

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 538.945

СТАТУС ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНО-
КРИОСТАТНОЙ СИСТЕМЫ КОЛЛАЙДЕРА NICA. РЕЗУЛЬТАТЫ
КРИОГЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ
МАГНИТОВ¹

© 2024 г. Д. Н. Никифоров^{а,*}, Ю. Г. Беспалов^а, Г. Г. Ходжибагиян^а,
А. А. Котова^а, Д. А. Золотых^а, В. В. Борисов^а, Ю. В. Гусаков^а,
С. А. Коровкин^а, А. В. Кудашкин^а, П. И. Кудряшов^а, Г. Л. Кузнецов^а,
М. В. Петров^а, Е. В. Сергеева^а, Р. В. Талызин^а

^аОбъединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6

*e-mail: dmitnik@jinr.ru

Поступила в редакцию 18.12.2023г.

После доработки 03.06.2024 г.

Принята к публикации 11.09.2024 г.

Ускорительный комплекс NICA состоит из трех сверхпроводящих колец: работающего с 1993 г. синхротрона нуклотрон, введенного в эксплуатацию с 2021 г. синхротрона бустер и строящегося коллайдера. В статье представлены статус производства элементов магнитно-криостатной системы коллайдера проекта NICA и результаты криогенных испытаний сверхпроводящих магнитов, включающих в себя тренировку сверхпроводящих обмоток, измерение параметров магнитного поля, измерения статического теплопритока и динамических тепловыделений.

~~Ключевые слова:~~ сверхпроводимость, ускорительная техника, сверхпроводящие магниты, проект NICA

1. ВВЕДЕНИЕ

Для создания коллайдера проекта NICA требуется произвести и испытать 290 сверхпроводящих (СП) магнитов. В научно-экспериментальном отделе сверхпроводящих магнитов и технологий (НЭОСМТ) в лаборатории физики высоких

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск.

энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина (ЛФВЭ) Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) организовано уникальное производство СП-магнитов с высокотехнологичной линией сборки, испытаний и сертификации [1]. За время работы производства было выпущено 448 СП-магнитов для проектов NICA ОИЯИ и SIS100 FAIR. В обоих проектах применяются СП-магниты типа оконная рама с седловидной СП-обмоткой из сверхпроводника NbTi [2]. СП-кабель создается по уникальной технологии и называется – кабель типа нуклотрон. Было произведено более 14 км СП-кабеля.

2. ТИПЫ СП-МАГНИТОВ

Сверхпроводящие магниты пяти различных типов были разработаны для кольца коллайдера, основные характеристики которых приведены в табл. 1. В регулярную структуру коллайдера FODO входит два типа СП-магнитов (см. рис. 1) – дипольный магнит и квадрупольная линза. В СП-магниты нерегулярной структуры (см. рис. 2) входят линзы финального фокуса пучка (ЛФФ), которые делятся на три подтипа: ЛФФ1, ЛФФ2 и ЛФФ3; блок квадрупольных линз (БЛ), который делится на три подтипа по длинам ярм: БЛ1, БЛ2 и БЛ3 и дипольные магниты вертикального сведения/разведения пучков (BV) двух подтипов: BV1 и BV2.

Рис.1. СП-магниты регулярной структуры: **а** – дипольный магнит, **б** –квадрупольная линза.

Рис. 2. СП-магниты нерегулярной структуры: **а** – линза финальной фокусировки пучка ЛФФ2, **б** – дипольный магнит сведения/разведения пучка BV2, **в** – блок квадрупольных линз.

Таблица 1. Основные характеристики СП-магнитов коллайдера

Тип магнит а	Кол-во	Макс. магнитное поле/градиент	Эффективная длина магнитного поля, м	Масса, кг	Статический теплоприток, Вт	Общий теплоприток, Вт	Индуктивность, мкГн
М	80	1.8	1.942	1779	5.9	7.7	450
Л	46	23.1 Тл/м	0.477 0.462 0.382	501	16.1	19.7	47
БЛ1	4	23.1 Тл/м	0.707 0.804	1264	40.5	74.1	143

