

УДК 621.56

Система очистки гелия на базе очистителя KDHPS-CC для источника ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия

Канд. физ.-мат. наук В. А. ЛЯМКИН¹, д-р физ.-мат. наук А. П. СЕРЕБРОВ,
Г. О. БОРОДИНОВ, А. О. КОПТЮХОВ, А. А. НЕДОЛЯК,
Д. В. ПРУДНИКОВ, А. В. СИРОТИН
НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ
¹E-mail: lyamkin_va@pnpi.nrcki.ru

Настоящая работа посвящена оценке работы гелиевого очистителя KDHPS-CC китайской фирмы CSIC Pride Cryogenics. На базе НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ идут работы по созданию источника ультрахолодных нейтронов (УХН) на основе сверхтекучего гелия для реактора ПИК. Для штатной работы источника УХН необходимо поддержание чистоты гелия в системе на уровне 99,999%, которое осуществляется включением в технологический комплекс системы очистки гелия. В настоящее время, в условиях введенных санкций, единственно доступным для приобретения является оборудование китайского производства. Проведенные испытания гелиевого очистителя показали существенное занижение реальной производительности очистителя от значений, указанных производителем в паспорте. Паспортная производительность очистителя была достигнута только при чистоте исходного гелия выше 99,5%. Результаты, полученные в результате запуска очистителя KDHPS-CC показывают, что 1% примеси в гелии снижает реальную производительность очистителя на 10%.

Ключевые слова: источник ультрахолодных нейтронов, реактора ПИК, сверхтекучий гелий, очистка гелия, криокуллер.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 13.03.2024, одобрена после рецензирования 16.05.2024, принята к печати 30.05.2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-3-10

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Лямкин В. А., Серебров А. П., Бородинов Г. О., Коптюхов А. О., Недоляк А. А., Прудников Д. В., Сиротин А. В.

Система очистки гелия на базе очистителя KDHPS-CC для источника ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия. // Вестник Международной академии холода. 2024. № 3. С. 3–10. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-3-10

Helium purification system based on KDHPS-CC purifier for an ultracold neutron source based on superfluid helium

Ph. D. V. A. LYAMKIN¹, D. Sc. A. P. SEREBROV,
G. O. BORODINOV, A. O. KOPTYUKHOV, A. A. NEDOLYAK, D. V. PRUDNIKOV, A. V. SIROTIN

NRC «Kurchatov Institute» — PNPI

¹E-mail: lyamkin_va@pnpi.nrcki.ru

The article concerns an assessment of the KDHPS-CC helium purifier performance by the Chinese company CSIC Pride Cryogenics. The PIK reactor at the Kurchatov Institute (Moscow, Russia) is going to be equipped with a high-flux ultracold neutron source for fundamental physics research. For normal operation of the UCN source, it is necessary to maintain the purity of helium in the system at the level of 99.999%, which made by including a helium purification system in the technological complex. Currently, under the conditions of the sanctions, the only equipment available for purchase is the one from the Republic of China. The tests of the helium purifier showed a significant underestimation of the real performance of the purifier from the values declared by the manufacturer. The performance of the purifier was achieved only when the purity of the initial helium was above 99.5%. Results obtained from running the KDHPS-CC purifier show that 1% impurity in helium reduces the actual performance of the purifier by 10%.

Keywords: ultracold neutron source, PIK reactor, superfluid helium, helium purification, cryocooler.

Article info:

Received 13/03/2024, approved after reviewing 16/05/2024, accepted 30/05/2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-3-10

Article in Russian

For citation:

Lyamkin V. A., Serebrov A. P., Borodinov G. O., Koptuykhov A. O., Nedolyak A. A., Prudnikov D. V., Sirotin A. V. Helium purification system based on KDHPS-CC purifier for an ultracold neutron source based on superfluid helium. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. No 3. p. 3-10. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-3-10

Введение

В 2020 г. был дан старт реализации программы по созданию приборной экспериментальной базы для реакторного комплекса ПИК [1]. Одним из главных приборных комплексов в этой программе стал новый источник ультрахолодных нейтронов (ИУХН) на основе сверхтекучего гелия для проведения исследований в области физики фундаментальных взаимодействий.

Идея источника УХН с использованием сверхтекучего ^4He (He-II) в качестве конвертера была теоретически проанализирована Ахиезером и Померанчуком еще в 1945 г. [2], что, возможно, вдохновило Зельдовича в 1959 г. на рассмотрение этой полностью свободной

от поглощения нейтронов среды для образования УХН [3]. Однако, из-за сложности поддержания этой низкотемпературной жидкости вблизи активной зоны ядерного реактора эта идея не получила немедленного дальнейшего развития в СССР [4]. В настоящее время, с имеющимися криогенными и вакуумными технологиями, разработки источников УХН на основе He-II проводятся в различных странах, включая Канаду [5], Францию [6], США [7] и Японию [8]. В то время как принцип образования УХН путем конверсии холодных нейтронов в He-II был экспериментально подтвержден в нескольких лабораториях в масштабе прототипов, следующим важным шагом будет его реализация в условиях высокопоточных нейтронного реактора. Текущие разработки, проводимые в ПИЯФ, направлены на достижение этой цели [9]–[11].

Источник УХН будет установлен на самый большой из имеющихся экспериментальных каналов реакторного комплекса ПИК — горизонтальный экспериментальный канал ГЭК4, диаметром 220 мм. В нише разборной биологической защиты сделан канал диаметром 1000 мм, повторяющий геометрию вакуумного модуля источника УХН. Носовая часть источника УХН вплотную прилегает к фланцу канала ГЭК-4. В носовой части размещен графитовый замедлитель, жидкодейтериевый предзамедлитель и конвертер нейтронов из сверхтекучего гелия.

