

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК 621.317.441

СЕРИЙНЫЕ МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ  
КВАДРУПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ КОЛЛАЙДЕРА NICA<sup>1</sup>

©2024 г. Д. А. Золотых<sup>а,\*</sup>, В. В. Борисов<sup>а</sup>, И. И. Донгузов<sup>а</sup>,  
О. М. Голубицкий<sup>а</sup>, Г. Г. Ходжибагиян<sup>а</sup>, Б. Кондратьев<sup>а</sup>, С. А. Костромин<sup>а</sup>,  
А. В. Кудашкин<sup>а</sup>, Д. Н. Никифоров<sup>а</sup>, И. Ю. Николайчук<sup>а</sup>,  
М. М. Омеляненко<sup>а</sup>, М. М. Шандов<sup>а</sup>, А. В. Шемчук<sup>а</sup>, И. А. Смирнов<sup>а</sup>,  
Е. В. Золотых<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Объединенный институт ядерных исследований,  
Россия, 141980, ~~г.~~ Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6  
<sup>\*</sup>e-mail: zolotykh@jinr.ru

Поступила в редакцию 12.03.2024 г.

После доработки 30.03.2024 г.

Принята к публикации 09.05.2024 г.

В научно-экспериментальном отделе сверхпроводящих магнитов и технологий (НЭОСМТ) в Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) им. В. И. Векслера и А. М. Балдина Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) проведены испытания и магнитные измерения 70 двухпертурных сверхпроводящих магнитов. Магниты измерены специально разработанной магнитометрической системой при температуре окружающей среды и рабочей температуре (4.5 К). Данная статья описывает магнитометрические системы и результаты магнитных измерений структурных квадрупольных магнитов арок и блоков квадрупольных магнитов коллайдера NICA.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) [1] – новый ускорительный комплекс, который создается в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна, Россия) с целью изучения свойств барионной материи высокой плотности. Ускорительный комплекс состоит из двух линейных ускорителей, бустерного синхротрона (бустера), существующего

---

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

синхротрона нуклотрона и накопителя – коллайдера. Магнитная система коллайдера состоит из двух накопительных колец периметром 503 м каждое и включает 46 двухапертурных сверхпроводящих квадрупольных магнитов (БЛ, блоки линз) (рис.1) трех типоразмеров длин, формирующих регулярные периоды магнитной системы арок. Магниты отличаются по длине ярма по своему функциональному назначению. Модуль магнита имеет по одному мультипольному корректирующему магниту (МПК) для каждой апертуры. Основные характеристики магнитов арок приведены в табл. 1 [1]. В прямолинейных участках расположены двухапертурные квадрупольные магниты (24 магнита), объединенные в дублеты (рис.2) с установленным между ними МПК.

**Рис. 1.** Двухапертурный квадрупольный магнит арки коллайдера NICA

**Рис. 2.** БЛ коллайдера NICA

**Таблица 1.** Основные характеристики квадрупольного магнита арок коллайдера NICA

Характеристика	Величина
Максимальный градиент магнитного поля $G_{max}$ , Тл/м	23.1
Минимальный градиент магнитного поля, $G_{min}$ , Тл/м	7.3
Эффективная длина магнита $L_{eff}$ , м	0.47
Скорость изменения градиента магнитного поля $dG/dt$ , (Тл/м)/с	$\leq 1.3$
Неоднородность градиента магнитного поля $DG/G$ на радиусе 30 мм	$\pm 2 \cdot 10^{-4}$
Расстояние от оси до полюса, м	0.0475
Расстояние между пучками, мм	320
Ширина ярма, м	0.3
Высота ярма, м	0.594
Масса магнита, кг	250
Ток при максимальном градиенте поля, кА	10.4
Число витков в обмотке (на полюс)	8(2)
Индуктивность, мкГн	94

С 2016 года в НЭОСМТ ЛФВЭ ОИЯИ начато серийное производство (сборка и испытания) структурных элементов ускорительного комплекса NICA. В НЭОСМТ осуществляется изготовление сверхпроводящего кабеля и обмотки, проводится контроль геометрии железных ярм, сборка обмотки с ярмом, выполняются “теплые” (при температуре

окружающей среды) и “холодные” (при температуре 4.5 К) магнитные измерения и другие испытания (электрические, криогенные, вакуумные и пр.). На данный момент полностью завершены работы по производству магнитов бустера [2], дипольных двухапертурных магнитов коллайдера [3], завершены испытания двухапертурных квадрупольных магнитов коллайдера и находятся на завершающей стадии испытания БЛ коллайдера [4].