БЛ2	4	23.1 Тл/м	0.693 0.584	1078	35.97	68.35	122
БЛ3	4	23.1 Тл/м	0.573 0.605	1015	36.44	65.96	113
ЛФФ1	4	19.2 Тл/м	0.945	940	10.3	15.2	579
ЛФФ2	4	19.2 Тл/м	1.415	1339	12.2	16.8	858
ЛФФ3	4	19.2 Тл/м	0.680	640	15.9	26.4	422
BV1	4	1.35 Тл	1.38	1046	19.7	21.7	209
BV2	4	1.35 Тл	1.38	1450	–	–	115

Каждый СП-магнит проходит две основные стадии производства: первая – криогенные испытания, вторая – окончательная сборка модуля с высоковакуумными камерами (ВВК) и выпуск технического паспорта. Криогенные испытания являются основными испытаниями СП-магнита, которые показывают стабильность его работы в рабочих условиях при температуре 4.5 К и максимальном магнитном поле/градиенте (табл. 1). Криогенные испытания включают в себя следующие этапы: охлаждение СП-магнита до температуры 4.5 К, тренировка СП-обмоток, измерение параметров магнитного поля, замер тепловых нагрузок и гидравлического сопротивления СП-магнита во время работы в цикле, проверку герметичности коммуникаций магнита и отепление СП-магнита. Каждый этап дает важные экспериментальные данные, на основе анализа которых принимается решение о пригодности СП-магнита для эксплуатации в коллайдере (рис.1, 2).

После успешного выполнения всех этапов криогенных испытаний наступает вторая стадия производства СП-магнита – окончательная сборка с ВВК и выпуск технического паспорта модуля, включающего в себя около 30 отчетов и протоколов измерений и испытаний в зависимости от типа СП-магнита.

Производство магнитов для проекта NICA находится на завершающей стадии. Все магниты регулярной структуры, а также блоки линз нерегулярной структуры успешно прошли криогенные испытания и перевезены в туннель для дальнейшего монтажа и сборки в кольцо. Линзы финальной фокусировки пучка уже прошли этап криогенных испытаний и подготавливаются к окончательной сборке с ВВК.

3. СБОРКА НЕМАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНО-КРИОСТАТНОЙ СИСТЕМЫ КОЛЛАЙДЕРА

Кроме 290 СП-магнитов в структуру магнитно-криостатной системы коллайдера входят более 40 элементов обводных участков общей длиной более 160 метров (рис. 3а) и два участка ввода криогенных жидкостей и тока (рис. 3б). Элементы обводных

участков необходимы для провода криогенных и токовых коммуникаций параллельно траектории пучка в местах установки теплых элементов коллайдера, таких как ВЧ-станции, электронное охлаждение и т. д. Внутри элементов находятся гелиевые и азотные коллекторы, а также токовые связи, соединяющие магнитные СП-элементы кольца. Разработано более 20 конфигураций элементов. Производство токовых связей завершено. Для сборки пятиметровых элементов обводных участков в туннели кольца организована специальная зона сборки.

Рис. 3. Немагнитные элементы коллайдера: **а** – несколько типов элементов обводных участков, **б** – западный участок ввода криогенных жидкостей и тока коллайдера.

Для обеспечения охлаждения, криостатирования и питания током кольца коллайдера применяются два участка ввода для западной и восточной арок коллайдера. Каждый участок включает в себя: два тоководных криостата по шесть ВТСП-тоководов и два криостата для ввода жидких азота и гелия, а также группы криогенной регулирующей арматуры и измерительной аппаратуры. Участок ввода является частью коллайдера, в котором повторяются все основные системы колец: криогенная, вакуумная, система потенциальной защиты, термометрия и измерения давлений в азотных и гелиевых коммуникациях, а также дополнительно система управления охлаждением ВТСП-тоководов. Все элементы участков ввода пройдут криогенные испытания для проверки гелиевых коммуникаций на герметичность и работоспособность всех подсистем.

Сборка элементов обводных участков должна закончиться в декабре 2024 года, сборка участков ввода криогенных жидкостей и тока в феврале 2025 года.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ КРИОГЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ СП-МАГНИТОВ

После сборки СП-магнита на испытательном плече начинается первый этап криогенных испытаний. С помощью гелиевого сателлитного рефрижератора [3] производительностью 100 Вт при максимальном расходе 7 г/с магнит охлаждается до температуры 4.5 К. Охлаждение осуществляется в два этапа: с 297 К до 120 К и с 120 К до 4.5 К. Ввиду конструкционных особенностей ярм магнитов в режим охлаждения введено ограничение скорости 5 К/ч. После охлаждения СП-магнита до температуры 4.5 К криогенные испытания проходят в соответствии с ранее указанной последовательностью.