Расчетным методом были получены плотности потоков нейтронов и теплопритоки к основным элементам источника УХН [12]. Результаты расчетов по оптимизации сведены в табл. 1 и приведены на рис. 1.

Для реализации данного проекта в ПИЯФ было закуплено и введено в эксплуатацию современное криогенное и вакуумное оборудование. В том числе гелиевый ожижитель производительностью 100 л/ч (Linde L-280), гелиевый рефрижератор мощностью 3000 Вт при 20 К (Linde TCF-50) и система вакуумной откачки паров гелия, обеспечивающая откачку 3 г гелия в секунду при давлении 50 Па [13]. Работа криогенного комплекса организована по замкнутому контуру. Для повторного ожижения гелия его чистота должна быть не менее 99,999%. С этой целью в комплекс также были включены два гелиевых очистителя KDHP-CC фирмы CSIC Pride Cryogenics производительностью 10 м³/ч при отношении времени очистки к времени регенерации 50 %.

Целью данной работы ставится расчет и оптимизация бесперебойной работы гелиевого контура источника УХН при работе реактора на мощности 100 МВт. Рабочий цикл кампании реактора ПИК составляет 25 сут. На это время необходимо обеспечить наличие сверхтекучего гелия в камере источника УХН в объеме 35 литров.

Гелиевый контур источника УХН на РК ПИК

Работа криогенного гелиевого контура источника УХН показана на рис. 2. Газообразный гелий комнатной температуры из двух ресиверов, с суммарным объемом 40 м³, поступает на сжатие в винтовой компрессор KAESER

Таблица 1
Параметры источника УХН для РК ПИК
на мощности 100 МВт

Table 1
Parameters of the ultracold neutron source
for the PIK reactor with the power of 100 MW

Параметр	Значение
Плотность потока тепловых нейтронов в He-II, см ⁻² с ⁻¹	6,6 · 10 ¹⁰
Плотность потока холодных нейтронов в He-II, см ⁻² с ⁻¹ Å ⁻¹	1,1 · 10 ⁹
Теплопритоки на камеру источника, Вт	3,85
Теплопритоки на камеру предзамедлителя, Вт	10,7
Теплопритоки на свинцовый экран, Вт	267

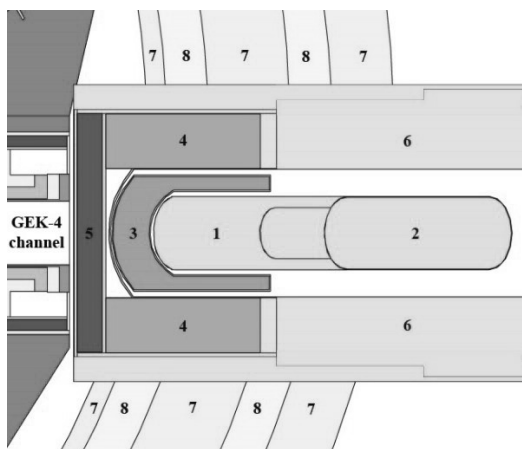


Рис. 1. Источник УХН на реакторе ПИК:

1 — изотопно-чистый сверхтекучий ^4He ; 2 — 1К гелий в теплообменнике; 3 — жидкодейтериевый предзамедлитель; 4 — графит; 5 — свинцовый экран; 6 — вакуумный чехол источника УХН; 7, 8 — биологическая защита РК ПИК

Fig. 1. Ultracold neutron source in the PIK reactor:

1 — isotopically-pure superfluid ^4He ; 2 — 1K helium in the heat exchanger; 3 — liquid-deuterium pre-decelerator; 4 — graphite; 5 — lead shield; 6 — vacuum cover of the ultracold neutron source; 7, 8 — biological protection of the PIK reactor

