

УДК 537.626:538.945

КРИОГЕННАЯ СИСТЕМА СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ОНДУЛЯТОРА, ОСНОВАННАЯ НА КОСВЕННОМ ОХЛАЖДЕНИИ

© 2023 г. С. В. Хрушев^{1, 2, *}, В. М. Цуканов^{1, 2}, В. А. Шкаруба^{1, 2},
Н. А. Мезенцев^{1, 2}, А. Н. Сафронов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук”,
Новосибирск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Федеральный исследовательский центр “Институт катализа имени Г.К. Борескова
Сибирского отделения Российской академии наук”,
Центр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов”, Кольцово, Россия
*E-mail: Khrushev@mail.ru

Поступила в редакцию 28.11.2022 г.

После доработки 15.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Описана криогенная система сверхпроводящего ондулятора с периодом 15.6 мм, магнитным полем 1.2 Тл и магнитным зазором 8 мм, основанная на косвенном охлаждении. Для ускорения процесса начального охлаждения в качестве проводников тепла от магнитной системы к первой ступени криоохладителей применяются азотные тепловые трубки. Полное охлаждение магнитной системы выполняется без использования криогенных жидкостей (с использованием только газообразного гелия). Описана конструкция криогенной системы, процесс охлаждения и функционирование системы в разных режимах.

DOI: 10.31857/S0367676522701277, EDN: ABPENC

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения эффективности использования магнитной системы сверхпроводящих вставных устройств (вигглеров и ондуляторов) необходимо минимизировать разницу между магнитным зазором в магнитной системе и вертикальной апертурой в криостате устройства. С этой целью конструкция создаваемых нами в последнее время вставных устройств основывается на косвенном охлаждении [1, 2]. При этом магнитная система находится в вакууме, а отвод тепла от нее производится с помощью трубок с циркулирующим жидким гелием.

ПРЕИМУЩЕСТВА СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ВСТАВНЫХ УСТРОЙСТВ С КОСВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Магнитная система вставного устройства с непосредственным охлаждением находится целиком в баке, заполненном жидким гелием. Гелиевый бак имеет находящуюся внутри магнитного зазора магнитной системы холодную вакуумную камеру, имеющую температуру жидкого гелия. Холодная вакуумная камера, во избежание ее нагрева пролетающим пучком, должна иметь внут-

ри себя медный экран – лайнер, имеющий температуру ниже 20 К.

Магнитная система вставного устройства с косвенным охлаждением находится в вакууме. При этом внутри магнитного зазора достаточно иметь только вакуумную камеру с температурой ниже 20 К, отделенную зазором от магнитной системы.

Во втором случае при той же вертикальной апертуре удастся уменьшить магнитный зазор, что приводит к увеличению магнитного поля. В наших устройствах уменьшение магнитного зазора при переходе на косвенное охлаждение составило 1 мм [1, 2].

Кроме вышесказанного, переход к косвенному охлаждению позволил использовать предварительное захлаживание без использования жидкого гелия. Используется только газообразный гелий в баллонах. Подробнее об этом будет сказано ниже.

УСТРОЙСТВО КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЫ ОНДУЛЯТОРА

Магнитная система ондулятора состоит из соединенных между собой через проставки верхней и нижней половин. Каждая половина представ-

