

ИТОГИ РАБОТЫ КРИОГЕННОГО КОМПЛЕКСА ЛФВЭ: СЕАНС БУСТЕР–НУКЛОТРОН

*Н. Н. Агапов, А. П. Булах, А. Э. Емельянов,
А. В. Константинов, М. С. Куняев, Ю. А. Митрофанова¹,
А. Е. Смирнов, Д. С. Швидкий*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В январе–апреле 2022 г. был проведен первый сеанс совместной работы ускорителей нуклотрон и бустер. Охлаждение обоих ускорителей было обеспечено модернизированным криогенным комплексом ЛФВЭ.

Впервые охлаждение магнитно-криостатной системы бустера от 300 до 4,5 К и дальнейшее ее криостатирование было проведено по штатной схеме: для охлаждения ускорителя использовался смонтированный в 2021 г. гелиевый спутниковый рефрижератор РСГ-2000/4.5 холодопроизводительностью 2000 Вт при 4,5 К. Жидкий гелий подавался на бустер по новому гелиевому трубопроводу с прохождением через сепараторы, которые обеспечивают его переохлаждение.

Для снабжения криогенных установок сжатым гелием впервые была реализована одновременная работа двух винтовых компрессорных агрегатов «Каскад-80/25» № 1, 2. Осушка и очистка от паров масла сжатого гелия проводились в двух блоках маслоочистки и осушки: МО-800 № 1, 2. Впервые работа криогенного комплекса была проведена на вновь смонтированном 1000-м³ гелиевом газгольдере изохорного типа.

Представлены обзор основных итогов работы криогенного комплекса в ходе ускорительного сеанса и план по его дальнейшему развитию.

In January–April 2022 the first session of joint operation of the Nuclotron and Booster was held. Cooling of both accelerators was provided by the modernized cryogenic complex of VBLHEP.

For the first time the cooling of the magnetic-cryostat system of the Booster from 300 K to 4.5 K and its further cryostatting were carried out according to the standard scheme: the accelerator was cooled by means of the helium satellite refrigerator RSG-2000/4.5 with a cooling capacity of 2000 W at 4.5 K. Liquid helium was supplied to the Booster via a new helium pipeline, passing through separators that provide supercooling of helium.

To provide the cryogenic facilities with compressed helium, the simultaneous operation of two screw compressor “Kaskad-80/25” No. 1, 2 was implemented for the first time. Drying and purification from oil vapors of the compressed helium were carried out in two units MO-800 No. 1, 2. For the first time, the operation of the cryogenic complex was carried out on a newly mounted 1000 m³ isochoric-type helium gas-holder.

A review of the main results of the operation of the cryogenic complex during the accelerator session and a plan for its further development are given.

PACS: 29.20.–c

¹E-mail: mitrofanova@jinr.ru

1. СИСТЕМА КРИОГЕННОГО ГЕЛИЕВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

Гелиевая криогенная система ускорительного комплекса NICA холодопроизводительностью 10 000 Вт при 4,5 К создается на основе имеющейся системы криогенного обеспечения нуклотрона, к которой добавляются новые гелиевые установки (рис. 1). Основные технические параметры системы представлены в работе [1].