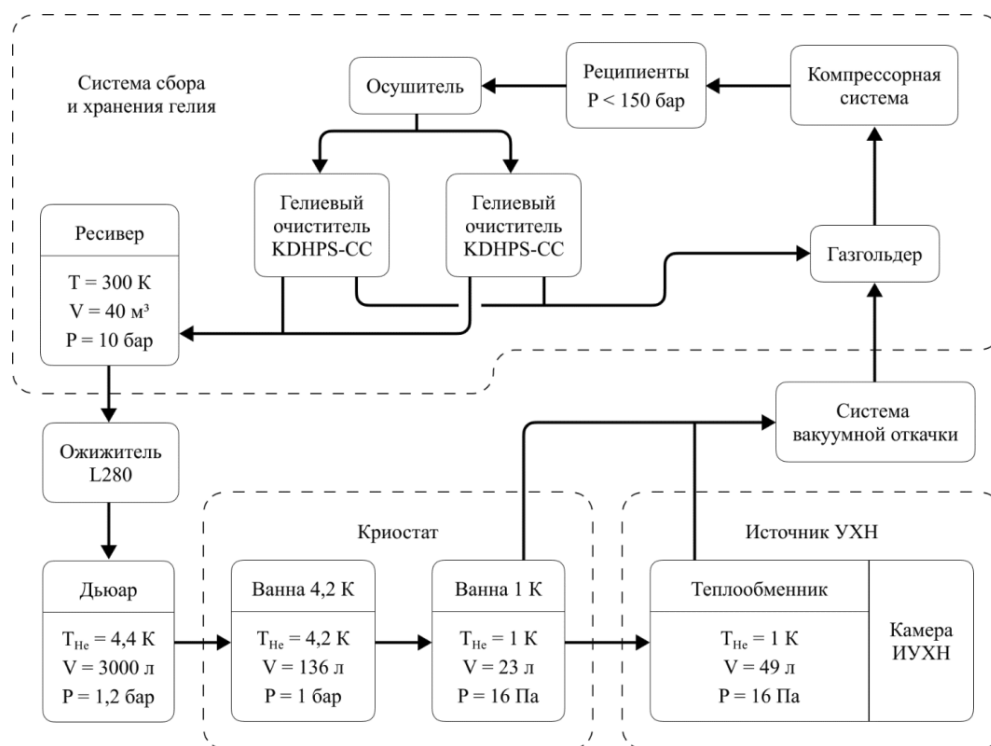


Рис. 2. Гелиевый криогенный цикл источника УХН
 Fig. 2. Helium cryogenic cycle of ultracold neutron source

ESD-301 и направляется в холодный блок гелиевого ожижителя L280. Там, в результате дросселирования, при предварительном двухступенчатом адиабатическом расширением на турбодетандерах, гелий сжижается и стекает в гелиевый Дьюар объемом 3000 л. Общий объем чистого гелия в двух ресиверах и Дьюаре перед началом кампании реактора ПИК — 2750 Нм³.

Из Дьюара происходит заполнение первой ванны криостата ИУХН объемом 136 л при температуре 4,2 К, откуда гелий поступает во вторую ванную объемом 23 л. За счет вакуумной откачки паров жидкого гелия температура во второй ванне достигает 1 К. Гелий из второй ванны поступает в теплообменник ИУХН объемом 49 л и осуществляет теплосъем с изотопно-чистого гелия в камере источника, в котором рождаются ультрахолодные нейтроны. Отвод тепла из теплообменника так же реализуется вакуумной откачкой паров гелия.

Таким образом, общее количество гелия перед началом кампании:

$$V = V_{\text{ресиверы}} + V_{\text{дьюар}} + V_{\text{ванна 4К}} + V_{\text{ванна 1К}} + V_{\text{теплообменник}} = 400 + 2350 + 106 + 21 + 44 = 2921 \text{ Нм}^3$$

Рассчитаем расход гелия, необходимого для поддержания температурного уровня 1 К в камере источника УХН. Расчеты показывают, что теплопритоки к жидкому гелию на температурном уровне 1 К оцениваются в 3,15 Вт. Добавив к этому планируемый теплоприток от реактора ПИК, получим суммарную величину теплопритока в 7 Вт. Это приводит к прямым испарениям гелия в количестве $G_{\text{He}} = 7 \text{ [Вт]} / 20 \text{ [Дж/г]} = 0,35 \text{ г/с}$. Такое количество гелия нужно вернуть в источник УХН. Однако жидкий гелий, поступающий в источник от ожижителя,

имеет температуру 4,2 К и откачке его паров (для понижения температуры с 4,2 К до 1 К) будет иметь место дополнительный расход гелия. Источник [14] говорит, что итоговый расход жидкого гелия при непрерывной подпитке емкости с гелием при температуре ниже 4,2 К

можно оценить как $m = \frac{Q}{r(1-x)}$, где $1-x = e^{-\int_1^{4.2} \left(\frac{c_p(T)dT}{r(T)} \right)}$.

Подставляя данные, получаем $m = 0,52 \text{ г/с}$, что соответствует объемному потоку гелия $G_T = 10,5 \text{ Нм}^3/\text{ч}$.

После откачки пары гелия поступают в газгольдер, откуда компрессорами высокого давления закачиваются в реципиенты. Постоянная эксплуатация комплекса источника УХН приводит к появлению примесей в гелии, в основном за счет натекания через сальники в системе вакуумной откачки паров гелия. Следовательно, весь гелий после откачки необходимо направить на очистку в два гелиевых очистителя KDHPs-CC. Содержание воды на входе в KDHPs-CC не должно превышать 5 ppm, поэтому в комплекс источника УХН был дополнительно включен осушитель с активированным углем в качестве абсорбента.

Так как бесперебойная работа комплекса возможна только при наличии чистого гелия в системе, то длительность кампании источника УХН можно оценить как $t = V_0 / (G_T - 2Q_{\text{KDHPs}})$, где t — длительность кампании; V_0 — количество гелия перед началом кампании; G_T — поток откачиваемого газа; Q_{KDHPs} — производительность одного очистителя.

Расчет показывает, что длительность кампании ИУХН напрямую зависит от производительности очистителей. Производитель CSIC Pride Cryogenics заявляет о максимальной производительности 10 Нм³/ч при отно-

шении времени очистки к времени регенерации — 1:1 [15]. Это означает, что среднее значение производительности при постоянной работе должно быть не менее 5 $\text{Nm}^3/\text{ч}$. Несмотря на данную паспортную информацию установки, нами были проведены рабочие испытания комплекса сбора и хранения гелия на длительном промежутке времени. Для оценки ожидаемой длительности работы комплекса источника УХН на реакторе ПИК будет использоваться производительность очистителя, полученная в результате этих испытаний.

Система очистки гелия KDHP5-CC

Использование гелиевого очистителя KDHP5-CC основана на отделении газовых примесей (азот, кислород и т. д.) криогенной конденсацией с использованием двухступенчатого криокулера Гиффорда-Макмагона. На рис. 3 приведена принципиальная схема KDHP5-CC.

