

ГЕЛИЕВАЯ ИНФРАСТРУКТУРА КРИОГЕННОГО КОМПЛЕКСА КОЛЛАЙДЕРА. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ПО ПОДГОТОВКЕ К ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ СЕАНСУ

*Н. Н. Агапов^а, С. В. Гудков^а, А. Э. Емельянов^а, А. В. Константинов^{а, 1},
Ю. А. Митрофанова^а, Д. С. Швидкий^а, Т. Г. Жиронкина^а,
А. А. Баззанов^б*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

^б ООО «Технология», Москва, Россия

Технологический сеанс кольца коллайдера запланирован на начало 2025 г. Программа сеанса включает охлаждение магнитов до рабочей температуры 4,5 К, испытания магнитно-криостатной системы на герметичность, ввод рабочего тока в магниты и проверку работоспособности корректоров. Для охлаждения магнитов будет задействовано новое оборудование криогенного комплекса: рефрижераторы РСГ № 2, 3, охижитель гелия ОГ-1000, холодное хранилище гелия КЦГ-40/0,5 и разветвленная система криогенных трубопроводов. В статье представлены результаты испытаний новых установок криогенного комплекса и описаны технологические решения, которые позволят обеспечить оптимальный режим работы оборудования ускорителя при гелиевых температурах.

The technological session of the Collider ring is scheduled for early 2025. The session program includes cooling the magnets to operating temperature of 4.5 K, testing the magnetic-cryostat system for leaks, testing with the operating current into the magnets, and checking the operability of the correctors. New equipment of the cryogenic complex will be used to cool the magnets: refrigerators RSG Nos. 2, 3, helium liquefier OG-1000, cold helium transport storage KCG-40/0.5, and an extensive system of cryogenic pipelines. The article presents the results of testing new cryogenic complex facilities and describes technological solutions that will ensure the optimal operating mode of the accelerator equipment at helium temperatures.

PACS: 29.20.–с; 07.20.Мс

1. РЕФРИЖЕРАТОРЫ КОЛЛАЙДЕРА. ПРИНЦИП РАБОТЫ, ТЕХНОЛОГИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ МАГНИТОВ

Сателлитные гелиевые рефрижераторы коллайдера (далее РСГ) — криогенные установки, предназначенные для получения жидкого гелия при температуре 4,5 К и его подачи на обмотки сверхпроводящих магнитов ускорителя.

¹E-mail: akonstantinov@jinr.ru

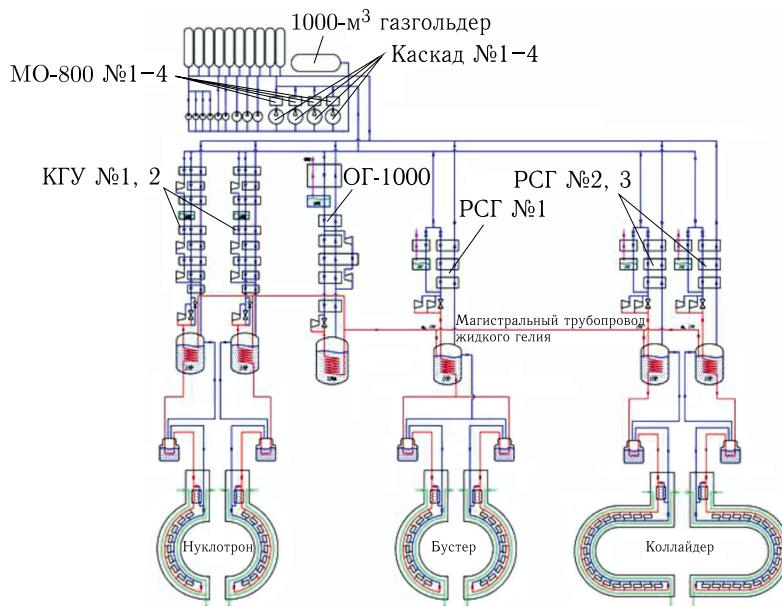


Рис. 1. Принципиальная схема криогенного комплекса

РСГ коллайдера при работе используют жидкый гелий, подаваемый от стороннего охладителя, и имеют в своем составе минимум технологически сложного оборудования, что повышает их надежность. Этому фактору необходимо уделять особое внимание, так как установки криогенного комплекса размещаются в нескольких отдельно стоящих зданиях.