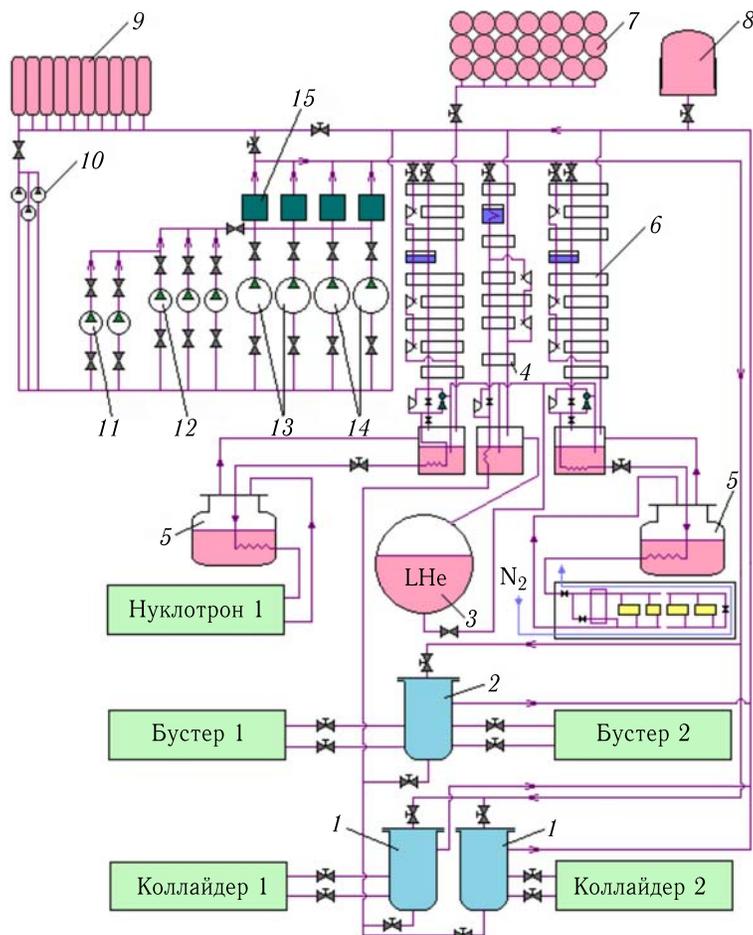


Рис. 1. Принципиальная схема системы криогенного гелиевого обеспечения ускорительного комплекса NICA: 1 — спутниковый рефрижератор РСГ-2000/4.5 коллайдера; 2 — спутниковый рефрижератор РСГ-2000/4.5 бустера; 3 — 40-м³ криогенная гелиевая цистерна КЦГ-40/0.5; 4 — гелиевый охладитель ОГ-1000; 5 — сепаратор нуклотрона; 6 — гелиевый рефрижератор КГУ-1600/4.5; 7 — 1000-м³ газгольдер; 8 — 20-м³ газгольдер; 9 — 20-м³ ресиверы сжатого гелия; 10 — поршневой компрессор 6ГШ-1.6-2/1.1-200-1; 11 — поршневой компрессор 2ГМ4-12/31; 12 — поршневой компрессор 305НП-20/30; 13 — винтовой компрессорный агрегат «Каскад-110/30»; 14 — винтовой компрессорный агрегат «Каскад-80/25»; 15 — блок маслоочистки и осушки МО-800

Система криогенного обеспечения бустера и коллайдера строится на основе центрального ожижителя гелия ОГ-1000 производительностью 1000 л/ч и трех спутельных рефрижераторов РСГ-2000/4.5 холодопроизводительностью 2000 Вт при 4,5 К каждый. Спутельные рефрижераторы работают, используя жидкий гелий от центрального ожижителя.

В период с января по апрель 2022 г. был проведен первый сеанс совместной работы ускорителей бустер-нуклотрон. Охлаждение и криостатирование нуклотрона осуществлялось штатным оборудованием: гелиевыми рефрижераторами КГУ-1600/4.5 № 1, 2. Охлаждение магнитно-криостатной системы (МКС) бустера от 300 до 4,5 К и дальнейшее ее криостатирование впервые было проведено по штатной схеме: для охлаждения обоих полуколец ускорителя использовался смонтированный в 2021 г. гелиевый спутельный рефрижератор РСГ-2000/4.5 № 1.

Для обеспечения сбора технологических данных от локальных САУ установок криогенного комплекса NICA, отображения информации для персонала, возможности управления локальными САУ оператором, архивирования и построения трендов технологических параметров была внедрена и опробована во время сеанса работы ускорителей единая система диспетчеризации криогенного комплекса (ЕСДКК, SCADA-система).

1.1. Гелиевый спутельный рефрижератор РСГ-2000/4.5. Основные технические параметры гелиевого спутельного рефрижератора РСГ-2000/4.5 представлены в работе [1].

Принципиальная схема охлаждения бустера представлена на рис. 2. Процесс охлаждения ускорителя делится на два этапа. На первом этапе источником холода является жидкий азот, подаваемый в азотную ванну рефрижератора, на втором — жидкий гелий от центрального ожижителя ОГ-1000 и адиабатное расширение гелия в парожидкостном турбодетандере.