Цикл работы очистителя состоит из 4 этапов:

- I — охлаждение ступеней криокулера;
- II — охлаждение объемов теплообменников;
- III — очистка гелия;
- IV — регенерация теплообменников.

Охлаждение ступеней криокулера происходит до температуры первой ступени равной $T_{301}=65\text{ K}$ и температуры второй ступени $T_{302}=30\text{ K}$.

На этапе охлаждения объемов теплообменников газобразный гелий давлением 25 бар поступает в KDHP5-CC. Пройдя через первый рекуперативный теплообменник и теплообменник первой ступени криокулера, гелий поступает в газожидкостный сепаратор. Там при давлении 25 бар азот переходит в жидкую фазу при темпера-

туре ниже 119,8 K и удаляется в атмосферу. После сепаратора газ проходит через второй рекуперативный теплообменник и теплообменник второй ступени криокулера. Пройдя через ступени криокулера, гелий возвращается обратно из KDHP5-CC в реципиенты, отдавая полученную холодопроизводительность через рекуперативные теплообменники.

Рабочий режим очистки гелия в KDHP5-CC начинается, когда температура второго рекуперативного теплообменника снижается до $T_{304} < 40\text{ K}$ (температура конденсации неона при $P > 12\text{ бар}$). Чистый гелий направляется в ресивер для дальнейшего ожижения в гелиевом ожижителе L-280.

В процессе очистки на стенках второго рекуперативного теплообменника и теплообменника второй ступени происходит конденсация неона, а также кристаллизация твердых примесей азота и кислорода, оставшихся после газожидкостного сепаратора. Когда разница давлений между сепаратором и вторым рекуперативным теплообменником достигает значения 6 бар, начинается этап регенерации. Регенерация осуществляется с помощью встроенного в KDHP5-CC электрического нагревателя. При достижении температуры второй ступени криокулера $T_{302}=70\text{ K}$, и температуры теплообменника второй ступени $T_{304}=90\text{ K}$, происходит продувка рабочего объема очистителя. На этом этап регенерации KDHP5-CC завершается.

Весь цикл работы очистителя автоматизирован. После этапа регенерации KDHP5-CC переходит к этапу охлаждения ступеней криокулера. Остановка работы очистителя происходит только при нажатии кнопки выключения пользователем.

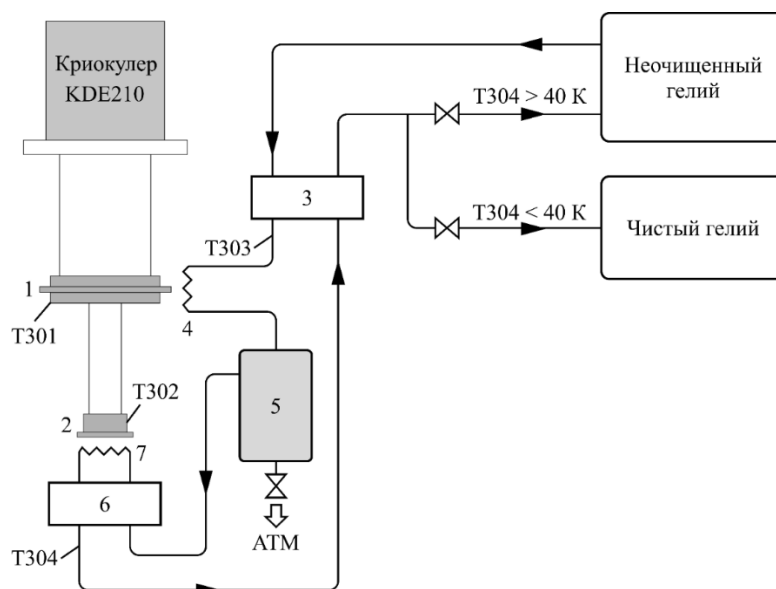


Рис. 3. Принципиальная схема KDHP5-CC:

- 1 — первая ступень криокулера; 2 — вторая ступень криокулера; 3 — первый рекуперативный теплообменник;
4 — теплообменник первой ступени; 5 — газожидкостный сепаратор; 6 — второй рекуперативный теплообменник;
7 — теплообменник второй ступени

Fig. 3. The diagram of KDHP5-CC:

- 1 — first stage of the cryocooler; 2 — second stage of the cryocooler; 3 — first recuperative heat exchanger;
4 — heat exchanger of the first stage; 5 — gas-liquid separator; 6 — second recuperative heat exchanger;
7 — heat exchanger of the second stage

Рабочие испытания гелиевого очистителя KDHP5-CC

Система очистки гелия на базе очистителя KDHP5-CC была поставлена и смонтирована в НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ на базе криогенного комплекса реактора ВВР-М. На рис. 4 представлен внешний вид очистителя KDHP5-CC.

Для определения производительности очистителей в составе комплекса источника УХН, нами были проведены ряд пусков с различными значениями потока на входе в очиститель $Q_{вх}$ и температурой второй ступени криокулера T_{302} . Идея заключалась в том, что меньшее значение $Q_{вх}$ позволит увеличить время чистки более качественной конденсацией азота в сепараторе, а меньшее значение T_{302} позволит быстрее охладить рабочие теплообменники очистителя. Были произведены запуски с чистотой гелия на входе 95 % и 99,5%.

