

УДК 621.59

Криогенная система сверхпроводящего сепаратора для канала каонов ускорителя ИФВЭ

*Д-р техн. наук А. И. АГЕЕВ, канд. техн. наук С. С. КОЗУБ,
М. Н. СТОЛЯРОВ*

Anatoliy.Ageyev@ihep.ru

*ФГБУ ГНЦ Институт физики высоких энергий (ИФВЭ)
142281, Московская обл., г. Протвино, пл. Науки, 1*

Для ускорительного комплекса У-70 ГНЦ ИФВЭ разработан и реализован проект канала сепарированных каонов для изучения редких распадов этих частиц. Получение пучка каонов производится с помощью сепаратора, состоящего из двух сверхпроводящих высокочастотных (ВЧ) дефлекторов. Расстояние между дефлекторами составляет 76 м, планируемая мощность тепловыделений дефлекторов от ВЧ нагрузки на температурном уровне 1,8 К составляет 20 Вт. В данной статье приводится описание криогенной системы и опыт ее эксплуатации.

Ключевые слова: сверхпроводящий сепаратор, криогенная система, гелий, теплообменник.

Cryogenic system of a superconducting separator for the channel IFVE accelerator kaons

*D. Sc. A. I. AGEEV, Ph. D. S. S. KOZUB,
M. N. STOLYAROV*

Anatoliy.Ageyev@ihep.ru

Institute of physics of high energiya

A cryogenic system for cooling a superconducting separator of a new Kaon channel of an accelerator was developed and commissioned at Institute for High Energy Physics (IHEP). The separator consists of two superconducting RF cavities placed at 76 m distance between them. The cryogenic system cools these cavities by superfluid helium at a temperature of 1,8 K and has 280 W refrigeration capacity at 1,8 K. The design of the cryogenic system and experience of its operation are presented in this article.

Keywords: superconducting separator, cryogenic system, helium, heat exchanger.

Введение

Для ускорительного комплекса У-70 ГНЦ ИФВЭ разработан и реализован проект канала сепарированных каонов для изучения редких распадов этих частиц. Предложение по созданию этого канала с использованием сверхпроводящего сепаратора сформулировано в работе [1], технические параметры приведены в [2]. Получение пучка каонов производится с помощью сепаратора, состоящего из двух сверхпроводящих высокочастотных (ВЧ) дефлекторов. Расстояние между дефлекторами составляет 76 м, планируемая мощность тепловыделений дефлекторов от ВЧ нагрузки на температурном уровне 1,8 К составляет 20 Вт.

Создаваемая криогенная система должна обеспечить одновременную работу двух дефлекторов RF1 и RF2 при температуре 1,8 К. Использование криогенной установки КГУ500–4,5/140 производительностью

150 л/ч в режиме ожижения и 500 Вт в рефрижераторном режиме при температуре 4,5 К, а также гелиевых компрессоров, системы хранения газообразного гелия, системы низкотемпературной очистки гелия, расположенных на расстоянии около 850 м от КГУ500–4,5/140, позволило существенно сократить сроки и стоимость создания системы охлаждения дефлекторов.

Схема криогенной системы для охлаждения сверхпроводящего высокочастотного сепаратора

Криогенная система для охлаждения сверхпроводящего ВЧ сепаратора, показанная на рис. 1 [3], построена по схеме с сателлитным рефрижератором, где в качестве холодогенерирующей установки использована установка КГУ500–4,5/140. Эта установка потребляет 60 г/с газообразного гелия при давлении 25 бар и производит 5 г/с жидкого гелия, часть которого через вентиль CV2 подается в Ванну промежуточного охлаждения (ВПО), пары гелия из которой возвращаются в КГУ (рефрижераторная нагрузка). Жидкий гелий в ВПО используется для охлаждения в теплообменнике КТ1 прямого потока и в теплообменнике КТ2 избыточного потока гелия сателлитного рефрижератора, направляемого на охлаждение RF1 и RF2. Остальная часть гелия из КГУ дросселируется через вентиль CV3 и после охлаждения в теплообменнике КТ2, расположенном в ВПО, подается в контур сателлитного рефрижератора, обеспечивая в нем избыточный поток. Эта часть гелия не возвращается в КГУ и является для нее ожижительной нагрузкой.