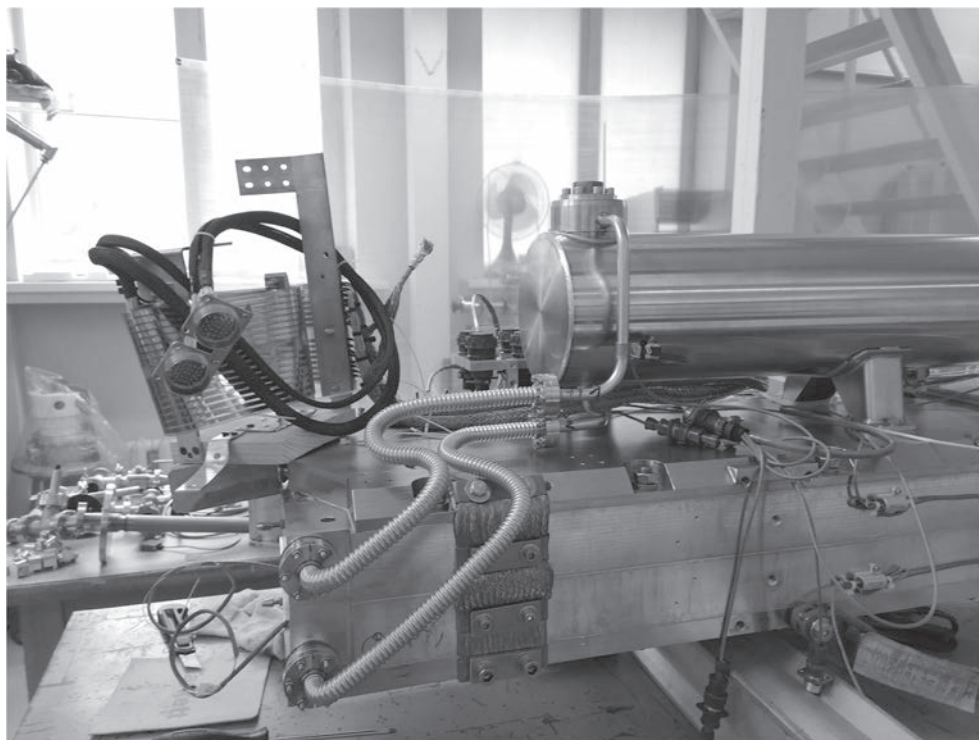


Рис. 1. Соединение гелиевого бака с продольными отверстиями в магнитной системе. На рисунке виден вход в нижнюю половину магнита и выход из верхней.

ляет собой плиту из алюминиевого сплава 6063 с закрепленными на ней катушками. Вдоль каждой из плит выполнено отверстие для прохождения жидкого гелия, охлаждающего плиты и, соответственно, катушки. Над магнитной системой закреплен гелиевый бак малого объема (около 40 л), в рабочем состоянии заполненный жидким гелием. Отверстия в плитах соединены гибкими трубками с гелиевым баком: один конец отверстия с нижней частью бака, второй — с верхней (рис. 1). Гелий с нижней части бака стекает в отверстия в плитах и, в случае, когда магнитная система имеет температуру выше температуры жидкого гелия, испаряется и в виде газа выходит в верхнюю часть бака.

Внутри гелиевого бака установлены два медных позолоченных теплообменника, соединенных со вторыми ступенями двух криокулеров SRDK-415 с номинальной температурой 4.2 К. В верхней части гелиевого бака имеется горловина, на которой находится аварийная разрывная мембрана и предохранительный клапан, для сброса газа при срывах, а также заливная горловина, которая при необходимости может быть использована для заливки жидкого гелия (в течение многомесячных активных испытаний не была использована ни разу).

АЗОТНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ТРУБКИ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЗАХОЛАЖИВАНИЯ

Для предварительного захлаживания используются азотные тепловые трубки, обеспечивающие тепловую связь между первыми ступенями криокулеров SRDK-408 с номинальной температурой 60 К (температура на этих ступенях в рабочем состоянии опускается примерно до 40 К) и магнитной системой [3–5]. Тепловые трубки обеспечивают ускорение процесса предварительного захлаживания от комнатной температуры до температуры жидкого азота.

ЗАХОЛАЖИВАНИЕ ОНДУЛЯТОРА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ

Процесс предварительного захлаживания выглядит следующим образом. Производится откачка вакуумных объемов. К гелиевому бачку через редуктор, установленный на избыточное давление 0.5–0.7 бар, подсоединяется баллон с газобразным гелием. Включаются все четыре криокулера.

