

СТАТУС РАБОТ ПО ВВОДУ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ КС № 2 ЛФВЭ

*Н. Н. Агапов^а, А. Н. Жарков^а, А. О. Колесников^а,
А. В. Константинов^а, Ю. А. Крюков^а, Ю. А. Митрофанова^а,
Г. Г. Стифоров^а, Д. С. Швидкий^{а, 1}*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

С вводом в эксплуатацию новых сверхпроводящих колец бустера и коллайдера возникла потребность в увеличении холодопроизводительности криогенной гелиевой системы ЛФВЭ более чем в 2 раза. Для обеспечения сжатым гелием охладителя ОГ-1000 и сателлитных рефрижераторов РСГ-2000/4.5 № 1–3 на компрессорной станции КС № 2 смонтированы два винтовых гелиевых компрессорных агрегата «Каскад-110/30» № 3, 4. Кроме того, для получения жидкого азота, реконденсации паров и транспортировки криоагента потребителям создается замкнутая азотная система криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA. Для снабжения сжатым азотом криогенных установок системы будут использоваться два турбокомпрессора Samsung SM5000 № 1, 2 и турбокомпрессор «Аэроком 2-179/18».

Commissioning of the new superconducting accelerators (Booster and Collider) led to the need to increase the cooling capacity of the VBLHEP cryogenic system more than twice. Two new screw helium compressors “Kaskad-110/30” No. 3, 4 have been installed at the compressor station CS No. 2 to supply the liquefier OG-1000 and satellite refrigerators RSG-2000/4.5 No. 1–3 with the compressed helium. Besides, a new closed cycle nitrogen cryogenic system of the NICA accelerator complex is being constructed for producing liquid nitrogen, recondensation of nitrogen vapors and nitrogen supply of the consumers. Two turbocompressors Samsung SM5000 No. 1, 2 and turbocompressor “Aerocom 2-179/18” will be used to supply the cryogenic facilities with compressed nitrogen.

PACS: 29.20.–c

1. КОМПРЕССОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ГЕЛИЕВОЙ СИСТЕМЫ КРИОГЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

Ускорительный комплекс NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) создается в Лаборатории физики высоких энергий с 2013 г. и включает в себя три сверхпроводящих ускорителя: бустер, нуклotron и коллайдер [1]. Рабочая температура колец

¹E-mail: shvidkiy@jinr.ru

ускорителя комплекса NICA равна 4,5 К. Жидкий гелий для охлаждения и криостатирования сверхпроводящих магнитов ускорителей обеспечивается криогенными установками: рефрижераторами и охлаждающими, расположенными в корпусе центральной криогенной станции. Криогенные установки снабжаются сжатым гелием от компрессоров, находящихся на двух компрессорных станциях КС №1 и 2.

Компрессорная станция КС №1 была введена в эксплуатацию в 1991 г. для снабжения сжатым гелием двух криогенных рефрижераторов КГУ-1600/4.5 №1, 2, охлаждающих сверхпроводящий ускоритель нуклotron. Установленная мощность станции составляет 4,4 МВт.

В связи с вводом в эксплуатацию новых ускорительных колец бустера и коллайдера была увеличена более чем в 2 раза «холодная» масса охлаждаемых СП-магнитов. Для охлаждения вновь смонтированных ускорителей были введены в эксплуатацию новые криогенные установки: гелиевый охлаждающий ОГ-1000 и гелиевые сателлитные рефрижераторы РСГ-2000/4.5 №1-3. Для обеспечения указанных установок сжатым гелием было смонтировано дополнительное компрессорное оборудование. Для размещения новых компрессоров была спроектирована и построена компрессорная станция №2. На станции размещены два винтовых гелиевых компрессора «Каскад-110/30» №3, 4 производства АО «НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа».

Установленная мощность гелиевых компрессоров компрессорной станции КС №2 составляет 3,2 МВт.

1.1. Компрессорная станция КС №1. На компрессорной станции КС №1 располагаются винтовые и поршневые гелиевые компрессорные агрегаты различных модификаций, основные технические параметры которых указаны в таблице.

Поршневые компрессоры используются для ступенчатого регулирования расхода газа в криогенной системе и закачки испарившегося гелия в хранилища.

Основными компрессорами являются двухступенчатые винтовые компрессоры «Каскад-80/25» №1, 2, сделанные в АО «НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», производительностью 5000 $\text{м}^3/\text{ч}$ каждый. Каскад №1 является предсерийным образцом.