Основной поток гелия для охлаждения дефлекторов создается сателлитным рефрижератором, основой которого является Большой вакуумный теплообменник (БВТО), охлаждающий поток сжатого гелия (7–10 г/с, 25 бар) от комнатной температуры до температуры близкой к температуре жидкого гелия. После БВТО поток гелия направляется в ВПО, где дросселируется в вентиле CV4, охлаждается в теплообменнике Т1 и затем получает поток от КГУ через теплообменник Т2. После ВПО этот поток по криогенному коллектору попадает в распреде-

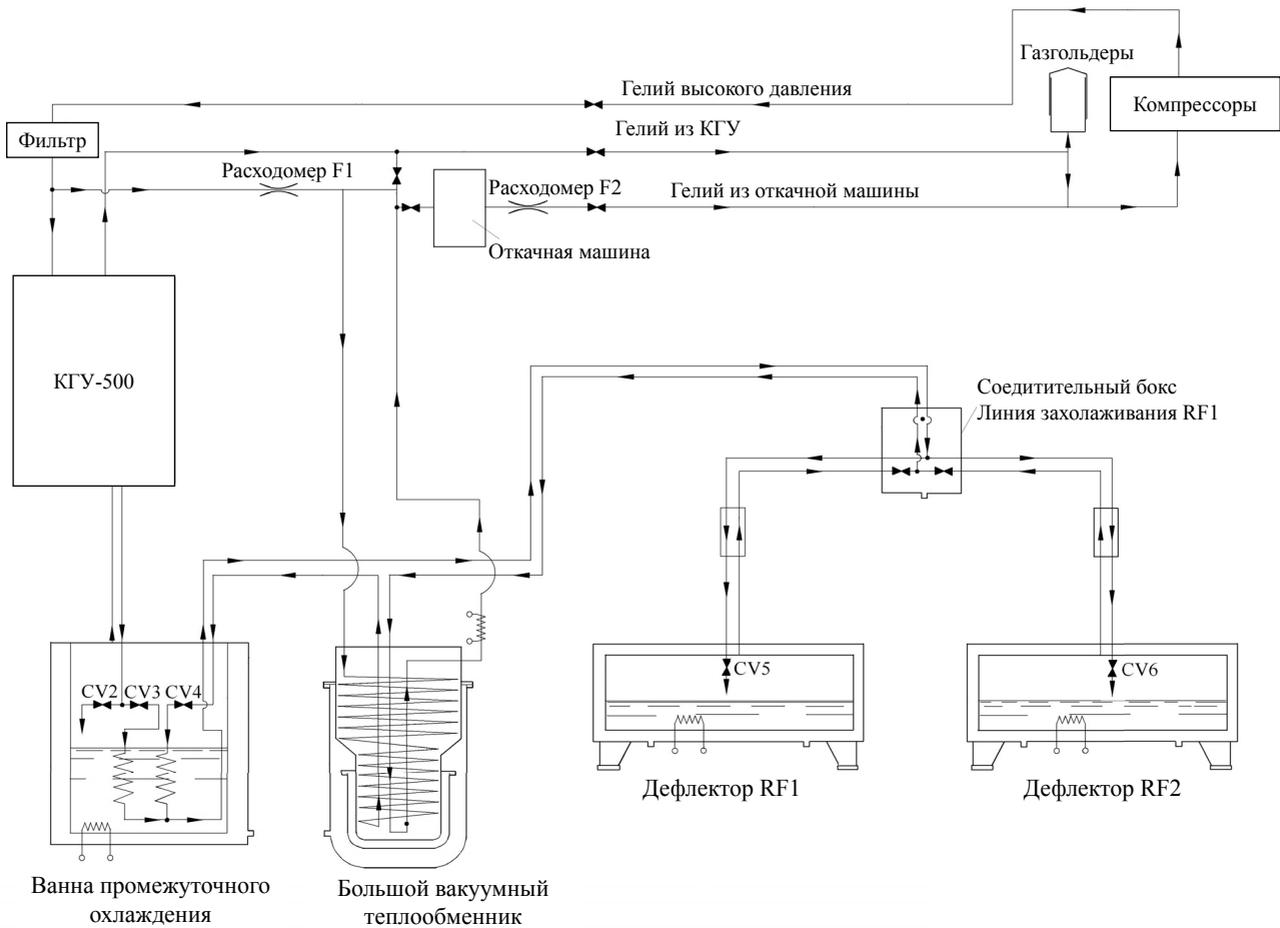


Рис. 1. Схема криогенной системы для охлаждения сверхпроводящих высокочастотных дефлекторов