Общее время, затраченное на испытание дипольного магнита коллайдера, составляет 117 часов. На рис. 4 показано распределение времени одного криогенного испытания дипольного магнита коллайдера. Самые затратные этапы – это охлаждение и отепление магнита, примерно 87% времени, само же испытание занимает около 13% от общего времени. Для уменьшения длительности отепления магнита применяется принудительная циркуляция теплового потока азота внутри изоляционного объема испытательного плеча. Данное техническое решение позволило вдвое сократить время отепления магнитов.

Рис. 4. Распределение времени этапов криогенных испытаний дипольного магнита коллайдера.

На рис. 5а представлен график тренировок всех СП-обмоток дипольных магнитов коллайдера. Магниты, в процессе тренировки которых количество срывов сверхпроводимости находится выше штриховой линии, должны пройти повторные криогенные испытания для проверки свойства запоминания тренировочного тока СП-обмоткой. При повторной тренировке первый срыв сверхпроводимости должен быть выше рабочего тока, на рис. 5б показан результат повторных тренировок для пяти дипольных магнитов коллайдера.

Рис. 5. Результаты тренировки СП-обмоток дипольных магнитов коллайдера: **а** – график тренировок всех СП-обмоток, **б** – первый ток перехода при повторных криогенных испытаниях.

Для проведения магнитных измерений разработаны специальные магнитометрические системы на базе метода вращающихся гармонических катушек [4]. Общее число магнитометров в данных системах составляет: шесть единиц для дипольных магнитов, шесть единиц для линз арок и четыре магнитометра, укомплектованные в два измерительных вала, для БЛ-коллайдера. В рамках проведения магнитных измерений при температуре 4.5 К проводятся измерения интегралов магнитного поля и относительных интегральных гармоник. На основе результатов магнитных измерений в дальнейшем проводится расстановка магнитов в коллайдере NICA. На рис. 6 представлено распределение относительных отклонений интегралов магнитного поля дипольных магнитов коллайдера NICA при максимальном рабочем

токе. Подробная информация о результатах магнитных измерений дипольных магнитов коллайдера NICA приведена в работе [4].

Рис. 6. Распределение относительных отклонений интегралов магнитного поля дипольных магнитов коллайдера NICA при максимальном рабочем токе 10.44 кА.

Тепловая нагрузка на СП-магнит включает в себя статический теплоприток и теплоприток при работе с током. При подведении рабочего тока на магниты коллайдера источником тепла являются медные спаи между испытательным стендом и магнитом, которые отсутствуют при монтаже магнитов на кольцо. Типы магнитов, в состав которых входят корректирующие магниты, имеют дополнительный теплоприток от слаботочных тоководов, питающих обмотки корректоров. Измерение тепловых нагрузок осуществляется с помощью калориметрического метода [5].

Криогенные испытания можно разделить на два типа, такие как серийные испытания, которые проводятся по штатной программе испытаний, согласно с планом производства и исследовательские испытания, цель которых заключается в исследовании различных характеристик и режимов работы самого магнита и его систем. К исследовательским испытаниям относятся: определение гидравлического сопротивления охлаждающего канала магнитов и подбор его; проведение циклов магнитных измерений для калибровки системы измерения магнитного поля; проведение исследований с целью определения времени распространения нормальной зоны; определение тепловых нагрузок различных элементов магнита; определение в пространстве положения магнита в процессе охлаждения и в режиме криостатирования для контроля работы системы подвеса и т.д.

В общей сложности для завершения производства магнитов регулярной и нерегулярной структуры потребовалось проведение 241 криогенного испытания (без учета магнитов серии BV). Из них 202 испытания были серийными, а 39 испытаний были направлены на исследования. Средний процент исследовательский испытаний на каждый новый тип магнитов составляет 23.5%.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Малый процент повторных серийных испытаний и успешные первые пуски бустерного синхротрона говорят о высокой надежности магнитов и качестве магнитного поля СП-магнитов, производимых в НЭОСМТ ЛФВЭ ОИЯИ, на базе технологии изготовления СП кабеля типа нуклотрон.