В каждом квадрупольном магните за один сеанс охлаждения измеряются следующие параметры:

- градиент магнитного поля  $G$  в центре магнита [Тл/м];
- интеграл градиента  $\int G dl$  [Тл];
- относительные интегральные гармоники поля до 10-й включительно;
- величина поля каждого корректирующего магнита в МПК (датчиком Холла).

Предварительные результаты измерений приведены в [5].

Согласно техническому заданию на проведение серийных магнитных измерений квадрупольных магнитов коллайдера NICA для значений токов, соответствующих энергиям пучка 1 ГэВ/нуклон (7.3 Тл/м, 2300 А), 3 ГэВ/нуклон (16.4 Тл/м, 6890 А) и 4.5 ГэВ/нуклон (23 Тл/м, 10440 А) на радиусе  $r_{ref} = 30$  мм качество поля оценивается по следующим критериям:

- относительный разброс эффективных длин (отклонение эффективной длины магнита от среднего по всем магнитам);
- относительный разброс интегралов поля;
- качество магнитного поля (относительные гармоники);
- положение магнитной оси элемента относительно референсной системы координат (оценивается при температуре окружающей среды на специализированном магнитометрическом стенде, результаты данных измерений приведены в [6]).

## 2. МАГНИТОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Для проведения магнитных измерений в соответствии с указанными требованиями выбран метод гармонических катушек [2, 3]. Основной измерительный элемент магнитометра – массив гармонических катушек 2 (рис.3, 4), выполненный по технологии многослойных печатных плат. Печатная плата состоит из 20 слоев, в каждом из которых содержится 20 витков (суммарно 400 витков на измерительную катушку). Количество и длина массивов катушек (для измерений квадрупольных магнитов используются массивы по 5 катушек в каждом), используемых в магнитометрах, подбирается таким образом, чтобы обеспечить перекрытие всей области распространения магнитного поля (включая краевые участки). Зазоры между измерительными катушками учитываются при обработке путем экстраполяции данных измерений с соседних катушек.

**Рис. 3.** Магнитометр квадрупольных магнитов арок коллайдера 1 с блоками гармонических катушек 2

**Рис. 4.** Магнитометр БЛ коллайдера 1 с блоками гармонических катушек 2, 3

Разработаны два отдельных типа магнитометра, предназначенных для определенного типа квадрупольных магнитов: арок (рис. 5) и прямолинейных участков (рис. 6) 1 пара магнитометров для проведения “теплых” и 2 пары для “холодных” магнитных измерений (ТМИ и ХМИ соответственно) квадрупольных магнитов арок коллайдера и 1 пара магнитометров для всех измерений БЛ (каждый магнитометр БЛ включает в себя 2 магнитометра, собранные в один измерительный вал). Общее число магнитометров составляет 10 шт. Магнитометр базируется в ярме магнита на полюса во внутренних опорах скольжения 1 (рис. 5). Вкладыши подшипника изготовлены из политетрафторэтилена (PTFE [7]), отвечающего требованиям по эксплуатации магнитометров при криогенных температурах. Позиционирование магнитометра от продольного смещения (вдоль направления движения пучка) осуществляется с помощью планок 2 (рис. 5), монтируемых на ярме магнита со специальными упорами. Для магнитометров квадрупольных магнитов арок на швеллер магнита монтируется специальная конструкция с внешними регулируемымися самоцентрирующимися опорами качения 3 (рис. 5), которые также обеспечивают радиальную поддержку магнитометра в модуле магнита. Радиальную поддержку в магнитометрах БЛ выполняют внешние конструкции, оборудованные подшипниками скольжения 2 (рис. 6).