лительный бокс, где делится на две части, каждая из которых по своему криогенному трубопроводу направляется в криостаты RF1 и RF2, перед которыми охлаждается в низкотемпературных теплообменниках и дросселируется через вентили CV5 и CV6 в гелиевые сосуды RF1 и RF2, соответственно.

Обратный поток паров гелия из гелиевых сосудов дефлекторов охлаждает прямой поток гелия в низкотемпературных теплообменниках, БВТО, затем откачивается и сжимается компрессором, после чего направляется в КГУ и БВТО и цикл повторяется. Получение и поддержание необходимой температуры RF1 и RF2 ниже 4,3 К осуществляется путем откачки паров из гелиевых сосудов дефлекторов с помощью откачной машины.

Оборудование криогенной системы

Дефлектор размещен в гелиевом сосуде криостата со сверхтекучим гелием, обеспечивающим необходимую стабилизацию температуры его поверхности. Основные параметры дефлектора и его криостата представлены в табл. 1 [4].

Ванна промежуточного охлаждения служит для охлаждения сверхкритического гелия ниже критической температуры после дросселирования в вентиле CV3 (теплообменник Т2) и CV4 (теплообменник Т1). Теплообменники погружены в жидкий гелий, кипящий при температуре 4,6 К, их основные характеристики представлены в табл. 2.

Таблица 1

Основные параметры дефлектора и его криостата

Параметр	Величина
Рабочая частота, ГГц	3
Сила отклоняющего поля, MV/м	1
Вес дефлектора, кг	260
Длина (диаметр) дефлектора, м	2,7 (0,14)
Длина (диаметр) гелиевого сосуда, м	3,5 (0,51)
Длина (диаметр) вакуумного кожуха, м	4,2 (0,92)
Рабочая температура дефлектора, К	1,8
Рабочий уровень (объем) гелия, % (л)	78 (415)

Таблица 2

Параметры теплообменников

Параметр	T1	KT2
Давление потока гелия в трубах, бар	2,5	2,5
Температура гелия в ВПО, К	4,6	4,6
Температура гелия на входе в теплообменник, К	6,0	5,6
Расход гелия через трубы, г/с	10	2
Наружный диаметр труб, м	0,006	0,006
Внутренний диаметр труб, м	0,004	0,004
Число труб	10	2
Длина труб, м	20	20

В Большом вакуумном теплообменнике поток сжатого гелия для криостатирования дефлекторов необходимо охладить от комнатной температуры до температуры близкой к температуре жидкого гелия. Низкое гидравлическое сопротивление по обратному потоку является важным требованием при создании такого теплообменника. Для обеспечения низких потерь давления снижена скорость обратного потока, процесс течения близок к ламинарному с низкими значениями числа Рейнольдса и, как следствие, низкими коэффициентами теплоотдачи. Возможности для улучшения теплообмена в области ламинарного потока весьма ограничены. В основном они сводятся к использованию каналов с малым эквивалентным диаметром и увеличению площади поверхности теплообмена с помощью оребрения.

Разработана конструкция теплообменника [5], удовлетворяющая требованиям, указанным выше. Он представляет собой плотную навивку медных труб, оребренных спиралью из медной проволоки. Это оребрение играет роль проставки, обеспечивая довольно равномерное расстояние между трубами, и является полезным для интенсивного перемешивания потока, таким образом, предотвращая проскок потока гелия. С другой стороны, спирали из проволоки до 10 раз увеличивают поверхность теплообмена. БВТО разделен на верхнюю и нижнюю части, чтобы компенсировать значительную зависимость свойств гелия от температуры. Прямой «теплый» поток гелия проходит по трубам, затем идет к дроссельному вентилю CV4, расположенному в ВПО. Обратный «холодный» поток гелия поднимается вверх в межтрубном пространстве теплообменника. Основные характеристики теплообменника представлены в табл. 3.