Все элементы магнитно-криостатной системы коллайдера будут произведены, собраны, испытаны и установлены в кольцо до марта 2025 года для начала проведения технического пуска систем комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nikiforov D.N., Agapov N.N., Khodzhibagiyan H.G. et al. // Journal of Physics Conference Series, 2014. V. 507. P. 032034.*
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/507/3/032034>.
2. *Khodzhibagiyan H.G., Borisov V.V., Kekelidze V.D. et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2019. V. 29. № 5.*
<https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2901591>.
3. *Никуфоров Д.Н.* Разработка и оптимизация систем криообеспечения стенда для испытаний сверхпроводящих магнитов проекта NICA. Дис. ... канд. тех. наук. Дубна: Объединенный институт ядерных исследований, 2020.
4. *Zolotykh D.A., Borisov V.V., Donguzov I.I. et al. // Proc. of the XXVII Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC-2021). Alushta, 2021. P. 383.*
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPS18>
5. *Bespalov Y.G., Nikiforov D.N., Khodzhibagiyan H.G. et al. // Proc. of the 15th Cryogenics. Prague, 2019.* <https://doi.org/10.18462/iir.cryo.2019.0016>.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис.1. СП-магниты регулярной структуры: **а** – дипольный магнит, **б** –квадрупольная линза.

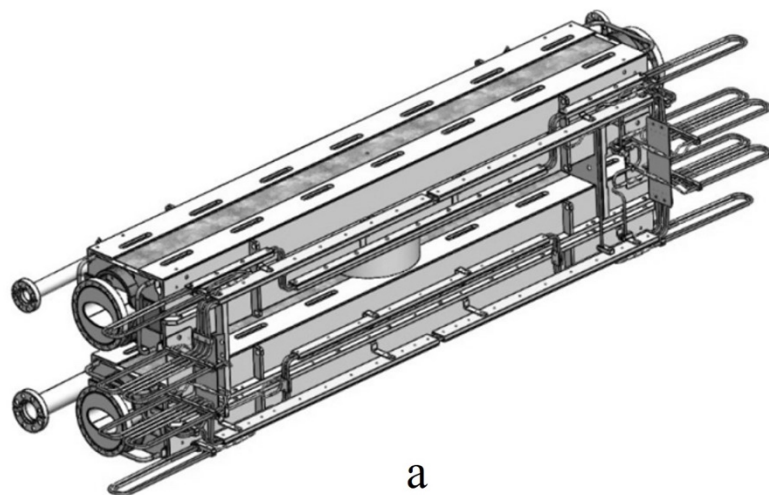
Рис. 2. СП-магниты нерегулярной структуры: **а** – линза финальной фокусировки пучка ЛФФ2, **б** – дипольный магнит сведения/разведения пучка BV2, **в** – блок квадрупольных линз.

Рис. 3. Немагнитные элементы коллайдера: **а** – несколько типов элементов обводных участков, **б** – западный участок ввода криогенных жидкостей и тока коллайдера.

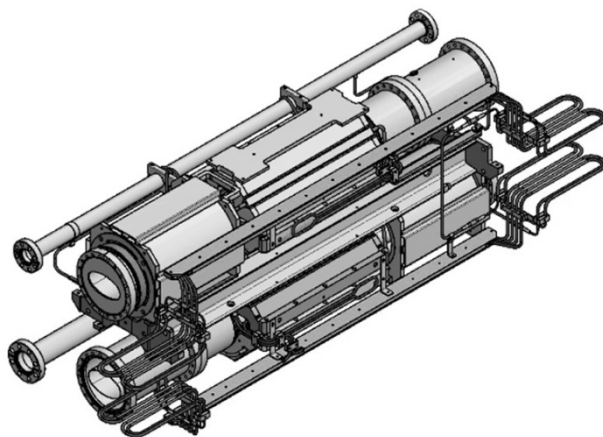
Рис. 4. Распределение времени этапов криогенных испытаний дипольного магнита коллайдера.