Из всего объема данных для данной работы будут рассмотрены четыре запуска со следующими настройками параметрами:

1. $Q_{вх} = 6 \text{ Нм}^3/\text{ч}$; $T_{302} = 30 \text{ К}$; $N_2/He = 5 \%$.
2. $Q_{вх} = 10 \text{ Нм}^3/\text{ч}$; $T_{302} = 30 \text{ К}$; $N_2/He = 5 \%$.
3. $Q_{вх} = 10 \text{ Нм}^3/\text{ч}$; $T_{302} = 26 \text{ К}$; $N_2/He = 5 \%$.
4. $Q_{вх} = 10 \text{ Нм}^3/\text{ч}$; $T_{302} = 30 \text{ К}$; $N_2/He = 0,5 \%$.

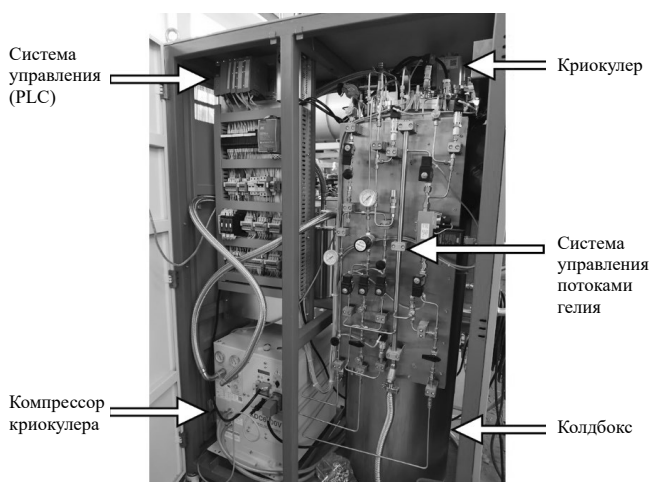


Рис. 4. Гелиевый очиститель KDHP5-CC
Fig. 4. KDHP5-CC helium purifier

На рис. 5–8 представлены графики работы очистителя в рассматриваемых пусках с разбивкой по этапам. Для объективной оценки производительности очистителя из рассмотрения был исключен первый цикл работы очистителя начиная с комнатной температуры. В этом

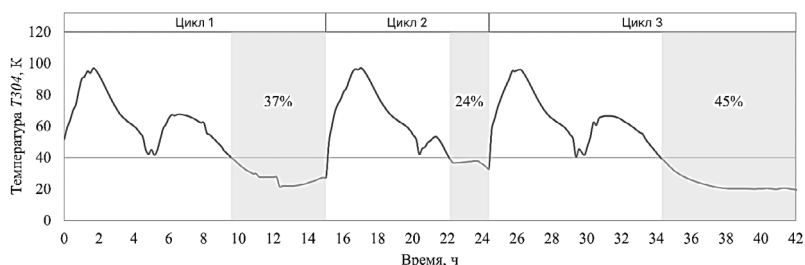


Рис. 5. 1-й запуск
Fig. 5. First startup

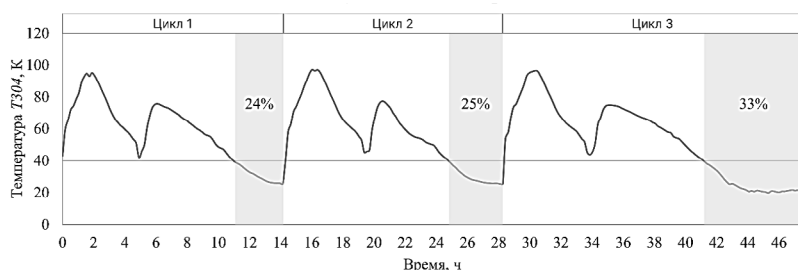


Рис. 6. 2-й запуск
Fig. 6. Second startup

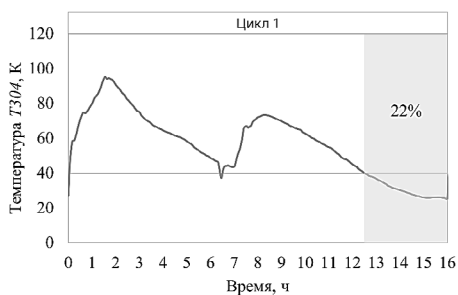


Рис. 7. 3-й запуск
Fig. 7. Third startup

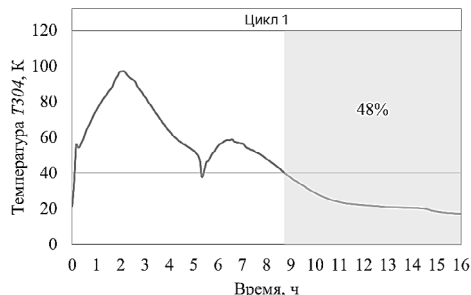


Рис. 8. 4-й запуск
Fig. 8. Fourth startup

цикле существенно (в пять раз) увеличено время захлаживания криокулера и рабочих объемов теплообменников. Эти этапы в первом цикле занимают порядка двух суток, поэтому перед первым пуском системы желательнее иметь запас по времени.

Производительность очистителя определяется длительностью режима при $T_{304} < 40$ К, так как только в это время идет очистка гелия с заполнением чистых ресиверов (на рисунках 5–8 этот режим обозначен серым цветом). В остальное время очиститель работает либо в режиме регенерации, либо в режиме охлаждения ступеней криокулера и теплообменников. Средняя производительность одного очистителя оценивается как: $\bar{Q}_{\text{KDHPSS}} = \bar{k}Q_{\text{вх}}$, где \bar{k} — отношение длительности времени очистки ($T_{304} < 40$ К) к длительности полного цикла очистителя; $Q_{\text{вх}}$ — поток на входе в очиститель. Расход гелия из реципиентов на протяжении всего времени работы очистителя соответствовал выставленному значению потока на контроллере расхода KDHPSS-CC. Численное значение \bar{k} для каждого цикла вписано в серую зону на рис. 5–8.