При охлаждении устройства параллельно работают два охлаждающих контура. На относительно высоких температурах основной съем тепла с магнитной системы осуществляют азотные

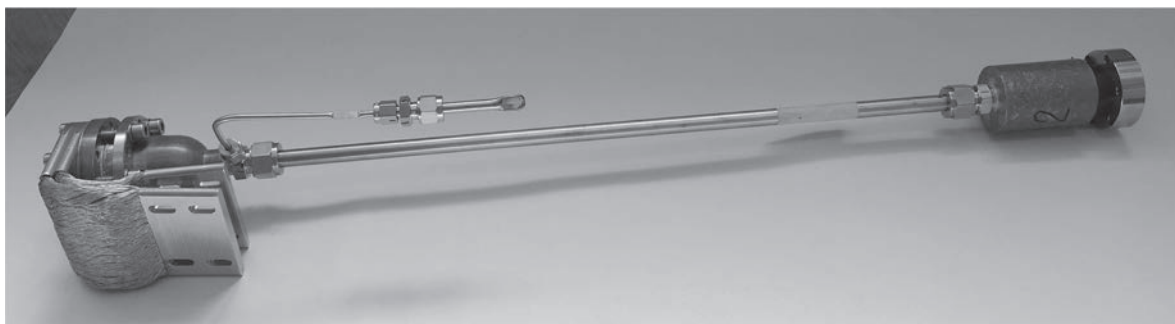


Рис. 2. Азотная тепловая трубка.

тепловые трубки (рис. 2). Эффективность их в процессе захлаживания составляет до 100 Вт.

Для эффективной работы тепловых трубок им необходимо обеспечить оптимальный тепловой режим. Первые ступени криокулеров с номинальной температурой 60 К, к которым подключены тепловые трубки, имеют избыточную эффективность, поэтому приходится не позволять температурам на них опускаться слишком низко, что может привести к преждевременному замерзанию азота в тепловых трубках и, соответственно, прекращению их работы. В процессе работы с азотными тепловыми трубками были применены два варианта стабилизации температуры на первых ступенях криокулеров. В нашем первом “сухом” вигглере на первых ступенях криокулеров были установлены компактные нагреватели и с внешнего источника питания программно поддерживался нужный тепловой режим [6]. В дальнейшем был опробован способ нагрева посредством выключения криокулеров [7]. Оба способа

работают, но от второго варианта в настоящее время мы отказались. Активные манипуляции с компрессорами криокулеров в процессе охлаждения могут негативно сказаться на их сроке службы. К тому же второй вариант практически исключает участие гелиевого контура при работе азотных тепловых трубок, так как отключение кулеров приводит к повышению температуры не только на первых ступенях, но также и на вторых, охлаждающих гелий в гелиевом баке. В используемой в настоящее время управляющей программе предусмотрена возможность использования любого варианта.

На графике (рис. 3) приведен процесс одного из захлаживаний со всеми его нюансами. В процессе охлаждения нестабильно работал один из основных термодатчиков (контакт в кабеле) — период 33–43 ч — связанное с этим замедление процесса охлаждения (произошло переохлаждение одной из тепловых трубок). Период 131–155 ч — в связи с аварийным отключением электроэнергии произошла полная остановка системы охлаждения, что привело к росту всех температур. Никаких технических проблем, кроме увеличения общего времени захлаживания, это не вызвало. Для восстановления работы потребовалось только повторное включение компрессоров. Из-за отключения электроэнергии было потеряно более 40 ч.

Азотная система охлаждения отключилась при 73 градусах (через 175 ч захлаживания).

Эффективность работы каждой тепловой трубки индивидуально можно оценить по разности температур между конкретными термодатчиками T01 и T02, расположенными на верхней поверхности магнита вблизи тепловых трубок, и термодатчиком T03, расположенным на нижней поверхности магнита практически равноудаленно от первых двух (рис. 4).

