

АЗОТНАЯ СИСТЕМА КРИОГЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

*Н. Н. Агапов^a, А. П. Булах^a, С. В. Гудков^a, А. Э. Емельянов^a,
Т. Г. Жиронкина^a, А. В. Константинов^a, А. А. Кузнецов^a,
Ю. А. Митрофанова^{a,1}, А. Е. Смирнов^a, Д. С. Швидкий^a*

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

Для ускорительного комплекса NICA создается азотная система криогенного обеспечения производительностью 2300 кг/ч жидкого азота. Система включает в себя азотный ожижитель производительностью 1300 кг/ч и два азотных реконденсатора производительностью 500 кг/ч каждый. Для циркуляции газа в системе будут использоваться два турбокомпрессора Samsung SM5000 производительностью 11 820 нм³/ч и турбокомпрессор «Аэроком 2-179/18» производительностью 10 740 нм³/ч. Ввод в эксплуатацию азотной системы замкнутого цикла увеличит энергетическую эффективность криогенного комплекса, уменьшит затраты при его эксплуатации и обеспечит независимость комплекса от поставок жидкого азота со стороны. Представлен статус работ по монтажу, пусконаладке и вводу в эксплуатацию оборудования азотной системы криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA.

The nitrogen cryogenic system with a capacity of 2300 kg/h of liquid nitrogen has been created for the NICA accelerator complex. The system includes a nitrogen liquefier with a capacity of 1300 kg/h and two nitrogen recondensers with a capacity of 500 kg/h each. To circulate gas in the system, two turbocompressors Samsung SM5000 with a capacity of 11 820 nm³/h each and turbocompressor Aerocom 2-179/18 with a capacity of 10 740 nm³/h will be used. The commissioning of a closed-cycle nitrogen system will increase the energy efficiency of the cryogenic complex, reduce the costs of its operation, and ensure the independence of the complex from external supplies of liquid nitrogen. The status of mounting and commissioning the equipment of the nitrogen cryogenic system for the NICA accelerator complex is given.

PACS: 29.20.—c

1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ АЗОТНОЙ СИСТЕМЫ КРИОГЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

Для охлаждения и поддержания при гелиевой и азотной температурах оборудования ускорительного комплекса NICA требуется испарять значительные количества жидкого азота [1]. Для получения жидкого азота, реконденсации паров и транспортировки криоагента к потребителям создается замкнутая азотная система криогенного

¹E-mail: mitrofanova@jinr.ru

обеспечения ускорительного комплекса NICA. Ввод в эксплуатацию азотной системы замкнутого цикла увеличит энергетическую эффективность криогенного комплекса, уменьшит затраты при его эксплуатации и обеспечит независимость комплекса от поставок жидкого азота со стороны.

При проектировании азотной криогенной системы учитывались не только технические характеристики потребителей жидкого азота, но и режимы их работы. Основными потребителями азота являются теплозащитные экраны магнитно-криостатных систем (МКС) ускорителей и криогенных трубопроводов, ВТСП-тоководы, гелиевые ожижители и рефрижераторы, блоки низкотемпературной очистки гелия.

Параметры испарившегося азота на выходе от каждого потребителя различны. Температура азота на выходе из экранов МКС ускорителей и криогенных трубопроводов равна 80 К, а на выходе из азотных ванн рефрижераторов КГУ-1600/4.5, сателлитных рефрижераторов РСГ-2000/4.5 и ожижителя ОГ-1000 равна 300 К. Таким образом, азотная криогенная система ускорительного комплекса NICA должна включать в себя оборудование, обеспечивающее не только ожижение азота с температурой 300 К, но и реконденсацию его паров с температурой 80 К.

Кроме того, величина затрат жидкого азота меняется в зависимости от режима работы гелиевой системы криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA. Существует два режима работы гелиевой криогенной системы: режим охлаждения — когда магнитные системы ускорителей охлаждаются от температуры окружающей среды до гелиевой температуры $T = 4,5$ К, рабочий режим — когда магнитные системы ускорителей находятся при $T = 4,5$ К.

При проектировании азотной системы принималось, что в рабочем режиме затраты жидкого азота составят 1840 кг/ч, в том числе:

на охлаждение теплозащитных экранов МКС	
нуклотрона, кг/ч	250
бустера, кг/ч	200
коллайдера, кг/ч	500;
затраты в рабочем режиме	
на двух рефрижераторах КГУ-1600/4.5 нуклотрона, кг/ч	330
на гелиевом ожижителе ОГ-1000, кг/ч	560.