Расчет значений \bar{k} и \bar{Q}_{KDHPSS} для рассматриваемых запусков сведены в табл. 2.

Работа очистителя при сниженном потоке не имеет практического смысла. При снижении потока на входе в очиститель на 40 %, среднее время работы в режиме очистки $T_{304} < 40$ К увеличилось лишь на 30 %, что тем самым не привело к общему увеличению производительности.

При более глубоком охлаждении криокулеров до 26 К перед вторым этапом (захлаживание рабочих объемов теплообменников), требуемое время на достижение $T_{304} < 40$ К действительно уменьшилось на 15 %, однако время на охлаждения криокулеров при этом увеличилось на 25 %, что в итоге привело к снижению средней производительности.

Единственный способ, который позволил получить паспортную производительность очистителя, оказался в повышении чистоты исходного гелия. При содержании $N_2/He=0,5\%$, очиститель вышел на заданную в паспорте производительность в $5 \text{ Нм}^3/\text{ч}$.

Можно сделать предположение, о том, что производительность очистителя линейно зависит от чистоты гелия на входе. Действительно, скорость кристаллизации твердых примесей в теплообменнике должна линейно зависеть от концентрации этих примесей в смеси. Из этого предположения и результатов, полученных в результате запуска очистителя, можно сделать вывод, что 1 % примеси в гелии снижает реальную производительность очистителя на 10 %.

Оценим длительность кампании источника УХН по наличию чистого гелия в системе. В расчетах будем использовать пессимистичный сценарий, при котором чистота гелия после системы вакуумной откачки паров будет не выше 95 %, при этом средняя производительность очистителя будет не больше $2,7 \text{ Нм}^3/\text{ч}$:

$$t = V_0 / (G_T - 2Q) = \frac{2921 \text{ Нм}^3}{10,5 \text{ Нм}^3/\text{ч} - 2 \cdot 2,7 \text{ Нм}^3/\text{ч}} \approx 572,7 \text{ ч} = 24 \text{ сут.}$$

Это значение сопоставимо по длительности рабочего цикла кампании реактора ПИК, которое равняется 25 сут. Учитывая, что ожидаемое содержание азота в гелиевых контурах технологического комплекса источника УХН ниже 5 %, реальная длительность кампании превысит 24 сут. Полномасштабный запуск комплекса источника УХН позволит уточнить полученные значения в процессе эксплуатации.

Выводы

В рамках создания нового источника УХН на основе сверхтекучего гелия для реакторного комплекса ПИК был разработан замкнутый криогенный гелиевый цикл для поддержания температуры 1 К в условиях реакторного теплопритока. В состав оборудования для данного цикла были включены два гелиевых очистителя KDHPSS-CC фирмы CSIC Pride Cryogenics. Заявленная производителем средняя скорость очистки гелия составляет не менее $5 \text{ Нм}^3/\text{ч}$ при чистоте гелия более 95 %.

На базе криогенного корпуса НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ были произведены испытания смонтированной системы сбора и хранения гелия источника УХН. В ходе испытаний были протестированы два гелиевых очистителя KDHPSS-CC.

При заявленном производителем отношением длительности очистки к длительности полного цикла очистителя равным 50 %, полученное экспериментальным путем относительное время полезной работы очистителя KDHPSS-CC варьировалось от 22 % до 50 % в зависимости от настроек и чистоты гелия на входе. Оптимальными настройками для работы данного очистителя являются: поток «грязного» гелия на входе в очиститель $Q_{\text{вх}} = 10 \text{ Нм}^3/\text{ч}$ и температура второй ступени криокулера перед переходом в режим очистки $T_{302} = 30$ К. Отклонение параметров очистителя от данных значений снижало среднюю производительность установки. Из результатов, полученных в результате запуска очистителя, был сделан вывод, что 1 % примеси в гелии снижает реальную производительность очистителя на 10 %. Данный резуль-

Таблица 2

Значения параметров при запусках очистителя KDHPSS-CC

Таблица 2

The parameters at the KDHPSS-CC purifier startup

Номер запуска (по рис. 5–8)	Поток на входе в очиститель, $Q_{\text{вх}}$ [Нм ³ /ч]	Температура 2-й ступени криокулера для перехода на этап III, T_{304} [К]	Содержание азота в гелии, N_2/He , %	Относительное время полезной работы очистителя, \bar{k}	Средняя производительность очистителя, \bar{Q}_{KDHPSS} [Нм ³ /ч]
1	6	30	5	0,35	2,1
2	10	30	5	0,27	2,7
3	10	26	5	0,22	2,2
4	10	30	0,5	0,5	5

тат стоит учитывать при подборе оборудования китайского производства.

Полученные в результате экспериментов значения средней производительности очистителя дают оценку длительности рабочей кампании источника УХН на реакторе ПИК не менее 24 сут при мощности реактора равной 100 МВт. Это значение сопоставимо по длительности рабочего цикла кампании реактора ПИК, которое равня-

ется 25 сут. Увеличить длительность работы источника УХН можно путем снижения степени загрязнения гелия или путем увеличения рабочих объемов с заранее подготовленным чистым гелием.