После отключения азотной системы охлаждения (замерзание азота в тепловых трубках) в работе принимает участие только гелиевый контур охлаждения (рис. 4). Гелий, циркулирующий через верхнюю и нижнюю половины магнитной системы,

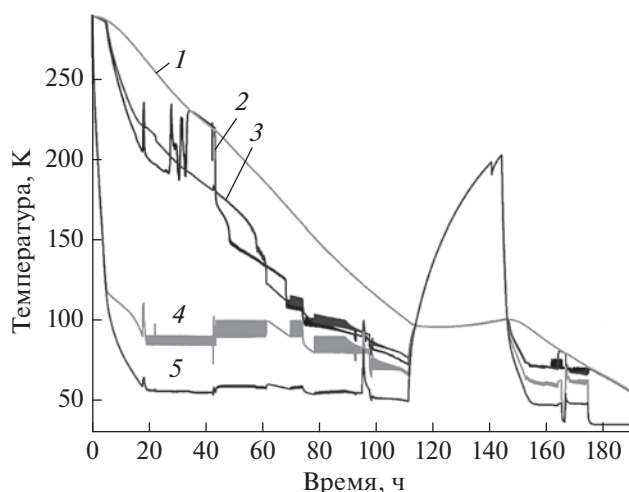


Рис. 3. Работа азотной системы охлаждения. 1 — Температура низа магнита, 2 — температура на входном конце магнита, 3 — температура на выходном конце магнита, 4 — температура на реконденсирующей головке тепловой трубки, 5 — температура на первой ступени криокулера.

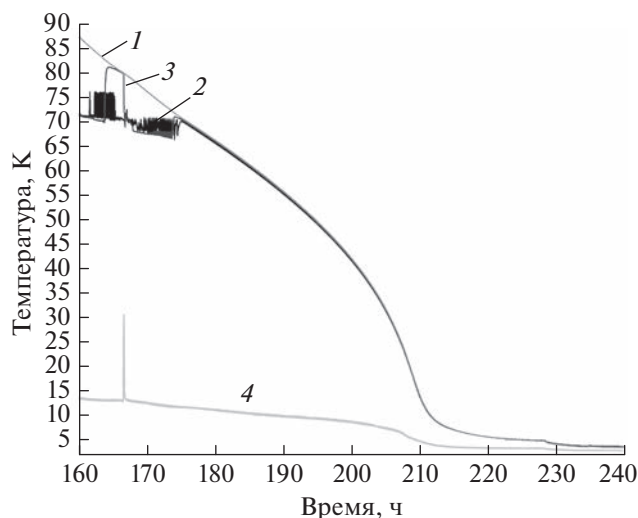


Рис. 4. Работа гелиевой системы охлаждения. 1 – Температура низа магнита, 2 – температура на входном конце магнита, 3 – температура на выходном конце магнита, 4 – температура на второй ступени криокулера.

охлаждается в гелиевом баке вторыми ступенями криокулеров с номинальной температурой 4.2 К.

Общую эффективность системы охлаждения можно оценить по изменению температуры на термодатчике Т03, расположенном на нижней поверхности магнита практически равноудаленно от тепловых трубок (рис. 5).

Можно заметить, что эффективность охлаждения в момент отключения тепловых трубок изменилась незначительно (176 ч). Это говорит о том, что вклад гелиевой системы к этому моменту уже значительно превосходил азотную. По величине изменения скорости охлаждения в момент отключения тепловых трубок (176 ч), можно сказать, что по эффективности гелиевая система десятикратно превосходила азотную.

Для полного цикла охлаждения достаточно одного стандартного сорокалитрового баллона (120–150 бар) гелия. При этом в баке накапливается 5–10% жидкости, что уже достаточно для нормальной работы устройства.