Теплообменники RF1 и RF2 служат для понижения температуры потока гелия перед его дросселированием в гелиевые сосуды дефлекторов. Теплообменник изготовлен из медных труб, оребренных спиралью из медной проволоки. Он размещен в трубе обратного потока криогенного коллектора. Прямой поток гелия движется в трубах, обратный поток гелия проходит между трубами. Основные характеристики низкотемпературных теплообменников представлены в табл. 4.

Таблица 3

Основные характеристики Большого вакуумного теплообменника

Параметр	Величина
Внешний диаметр трубы, мм	4
Внутренний диаметр трубы, мм	3,2
Диаметр спирали оребрения, мм	5
Диаметр проволоки оребрения, м	0,8
Массовый расход, кг/с	0,01
Падение давления в прямом потоке, Па	1100
Падение давления в обратном потоке, Па	270
Поверхность теплообмена по обратному потоку, м ²	275
Поверхность теплообмена по прямому потоку, м ²	32,3

Температура 1,8 К в гелиевом сосуде дефлектора достигается откачкой паров гелия до давления 1,6 кПа с помощью откачной машины, при этом расход гелия через каждый дефлектор составляет около 5 г/с и через откачную машину — 10 г/с. Откачная машина состоит из двадцати четырех вакуумных насосов, распределенных по трем ступеням. Первая ступень из восьми винтовых вакуумных насосов 2ДВН-1500 обеспечивает сжатие до 3 кПа. Вторая ступень использует восемь винтовых насосов 2ДВН-500 и сжимает гелий до 5 кПа. Третья ступень из восьми форвакуумных насосов АВЗ-180 сжимает гелий до 100 кПа. После каждого насоса первой и второй ступеней поток гелия охлаждается водой до 30 °С в холодильниках, разработанных и изготовленных в ГНЦ ИФВЭ.

Испытания откачной ячейки из соединенных последовательно насосов 2ДВН-1500, 2ДВН-500 и АВЗ-180 показали, что при давлении на входе 1 кПа она обеспечивает расход 2,5 г/с. В этом случае расход через откачную машину составляет 20 г/с (12 м³/с).

Трубопровод между дефлекторами и откачной машиной длиной около 100 м заметно снижает скорость откачки. По расчету проводимости этого трубопровода составляет 16 м³/с и определяется гидравлическим сопротивлением БВТО. Тем не менее, при давлении на входе 1 кПа откачная машина обеспечивает расход 6,9 м³/с, что выше требуемой величины 6 м³/с.

В состав первой очереди системы управления, созданной ГНЦ ИФВЭ [6], вошли 240 каналов сбора данных и дистанционного управления, 72 блока электроники в 14 каркасах и 8 шкафах, вывод информации на 5 персональных компьютеров операторов в 2 пультовых. Система контроля обеспечивает измерение:

- температуры потоков гелия в 72 точках и насосов откачной машины в 42 точках;
- разрежения между ступенями откачной машины в 3 точках;
- вакуума в 32 точках;
- уровня жидкого гелия в 3 резервуарах;
- давления гелия в 11 точках;
- расхода гелия в 2 точках;
- фазных токов двигателей насосов откачной машины по 72 каналам;
- дискретных сигналов по 12 каналам чтения (статусные).

Таблица 4

Основные параметры теплообменников RF1 и RF2

Параметр	Величина
Внешний диаметр трубки, мм	4
Внутренний диаметр трубки, мм	3,2
Диаметр спирали оребрения, мм	5
Диаметр проволоки оребрения, мм	0,8
Внутренний диаметр намотки, м	0,1
Внешний диаметр намотки, м	0,176
Длина намотки, м	0,56
Число слоев намотки	3
Массовый расход, кг/с	0,005
Поверхность теплообмена по обратному потоку, м ²	3,7
Поверхность теплообмена по прямому потоку, м ²	0,43
Падение давления обратного потока, Па	5

Для контроля этих параметров создана система удаленного анализа и наблюдения с функцией архивации данных [7]. Для хранения и накопления данных использован MS SQL-server, программное обеспечение для отображения архивных данных (графики, таблицы) создано при помощи пакета программ NI Developer Suit Core. Для отображения текущих параметров в режиме онлайн с целью контроля КВУ использован специальный web-сервер с механизмом интерактивных мнемосхем, созданный на разработанном в ИФВЭ оригинальном программном обеспечении.