**Рис. 5.** Общий вид стенда ТМИ квадрупольных магнитов арок коллайдера NICA: 1 –

**Рис. 6.** Магнитометр БЛ коллайдера NICA

Для вращения и точного углового позиционирования магнитометров во время измерений используется сервоприводы 4 (рис. 5) производства KOLLMORGEN [8]. С помощью специальных токосъемников 5 (рис. 5) MOFLON [9] осуществляется передача сигналов с разъема на магнитометре [10] на выходной стационарный разъем. Для компенсации несоосностей, возникающих при сборке модуля на испытательном стенде, валы соединяются с токосъемниками и сервомоторами с помощью сильфонных муфт 6 (рис. 5).

Процедура ТМИ выполняется на специально созданном стенде. Общий вид стенда ТМИ квадрупольных магнитов арок коллайдера приведен на рис. 7. Из-за наличия ограниченного количества магнитометров БЛ коллайдера и производственной необходимости ТМИ магнитов прямолинейного участка выполнялись на стенде криогенных испытаний.

**Рис. 7.** Вид стенда ТМИ с квадрупольным магнитом арки коллайдера NICA (слева)

Параметры токового импульса для проведения ТМИ квадрупольных магнитов коллайдера приведены на рис. 8: скорость роста составляет 3 кА/с, время переходных участков 3 мс для ТМИ и скорость роста 10.44 кА/с, время переходного процесса 50 мс для ХМИ.

**Рис. 8.** Импульс тока при ТМИ (слева) и ХМИ (справа) магнитных измерениях

Для проведения ХМИ используется магнитометрическая система аналогичной конструкции, отличающаяся длиной приводных валов (используются более длинные валы с дополнительным облегчением) и наличием вакуумных кожухов у токосъемников в силу конструктивных особенностей криогенного стенда. Внешний вид стенда для проведения ХМИ представлен на рис. 9 (квадрупольных магнитов арок коллайдера) и на рис. 10 (БЛ коллайдера).

**Рис. 9.** Магнитно-криостатная система квадрупольного магнита арок коллайдера NICA с установленными магнитометрами

**Рис. 10.** Магнитно-криостатная система БЛ коллайдера

Магнитно-криостатная система БЛ коллайдера NICA имеет схожее строение и отличается габаритами вакуумного кожуха магнита. Передача сигналов с магнитометра на внешний разъем осуществляется также через токосъемники б на рис. 9.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 11 приведен график выполнения ХМИ структурных магнитов коллайдера NICA. В рамках производства двух серий магнитов (без учета исследований) выполнено 58 ХМИ: 46 арочных магнитов и 12 БЛ коллайдера NICA.

**Рис. 11.** Выполнение ХМИ структурных квадрупольных магнитов коллайдера NICA

В процессе измерений происходит одновременное измерение как основного (некомпенсированного), так и скомпенсированного сигналов. Измерения проводились в противоположные стороны вращения магнитометра в шаговом режиме с целью учета влияния скручивания магнитометра.

Для оценки параметров измеренных магнитов, полученных при проведении измерений с помощью 6 различных магнитометров для квадрупольных магнитов арок и 4 магнитометров для БЛ, проведена относительная калибровка коэффициента геометрической чувствительности катушек на основании обобщенной статистики измеренных данных. Представленные далее результаты измерений являются приведенными по отношению к одному из шести магнитометров для квадрупольных магнитов арок и к одному из четырех для БЛ.

На рис. 12 приведены распределения отклонений относительных величин интегралов магнитного поля квадрупольных магнитов арок коллайдера, на рис. 13 – для БЛ коллайдера NICA. Величина разброса значений интегралов магнитного поля улучшилась по сравнению с дуплетами линз бустера. Для линз бустера величина относительного отклонения интеграла магнитного поля составляет примерно  $2.28 \cdot 10^{-3}$  [2], для арочных линз коллайдера –  $0.97 \cdot 10^{-3}$ , для БЛ коллайдера –  $0.49 \cdot 10^{-3}$ . Данный показатель свидетельствует об улучшении качества производства ярм для квадрупольных магнитов коллайдера в сравнении с квадрупольными магнитами бустера. При сравнении квадрупольных магнитов арок и прямолинейных участков коллайдера наблюдается разница данного отклонения почти в два раза. Для обоснования данного различия проводятся дополнительные исследования.