Рис. 5. Результаты тренировки СП-обмоток дипольных магнитов коллайдера: **а** – график тренировок всех СП-обмоток, **б** – первый ток перехода при повторных криогенных испытаниях.

Рис. 6. Распределение относительных отклонений интегралов магнитного поля дипольных магнитов коллайдера NICA при максимальном рабочем токе 10.44 кА.

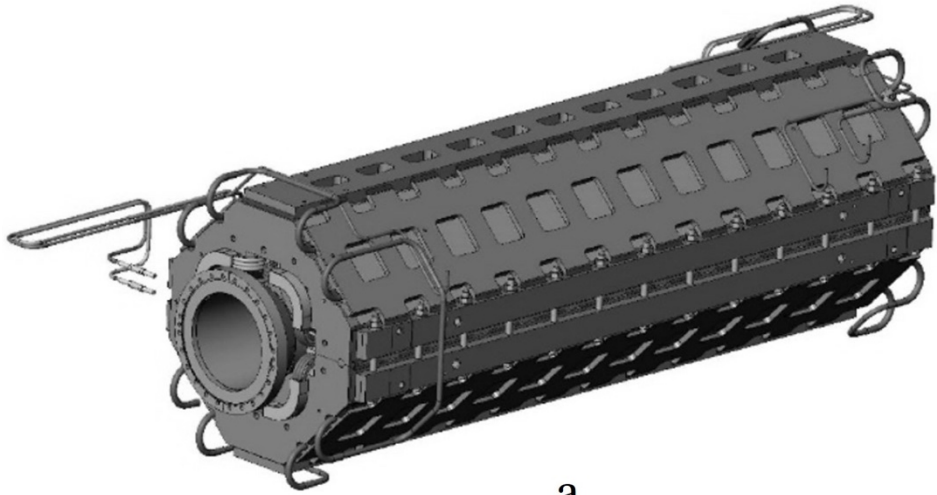


а

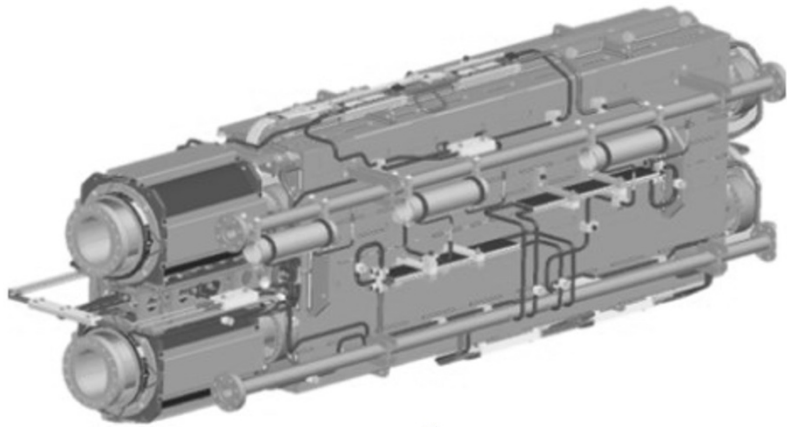


б

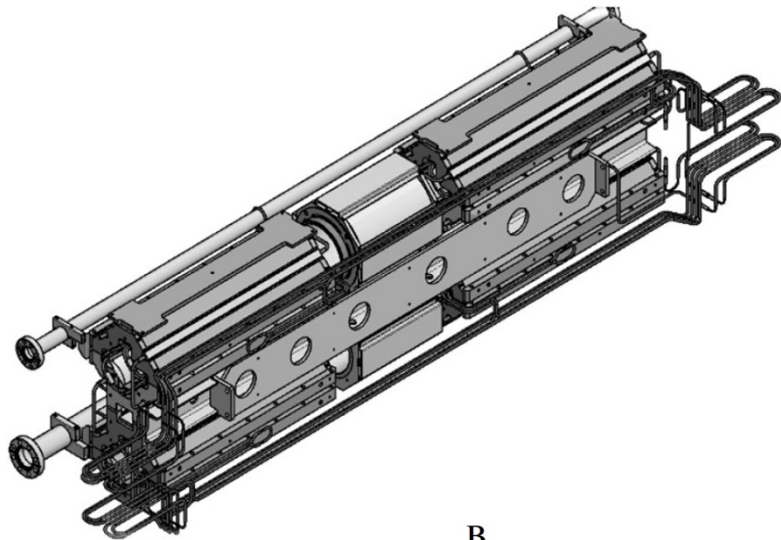
Рис. 1.