Как видно из рис. 1, жидкый гелий, необходимый для работы рефрижераторов, подается по магистральному трубопроводу, который соединяет все установки криогенного комплекса. Попадая в сборник РСГ, гелий испаряется и используется для охлаждения потока гелия, подаваемого на ускоритель. Теплообмен происходит в медных витых оребренных теплообменных аппаратах. В сборнике рефрижератора установлен змеевик, в котором происходит переохлаждение гелия перед его подачей на ускоритель.

Тепловая нагрузка на гелиевую систему складывается из статических теплопритоков и динамических тепловыделений в магнитах. Статический теплоприток к гелию есть сумма потоков тепла, передаваемых из окружающей среды излучением от более теплых поверхностей, теплопередачей по опорам магнитов и остаточными газами через изоляционный вакуум. Динамические тепловыделения возникают в обмотках магнитов при вводе и выводе из них тока.

Чтобы эффективно снять тепловую нагрузку с магнитов, необходимо обеспечить достаточный расход хладагента через охлаждающие каналы [1]. Необходимый расход характеризуется гидравлическим сопротивлением обмотки магнита dp в рабочем режиме. Все элементы магнитной структуры ускорителей имеют одинаковое гидравлическое сопротивление, что позволяет охлаждать их по параллельной схеме включения (рис. 2).

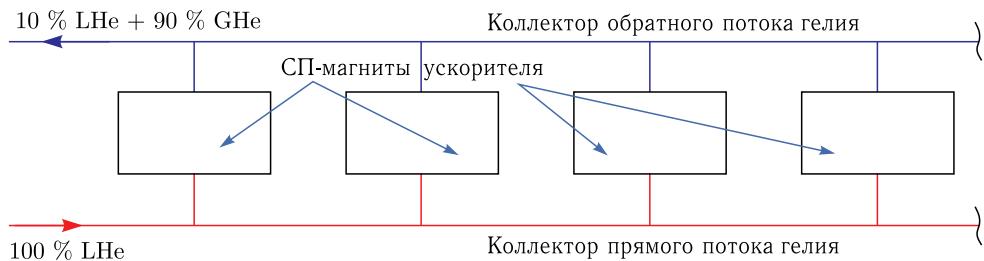


Рис. 2. Схема криостатирования сверхпроводящих магнитов



Рис. 3. Тепловые нагрузки на гелиевую систему от ускоряющих колец комплекса NICA

На рис. 3 приведены величины тепловой нагрузки на каждое сверхпроводящее кольцо комплекса NICA [2].

Из рис. 3 видно, что тепловая нагрузка на криогенную систему бустера и коллайдера имеет соотношение 1:2. С учетом габаритных размеров и удобства эксплуатации целесообразно проводить охлаждение этих объектов тремя идентичными установками. Это унифицирует линейку используемого оборудования и упростит ввод в эксплуатацию рефрижераторов коллайдера с учетом опыта, полученного при работе рефрижератора бустера.

2. ИЗМЕНЕНИЯ, ВНЕСЕННЫЕ В КОНСТРУКЦИЮ УСТАНОВОК, ПО ИТОГАМ РАБОТЫ РЕФРИЖЕРАТОРА БУСТЕРА

Первое охлаждение сверхпроводящего синхротрона бустер при помощи рефрижератора РСГ № 1 состоялось в 2021 г. Установка подтвердила свои характеристики, обеспечив температурный режим работы ускорителя и необходимый расход гелия через обмотки сверхпроводящих магнитов. В ходе эксплуатации рефрижератора нами выявлен ряд проблем, которые были успешно решены.

Охлаждение нового ускорителя планировалось провести за 7 сут. Однако фактическое время получения температуры в 4,5 К заняло почти 14 сут (рис. 4). Столь низкий темп охлаждения был связан с так называемым «паразитным» теплообменом в сепараторах бустера. Теплообмен происходил между холодным потоком гелия, подаваемым на ускоритель, и более теплым, обратным потоком, возвращающимся с него (рис. 5).

