

КРИОГЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Константинов А. В., Митрофанова Ю. А., Швидкий Д. С.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, ул. Ак. Балдина, 4

e-mail: akonstantinov@jinr.ru

Дан краткий обзор применению техники низких температур на ускорительном комплексе и экспериментальных установках Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований (ЛФВЭ ОИЯИ).

Криогенная техника в ЛФВЭ представлена как крупномасштабными системами большой холодопроизводительности, предназначенными для криостатирования сверхпроводящих ускорителей, так и установками, созданными для решения задач экспериментальной физики: криогенные мишени, источники ионов, незамкнутые сверхпроводящие экраны и др.

Создание ускорителей частиц, способных обеспечить необходимые физикам–экспериментаторам энергию и интенсивность пучка, стало возможным благодаря использованию сверхпроводящих магнитов. Такие магниты, работающие при температурах близких к абсолютному нулю, позволяют получить магнитные поля значительно более высокой величины, по сравнению с классическими «теплыми» ускорителями. Первый в Европе и второй в мире сверхпроводящий ускоритель Нуклотрон был создан в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ в 1993 г.

Нуклотрон– кольцевой сверхпроводящий синхротрон, ускоряющий частицы до энергии 4,5 ГэВ/н. Периметр кольца – 252 м, рабочая температура магнитов – 4,5 К, общая масса оборудования, охлаждаемого до 4,5 К – 80 т. Ускоритель изготовлен из сверхпроводящих магнитов типа «Дубна», особенностью которых является их охлаждение кипящим двухфазным гелием, циркулирующим внутри сверхпроводящей обмотки. Такое решение позволяет эффективно снимать тепловую нагрузку, используя теплоту испарения жидкого гелия и минимизировать его количество в магнитно-криостатной системе.

Для охлаждения Нуклотрона была создана крупная криогенная гелиевая система, в основе которой лежат две установки КГУ-1600/4,5, винтовые компрессоры Каскад-80/25, многоступенчатая система очистки гелия.

Криогенная гелиевая установка КГУ-1600/4,5 имеет холодопроизводительность 1600 Вт на температурном уровне 4,5 К в дроссельном режиме

и 2000 Вт при использовании парожидкостного турбодетандера в ступени ожижения. Каждая установка охлаждает полукольцо ускорителя, обеспечивая температурный режим работы Нуклотрона несколько месяцев в году. Ускоритель Нуклотрон является базовой установкой, обеспечивающей выполнение физической программы Лаборатории по настоящее время.

С 2013 года Лабораторией реализуется mega-science проект коллайдера тяжелых ионов NICA - Nuclotron based Ion Collider fAcility. Создаваемый комплекс будет состоять из трех сверхпроводящих колец: Нуклотрона, Бустера и Коллайдера. Все они будут работать при температуре жидкого гелия. Для обеспечения их работы холодопроизводительность криогенного комплекса необходимо увеличить более чем в два раза. На рис. 1 показаны основные элементы криогенного комплекса NICA.



Рис. 1. Основные элементы криогенного комплекса NICA

К двум установкам КГУ-1600/4,5 добавятся три сателлитных гелиевых рефрижератора РСГ-2000/4,5 и ожижитель гелия ОГ-1000. На рис. 2 показаны термодинамические циклы ожижителя и сателлитного рефрижератора, на рис. 3 – система криогенного обеспечения коллайдера NICA.

Для снабжения комплекса жидким азотом, создается замкнутая азотная система с ожижителем азота и реконденсаторами. Такое решение обеспечит независимость комплекса от поставок азота от сторонних организаций и повысит его энергоэффективность. Рост холодопроизводительности системы потребует также и увеличения мощностей компрессии гелия. Для этого построено новое здание криогенно-компрессорной станции, в которой смонтированы гелиевые винтовые и азотные центробежные компрессорные установки.

