{He}$ . В качестве технологии была использована особенность протекания только сверхтекучей компоненты гелия сквозь сверхтекучий фильтр из прессованного порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Очистка гелия проводилась при температуре в  $1.3\text{ K}$  — существенно большей температуры  $2.6\text{ mK}$ , при которой  $^3\text{He}$  начинает переходить в сверхтекучую фазу.

Сверхтекучий фильтр из прессованного порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  показал высокую степень очистки коммерческого гелия от изотопа гелий-3. С его помощью было подготовлено и закачено  $43\text{ m}^3$  изотопно-чистого  $^4\text{He}$ . Проведенный анализ гелия из ресиверов на масс-спектрометре показал, что величина  $^3\text{He}$  была снижена на 3 порядка: с  $10^{-8}$  до  $2 \cdot 10^{-11}$ . Время жизни нейтронов в очищенном гелии оценивается на уровне 39 s, в то время как в коммерческом гелии это значение не превышает 3 s.

Этот изотопно-очищенный  $^4\text{He}$  будет использоваться для нового источника УХН на основе сверхтекучего гелия на реакторном комплексе ПИК. Изотопная чистота гелия позволит существенно увеличить время жизни нейтрона в источнике и достичь рекордных плотностей УХН в экспериментальной установке — вплоть до  $200\text{ cm}^{-3}$ .

Сверхтекучий фильтр, изготовленный по нашей технологии, и комплекс по изотопной очистке гелия будут включены в технологический комплекс источника УХН на РК ПИК для пополнения запаса  $^4\text{He}$  в будущем.

## Благодарности

Коллектив авторов выражает благодарность сотрудникам Института физических проблем им. Капицы К.О. Кешишеву и С.Т. Болдареву за советы и обсуждение технологии по очистке гелия с использованием сверхтекучего фильтра.