В январе 2024 г. была начата модернизация установки «Каскад-80/25» №1 с целью повышения ее производительности и ремонтопригодности. Отличие серийного образца заключается в большей производительности винтовой пары второй ступени

Технические характеристики компрессорного оборудования компрессорной станции КС №1

Параметр	Наименование компрессорного агрегата				
	Каскад 80/25	405ГП-20/31	305НП-20/31	2ГМ4-12/31	6ГШ1.6-2/1.1-200-1
Количество, шт.	2	1	2	3	3
Производительность, $\text{м}^3/\text{ч}$	5040	1200	1200	720	120
Давление нагнетания, МПа	2,5	3,1	3,1	3,1	20
Число ступеней сжатия	2	4	4	4	5
Мощность электродвигателя, кВт	800/600	200	200	160	55
Частота вращения, об./мин	2970	500	500	700/350	1450



Рис. 1. Переходная пластина гелиевого винтового компрессорного агрегата «Каскад-80/25» № 1



Рис. 2. Установка переходных пластин гелиевого винтового компрессорного агрегата «Каскад-80/25» № 1 под компрессор и электродвигатель

и, соответственно, в больших ее габаритных размерах. Из-за меньшей производительности второй ступени предсерийной машины отличаются межступенчатые давления компрессоров. На предсерийной установке для согласования работы первой и второй ступеней приходилось частично байпасировать первую, что снижало энергоэффективность и производительность установки в целом.

Для установки серийной винтовой пары второй ступени необходимо было удлинить место крепления компрессора к раме. Для этого были изготовлены переходные фрезерованные пластины под компрессор и электродвигатель (рис. 1, 2), так как он должен находиться на одной оси с винтовой парой с отклонением в допуске до 0,08 мм по вертикали и горизонтали. При этом необходимо было перемонтировать трубопроводную связь компрессорной установки, так как двигатель с компрессором второй ступени стали располагаться выше.

В марте 2024 г. модернизированный компрессор «Каскад-80/25» № 1 был запущен в работу: производительность компрессора увеличилась с 4800 до 5050 $\text{нм}^3/\text{ч}$.

1.2. Компрессорная станция КС № 2. Два винтовых компрессора «Каскад-110/30» № 3, 4, расположенные в компрессорной станции КС № 2, представляют собой трехкорпусную двухступенчатую компрессорную установку (рис. 3) [2].

Основные отличия компрессора «Каскад-110/30» от «Каскад-80/25»: наличие собственного электродвигателя на каждом компрессоре первой ступени и усовершенствованной маслосистемы с пусковым масляным электронасосом, а также возможность регулировки производительности установки в широком диапазоне (от 20 до 100 %) путем включения/выключения одного из двигателей первой ступени и регулировки с помощью золотниковых регуляторов.

Все коммуникации компрессорной станции КС № 2 были проверены на плотность и герметичность, отвакуумированы, заполнены гелием. В настоящее время компрессорное оборудование штатно подключено к гелиевой системе криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA.

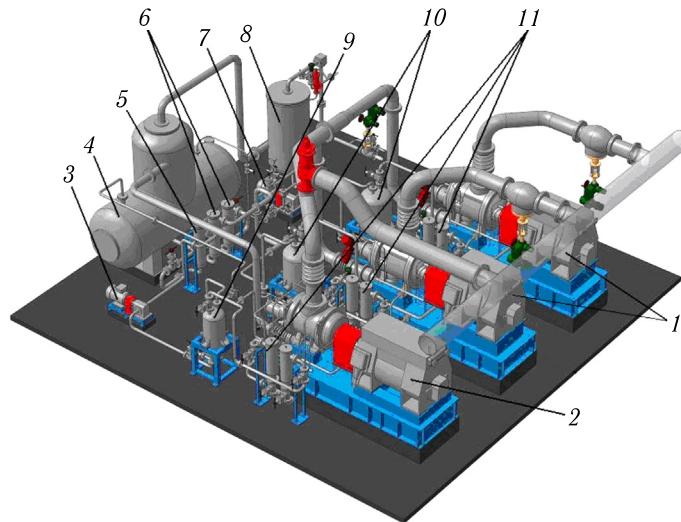


Рис. 3. Общий вид гелиевого винтового компрессорного агрегата «Каскад-110/30»: 1 — два винтовых компрессора первой ступени сжатия; 2 — винтовой компрессор второй ступени сжатия; 3 — масляный насос; 4 — маслобак; 5 — фильтры грубой очистки второй ступени; 6 — фильтры грубой очистки первой ступени; 7 — пусковой масляный насос компрессоров первой ступени; 8 — сепаратор; 9 — маслоохладитель второй ступени; 10 — два маслоохладителя первой ступени; 11 — фильтры тонкой очистки