**Рис. 12.** Распределение относительных отклонений интегралов магнитного поля

**Рис. 13.** Распределение относительных отклонений интегралов магнитного поля БЛ

На рис. 14а, 15а приведены передаточные функции по току питания обмоток для различных групп квадрупольных магнитов арок и БЛ коллайдера NICA по 1 магниту из каждой группы. На рис. 14б,в,г и 15б,в,г более детального представления результаты в масштабах каждой из групп. Различия интегралов магнитных полей у квадрупольных магнитов арок при одинаковой длине ярм (474 мм) вызвано отклонением в магнитных свойствах материалов лобовых пластин. Также с этим связано значительное уменьшение передаточной функции в области малых токов. Для более детальной оценки данного эффекта проводятся дополнительные исследования.

**Рис. 14.** Передаточные функции квадрупольных магнитов арок коллайдера для различных длин ярм

**Рис. 15.** Передаточные функции БЛ коллайдера для различных длин ярм

На рис. 16 представлены относительные интегральные гармоники для структурных квадрупольных магнитов коллайдера NICA с указанием допуска (затемненные области) на качество магнитного поля элемента (остальные гармоники величиной менее 1 юнита (1 юнит =  $10^{-4}$ ) не представлены). Величина относительной гармоники  $b_3$  превышает допуск, что может быть вызвано большими отклонениями геометрии полюсов. Результаты исследований по определению причин большой величины данной гармоники приведены в [2, 11].

**Рис. 16.** Относительные гармоники квадрупольных магнитов арок коллайдера и БЛ

На рис. 17, 18 представлены зависимости величины разрешенной гармоники  $b_6$  от величины тока для квадрупольных магнитов арок и БЛ коллайдера соответственно при

различных длинах магнитов. Из указанных графиков зависимостей видно, что из представленных длин ярм магнитов, наилучший эффект от шиммирования ярма наблюдается при длине  $L_{\text{yoke}} = 564$  мм, где величина  $b_6$  практически не зависит от тока и находится в допуске на магнитные измерения. Для более детальной оценки данного эффекта требуются дополнительные исследования.

**Рис. 17 .** Зависимость величины относительной интегральной гармоники  $b_6$  от тока для различных групп квадрупольных магнитов арок коллайдера

**Рис. 18 .** Зависимость величины относительной интегральной гармоники  $b_6$  от тока для различных групп БЛ коллайдера

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Завершены серийная сборка и испытания структурных квадрупольных магнитов арок и БЛ коллайдера NICA. Результаты магнитных измерений будут в дальнейшем использованы при расчетах для определения расстановки модулей магнитов в кольце коллайдера, построении моделей, позволяющих повысить эффективность настройки ускорителя и расчета динамической апертуры. Для детальной оценки различных эффектов, таких как влияние материала лобовых пластин ярма на величину интегралов градиента магнитного поля и пр., проводятся дополнительные исследования. Исходя из полученных результатов магнитных измерений, заметно улучшено качество изготовления квадрупольных магнитов по сравнению с магнитами бустера [12].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Technical Project of NICA Acceleration Complex. Dubna, 2015.
2. *Shemchuk A.V., Donguzov I.I., Kashuninet M.A. et al.* // Proc. RuPAC-2018. Protvino, Russia. 2018. P. 353. <http://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-WEPSB33>
3. *Zolotikh D.A., Donguzov I.I., Kostromin S.A. et al.* // Proc. RuPAC'21. Alushta, Russia. 2021. P. 383. <http://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPS18>
4. *Беспалов Ю., Нукифоров Д., Ходжибагиян Г. и др.* // Материалы RuPAC'23. Новосибирск, Россия. 2023. С. 264.
5. *Shandov M.M., Khodzhbagiyant H.G., Kostromin S.A. et al.* // Proc. RuPAC'21. Alushta, Russia. 2021. P. 41. <http://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUB02>
6. *Николайчук И.* // Материалы RuPAC'23. Новосибирск, Россия. 2023. С. 104.
7. <http://www.plastspb.ru>