Таким образом, чтобы обеспечить необходимое количество жидкого азота, была спроектирована азотная система криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA производительностью 2300 кг/ч, включающая в себя ожижитель ОА-1.3 производительностью 1300 кг/ч и два реконденсатора РА-0.5 производительностью 500 кг/ч (в режиме ожижения азота производительность реконденсатора составляет 350 кг/ч).

Один из реконденсаторов будет обеспечивать реконденсацию паров азота, поступающих с теплозащитных экранов МКС нуклотрона и бустера; второй — паров, поступающих с экранов МКС коллайдера. Азотный ожижитель ОА-1.3 будет компенсировать затраты жидкого азота в рабочем режиме на двух рефрижераторах КГУ-1600/4.5 и гелиевом ожижителе ОГ-1000.

Значительные затраты жидкого азота связаны также с режимом охлаждения, когда магниты ускорителей охлаждаются от 300 до 4,5 К.

Магниты ускорительного комплекса NICA изготавливаются по технологии, разработанной для нуклотрона. Для магнитов нет каких-либо ограничений по времени

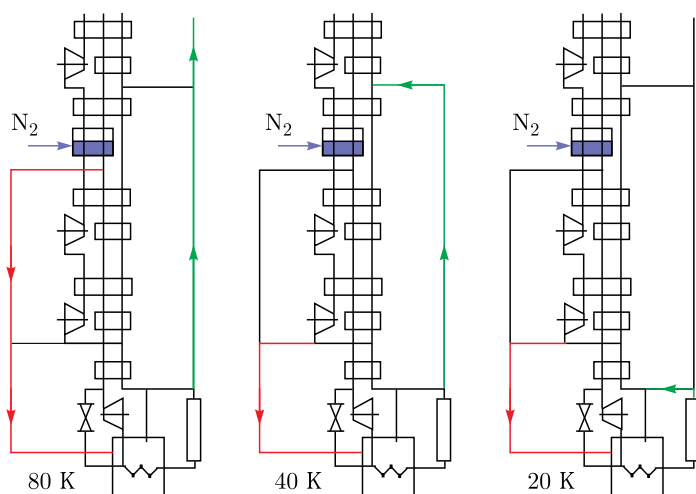


Рис. 1. Принципиальная схема охлаждения нуклотрона

охлаждения в связи с температурными градиентами и напряжениями в конструкциях. Поэтому в период охлаждения ограничительным фактором является только холодопроизводительность гелиевой криогенной системы.

Кольцо нуклотрона охлаждается двумя рефрижераторами КГУ-1600/4.5. Схема охлаждения ускорителя использует принудительный поток газообразного гелия, охлаждаемого в рефрижераторе КГУ-1600/4.5 посредством испарения жидкого азота. Чтобы ускорить охлаждение нуклотрона, рефрижераторы снабжены обводными линиями: ускоритель вводится в рабочий режим в три этапа, каждому из которых соответствует одна из схем на рис. 1. Максимальное потребление азота в режиме охлаждения составляет ~ 25 т/сут. Таким образом, в период охлаждения нуклотрона затраты жидкого азота будут составлять около 1100 кг/ч и азотный ожижитель ОА-1.3 будет компенсировать эти затраты криоагента.

Схема охлаждения бустера и коллайдера представлена на рис. 2 [2]. Для охлаждения бустера и коллайдера используются три сателлитных гелиевых рефрижератора РСГ-2000/4.5 производительностью каждый 2000 Вт при 4,5 К. Один рефрижератор обеспечивает охлаждение обоих полуколец бустера. Два других сателлитных рефрижератора обеспечивают охлаждение одного из соответствующих полуколец коллайдера каждый.

Процесс охлаждения бустера и коллайдера делится на два этапа. На первом этапе источником холода является жидкий азот с расходом 570 кг/ч. Жидкий гелий от центрального ожижителя ОГ-1000 используется на втором этапе охлаждения. Таким образом, на первом этапе охлаждения бустера и коллайдера соответствующий конденсатор РА-0.5 будет компенсировать затраты жидкого азота в количестве 350 кг/ч (в режиме ожижения азота). Остальное количество будет компенсироваться заранее запасенным азотом.