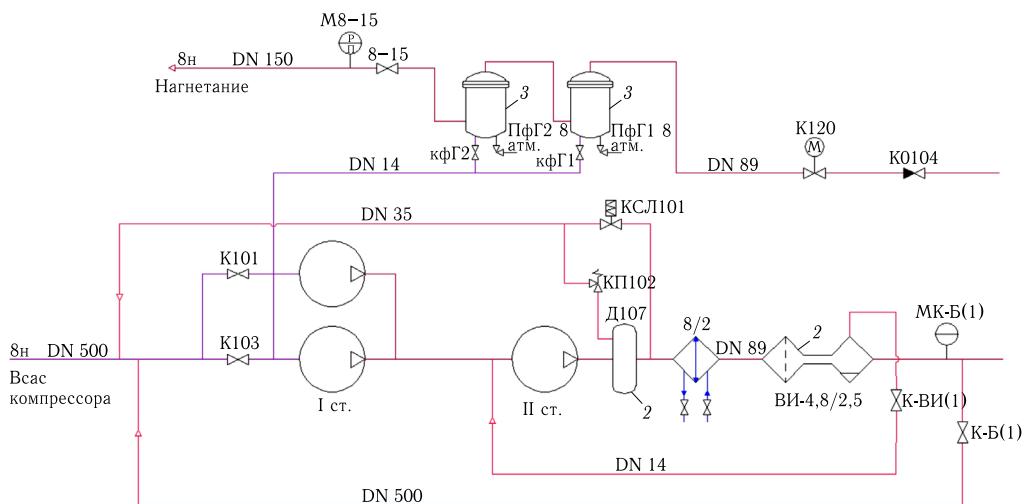


Рис. 4. Система очистки газа на выходе из компрессоров «Каскад-110/30» № 3, 4

Весной 2024 г. были проведены испытания компрессорных агрегатов «Каскад-110/30» № 3, 4 на воздушной среде: каждый из компрессоров проработал в течение 72 ч при избыточном давлении на нагнетании 25 кГс/см². В процессе работы была

оценена производительность каждой компрессорной установки с помощью байпасного вентиля с известной расходной характеристикой. Производительность составила 6400 и 6500 $\text{нм}^3/\text{ч}$ для «Каскад-110/30» № 3 и «Каскад-110/30» № 4 соответственно. По результатам испытаний компрессоры введены в эксплуатацию для работы на криогенном комплексе NICA.

Так как винтовые компрессоры являются маслосмазываемыми, необходима очистка сжатого газа перед его подачей в криогенные установки. Для очистки сжатого газа от примесей масла используется многоступенчатая система (рис. 4). Первой степенью очистки является фильтр-маслоотделитель (1) самой компрессорной установки. Но такая степень очистки является недостаточной для криогенных установок, и для ее повышения была установлена дополнительная ступень очистки, состоящая из фильтра-сепаратора (2) и двух фильтров (3).

В фильтре-сепараторе за счет закручивания потока газа отбивается часть масла, и отсепарированное масло направляется на всас компрессора. В каждом из двух фильтров происходит очистка газа в ненамокаемом фильтроэлементе: газ проходит сквозь фильтр, а масло стекает вниз, откуда также попадает обратно на всас компрессора.

Такая система очистки газа позволяет возвращать в компрессор более 99 % масла, обеспечивая его длительную работу без доливки масла в систему.

2. КОМПРЕССОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ АЗОТНОЙ СИСТЕМЫ КРИОГЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

Создаваемая азотная система замкнутого цикла для криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA включает в себя охладитель ОА-1.3 производительностью 1300 $\text{кг}/\text{ч}$ и два реконденсатора паров азота РА-0.5 производительностью 500 $\text{кг}/\text{ч}$ каждый [3].