Система охлаждения устройства с косвенным охлаждением предельно проста. К гелиевому баку через газовый редуктор низкого давления, позволяющий с достаточной точностью выставлять давление в гелиевом баке криостата, подключается баллон с гелием. Установка баллона возможна на любом (разумном) удалении от криостата. Для соединения баллона и криостата использовалась пластиковая трубка диаметром 6 мм.

Эффективность гелиевого контура охлаждения зависит от давления в баке. Нами был доработан предохранительный клапан, добавлена пружина и регулировочный винт, позволяющий

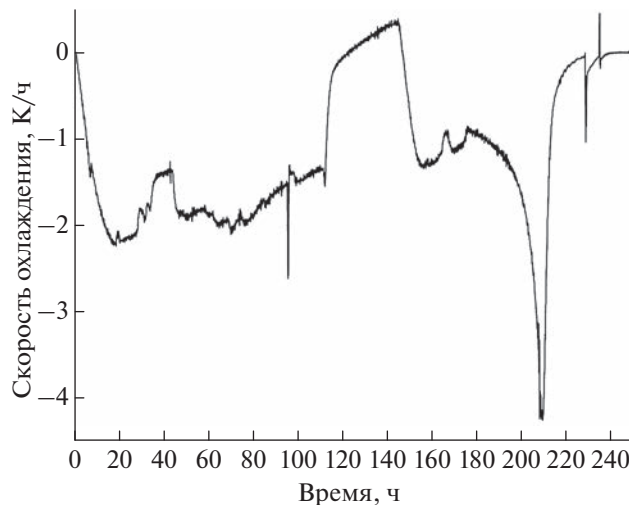


Рис. 5. График общей эффективности – производная температуры на магнитной системе по времени (датчик Т03).

регулировать избыточное давление срабатывания от 0.35 до 2 бар.

В процессе работы между баллоном и редуктором был установлен датчик давления, позволяющий измерять остаток гелия в баллоне и при необходимости прекращать подачу гелия. Измерение динамики давления в баллоне позволяет производить оценку эффективности гелиевой системы в процессе захлаживания. К сожалению, датчик давления был установлен после охлаждения магнита.

ПОВЕДЕНИЕ КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ СРЫВЕ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

В процессе нормальной работы эффективности криогенной системы достаточно для поддержания давления в гелиевом баке ниже атмосферного (0.7 бар). При этом температура магнитной системы опускается до 3.5 К. Минимальная температура магнитной системы определяется балансом производительности криокулеров, которая составляет 2 Вт при 4.2 К и уменьшается при снижении температуры, и паразитными теплопритоками к магниту [8]. В нашем случае большой вклад в теплоприток дает измерительная камера системы магнитных измерений.

На графике (рис. 6) приведены две кривые, показывающие абсолютное давление в криостате и уровень гелия. Пики высокого давления вызваны срывами сверхпроводимости.

В начальной части графика (250–339 ч) изображена работа непосредственно после захлаживания одним баллоном гелия. Баллона хватает для заполнения бака приблизительно на 12% объема. Видно, что при таком уровне заполнения бака срывы сверхпроводимости никак на него не влияют.

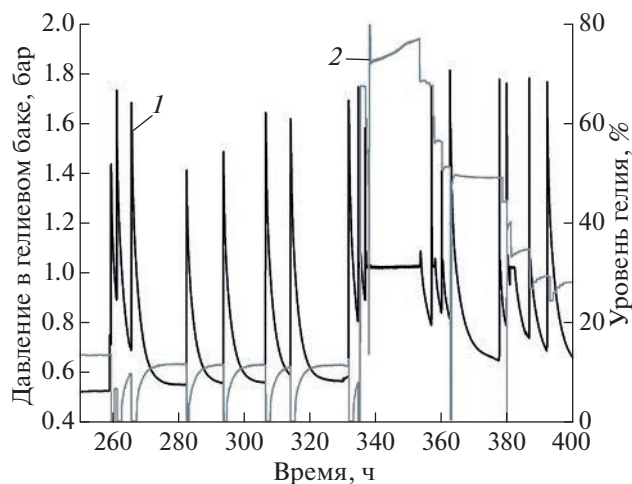


Рис. 6. Поведение давления и уровня гелия в гелиевом баке при срыве сверхпроводимости. 1 — Давление в гелиевом баке, 2 — уровень жидкого гелия в баке.