В отличие от нуклотрона, когда жидкий азот на теплозащитные экраны начинает подаваться с момента начала охлаждения МКС, на теплозащитные экраны бустера

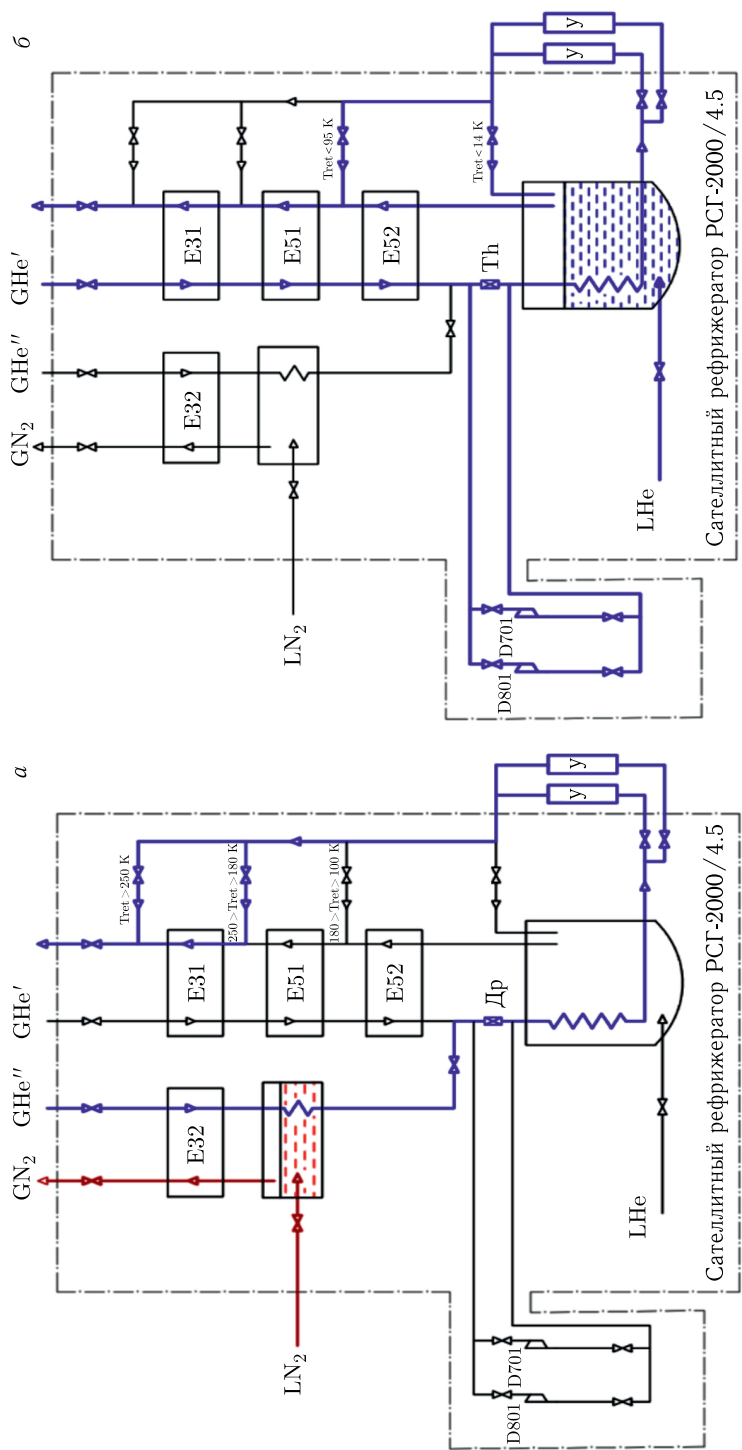


Рис. 2. Принципиальная схема охлаждения бустера: а) на первом этапе охлаждения; б) на втором этапе охлаждения

и коллайдера жидкий азот начинает подаваться только после того, как ярма всех магнитов охладятся до температур ниже 120 К. В противном случае может произойти нарушение юстировки магнитной системы ускорителей. Таким образом, окончание первого этапа охлаждения бустера и коллайдера совпадает с моментом, когда необходимо начинать подачу азота в теплозащитные экраны МКС ускорителей. С этого момента спутниковый рефрижератор переводится на второй, гелиевый этап охлаждения, а соответствующий реконденсатор переходит в режим реконденсации паров азота с теплозащитных экранов МКС ускорителя с производительностью 500 кг/ч.