Для снабжения сжатым газом азотных установок криогенного комплекса будут использоваться два турбокомпрессора Samsung SM5000 производительностью 11 820 $\text{нм}^3/\text{ч}$ и турбокомпрессор «Аэроком-2 179/18» производительностью 10 740 $\text{нм}^3/\text{ч}$. Компрессоры смонтированы на компрессорной станции № 2.

Компрессорные установки состоят из компрессорного агрегата, соединенного с электродвигателем мощностью 1600 кВт. В агрегате азот последовательно сжимается в четырех ступенях компрессора, после каждой ступени происходит охлаждение рабочего газа в охладителе.

Также в компрессорной станции КС № 2 установлены два поршневых азотных компрессора 6ГШ1.6-2/1.1-200-2 производительностью 180 $\text{нм}^3/\text{ч}$ каждый. Компрессоры обеспечивают закачку азота в ресиверы.

Установленная мощность азотных компрессоров составляет 4,8 МВт.

К настоящему времени завершены работы по монтажу азотных коммуникаций компрессорной станции КС № 2, проведены испытания турбокомпрессоров SM5000 № 1, 2 и «Аэроком-2 179/18» и поршневых компрессоров 6ГШ1.6-2/1.1-200-2 № 1, 2 на воздушной среде.

Следующим этапом пусконаладочных работ азотного компрессорного оборудования являются испытания компрессоров на рабочей среде — азоте. Для проведения

указанных испытаний будет необходим ввод в эксплуатацию газового пульта управления, монтируемого в корпусе 1Б.

Пульт управления азотной системы криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA предназначен для контроля и поддержания технологических параметров на линии закачки азота в ресиверы и линиях всасывания и нагнетания компрессоров. Таким образом, газовый пульт обеспечивает взаимосвязь оборудования системы хранения и компримирования газообразного азота: компрессоров, ресиверов и газгольдера.

Оборудование для хранения газообразного азота системы криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA включает в себя пять ресиверов объемом 20 м³ каждый. Ресиверы были отвакуумированы и заполнены сухим азотом.

1000-м³ азотный газгольдер изохорного типа обеспечивает избыточное давление на линии всасывания компрессоров и в системе в диапазоне 0,02–0,06 кГс/см². Газгольдер состоит из 10 отсекаемых друг от друга сосудов объемом 100 м³ каждый. Азотный газгольдер был отвакуумирован и заполнен сухим азотом.

Монтаж газового пульта был завершен в декабре 2024 г., после этого проведены пусконаладочные работы азотного компрессорного оборудования на рабочей среде.

3. СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ КОМПРЕССОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ КРИОГЕННО-КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ ЛФВЭ

Для охлаждения компрессорного оборудования компрессорной станции КС № 2 используется система обратного водоснабжения (СОВ), состоящая из градирен, емкостей с водой, насосной станции, системы фильтрации воды, расходомеров и балансировочной арматуры (рис. 5).

Охлаждение компрессоров (2) обеспечивается циркуляцией охлаждающей воды в контуре СОВ. Нагретая вода на выходе из теплообменников каждого компрессора поступает в систему градирен. В градирнях происходит охлаждение воды воздухом, принудительно нагнетаемым лопастями вентиляторов (10). Охлажденная вода стекает в емкости 1, 2 (6). Из емкостей охлаждающая вода поступает на насосную станцию (4). Далее вода с давлением необходимой величины проходит очистку от взвешенных частиц в системе фильтрации воды, состоящей из самоочищающихся фильтров (3), и поступает на охлаждение в теплообменники компрессоров.

Для СОВ введена в эксплуатацию автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУТП), обеспечивающая контроль технологических параметров и дистанционное управление оборудованием системы. В АСУТП СОВ реализованы функции архивирования данных, формирования технологических и информационных сигнализаций и т. д.

Весной 2024 г. была проведена настройка контура регулирования подачи воды для подпитки системы. Кроме того, была проведена настройка балансировочной арматуры, установленной на входе в теплообменники каждого компрессора, для оптимизации величины расхода охлаждающей воды. В результате была снижена нагрузка на насосную станцию.

В настоящее время ведутся работы по модернизации АСУТП СОВ с целью обеспечения дистанционного управления насосами, градирнями, фильтрами.