Производительности винтовых компрессоров криогенной системы нуклотрона и оборудования системы очистки сжатого газа от паров масла и влаги было недо-

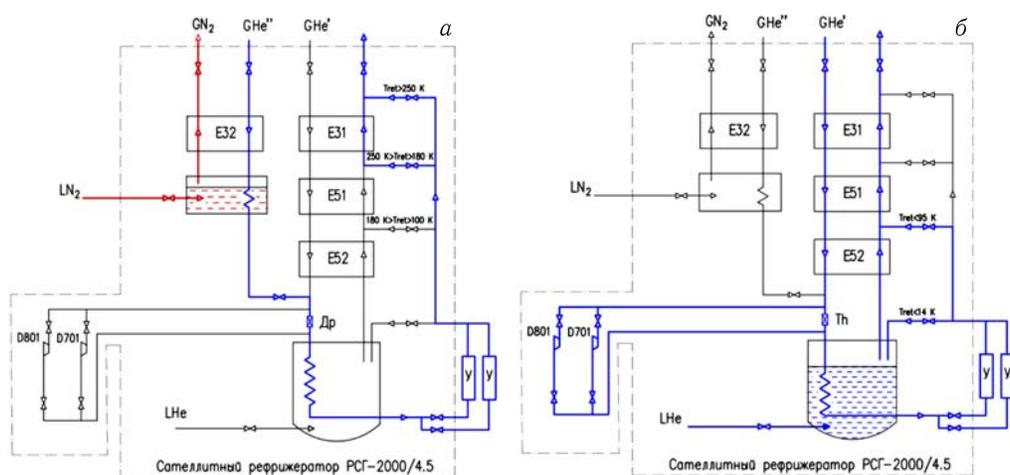


Рис. 2. Принципиальная схема охлаждения бустера: первый (а) и второй (б) этапы охлаждения

статочно для работы ожижителя ОГ-1000. В связи с этим в зимне-весенний сеанс работы бустера–нуклотрона жидкий гелий от рефрижераторов КГУ-1600/4.5 № 1, 2 подавался не только на охлаждение нуклотрона, но и в рефрижератор РСГ-2000/4.5, благодаря чему поддерживалась необходимая холодопроизводительность.

Таким образом, в ходе первого сеанса работы рефрижератор РСГ-2000/4.5 обеспечил необходимые параметры для работы МКС бустера: температуру магнитов $T = 4,5$ К, расход гелия через магниты и холодопроизводительность.

В период между ускорительными сеансами продолжают пусконаладочные работы РСГ-2000/4.5, в том числе наладка АСУ ТП, и работы по устранению замечаний и дефектов, выявленных в ходе работы установки в сеансе.

В ходе работы РСГ-2000/4.5 в ускорительном сеансе несколько раз происходила аварийная остановка парожидкостного турбодетандера из-за попадания на его рабочее колесо и в газовые подшипники механических частиц, главным образом угольной пыли. Источником этой пыли являются угольные адсорберы, предназначенные для очистки гелия. Это явление связано с вводом в эксплуатацию нового оборудования: активированный уголь, засыпаемый в адсорберы, на первых этапах работы отдает больше пыли. Выявлялось также попадание в турбодетандеры и металлической стружки, что обусловлено большим объемом работ по монтажу нового оборудования и коммуникаций.

После замены вышедшего из строя турбодетандера на запасной проводился его пуск непосредственно в процессе работы РСГ-2000/4.5. Так как турбодетандер имел комнатную температуру, его запуск приводил к сильным возмущениям в системе криогенного обеспечения бустера, находящейся при рабочей температуре $T = 4,5$ К, а именно происходил резкий рост давления гелия в сепараторах, что могло привести к срабатыванию предохранительных мембран.

Для плавного пуска парожидкостного турбодетандера после замены и ускорения процесса возврата к штатному режиму криостатирования бустера были смонтированы пусковые линии, обеспечивающие предварительное охлаждение турбодетандера. В ходе проведения пусконаладочных работ РСГ-2000/4.5 пусковые линии были успешно испытаны в августе 2022 г.

В планы по дальнейшей модернизации криогенного комплекса ЛФВЭ входит установка дополнительных фильтров на линии подачи сжатого очищенного гелия к газовым подшипникам гелиевых рефрижераторов КГУ-1600/4.5, РСГ-2000/4.5 и на входе гелия в парожидкостный турбодетандер РСГ-2000/4.5.