2. АЗОТНАЯ СИСТЕМА КРИОГЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

Принципиальная схема азотной системы криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA представлена на рис. 3 [3]. Система включает в себя ожижитель ОА-1.3 (7) производительностью 1300 кг/ч, два реконденсатора паров азота РА-0.5 (6) производительностью 500 кг/ч каждый и три турбокомпрессора (2). Для хранения

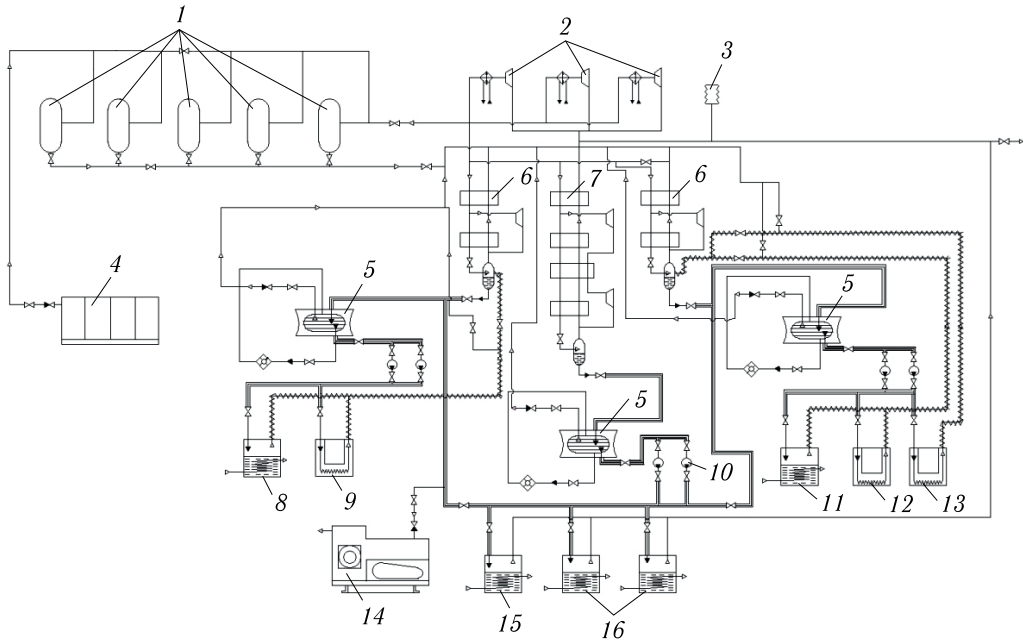


Рис. 3. Принципиальная схема азотной системы криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA: 1 — ресиверы 20 м³; 2 — турбокомпрессоры; 3 — газгольдер 1000 м³; 4 — транспортабельная адсорбционная установка Ада-0.100Т; 5 — криогенные резервуары 30 м³; 6 — реконденсаторы РА-0.5 500 кг/ч; 7 — ожижитель ОА-1.3 1300 кг/ч; 8 — азотные ванны спутниковых рефрижераторов коллайдера; 9 — теплозащитный экран МКС коллайдера; 10 — электронасосные установки ЭНУ-5/50; 11 — азотная ванна спутникового рефрижератора бустера; 12 — теплозащитный экран МКС бустера; 13 — теплозащитный экран МКС нуклотрона; 14 — вакуумный насос; 15 — азотная ванна гелиевого ожижителя ОГ-1000; 16 — азотные ванны гелиевых рефрижераторов КГУ-1600/4.5

газа и поддержания необходимого давления на линии всасывания компрессоров в системе будут использоваться газгольдер 1000 м³ (3) и пять ресиверов 20 м³ (1). Для циркуляции газообразного азота в криогенной системе будут использоваться центробежные компрессоры: Samsung SM5000 (2 шт.) производительностью 11 820 м³/ч каждый и «Аэроком 2-179/18» (1 шт.) производительностью 10 740 м³/ч.