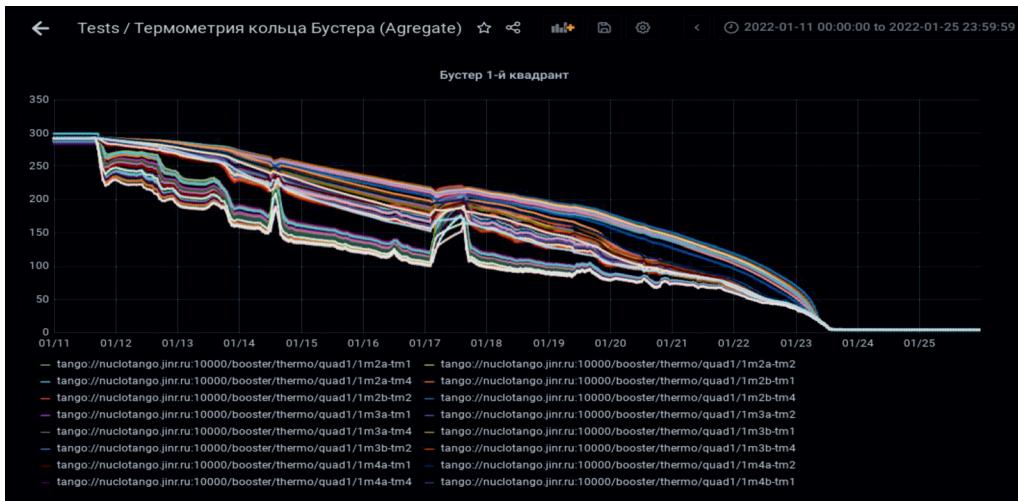


Рис. 4. График охлаждения магнитов бустера

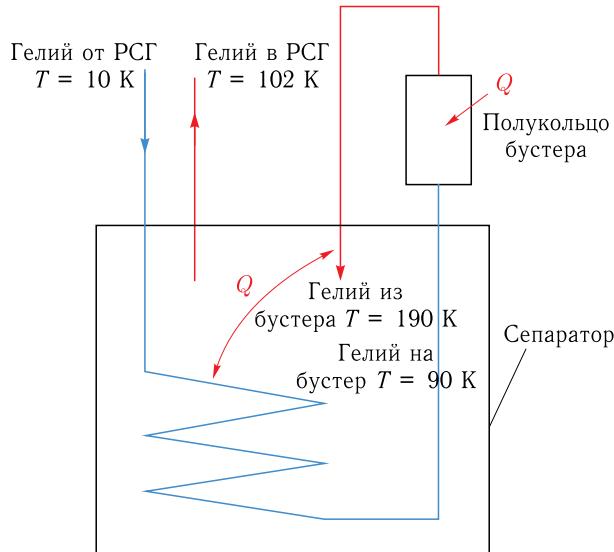


Рис. 5. Механизм возникновения «паразитного» теплообмена при охлаждении бустера

Данный эффект снижал холодопроизводительность системы практически в два раза.

Это было преодолено путем добавления байпасных линий в обход сепаратора, что позволило уменьшить время захолаживания бустера до 8 сут.

Полученный опыт учтен при проектировании линий жидкого гелия колладера. Новые трубопроводы жидкого гелия будут оснащены необходимой арматурой для обеспечения расчетной работы системы.