1.2. Криогенные трубопроводы и сепараторы бустера. Подача жидкого гелия от сателлитного рефрижератора РСГ-2000/4.5 в измерительный период каждого полукольца бустера обеспечивалась смонтированными в конце 2021 г. криогенными трубопроводами с экранно-вакуумной изоляцией и азотным экраном.

Перед подачей в ускоритель жидкий гелий переохлаждался в сепараторах, что гарантировало отсутствие в нем паровой фазы. Два сепаратора бустера объемом 500 л каждый были смонтированы в 2021 г.

Штатный вывод в ЕСДКК технологических параметров с контрольно-измерительных приборов, установленных на указанном оборудовании, и ввод в эксплуатацию локальной САУ были запланированы на 1-й квартал 2023 г.

1.3. 1000-м³ гелиевый газгольдер. Оборудование для хранения газообразного гелия системы криогенного обеспечения нуклотрона включало в себя 10 ресиверов

суммарным объемом 6000 м^3 и маслonaполненный газгольдер изобарного типа объемом 20 м^3 . Газгольдер обеспечивал избыточное давление величиной $0,03 \text{ кгс/см}^2$ в обратном потоке и на линии всасывания компрессоров.

Однако работа с газгольдером такого небольшого объема на крупной системе криогенного обеспечения вызывала затруднения. Также работа на 20-м^3 газгольдере приводила к значительным потерям гелия через его масляный затвор при аварийных отключениях электропитания. В октябре 2021 г. был введен в эксплуатацию газгольдер изохорного типа объемом 1000 м^3 , позволивший решить вышеуказанные проблемы. 20-м^3 газгольдер остался в системе и периодически используется для испытаний на герметичность отдельных компрессоров во время проведения регламентных работ.

Вывод технологических параметров с КИП, установленных на обоих газгольдерах, в ЕСДКК осуществлен в 2021 г.

1.4. Система компримирования, маслоочистки и осушки гелия. Система криогенного обеспечения ускорительного комплекса НИСА включает в себя компрессоры различных типов, технические характеристики которых представлены в работе [1]. В качестве основных будут использоваться два винтовых компрессорных агрегата «Каскад-80/25» и два агрегата «Каскад-110/30». Поршневые компрессоры применяются для ступенчатого регулирования расхода газа в системе.

После ввода в эксплуатацию 1000-м^3 газгольдера диапазон рабочего давления на линии всасывания компрессоров составляет $0,02\text{--}0,06 \text{ кгс/см}^2$. Аварийное отключение компрессоров происходит при $0,11 \text{ кгс/см}^2$. Для быстрого восстановления работы криогенного комплекса после просадок напряжения, приводящих к аварийной остановке компрессорного оборудования, в машзале был проведен комплекс мероприятий: доработана технология запуска поршневых компрессоров, предохранительные клапаны настроены на соответствующие значения срабатывания, перенастроены АСУ ТП поршневых компрессоров для обеспечения работоспособности при более высоком давлении на линии всасывания. В 2021 г. в машзале была смонтирована система сигнализации, информирующая об аварийной остановке любого из поршневых компрессоров и позволяющая оперативному персоналу принять необходимые меры.

На сентябрь 2022 г. была запланирована модернизация АСУ ТП винтовых компрессоров «Каскад-80/25» для обеспечения возможности архивирования и построения трендов основных технологических параметров.

В конце 2021 г. перед началом сеанса нуклотрон–бустер была введена в работу система автоматического регулирования давления газа в коллекторе высокого давления, что значительно снизило нагрузку на оперативный персонал.

Для ускорительного комплекса НИСА очистка сжатого гелия на выходе из компрессоров от паров масла и влаги будет обеспечиваться системой из четырех блоков маслоочистки и осушки МО-800 производительностью $4800 \text{ м}^3/\text{ч}$ каждый.

В ходе зимне-весеннего сеанса работы бустер–нуклотрон впервые для обеспечения необходимого количества сжатого гелия в системе одновременно работали два винтовых компрессорных агрегата «Каскад-80/25» № 1, 2.

Осушка и очистка от паров масла сжатого гелия проводились в двух блоках МО-800 № 1, 2 производства ООО «Криомаш-БЗКМ», один из которых был смонтирован и введен в эксплуатацию непосредственно в декабре 2021 г., перед началом сеанса работы ускорителей. Ввод в эксплуатацию оставшихся двух блоков МО-800 № 3, 4 производства ПАО «Криогенмаш» был запланирован на начало 2023 г.