а



б

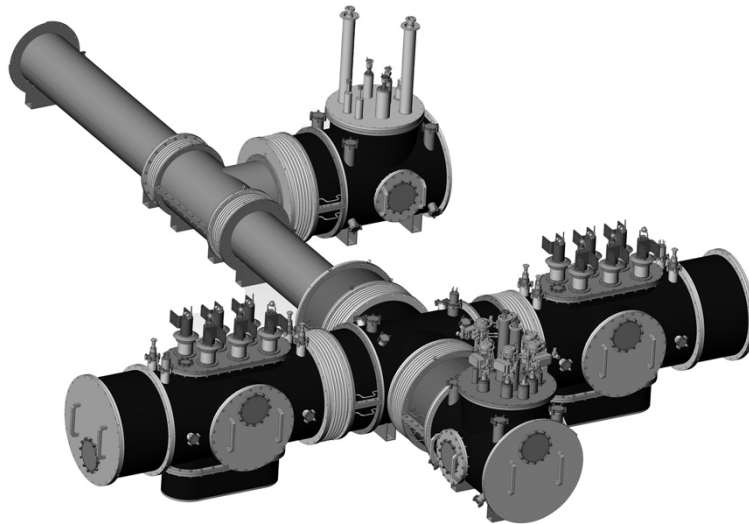


в

Рис. 2.



а



б

Рис. 3.