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

Литература

1. Ковальчук М. В., Воронин В. В., Григорьев С. В., Серебров А. П. Приборная база реактора ПИК // Кристаллография. 2021. Т. 66. № 2. С. 191. DOI: 10.31857/S0023476121020065.
2. Ахизер А. И., Померанчук И. Я. О рассеянии нейтронов с энергией несколько градусов в жидком гелии II // ЖЭТФ. 1946. Т. 16. С. 391.
3. Зельдович Я. Б. Хранение холодных нейтронов // ЖЭТФ. 1959. Т. 36. № 6. С. 1952–1953.
4. Serebrov A. P., Lyamkin V. A. Development of UCN sources at PNPI // Journal of Neutron Research. 2022. Vol. 24, no. 2. P. 145–166. DOI: 10.3233/JNR-220007.
5. Martin J. et al. The TRIUMF UltraCold Advanced Neutron Source // Nuclear Physics News. 2021. Vol. 31, Iss. 2. P. 19–22. DOI: 10.1080/10619127.2021.1881367.
6. Piegsa F. M. et al. New source for ultracold neutrons at the Institut Laue — Langevin // Physical Review. 2014. Vol. 90, Iss. 1, 015501. DOI: 10.1103/PhysRevC.90.015501.
7. Leung K. K. H. et al. A next-generation inverse-geometry spallation-driven ultracold neutron source // Journal of Applied Physics. 2019. Vol. 126, Iss. 22, 224901. DOI: 10.1063/1.5109879.
8. Kawasaki S., Okamura T. Cryogenic design for a high intensity ultracold neutron source at TRIUMF // EPJ Web of Conferences. 2019. Vol. 219, 10001. DOI: 10.1051/epjconf/201921910001.
9. Серебров А. П., Лямкин В. А., Коптюхов А. О., Онегин М. С., Коваленко А. Н. Теплообменник для устройства термализации нейтронов на пучковом исследовательском корпусном реакторе // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 2. С. 263–271. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-263-271.
10. Серебров А. П., Лямкин В. А., Коптюхов А. О., Онегин М. С., Прудников Д. В., Самодуров О. Ю. Теплогидравлической расчет низкотемпературной части источника ультрахолодных нейтронов для реактора ВВР-М // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 1. С. 73–86. DOI: 10.18721/JPM.12106.
11. Лямкин В. А., Серебров А. П., Коптюхов А. О. Первые криогенные испытания теплообменника источника ультрахолодных нейтронов на сверхтекучем гелии // Атомная энергия. 2023. Т. 133. № 3. С. 174–177. DOI: 10.1007/s10512-023-00993-6
12. Серебров А. П., Лямкин В. А., Фомин А. К., Онегин М. С. Источник ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия для реактора ПИК // Журнал технической физики. 2022. Т. 92. № 6. С. 899–906. DOI: 10.21883/JTF.2022.06.52522.21–22.
13. Серебров А. П., Лямкин В. А., Прудников Д. В., Кешисhev К. О., Болдарев С. Т., Васильев А. В. Запуск полномасштабной модели источника ультрахолодных нейтронов со сверхтекучим гелием // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. № 2. С. 301–305. DOI: 10.21883/JTF.2017.02.1941.

References

1. Kovalchuk M. V., Voronin V. V., Grigoriev S. V., Serebrov A. P. Instrument Base of the Reactor PIK. *Crystallography*. 2021. Vol. 66, no 2. P. 191. DOI: 10.31857/S0023476121020065. (in Russian)
2. Ahiczer A. I., Pomeranchuk I. Ya. On the scattering of neutrons with energies of several degrees in liquid Helium II. *JETP*. 1946. Vol. 16. P. 391. (in Russian)
3. Zeldovich Ya. B. Storage of cold neutrons. *JETP*. 1959. Vol. 36. № 6. P. 1952–1953. (in Russian)
4. Serebrov A. P., Lyamkin V. A. Development of UCN sources at PNPI. *Journal of Neutron Research*. 2022. Vol. 24, no. 2. P. 145–166. DOI: 10.3233/JNR-220007.
5. Martin J. et al. The TRIUMF UltraCold Advanced Neutron Source. *Nuclear Physics News*. 2021. Vol. 31, Iss. 2. P. 19–22. DOI: 10.1080/10619127.2021.1881367.
6. Piegsa F. M. et al. New source for ultracold neutrons at the Institut Laue — Langevin. *Physical Review*. 2014. Vol. 90, Iss. 1, 015501. DOI: 10.1103/PhysRevC.90.015501.
7. Leung K. K. H. et al. A next-generation inverse-geometry spallation-driven ultracold neutron source. *Journal of Applied Physics*. 2019. Vol. 126, Iss. 22, 224901. DOI: 10.1063/1.5109879.
8. Kawasaki S., Okamura T. Cryogenic design for a high intensity ultracold neutron source at TRIUMF. *EPJ Web of Conferences*. 2019. Vol. 219, 10001. DOI: 10.1051/epjconf/201921910001.
9. Serebrov A. P., Lyamkin V. A., Koptyukhov A. O., Onegin M. S., Kovalenko A. N. Heat exchanger for neutron thermalization device in beam research vessel reactor. *Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics*. 2020. Vol. 20. № 2. P. 263–271. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-263-271. (in Russian)
10. Serebrov A. P., Lyamkin V. A., Koptyukhov A. O., Onegin M. S., Prudnikov D. V., Samodurov O. Yu. The low-temperature subsystem of the ultracold neutron supersource at the WWR-M reactor: a heat-hydraulic design study. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2019. Vol. 12. № 1. P. 73–86. DOI: 10.18721/JPM.12106. (in Russian)
11. Lyamkin V. A., Serebrov A. P., Koptyukhov A. O. First Cryogenic Tests of Superfluid Helium Heat Exchanger for an Ultracold Neutron Source. *At Energy*. 2023. Vol. 133. P. 187–190. DOI: 10.1007/s10512-023-00993-6
12. Serebrov A. P., Lyamkin V. A., Fomin A. K., Onegin M. S. Superfluid helium based ultracold neutron source for the PIK reactor. *Technical Physics*. 2022. Vol. 67. № 6. P. 763–769. DOI: 10.21883/JTF.2022.06.52522.21–22.
13. Serebrov A. P., Lyamkin V. A., Prudnikov D. V., Keshishev K. O., Boldarev S. T., Vasiliev A. V. Launch of a full-scale model of a superfluid helium based ultracold neutron source. *Technical Physics*. 2017. Vol. 87. № 2. P. 301–305. DOI: 10.21883/Jtf.2017.02.1941. (In Russian)