На конец 2022 г. были запланированы работы по вводу в эксплуатацию АСУ ТП МО-800 № 1. Эта система обеспечит возможность дистанционного управления техническими устройствами блока оперативным персоналом, контроля параметров и автоматизированного выполнения технологических процессов, передачи значений технологических параметров работы установки в ЕСДКК для визуализации и архивирования.

2. СИСТЕМА КРИОГЕННОГО АЗОТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ БУСТЕР И НУКЛОТРОН

Помимо гелиевой криогенной системы ускорительного комплекса NICA монтируется оборудование азотной криогенной системы [2, 3]. В настоящее время штатная схема обеспечения потребителей жидким азотом находится в процессе создания.

В зимне-весеннем сеансе работы 2022 г. жидким азотом с давлением 2 кгс/см², выдаваемом из двух переключающихся танков объемом 28 и 5 м³, обеспечивались следующие потребители: теплозащитные экраны нуклотрона и криогенных трубопроводов, экраны гелиевых сепараторов нуклотрона и бустера, гелиевые рефрижераторы КГУ-1600/4.5 № 1, 2 и РСГ-2000/4.5 № 1. Подача азота осуществлялась по криогенным трубопроводам системы криогенного обеспечения нуклотрона.

Охлаждение теплозащитных экранов и тоководов бустера обеспечивалось подачей жидкого азота под давлением 2,2 кгс/см² из двух переключающихся танков объемом 8 м³ каждый по временным трубопроводам.

Раздельное обеспечение потребителей жидким азотом было реализовано по итогам ранее проведенных сеансов работы бустера. При одновременной подаче азота из одного танка к потребителям центральной криогенной станции и к потребителям самого бустера наблюдался рост температуры тоководов, связанный с недостаточным расходом криоагента, подаваемого в тоководный криостат.

К осенне-зимнему сеансу 2022 г. схема обеспечения жидким азотом была модернизирована за счет ввода в эксплуатацию штатного оборудования азотной криогенной системы: двух электронасосных установок ЭНУ-5/50 и двух 30-м³ танков жидкого азота VRV. Все ранее указанные потребители жидкого азота обеспечиваются криоагентом от одного из двух переключающихся танков. Жидкий азот из танка самооттеком подается на вход в один из двух переключающихся насосов ЭНУ-5/50. Необходимый расход азота в контуре циркуляции устанавливается с помощью частотного регулирования двигателя насоса. Монтаж указанного оборудования был проведен в августе 2022 г. Пусконаладочные работы были запланированы на сентябрь 2022 г.

Монтаж криогенных трубопроводов бустера и нуклотрона штатной азотной системы криогенного обеспечения комплекса NICA был запланирован на 2023 г.

3. ОХЛАЖДЕНИЕ НУКЛОТРОНА

Для обеспечения вывода пучка из бустера в нуклотрон в левое полукольцо нуклотрона был установлен дополнительный магнит Ламбертсона, масса которого значительно превышает массы остальных элементов ускорителя. Его установка привела к увеличению времени охлаждения ускорителя на 1,5–2 сут.

В ходе сеанса при охлаждении левого полукольца нуклотрона наблюдалось значительное отставание температуры магнита Ламбертсона от температур остальных элементов ввиду большой разницы в массах. Переход на рефрижераторе КГУ-1600/4.5 в рабочий режим охлаждения не устранил эту проблему: в коллектор прямого потока МКС нуклотрона подавался жидкий гелий, основные элементы полукольца находились уже при рабочей температуре $T = 4,5$ К, в то время как магнит Ламбертсона имел температуру $T = 150$ К. Это объяснялось тем, что жидкий гелий, подаваемый на охлаждение магнита, испарялся его теплой массой. Образующая при этом газовая пробка увеличивала гидравлическое сопротивление каналов охлаждения и, как следствие, уменьшала расход охлаждающего гелия через магнит. Для исключения подачи жидкой фазы на вход в магнит Ламбертсона было принято решение об отеплении левого полукольца до $T = 15\text{--}20$ К путем возврата рефрижератора в пусковой режим охлаждения. По достижении температуры магнита Ламбертсона $T = 75$ К на рефрижераторе вновь был осуществлен переход в рабочий режим, обеспечивший дальнейшее охлаждение всего полукольца до рабочей температуры $T = 4,5$ К.