8. <http://www.kollmorgen.com/>
9. <http://www.moflon.com/>
10. <http://www.eandc.ru/pdf/snc146.pdf>
11. *Cobb J.K., Muray J.J.* // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1965. V. 12. № 3. P. 395.  
<https://doi.org/10.1109/TNS.1965.4323660>
12. *Khodzhibagiyan H., Fischer E., Bepalov Yu. et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2024. P. 1.  
<http://doi.org/10.1109/TASC.2024.3368993>

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Двухапертурный квадрупольный магнит арки коллайдера NICA: 1 – МПК, 2 – ярмо, 3 – обмотка, 4 – охлаждающая трубка, 5 – кабели электрической связи соседних магнитов.
- Рис. 2.** БЛ коллайдера NICA: 1 – МПК, 2 – ярмо, 3 – обмотка, 4 – охлаждающая трубка, 5 – кабели электрической связи соседних магнитов.
- Рис. 3.** Магнитометр квадрупольных магнитов арок коллайдера 1 с блоками гармонических катушек 2.
- Рис. 4.** Магнитометр БЛ коллайдера 1 с блоками гармонических катушек 2, 3.
- Рис. 5.** Общий вид стенда ТМИ квадрупольных магнитов арок коллайдера NICA: 1 – внутренние опоры магнитометра, 2 – упорные планки, 3 – внешние опоры магнитометра, 4 – сервомотор, 5 – токосъемники, 6 – сильфонная муфта.
- Рис. 6.** Магнитометр БЛ коллайдера NICA: 1 – внутренние опоры магнитометра, 2 – упорные планки с подшипниками.
- Рис. 7.** Вид стенда ТМИ с квадрупольным магнитом арки коллайдера NICA (слева): 1 – токосъемник, 2 – магнит, 3 – магнитометр, 4 – сильфонная муфта, 5 – сервомотор, 6 – стол для установки магнита, 7 – элементы крепления магнита, 8 – кронштейн сервомоторов. Импульсный ИП для стенда ТМИ (справа).
- Рис. 8.** Импульс тока при ТМИ (слева) и ХМИ (справа) магнитных измерениях.
- Рис. 9.** Магнитно-криостатная система квадрупольного магнита арок коллайдера NICA с установленными магнитометрами: 1 – сигнальный разъем магнитометра, 2 – ярмо магнита, 3 – магнитометр, 4 – азотный экран, 5 – вакуумный кожух, 6 – токосъемники (в вакуумном кожухе).
- Рис. 10.** Магнитно-криостатная система БЛ коллайдера: 1 – вакуумный кожух, 2 – азотный экран, 3 – магнитометры БЛ, 4 – БЛ коллайдера, 5 – связь разрезная (компенсатор), 6 – сигнальный разъем.
- Рис. 11.** Выполнение ХМИ структурных квадрупольных магнитов коллайдера NICA.
- Рис. 12.** Распределение относительных отклонений интегралов магнитного поля квадрупольных магнитов арок коллайдера при рабочих токах 2.3 кА (а), 6.89 кА (б) и 10.44 кА (в).
- Рис. 13.** Распределение относительных отклонений интегралов магнитного поля БЛ коллайдера при рабочих токах 2.3 кА (а), 6.89 кА (б) и 10.44 кА (в).