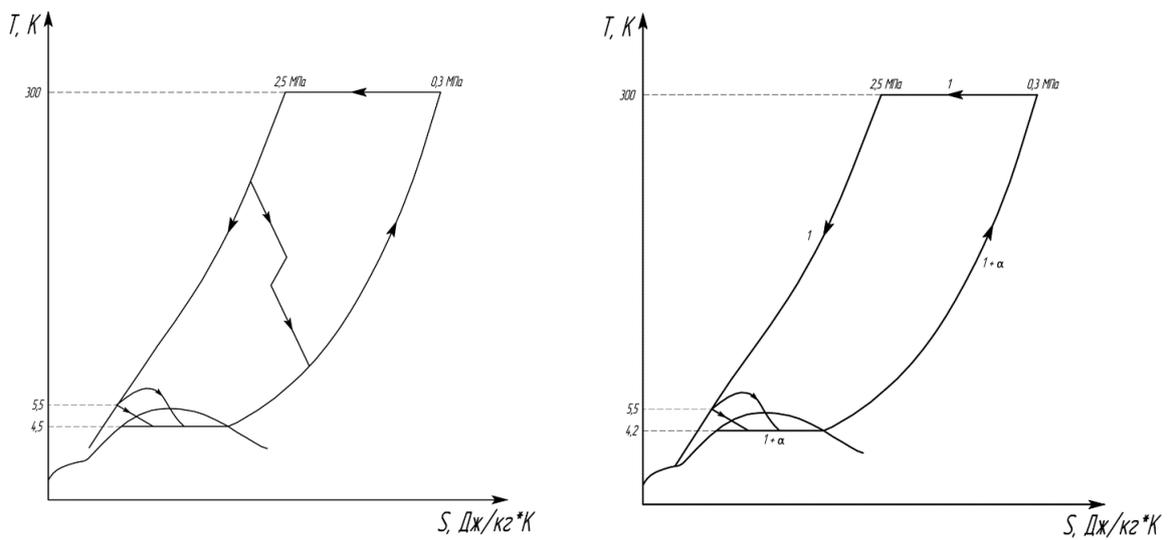


Рис. 2. Т-S диаграммы работы ожижительной установки и спутникового рефрижератора (α – жидкий гелий, подаваемый в РСГ от стороннего ожижителя)