По итогам первого сеанса охлаждения модернизированной МКС нуклотрона была пересмотрена технология охлаждения левого полукольца. Необходимо увеличить период работы рефрижератора КГУ-1600/4.5 в пусковом режиме охлаждения, когда на магниты подается гелий с температурой $T = 15\text{--}20$ К. В таком режиме необходимо находиться до тех пор, пока температура магнита Ламбертсона не достигнет значения $50\text{--}60$ К. По достижении указанных температур магнита его теплоемкость резко уменьшается.

4. ОХЛАЖДЕНИЕ БУСТЕРА

Время охлаждения бустера оказалось в 2 раза больше расчетного значения — 14 сут.

Причиной стал так называемый паразитный теплообмен в сепараторе между «холодным» прямым потоком гелия, подаваемого на охлаждение МКС ускорителя, и «теплым» обратным потоком на выходе из МКС (рис. 3).

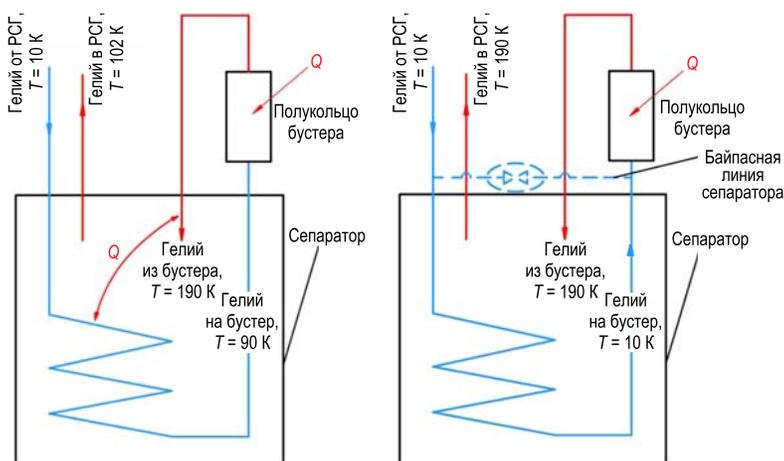


Рис. 3. Паразитный теплообмен в сепараторах бустера

Для устранения этого эффекта были смонтированы байпасные линии сепараторов бустера, и в августе 2022 г. было проведено их успешное испытание. Эксперимент показал, что данное техническое решение позволяет существенно сократить время охлаждения МКС ускорителя в последующих сеансах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги работы криогенного комплекса ЛФВЭ в первом сеансе бустер–нуклотрон.

- Впервые осуществлено охлаждение бустера по штатной схеме. Гелиевый сателлитный рефрижератор РСГ-2000/4.5 обеспечил необходимые параметры для работы МКС бустера: температуру магнитов $T = 4,5$ К, расход гелия через магниты и холодопроизводительность.

- Впервые осуществлена одновременная работа двух компрессорных агрегатов «Каскад-80/25».

- Новый 1000-м³ газгольдер обеспечил уменьшение потерь гелия при аварийных отключениях электропитания и надежное функционирование системы криогенного обеспечения при одновременной работе двух компрессорных агрегатов «Каскад-80/25».

- Смонтированы и успешно испытаны байпасные линии сепараторов бустера, которые обеспечат расчетное время охлаждения ускорителя до рабочей гелиевой температуры.

- Для плавного пуска «теплого» парожидкостного турбодетандера в составе рефрижератора РСГ-2000/4.5 и ускорения процесса возврата к штатному режиму криостатирования бустера смонтированы и испытаны пусковые линии, обеспечивающие предварительное охлаждение турбодетандера.

- Пересмотрена технология охлаждения МКС нуклотрона с учетом добавления в нее новых элементов (магнита Ламбертсона).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Agapov N. et al.* Cryogenic Technologies of the Superconducting NICA Accelerator Complex // Proc. of the 15th IIR Conf. (Cryogenics'2019), Prague, 2019. P. 56.
2. *Agapov N. et al.* Status of the NICA Cryogenics at JINR // Proc. of the 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. P. 48.

Получено 18 ноября 2022 г.