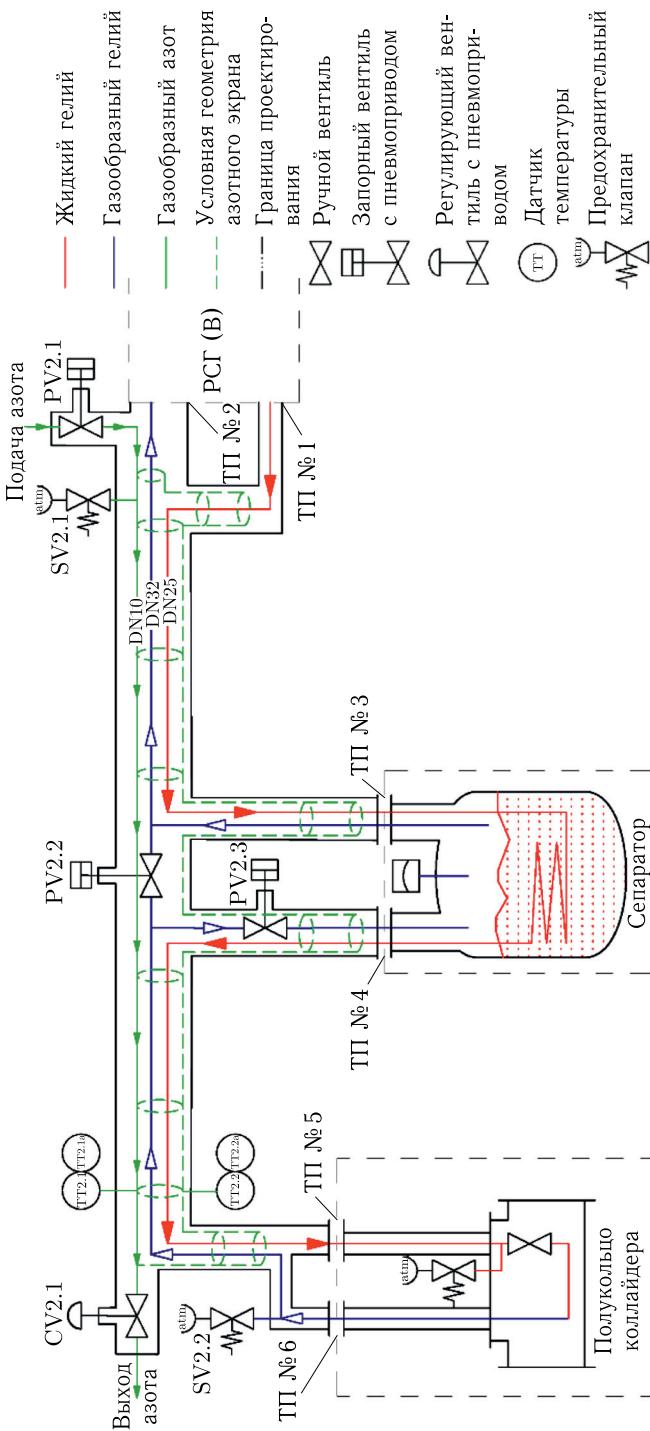


Рис. 6. Принципиальная схема трубопровода

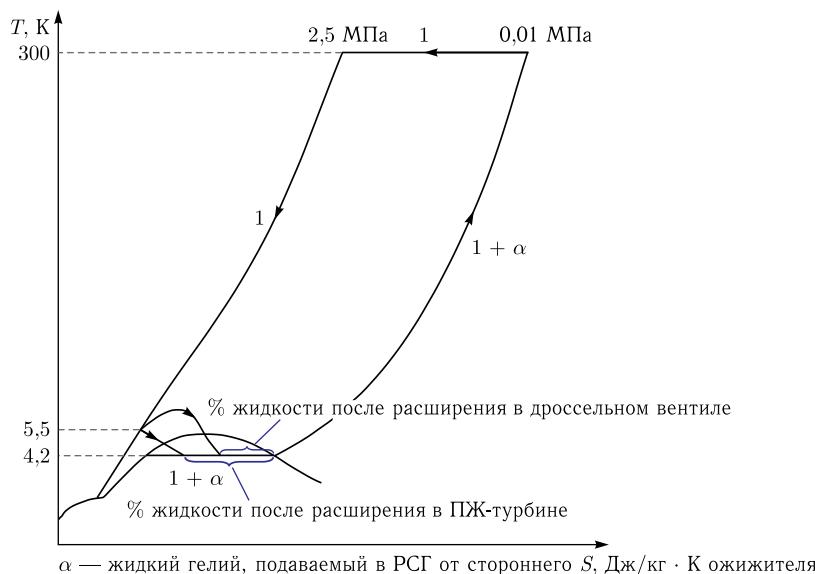


Рис. 7. Цикл сателлитного рефрижератора в T-S-диаграмме

На линии обратного потока установлены клапаны PV2.2 и PV2.3 (рис. 6), предназначенные для обеспечения двух режимов возврата гелия в рефрижератор: через сепаратор и в обход сепаратора.

Высокая эффективность криогенного цикла РСГ достигается использованием парожидкостной турбины в ступени охлаждения (рис. 7). По сравнению с использованием дросселирования (эффект Джоуля–Томсона) парожидкостная турбина дает прирост холододородительности на 25 %.

Для повышения надежности и уменьшения времени восстановления при выходе турбины из строя РСГ оснащен двумя парожидкостными машинами, установленными в параллель. В процессе эксплуатации РСГ бустера, при пуске резервной турбины, находившейся при комнатной температуре, происходил резкий рост давления в сборнике из-за тепла, вносимого в цикл установки. Для обеспечения плавного пуска турбины были смонтированы линии для ее предварительного захолаживания в обход установки.