После сжатия в турбокомпрессорах газообразный азот при давлении 17 кгс/см² подается в реконденсаторы азота РА-0.5 № 1, 2 и в ожижитель ОА-1.3. Реконденсатор РА-0.5 № 1 будет использоваться для реконденсации паров, поступающих с теплозащитных экранов МКС нуклотрона и бустера; реконденсатор РА-0.5 № 2 — паров, поступающих с теплозащитных экранов МКС коллайдера.

Жидкий азот из каждого реконденсатора и ожижителя по криогенным трубопроводам подается в соответствующий 30 м³ криогенный резервуар (5). Для обеспечения непрерывной подачи и поддержания необходимой величины давления жидкого азота, подаваемого потребителям, каждый из трех танков оснащен электронасосной установкой ЭНУ-5/50 (10) с основным и резервным насосами.

Таким образом, создаваемая азотная криогенная система состоит из трех подсистем: хранения и компримирования газообразного азота; криогенных установок и хранения; выдачи жидкого азота потребителям. Ниже приводится информация о статусе оборудования, входящего в каждую из подсистем.

3. ПОДСИСТЕМА ХРАНЕНИЯ И КОМПРИМИРОВАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО АЗОТА

Подсистема хранения и компримирования азота включает в себя компрессорное оборудование, оборудование для хранения газообразного азота и газовый пульт управления, обеспечивающий их взаимодействие.

Оборудование для хранения газообразного азота системы криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA включает в себя пять ресиверов объемом 20 м³ каждый и газгольдер 1000 м³ изохорного типа.

3.1. Ресиверы 20 м³. Ресиверы были смонтированы в 2021 г. В 2023 г. был проведен первый этап пусконаладочных работ: ресиверы были отвакуумированы, заполнены сухим азотом до давления $P = 0,5$ кгс/см² и проверены на герметичность. Следующим этапом пусконаладки является проведение их испытаний на плотность и прочность при рабочем и пробном давлении.

Для проведения пневмоиспытаний необходим газовый пульт управления азотной системы, который обеспечит штатную подачу сухого азота в ресиверы. Ввод в эксплуатацию газового пульта управления, монтируемого в корпусе 1Б, был запланирован на 4-й квартал 2024 г.

3.2. Газгольдер 1000 м³. Азотный газгольдер 1000 м³ 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.

Газгольдер был смонтирован в 2021 г. В июне 2024 г. на нем был проведен комплекс пусконаладочных работ: вакуумирование, заполнение сухим азотом, проверка на герметичность. Ввод в эксплуатацию газового пульта управления обеспечит штат-

ное подключение газгольдера к азотной системе криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA.

3.3. Компрессорное оборудование. Подсистема компримирования азотной системы криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA включает в себя компрессоры различных типов. В качестве основных используются два центробежных турбокомпрессора Samsung SM5000 и один турбокомпрессор «Аэроком 2-179/18». Каждая компрессорная установка состоит из компрессорного агрегата, соединенного с электродвигателем мощностью 1600 кВт. Помимо турбокомпрессоров, в систему компримирования входят также два поршневых компрессора типа 6ГШ1,6-2/1,1-200-2 производительностью 180 м³/ч каждый. Поршневые компрессоры используются для закачки азота в ресиверы.

Азотные компрессоры смонтированы в новом здании компрессорной станции № 2. Кроме азотных компрессоров на станции размещены также два гелиевых винтовых компрессорных агрегата «Каскад-110/30».

В 1-м квартале 2024 г. был закончен монтаж азотных коммуникаций компрессорной станции № 2, после чего были проведены испытания турбокомпрессоров «Аэроком 2-179/18» и Samsung SM500 № 1, 2 в воздушной среде: каждый из компрессоров проработал в течение 72 ч; технические характеристики соответствовали параметрам, указанным в документации заводов-изготовителей. В мае 2024 г. были также закончены пусконаладочные работы на азотных поршневых компрессорах 6ГШ1,6-2/1,1-200-2. Следующим этапом являются испытания азотных компрессоров в рабочей среде. Для их проведения также необходимо ввести в эксплуатацию газовый пульт управления.

3.4. Газовый пульт управления. Пульт управления азотной системы криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA предназначен для контроля и поддержания технологических параметров на линиях всасывания и нагнетания компрессоров (давление газа в коллекторе высокого давления и в обратном потоке) и линии закачки азота в ресиверы. На пульте будет реализована возможность ручного включения и выключения компрессоров 6ГШ1,6-2/1,1-200-2 для закачивания газа в азотные ресиверы. Также посредством пульта будет реализована возможность как первичного заполнения системы сухим азотом, так и подачи от ПКО ЛФВЭ азота необходимого давления для проведения пневмоиспытаний сосудов под давлением.