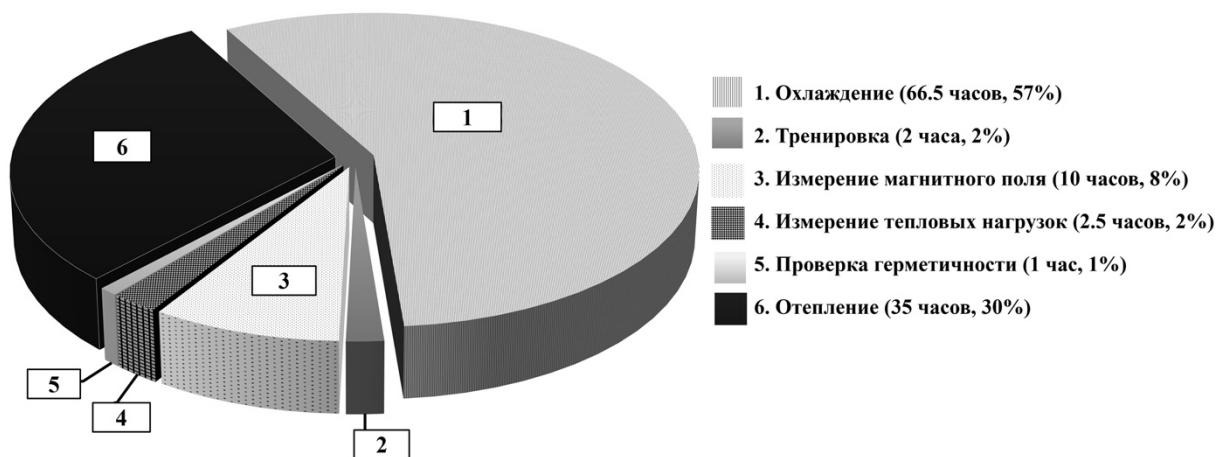
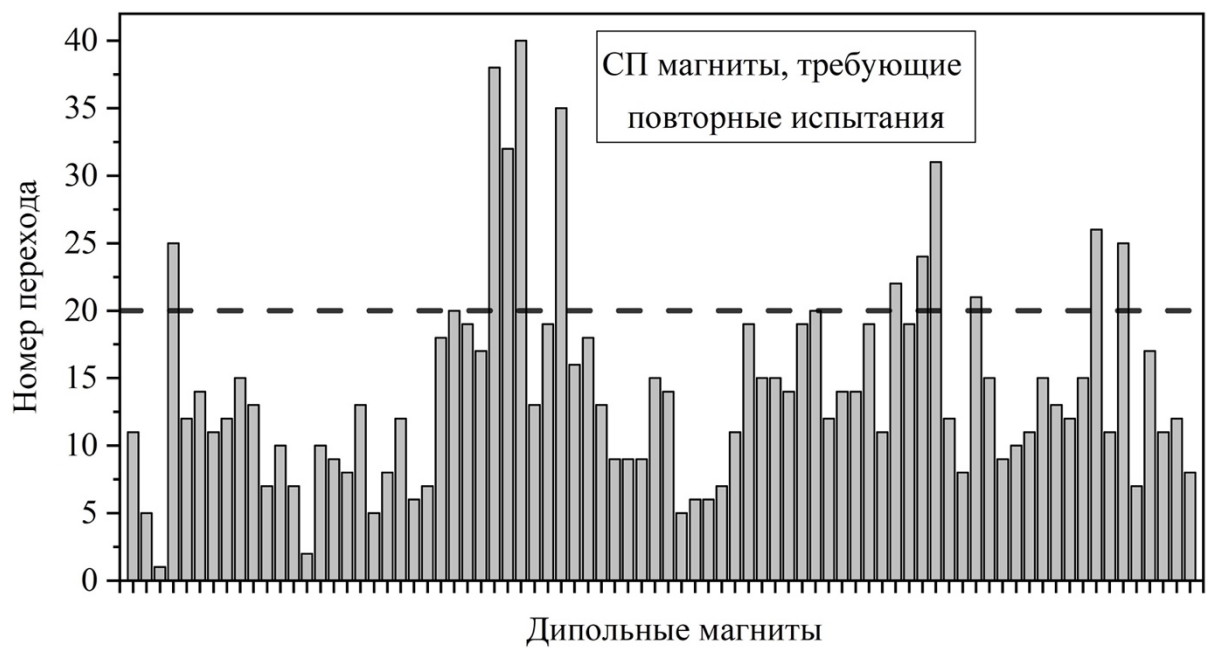
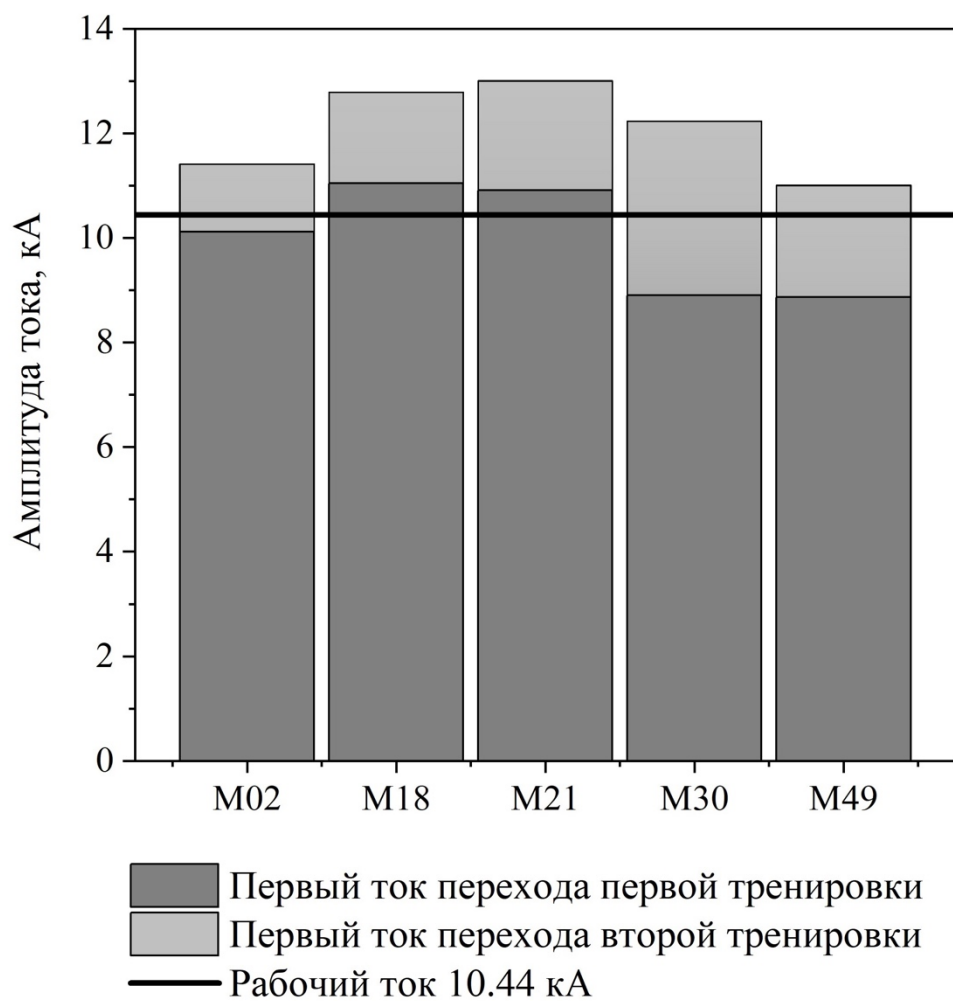