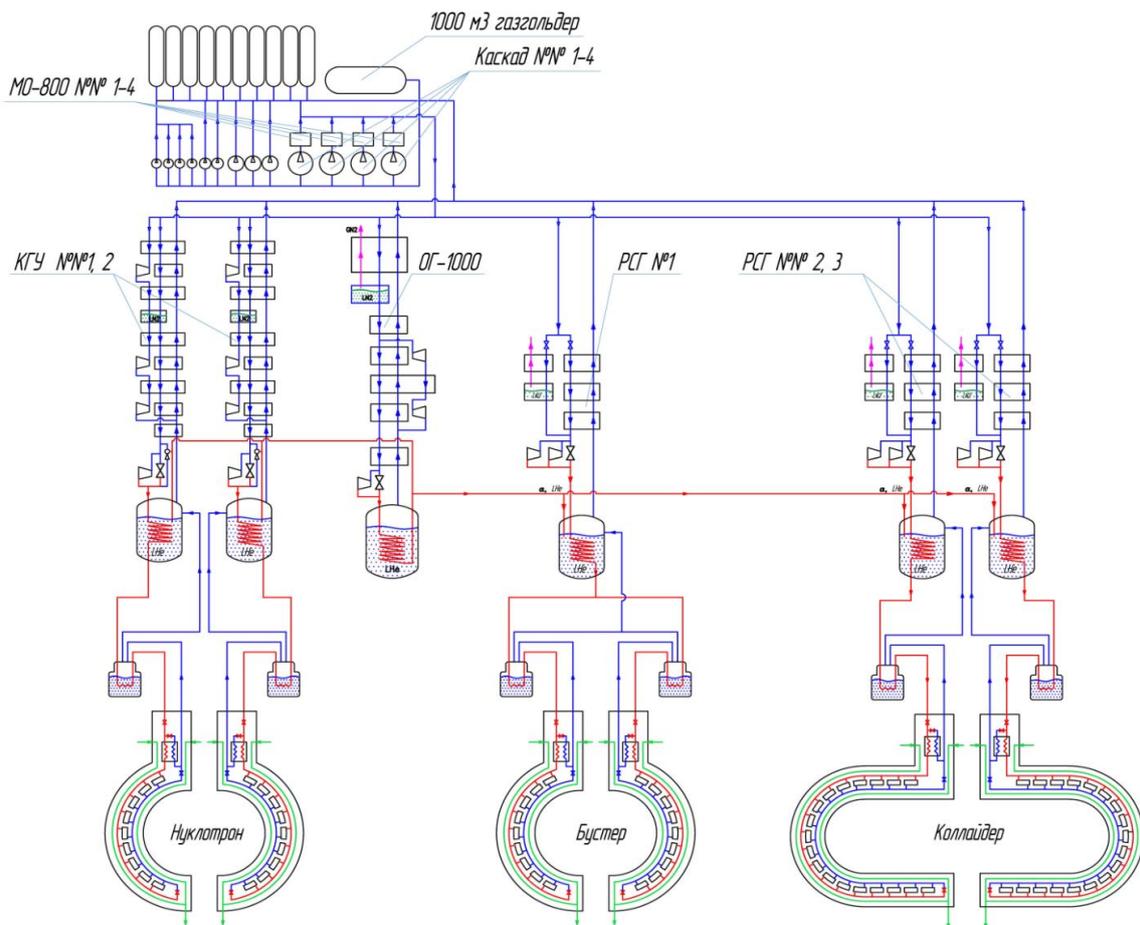


Рис. 3. Принципиальная схема системы криогенного обеспечения коллайдера NICA

Помимо ускорителей, применение криогенных технологий позволило создать ряд уникальных физических установок и комплексов, а также обеспечить проведение важнейших экспериментальных и исследовательских работ Лаборатории.

Так, для проведения экспериментов с ядрами легчайших элементов (H_2 , D_2 , 4He) в Лаборатории разработаны оригинальные устройства - криогенные жидкостные мишени. Криогенная мишень представляет собой цилиндрический горизонтальный сосуд, изготовленный из полимерной пленки, заполняемый жидкими H_2 , D_2 или 4He . Вакуумный кожух мишени изготавливается из пенопласта специальных марок. Использование полимерных материалов для изготовления сосуда и вакуумного кожуха, позволяет свести к минимуму количество посторонних взаимодействий с пучком и повышает качество получаемых экспериментальных данных. Для эксперимента BM@N (baryonicmatter at Nuclo-tron) создана криогенная жидкостная мишень на основе газовой холодильной машины - криокулера. Ее использование значительно упрощает эксплуатацию установки и позволяет отказаться от использования жидкого гелия для ожижения водорода.

Важным параметром любого ускорителя является однородность магнитного поля, которая влияет на качество пучка. Для повышения однородности поля используются незамкнутые сверхпроводящие экраны, создаваемые в Лаборатории. Для их изготовления используются высокотемпературные сверхпроводники из 2G-ВТСП ленты, рабочая температура которой составляет 77 К. Применение новых ВТСП материалов ставит необходимость решать новые задачи, связанные с особенностями этих материалов. Несмотря на достаточно высокие значения рабочих температур, для работы в высоких магнитных полях, ленту необходимо охлаждать значительно ниже 77 К (20...40 К), чтобы обеспечить необходимые величины критических токов ленты.

Столкновение пучков в коллайдере будет происходить в двух детекторах: MPD (multi-purposedetector) и SPD (spinphysicsdetector). Детекторы располагаются на диаметрально противоположных прямолинейных участках коллайдера. В каждом из детекторов находится сверхпроводящий магнит, работающий при температуре 4,5 К.

В феврале 2024 г. начат первый этап криогенных испытаний магнита детектора MPD, в процессе которого он будет охлажден до 77 К. Конструкция магнита чувствительна к температурным деформациям и скорость его охлаждения не должна превышать 1 К в час. Охлаждение до температуры 4,5 К будет осуществлено при помощи сателлитного рефрижератора по готовности гелиевой криогенной системы. Магнит для детектора SPD находится на стадии проектирования.

Лабораторией освоено создание источников ионов для ускорителей частиц. Основная часть источника - сверхпроводящий соленоид, погруженный в жидкий гелий. Процесс ускорения частицы начинается с её рождения в источнике и от него зависит работа всего ускорительного комплекса.

В 2016 году в Лаборатории запущено производство сверхпроводящих магнитов. Здесь изготавливают магниты для проектов NICA и FAIR (г. Дармштадт, Германия). Общий вид цеха по производству и испытанию сверхпроводящих магнитов показан на рис. 4.



Рис. 4. Стенд изготовления и испытаний сверхпроводящих магнитов

Рабочая температура магнитов – 4,5 К. Криогеника здесь представлена участком криогенных испытаний. Каждый изготовленный магнит необходимо охладить до рабочей температуры и провести его всестороннее тестирование. Криогенный комплекс ЛФВЭ регулярно обеспечивает это производство жидким гелием и участвует в сменах по испытаниям магнитов. Для испытаний на фабрике смонтировано три гелиевых сателлитных рефрижератора малой мощности (100 Вт).

Для измерения гелиевых температур в Лаборатории разработана собственная технология и создан стенд калибровки криогенных термометров ТВО (твердотельный, влагостойкий, объемный). Существующая термометрия Нуклофона создана на базе этих датчиков и показала высокую надежность и точность измерений. Измерение температур сверхпроводящих колец Бустера и Коллайдера также реализовано на базе термометров ТВО.