Ввод в эксплуатацию пульта управления обеспечит штатное подключение в азотную систему криогенного обеспечения 1000 м³ газгольдера и ресиверов и, как следствие, проведение следующего этапа пусконаладочных работ на компрессорах — испытаний на рабочей среде.

Для обеспечения безаварийной работы оборудования ведется разработка автоматизированной системы контроля и поддержания технологических параметров в заданных диапазонах на линиях всасывания и нагнетания компрессоров и линии закачки азота в ресиверы. Ввод в эксплуатацию автоматизированной системы планируется в январе 2025 г.

4. ПОДСИСТЕМА КРИОГЕННЫХ УСТАНОВОК

Азотный ожижитель ОА-1.3 и реконденсатор РА-0.5 № 1 смонтированы в корпусе 1Б в 2021 г. Реконденсатор РА-0.5 № 2 смонтирован в помещении 177 здания 17 в 2022 г.

Указанное оборудование оснащено датчиками температур и давлений, арматурой с приводами различного типа. Поэтому для работы установок необходимо ввести в эксплуатацию АСУ ТП, обеспечивающие дистанционный контроль параметров и управление арматурой. В настоящее время ведутся работы по созданию АСУ ТП всех трех установок. Ввод в эксплуатацию АСУ ТП РА-0.5 № 1 был запланирован на конец 2024 г.

5. ПОДСИСТЕМА ХРАНЕНИЯ И ВЫДАЧИ ЖИДКОГО АЗОТА ПОТРЕБИТЕЛЮ

5.1. Система обеспечения жидким азотом нуклотрона и бустера. В систему обеспечения жидким азотом нуклотрона и бустера входят два криогенных резервуара ЕК-1 и ЕК-2, две электронасосные установки ЭНУ-5/50 № 1, 2 и сеть криогенных и «теплых» трубопроводов.

Жидкий азот из реконденсатора РА-0.5 № 1 и ожижителя ОА-1.3 подается в криогенные резервуары ЕК-1 и ЕК-2 соответственно. Далее азот из каждого резервуара самотеком подается на вход в один из двух переключающихся насосов установки ЭНУ-5/50: необходимый расход азота в контуре циркуляции устанавливается с помощью частотного регулирования двигателя насоса.

Криогенные резервуары 30 м³ ЕК-1 и ЕК-2 и электронасосные установки ЭНУ-5/50 № 1, 2 нуклотрона и бустера были смонтированы в 2022 г. на открытой площадке за корпусом 1Б. Оба резервуара использовались в ходе сеанса № 4. В настоящее время ведется разработка системы автоматизированного управления ЭНУ-5/50 № 1, 2, монтаж и наладка АСУ ТП ЭНУ-5/50 № 1, 2 были запланированы на 4-й квартал 2024 г., ввод в эксплуатацию запланирован на 1-й квартал 2025 г.

Выдача жидкого азота потребителям при работе нуклотрона и бустера будет вестись из криогенного резервуара ЕК-1. На случай, если производительность реконденсатора РА-0.5 № 1 окажется недостаточной, предусмотрена возможность перелива жидкого азота из резервуара ожижителя в резервуар реконденсатора.

В апреле 2024 г. были смонтированы и прошли испытания криогенные трубопроводы системы обеспечения жидким азотом нуклотрона и бустера.

5.2. Система обеспечения жидким азотом коллайдера. В систему обеспечения жидким азотом коллайдера входят криогенный резервуар ЕК-3, электронасосная установка ЭНУ-5/50 № 3 и сеть криогенных и «теплых» трубопроводов.

Криогенный резервуар 30 м³ ЕК-3 и электронасосная установка ЭНУ-5/50 № 3 коллайдера были смонтированы на открытой площадке за корпусом 1А весной 2024 г. Завершается монтаж криогенных трубопроводов от реконденсатора РА-0.5 № 2 до танка ЕК-3 и от танка ЕК-3 в помещение 177. Ввод в эксплуатацию указанных трубопроводов запланирован на сентябрь 2024 г.

Проектирование азотных криогенных трубопроводов к полукольцам коллайдера было завершено в августе 2024 г. Ввод в эксплуатацию запланирован на декабрь 2024 г.