## Финансирование работы

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

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

**Список литературы**

- [1] Я.Б. Зельдович. *ЖЭТФ*, **36** (6), 1952 (1959). [Ya.B. Zeldovich. *Sov. Phys. JETP*, **9** (6), 1389 (1959).
- [2] В.В. Владимирский. *ЖЭТФ*, **12** (4), 740 (1961). [V.V. Vladimirovskii. *Sov. Phys. JETP*, **12** (4), 740 (1961).]
- [3] C. Abel, S. Afach, N.J. Ayres, C.A. Baker, G. Ban, G. Bison, K. Bodek, V. Bondar, M. Burghoff, E. Chanel, Z. Chowdhuri, P.-J. Chiu, B. Clement, C.B. Crawford, M. Daum, S. Emmenegger, L. Ferraris-Bouchez, M. Fertl, P. Flaux, B. Franke, A. Fratangelo, P. Geltenbort, K. Green, W.C. Griffith, M. van der Grieten, Z.D. Grujić, P.G. Harris, L. Hayen, W. Heil, R. Henneck, V. Hélaine, N. Hild, Z. Hodge, M. Horras, P. Iaydjiev, S.N. Ivanov, M. Kasprzak, Y. Kermaidic, K. Kirch, A. Knecht, P. Knowles, H.-C. Koch, P.A. Koss, S. Komposch, A. Kozela, A. Kraft, J. Krempel, M. Kuźniak, B. Lauss, T. Lefort, Y. Lemièrre, A. Leredde, P. Mohanmurthy, A. Mtchedlishvili, M. Musgrave, O. Naviliat-Cuncic, D. Pais, F.M. Piegsa, E. Pierre, G. Pignol, C. Plonka-Spehr, P.N. Prashanth, G. Quémener, M. Rawlik, D. Rebreyend, I. Rienäcker, D. Ries, S. Roccia, G. Rogel, D. Rozpedzik, A. Schnabel, P. Schmidt-Wellenburg, N. Severijns, D. Shiers, R. Tavakoli Dinani, J.A. Thorne, R. Virost, J. Voigt, A. Weis, E. Wursten, G. Wyszynski, J. Zejma, J. Zenner, G. Zsigmond. *Phys. Rev. Lett.*, **124** (8), 081803 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.081803
- [4] F.M. Gonzalez, E.M. Fries, C. Cude-Woods, T. Bailey, M. Blatnik, L.J. Broussard, N.B. Callahan, J.H. Choi, S.M. Clayton, S.A. Currie, M. Dawid, E.B. Dees, B.W. Filippone, W. Fox, P. Geltenbort, E. George, L. Hayen, K.P. Hickerson, M.A. Hoffbauer, K. Hoffman, A.T. Holley, T.M. Ito, A. Komives, C.-Y. Liu, M. Makela, C.L. Morris, R. Musedinovic, C. O'Shaughnessy, R.W. Pattie Jr., J. Ramsey, D.J. Salvat, A. Saunders, E.I. Sharapov, S. Slutsky, V. Su, X. Sun, C. Swank, Z. Tang, W. Uehrich, J. Vanderwerp, P. Walstrom, Z. Wang, W. Wei, A.R. Young (UCN $\tau$  Collaboration). *Phys. Rev. Lett.*, **127** (16), 162501 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.162501
- [5] A.P. Serebrov, V.A. Lyamkin. *J. Neutron Res.*, **24** (2), 145 (2022). DOI: 10.3233/JNR-220007
- [6] B. Lauss, B. Blau. *Sci. Post Phys. Proceed.*, **5**, 004 (2021). DOI: 10.21468/SciPostPhysProc.5.004
- [7] T.M. Ito, E.R. Adamek, N.B. Callahan, J.H. Choi, S.M. Clayton, C. Cude-Woods, S. Currie, X. Ding, D.E. Fellers, P. Geltenbort, S.K. Lamoreaux, C.Y. Liu, S. MacDonald, M. Makela, C.L. Morris, R.W. Pattie Jr., J.C. Ramsey, D.J. Salvat, A. Saunders, E.I. Sharapov, S. Sjue, A.P. Sproy, Z. Tang, H.L. Weaver, W. Wei, A.R. Young. *Phys. Rev. C*, **97** (1), 012501 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevC.97.012501
- [8] K.K.H. Leung, G. Muhler, T. Hügle, T.M. Ito, E.M. Lutz, M. Makela, C.L. Morris, R.W. Pattie, A. Saunders, A.R. Young. *J. Appl. Phys.*, **126** (22), (2019).
- [9] O. Zimmer, R. Golub. *Phys. Rev. C*, **92**, 015501 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevC.92.015501
- [10] J. Martin, B. Franke, K. Hatanaka, S. Kawasaki, R. Picker. *Nucl. Phys. News*, **31** (2), 19 (2021). DOI: 10.1080/10619127.2021.1881367
- [11] М.В. Ковальчук, В.В. Воронин, С.В. Григорьев, А.П. Серебров. *Кристаллография*, **66** (2), 191 (2021). DOI: 10.31857/S00234761210200065 [M.V. Kovalchuk, V.V. Voronin, S.V. Grigoryev, A.P. Serebrov. *Crystallography Reports*, **66** (2), 195 (2021). DOI: 10.1134/S10637745210200061]
- [12] А.П. Серебров, В.А. Лямкин, А.К. Фомин, М.С. Онегин. *ЖТФ*, **92** (6), 899 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.06.52522.21-22. [A.P. Serebrov, V.A. Lyamkin, A. K. Fomin, M.S. Onegin. *Tech. Phys.*, **67** (6), 763 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.06.54425.21-22]
- [13] А.П. Серебров, А.К. Фомин, М.С. Онегин, А.Г. Харитонов, Д.В. Прудников, В.А. Лямкин, С.А. Иванов. *Письма в ЖТФ*, **40** (1), 24 (2014). [A.P. Serebrov, A.K. Fomin, M.S. Onegin, A.G. Kharitonov, D.V. Prudnikov, V.A. Lyamkin, S.A. Ivanov. *Tech. Phys. Lett.*, **40** (1), 10 (2014). DOI: 10.1134/S1063785014010118]
- [14] А.П. Серебров. *УФН*, **185** (11), 1179 (2015). DOI: 10.3367/UFNr.0185.201511c.1179 [A.P. Serebrov. *Phys.-Usp.*, **58** (11), 1074 (2015). DOI: 10.3367/UFNe.0185.201511c.1179]
- [15] K.K.H. Leung, S. Ivanov, F.M. Piegsa, M. Simson, O. Zimmer. *Phys. Rev. C*, **93** (2), 025501 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevC.93.025501
- [16] ParticleDataGroup. *Review of Particle Physics* (Oxford University Press, Oxford, 2022)
- [17] H. Yoshiki, H. Nakai, E. Gutmiedl. *Cryogenics*, **45** (6), 399 (2005). DOI: 10.1016/j.cryogenics.2005.01.007