3. ОХЛАДИТЕЛЬ ГЕЛИЯ ОГ-1000

Для обеспечения сателлитных рефрижераторов гелием предприятием НПО «Гелиймаш» по нашему техническому заданию был спроектирован и изготовлен охладитель гелия ОГ-1000 производительностью 1000 л/ч. По производительности эта установка крупнейшая в России. В ее состав входят блоки очистки, охлаждения и охлаждения. Из-за большой производительности затруднены его полноценные испытания, так как при выходе на рабочий режим происходит быстрое заполнение гелием всех объемов установки. Для обкатки охладителя в течение продолжительного времени необходимо иметь большой холодный объем, куда установка будет сливать ге-

лий. В качестве такой емкости была использована контейнер-цистерна транспортная КЦГ-40/0,5, предназначенная для хранения до 40 м³ жидкого гелия.

Благодаря возможности возвращать холодные пары гелия от потребителей (рис. 8) данная установка имеет гибкие режимы работы:

- обеспечение работы сателлитных рефрижераторов с выдачей гелия из змеевика;
- захолаживание и слив гелия в холодные хранилища.

На 2025 г. запланирована работа по оптимизации пускового режима охладителя, которая позволит снизить затраты жидкого азота при захолаживании гелиевых емкостей. Данная задача будет решена путем перенаправления обратного потока в теплообменный аппарат E31 в период работы установки в диапазоне от 300 до 60 К.

В 2023–2024 гг. проведено несколько сеансов работы охладителя по 10–12 ч, во время которых производился слив гелия в цистерну с рекуперацией холодных паров установкой. Охладитель ОГ-1000 подтвердил свои характеристики по производительности, а также показал удовлетворительную управляемость всех систем.

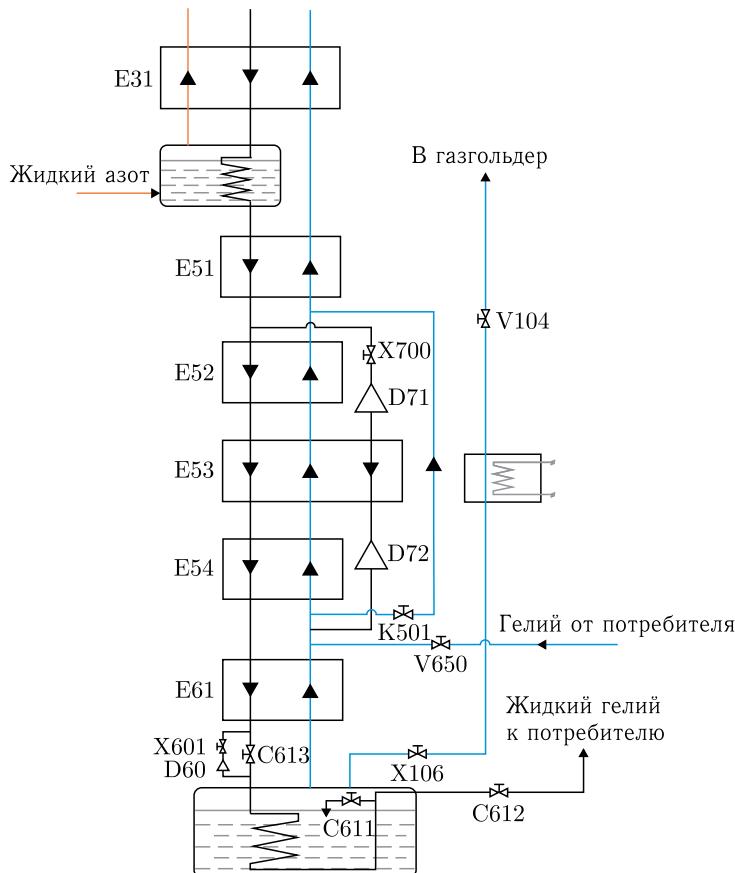


Рис. 8. Принципиальная схема охладителя гелия ОГ-1000

4. КОНТЕЙНЕР-ЦИСТЕРНА ТРАНСПОРТНАЯ КЦГ 40/0,5

Для хранения большого количества гелия, необходимого для заполнения холодных объемов ускоряющих колец комплекса NICA и обеспечения потребностей других потребителей лаборатории, по заказу ОИЯИ НПО «Гелиймаш» спроектировал и изготовил контейнер-цистерну транспортную КЦГ 40/0,5 объемом 40 м³.