Рис. 4.



а



б

Рис. 5.

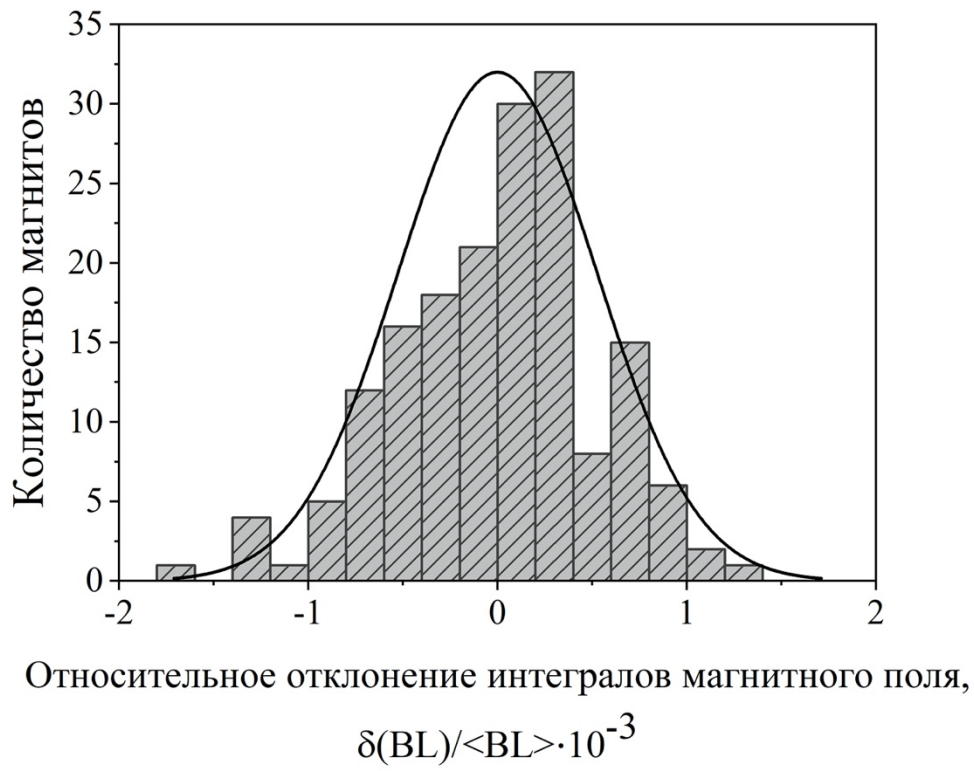


Рис. 6.

Для связи с авторами:

Никифоров Дмитрий

Е-mail: dmitnik@jinr.ru

Беспалов Юрий

Е-mail: bespalov@jinr.ru

Тел.: 8-963-661-63-11 (моб.)

(496)216-22-52

Ходжибагиян Гамлет

Е-mail: hamlet@jinr.ru

(496)216-46-86

Для переводчика:

Status of the production the NICA collider magnetic-cryostat system. Results of cryogenic tests of superconducting magnets.

The NICA accelerator complex consists of three superconducting rings: the Nuclotron synchrotron, which has been in operation since 1993, the synchrotron accelerator, which has been commissioned since 2021, and the collider under construction. The article presents production status of the collider magnetic-cryostat system elements and results of cryogenic tests, including training of superconducting coils, measurements of magnetic field parameters, measurements of static heat leak and dynamic heat releases.