В дальнейшем была произведена дозаправка бака. Была произведена замена баллона и уровень гелия поднят до более чем 75%. В результате мы видим, что каждый срыв приводит к значительной потере гелия (изменение уровня от срыва к срыву — 75, 50, 35, 30%). Видно, что чем меньше уровень гелия перед срывом, тем меньше потери при срыве. Кроме того, потери зависят от настройки предохранительного клапана чем выше давление срабатывания, тем выше величина стабилизации уровня гелия. При настройке клапана на 1.8 бар заполнение бака стабилизировалось на уровне 20%.

Из вышесказанного следует, что нет необходимости при работе заполнять объем более чем на 10–15%. Нужно отметить, что уровень заполнения бака никак не влияет на работу магнита между срывами сверхпроводимости.

Следует отметить, что система после срыва восстанавливается без каких-либо внешних вмешательств: примерно через 3 ч после срыва давление в баке падает до атмосферного и ондулятор

снова готов к работе. Чтобы достичь пониженного давления 0.7 атм требуется около 7 ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Криогенная система с косвенным охлаждением позволяет значительно упростить работу с устройством. Для охлаждения магнита нет необходимости в использовании криогенных жидкостей. Начальное охлаждение магнита не требует участия технического персонала. Для приведения установленного на кольцо устройства в рабочее состояние достаточно одного баллона сжатого (120–150 бар) гелия. При срывах сверхпроводимости не требуется вмешательство технического персонала, что существенно упрощает процедуры обслуживания установленного на кольцо устройства. Все эти преимущества вполне компенсируют увеличение времени захолаживания.

Работа выполнена в рамках соглашения с Минобрнауки России № 075-15-2021-1359 и частично при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (проект № FWUS-2021-0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shkaruba V.A., Bragin A.V., Volkov A.A. et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17. No. 4. P. 542.
2. Шкаруба В.А., Брагин А.В., Волков А.А. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17. № 4(229). С. 567.
3. Tsukanov V.M., Khrushchev S.V., Mezentssev N.A. et al. // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2299. Art. No. 020018.
4. Bragin A.V., Khrushchev S.V., Mezentssev N.A. et al. // Proc. CRYOGENICS 2017. (Dresden, 2017). P. 400.
5. Khrushchev S., Lev V., Mezentssev N. et al. // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 90.
6. Bragin A., Gusev Ye., Khrushchev S. et al. // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 54.
7. Shkaruba V., Bragin A., Erokhin A. et al. // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2299. Art. No. 020005.
8. Khrushchev S., Mezentssev N., Shkaruba V. et al. // Proc. 15th IIR Int. Conf. CRYOGENICS 2019. (Prague, 2019). Art. No. 0043.

Superconducting undulator cryogenic system based on indirect cooling

S. V. Khrushchev^{a, b, *}, V. M. Tsukanov^{a, b}, V. A. Shkaruba^{a, b}, N. A. Mezentssev^{a, b}, A. N. Safronov^a

^a Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

^b Synchrotron Radiation Facility — Siberian Circular Photon Source “SKIF”, Boreskov Institute of Catalysis of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Koltsovo, 630559 Russia

*e-mail: Khrushchev@mail.ru

The indirect cooling cryogenic system of the superconducting undulator with 15.6 mm period and 8 mm magnetic gap is described in this article. Nitrogen heat pipes are used in this system to accelerate cooling down process. The cooling down without liquid helium was tested (only helium gas was used). The cryogenic system design is described and process of cooling down is presented.