Территория ЛФВЭ_11_03

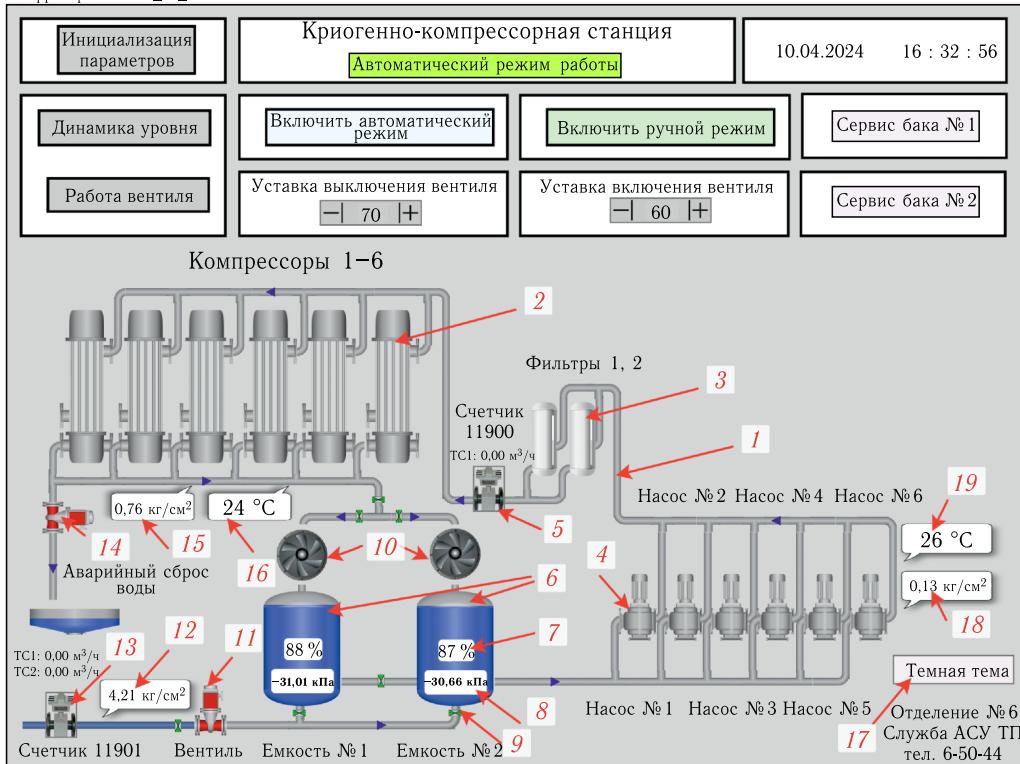


Рис. 5. Мнемосхема системы обратного водоснабжения компрессорной станции №2: 1 — трубопроводы; 2 — компрессорное оборудование; 3 — фильтры; 4 — насосная группа; 5 — расходомер; 6 — баки с водой; 7 — индикация уровня баков в процентах; 8 — давление в баках; 9 — арматура; 10 — вентиляторы градирен; 11 — вентиль-подпитка; 12 — давление в системе подпитки; 13 — расходомер; 14 — вентиль сброса воды; 15 — давление воды после компрессорного оборудования; 16 — температура воды после компрессорного оборудования; 17 — изменение фона мнемосхемы; 18 — давление воды после насосов; 19 — температура воды после насосов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время все гелиевые компрессорные агрегаты введены в эксплуатацию и используются при работе криогенных установок КГУ-1600/4.5 № 1, 2, ОГ-1000 и РСГ-2000/4.5 № 1. Наличие четырех винтовых компрессорных агрегатов серии «Каскад» и парка поршневых компрессоров позволит обеспечить сжатым гелием в необходимом количестве все установки криогенного комплекса NICA.

Ввод в эксплуатацию азотной системы хранения и компримирования обеспечит проведение пусконаладочных работ на азотном реконденсаторе РА-0.5 №1 в 2025 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Agapov N. et al.* Cryogenic Technologies of the Superconducting NICA Accelerator Complex // Proc. 15th IIR Conf. "Cryogenics 2019". Prague, 2019.
2. *Хисамиев И. Г., Зискин Г. Ф., Агапов Н. Н., Швидкий Д. С.* Создание компрессорной установки ГВ 110/30 («Каскад-110/30») для криогенной системы ускорительно-накопительного комплекса NICA // Тр. 15-й Междунар. науч.-техн. конф. по компрессорной технике. Казань, 2011.
3. *Agapov N. et al.* Nitrogen Cryogenic System for the NICA Accelerator Complex at JINR // IEEE Trans. Appl. Superconduct. 2018. V.28, Iss. 4.

Получено 28 октября 2024 г.