Анализ основных режимов криогенной системы

Холодопроизводительность криогенной системы должна скомпенсировать теплопритоки к оборудованию системы и обеспечить требуемую скорость охлаждения СП ВЧ сепаратора. Измеренные значения теплопритоков в системе показаны в табл. 5.

Время охлаждения сепаратора определяется соотношением холодопроизводительности генерирующей холод установки, массой и теплоемкостью охлаждаемых конструкций, ограничениями на скорость охлаждения, накладываемыми конструктивными особенностями дефлекторов.

Основной холодогенерирующей установкой в диапазоне температур от комнатной до 20 К является установка КГУ 500–4,5/140. Сателлитный рефрижератор начинает работать при температурах ниже 40 К (температуры инверсии гелия). На температурном уровне 1,8 К расход гелия в прямом потоке после ВПО составляет 9,15 г/с, что соответствует холодопроизводительности 280 Вт. Из этого расхода 6,26 г/с необходимы для обеспечения рабочего режима дефлекторов и 2,89 г/с (86 л/час) используются для накопления жидкого гелия в криостатах дефлекторов.

Единственными изделиями, на которые накладываются ограничения по скорости охлаждения, являются сверхпроводящие дефлекторы: в области температур от комнатной до 150 К (10 К /ч); от 150 до 90 К (20 К /ч); ниже 90 К (10 К /ч). В табл. 6 показана длительность этапов вывода дефлекторов на рабочую температуру [8].

Таблица 5

Теплопритоки в криогенной системе на температурном уровне 1,8 К

Элементы криогенной системы	Теплоприток, Вт
Ванна промежуточного охлаждения	8
Криогенный коллектор между ВПО и RF1 и RF2	135
Гелиевый сосуд RF1	15
Гелиевый сосуд RF2	22
Тепловыделения СП ВЧ резонаторов RF1 и RF2	20
Суммарная тепловая нагрузка	200

Потребление электроэнергии КВУ связано с работой компрессоров (256 кВт) и откачной машины (280 кВт). В стационарном режиме криогенная система потребляет 4 тонны в сутки жидкого азота, как для КГУ, так и для охлаждения экранов ВПО и БВТО, криостатов дефлекторов, криогенного коллектора с распределительным боксом.

Для аварий, ликвидация которых требует длительное время, был разработан специальный режим. При остановке криогенной гелиевой установки Большой вакуумный теплообменник продолжает работать в режиме сателлитного рефрижератора, используя в качестве источника холода пары гелия, испаряющиеся из криостатов дефлекторов за счет теплопритоков из окружающей среды. В этом случае количество жидкого гелия в криостатах дефлекторов уменьшается, но его запаса достаточно для длительной работы в подобном режиме. В таком режиме криогенный коллектор прогревается не более, чем до 12 К, что при повторном пуске криогенной системы позволяет сохранить жидкий гелий в криостатах RF1, RF2 и не приводит к повышению температуры дефлекторов. К примеру, при реализации этого режима перед остановкой криогенной гелиевой установки уровень жидкого гелия в криостатах дефлекторов был 70%. Через 12 ч была запущена криогенная гелиевая установка и еще через 4 ч криогенная система была выведена на стационарный режим работы, при этом в гелиевых сосудах RF1 и RF2 поддерживалась температура 1,8 К и уровень жидкого гелия в криостатах дефлекторов не опустился ниже 40%.

В сеансе 2010 г. установка проработала 50 сут. Из этого времени 54 ч ушло на охлаждение от комнатной температуры до 4,3 К и заполнение криостатов RF1 и RF2 жидким гелием. Подготовка дефлекторов к работе при температурах 3; 2,5; 2 К продолжалась примерно 5,5 сут, после чего работа RF1 и RF2 продолжалась при температуре 1,8 К в течение 40 сут. Отогрев системы до температуры 250 К составил 2 сут. За время сеанса было получено свыше миллиона событий на установке ОКА. Изучение каонных распадов продолжается по настоящее время.