Характеристикой, определяющей качество данного изделия, является теплопроток к гелиевому сосуду, размещенному внутри вакуумного кожуха. Для его минимизации между сосудом и кожухом установлен тепловой экран, охлаждаемый жидким азотом.

Паспортная величина теплопротока составляет 5,9 Вт, и для ее подтверждения было произведено измерение испаряемости. Измерения проводились на производственной базе ООО «Технология» в пос. Малаховка (Московская область).

В качестве измерительного прибора использовался барабанный газовый счетчик тип ГСБ-400, имеющий 1-й класс точности измерений. Газовый счетчик подключался к линии газосброса гелиевой емкости через металлорукав. Испаряющийся из емкости гелий проходил через счетчик и далее попадал в мягкий газгольдер, давление в котором равно атмосферному, и закачивался из него компрессором в систему хранения газообразного гелия. Перед подачей газа в счетчик проводился его дополнительный подогрев.

Измерения испаряемости проводились при следующих параметрах:

- 1) уровень жидкого гелия в емкости — 60 %;
- 2) давление в емкости, избыточное — 0 кг/см²;
- 3) температура газа, поступающего в счетчик, — 223 К;
- 4) показания датчиков температур азотного экрана емкости:
 - термометр № 1 — 80 К;
 - термометр № 2 — 81 К;
 - термометр № 3 — 81 К;
- 5) уровень жидкого азота в емкости экрана — 100 %;
- 6) показания термометра гелиевой емкости — 35,75 К (1773 Ом).

Показания термометра гелиевой емкости некорректны, необходима проверка калибровки термометра и вторичного прибора.

Измерения проводились в течение 2,5 ч. За это время объем газа, получившегося в результате испарения гелия из емкости, составил 10 м³, что соответствует 4 м³/ч.

Количество тепла (Q , Вт), необходимое для испарения (G , кг/ч) криогенного продукта, определяется по формуле

$$Q = \frac{G \cdot r}{3600},$$

где G — количество испарившегося криогенного продукта в кг/ч; r — удельная теплота испарения продукта в Дж/кг.

Для измеренного объемного расхода V в 4 м³/ч имеем массовый расход G :

$$G = V \cdot \rho = 4 \cdot 0,215 = 0,86 \text{ кг/ч},$$

где V — объемный расход в м³/ч; ρ — плотность газообразного гелия (при температуре измерения 223 К) в кг/м³.

Величина теплопритока к внутреннему сосуду гелиевой емкости составит

$$Q = \frac{G \cdot r}{3600} = \frac{0,86 \cdot 2,03 \cdot 10^4}{3600} = 4,85 \text{ Вт.}$$

Полученный результат показывает, что теплоприток к внутреннему сосуду контейнер-цистерны транспортной КЦГ-40/0,5 составляет 4,85 Вт, что на 18 % ниже расчетного значения. Это позволяет сделать вывод о высоких теплотехнических характеристиках испытуемого изделия, сравнимых с зарубежными аналогами, и его пригодности для транспортировки и хранения жидкого гелия.

Помимо теплотехнических испытаний, проведен успешный цикл транспортировки КЦГ-40/0,5 с его заправкой жидким гелием на производстве в Оренбурге и последующей доставкой на базу в Московской области для раздачи потребителям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог, можно сказать, что созданный криогенный гелиевый комплекс способен обеспечить необходимый температурный режим работы магнитов коллайдера. Использование сателлитных рефрижераторов с избыточным обратным потоком повышает надежность работы системы, а наличие большого «холодного» хранилища КЦГ-40/0,5 позволяет иметь запас жидкого гелия для сглаживания нештатных ситуаций и обеспечивать им сторонних потребителей лаборатории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Agapov N. et al.* Cryogenic Technologies of the Superconducting NICA Accelerator Complex // Proc. 15th IIR Conf. "Cryogenics 2019", Prague, 2019.
2. *Konstantinov A. et al.* Analysis of the Thermal Loads on the NICA Accelerator Complex // Proc. 14th IIR Intern. Conf. "Cryogenics 2017", Dresden, 2017.

Получено 28 октября 2024 г.