14. Хефер Р. Криовакуумная техника. М.: Энергоиздат, 1983. 272 с.
15. Hu X., Chen J., Xu Z. A new type of helium purifier which uses a GM cryocooler as the cold source // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 502, 012047. DOI: 10.1088/1757-899X/502/1/012047.
14. Hefer R. Cryovacuum Technology. M.: Energoatomizdat, 1983. 272 p. (in Russian)
15. Hu X., Chen J., Xu Z. A new type of helium purifier which uses a GM cryocooler as the cold source. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 502, 012047. DOI: 10.1088/1757-899X/502/1/012047.

Сведения об авторах

Лямкин Виталий Александрович

К. ф.-м. н., научный сотрудник Отделения Нейтронных Исследований НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, 188300, Россия, Лен. область, г. Гатчина, мкр. Орлова роща, 1, lyamkin_va@pnpi.nrcki.ru. ORCID: 0000-0002-0640-9507

Серебров Анатолий Павлович

Д. ф.-м. н., чл. корр. РАН, главный научный сотрудник Отделения Нейтронных Исследований НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, 188300, Россия, Лен. область, г. Гатчина, мкр. Орлова роща, 1, serebrov_ap@pnpi.nrcki.ru. ORCID: 0000-0002-6734-038X

Бородин Григорий Олегович

Лаборант-исследователь Отделения Нейтронных Исследований НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, 188300, Россия, Лен. область, г. Гатчина, мкр. Орлова роща, 1, borodinov_go@pnpi.nrcki.ru

Коптюхов Артем Олегович

Инженер технолог Отделения Нейтронных Исследований НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, 188300, Россия, Лен. область, г. Гатчина, мкр. Орлова роща, 1, koptyukhov_ao@pnpi.nrcki.ru. ORCID: 0000-0002-9660-3601

Недоляк Андрей Александрович

Лаборант-исследователь Отделения Нейтронных Исследований НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, 188300, Россия, Лен. область, г. Гатчина, мкр. Орлова роща, 1, nedolyak_aa@pnpi.nrcki.ru

Прудников Дмитрий Владимирович

Инженер технолог Отделения Нейтронных Исследований НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, 188300, Россия, Лен. область, г. Гатчина, мкр. Орлова роща, 1, dpvbox@mail.ru

Сиротин Алексей Владиславович

Старший лаборант Отделения Нейтронных Исследований НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, 188300, Россия, Лен. область, г. Гатчина, мкр. Орлова роща, 1, sirotin_av@pnpi.nrcki.ru

Information about authors

Lyamkin Vitaliy A.

Ph. D., Researcher, Department of Neutron Research, NRC «Kurchatov Institute» — PNPI, 188300, Russia, Leningradskaya oblast, Gatchina 1, mkr. Orlova roshcha, lyamkin_va@pnpi.nrcki.ru. ORCID: 0000-0002-0640-9507

Serebrov Anatolii P.

D. Sc., Corresponding Member of RAS, main researcher, Department of Neutron Research, NRC «Kurchatov Institute» — PNPI, 188300, Russia, Leningradskaya oblast, Gatchina 1, mkr. Orlova roshcha, serebrov_ap@pnpi.nrcki.ru. ORCID: 0000-0002-6734-038X

Borodinov Grigoriy O.

laboratory assistant-researcher, Department of Neutron Research, NRC «Kurchatov Institute» — PNPI, 188300, Russia, Leningradskaya oblast, Gatchina 1, mkr. Orlova roshcha, borodinov_go@pnpi.nrcki.ru

Koptyukhov Artem O.

Technologist Engineer, Department of Neutron Research, NRC «Kurchatov Institute» — PNPI, 188300, Russia, Leningradskaya oblast, Gatchina 1, mkr. Orlova roshcha, koptyukhov_ao@pnpi.nrcki.ru. ORCID: 0000-0002-9660-3601

Nedolyak Andrey A.

laboratory assistant-researcher, Department of Neutron Research, NRC «Kurchatov Institute» — PNPI, 188300, Russia, Leningradskaya oblast, Gatchina 1, mkr. Orlova roshcha, nedolyak_aa@pnpi.nrcki.ru

Prudnikov Dmitriy V.

Technologist Engineer, Department of Neutron Research, NRC «Kurchatov Institute» — PNPI, 188300, Russia, Leningradskaya oblast, Gatchina 1, mkr. Orlova roshcha, dpvbox@mail.ru

Sirotin Aleksey V.

Senior laboratory assistant, Department of Neutron Research, NRC «Kurchatov Institute» — PNPI, 188300, Russia, Leningradskaya oblast, Gatchina 1, mkr. Orlova roshcha, sirotin_av@pnpi.nrcki.ru



Статья доступна по лицензии

Creative Commons «Attribution-NonCommercial»