Также ведется разработка автоматизированной системы дистанционного контроля технологических параметров и управления клапанами системы обеспечения жидким азотом коллайдера. Ввод в эксплуатацию автоматизированной системы был запланирован на март 2025 г.

6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СЕАНС № 5 КОЛЛАЙДЕРА: ЗАТРАТЫ ЖИДКОГО АЗОТА

При проведении пусконаладочных сеансов инжекционного комплекса NICA в период 2022–2023 гг. подача азота потребителям обеспечивалась из переключающихся азотных танков. На выходе от потребителей пары азота сбрасывались в атмосферу. Заполнение танков осуществлялось как жидким азотом, производимым ПКО, так и азотом, закупаемым у сторонних организаций. Затраты жидкого азота в ходе пусконаладочных сеансов были одними из основных эксплуатационных затрат инжекционного комплекса NICA. В ходе сеанса № 4 среднесуточные затраты азота составили 34 т/сут.

В период с января по октябрь 2025 г. запланировано проведение технологического сеанса № 5 коллайдера: ускорители будут поочередно охлаждаться до рабочей температуры $T = 4,5$ К. Криогенные резервуары ЕК-1, ЕК-2, ЕК-3 и трубопроводы, обеспечивающие подачу жидкого азота к нуклотрону и бустеру, смонтированы. Монтаж трубопроводов выдачи жидкого азота в помещение 177 — сентябрь 2024 г.; ввод в эксплуатацию трубопроводов, обеспечивающих подачу жидкого азота к полукольцам коллайдера, — декабрь 2024 г.

Таким образом, к началу сеанса № 5 будет обеспечена возможность подачи азота к потребителям NICA по ранее применяемой технологии: заполнение резервуаров привозным азотом и сброс азота от потребителей в атмосферу. В этом случае суммарные затраты азота за сеанс ориентировочно составят 12 700 т (таблица).

Производительность ПКО ЛФВЭ составляет 15 т/сут жидкого азота (3 750 т за сеанс), остальное количество будет компенсировано привозным азотом от сторонних организаций.

Ввод в эксплуатацию реконденсатора РА-0.5 № 1 бустера и нуклотрона обеспечит производительность по жидкому азоту 500 кг/ч в режиме реконденсации (12 т/сут), что может значительно сократить количество привозного азота в ходе сеанса.

Для обеспечения работы реконденсатора РА-0.5 № 1 в ходе сеанса № 5 необходимо:

- ввести в эксплуатацию газовый пульт управления;
- провести пневмоиспытания ресиверов 20 м³, обеспечить их штатное подключение к системе;
- провести штатное подключение к системе 1000 м³ газгольдера;

Затраты жидкого азота в сеансе № 5

Период	Потребители	Среднесуточные затраты, т/сут	Итоговые затраты, т
Январь	Западное полукольцо коллайдера	15	465
Февраль	Западное полукольцо коллайдера и бустер	27	760
Март	Коллайдер и бустер	40	1240
Апрель–сентябрь	Бустер, нуклотрон, коллайдер	55	10 230
Итого:			12 700

- провести пусконаладку компрессоров по штатной схеме на рабочей среде: с подключенными линиями всасывания и нагнетания;
- ввести в эксплуатацию АСУ ТП РА-0.5 № 1 и РА-0.5 № 2;
- ввести в эксплуатацию АСУ ТП ЭНУ-5/50 № 1, 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ведутся работы по созданию азотной системы криогенного обеспечения ускорительного комплекса NICA. Первым этапом в течение 2025 г. ввести в эксплуатацию АСУ ТП РА-0.5 № 1 нуклотрона и бустера, турбокомпрессоры, газгольдер и ресиверы.

Без использования реконденсации паров в ходе технологического сеанса № 5 коллайдера суммарные затраты азота за сеанс ориентировочно составят 12 700 т. Ввод в работу реконденсатора значительно снизит эти затраты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Agapov N. et al.* Cryogenic Technologies of the Superconducting NICA Accelerator Complex // Proc. 15th IIR Conf. Cryogenics. Prague, 2019.
2. *Agapov N. et al.* Status of the NICA Cryogenics at JINR // Proc. 1st Intern. IIR Conf. "ICCRT 2016". Bucharest, 2016. P. 183.
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.