Таблица 6

Длительность этапов вывода дефлекторов на рабочую температуру

Наименование этапа	Время, ч
Охлаждение КГУ-500–4,5/140 и ВПО	10
Охлаждение криогенного коллектора	4
Охлаждение резонаторов от 290 до 4,3 К	38
Накопление жидкого гелия в гелиевых сосудах дефлекторов:	
— при температуре 4,3 К	9
— при температуре 1,8 К	4
Итого:	65

Вывод

Можно констатировать создание и успешное начало работы на ускорительном комплексе У-70 ГИЦ ИФВЭ самой крупной в России криогенной системы, охлаждающей сверхпроводящие устройства сверхтекучим гелием. Успешная работа этой системы, холодопроизводительностью 280 Вт при температуре 1,8 К, позволила обеспечить необходимые параметры сверхпроводящего высокочастотного сепаратора 21 канала, получить свыше миллиона событий на установке ОКА и планировать набор большого количества каонных распадов, что необходимо для их исследования на новом уровне.

Список литературы

1. *Obraztsov V. F., Landsberg L. G.* Prospects for CP-violation searches in the future experiment with RF-separated K[±] — beam at U-70. /International Conference on CP Violation. Sep 18–22, 2000, Italy.
2. *Garkusha V. I. et al.* Calculated characteristics of the separated kaon beam for OKA experiment at the U-70 accelerator. Preprint, IHEP-2003–4. W.
3. *Ageyev A., Bakay A., Kashtanov E., Kozub S. et al.* Commissioning of superconducting radiofrequency separator cryogenic system. Proceedings RUPAC 2006, Novosibirsk, Russia.
4. *Barth W., Lehmann.* Experience with Two Large-Scale HeII–Cryostats for a Superconducting r. f. Particle Separator Working in Closed Cycle with a 300 W Refrigerator. Proc. ICEC-6. Grenoble, 1976.
5. *Kashtanov E., Pleskach V., Polkovnikov K. et al.* Large Low Pressure Heat Exchanger for the TTF Cryogenic System. Proceedings of ICEC-18, Mumbai, India, 2000.
6. *Alferov V., Ageyev A., Bakay A., Fedorchenko V. et al.* LabView Control System of the Cryogenic Complex for the Kaon RF-Separator at IHEP. Proceedings of RUPAC-2010.
7. *Lobov I., Lutchev A., Stolyarov M. N., Sukhov S. A.* Software Service for Cryogenic Data Representation and Analysis. Proceedings of RUPAC-2010.
8. *Ageyev A., Bakay A., Kalashnikov L., Kaltchuk A., Kozub S. et al.* Starting -Up and Adjustment Works on Cryogenic AND Vacuum System of the Superconducting Radio-Frequency Separator. Proceedings RUPAC 2008.

Требования к рукописям, представляемым в журнал «Вестник Международной академии холода»

При подготовке статей для журнала «Вестник Международной академии холода» необходимо руководствоваться следующими правилами:

- в начале статьи, слева – УДК;
- после названия статьи – авторы с указанием места работы и контактной информации;
- отдельно указываются ключевые слова (не более десяти);
- одновременно со статьей представляется реферат на русском и английском языках. Объем реферата 1/3–1/4 страницы формата А4;
- статьи представляются набранными на компьютере в текстовом редакторе Word 97–2007 через 1,5 интервала, размер шрифта 14.
- объем статьи – не более 12–14 страниц (формат А4, вертикальный, 210×297 мм);
- поля: левое – 2 см, правое – 2 см, верхнее – 2 см, нижнее – 2 см;
- иллюстрации представляются на магнитном носителе в следующем формате: растровые – TIFF-СМУК-300 dpi, TIFF-ВМ-800 dpi, векторные – EPS-СМУК, в статьях необходимо использовать Международную систему единиц (СИ);
- в списке используемой литературы указываются: фамилия, инициалы автора(ов), название книги, место издания, название издательства, год издания (или название статьи и журнала (или другого периодического издания), год, номер). Ссылки на рукописные работы не допускаются;
- статьи принимаются на магнитном носителе и в печатном экземпляре или высылаются на адрес редакции по e-mail: vestnikmax@rambler.ru

С аспирантов и студентов плата за публикации рукописей не взимается