- Рис. 14.** Передаточные функции квадрупольных магнитов арок коллайдера для различных длин ярм: **а** – общий вид функций всех типов квадрупольных магнитов; **б, в, г** – детальное рассмотрение.
- Рис. 15.** Передаточные функции БЛ коллайдера для различных длин ярм: **а** – общий вид функций всех типов БЛ; **б, в, г** – детальное рассмотрение.
- Рис. 16.** Относительные гармоники квадрупольных магнитов арок коллайдера (**а, б, в**) и БЛ коллайдера (**г, д, е**) при рабочих токах 2.3 кА, 6.89 кА и 10.44 кА.
- Рис. 17.** Зависимость величины относительной интегральной гармоники  $b_6$  от тока для различных групп квадрупольных магнитов арок коллайдера.
- Рис. 18.** Зависимость величины относительной интегральной гармоники  $b_6$  от тока для различных групп БЛ коллайдера.

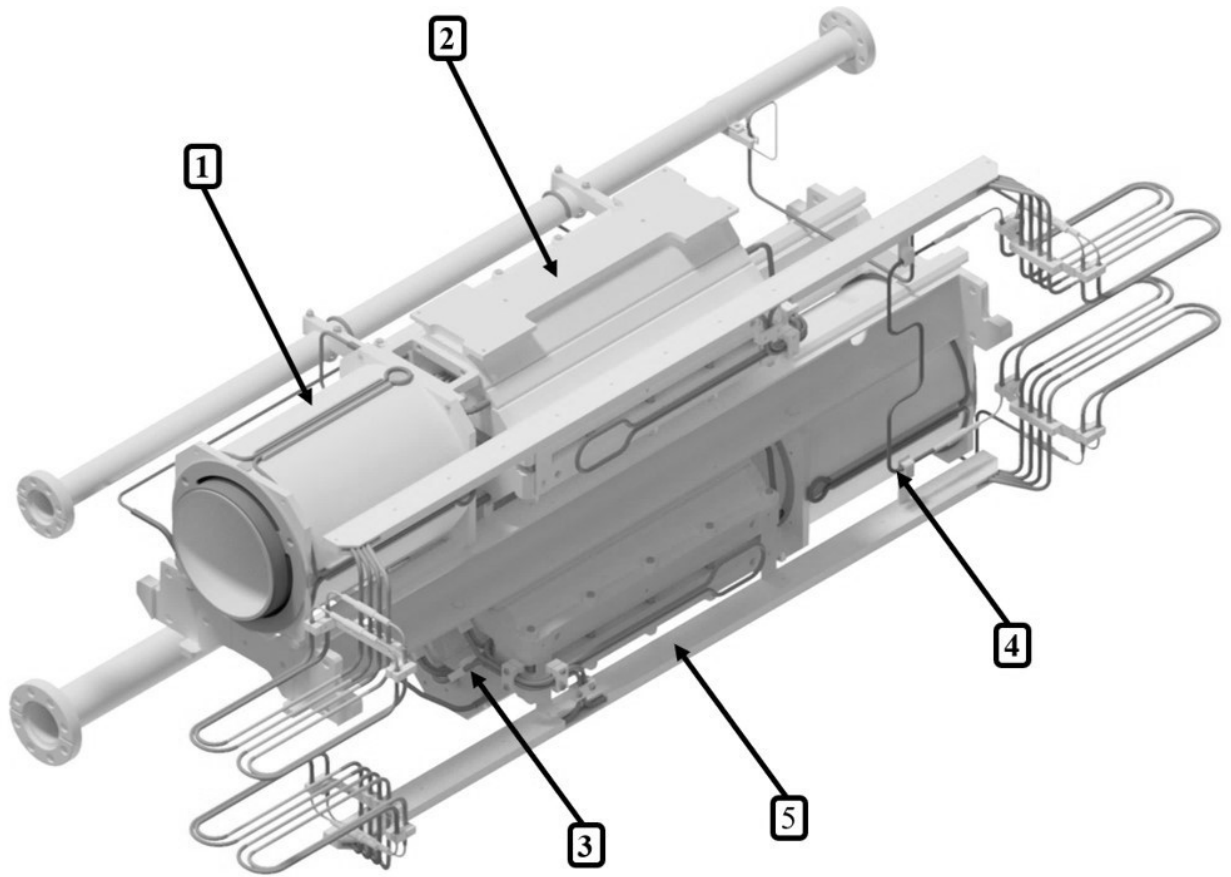


Рис.1.

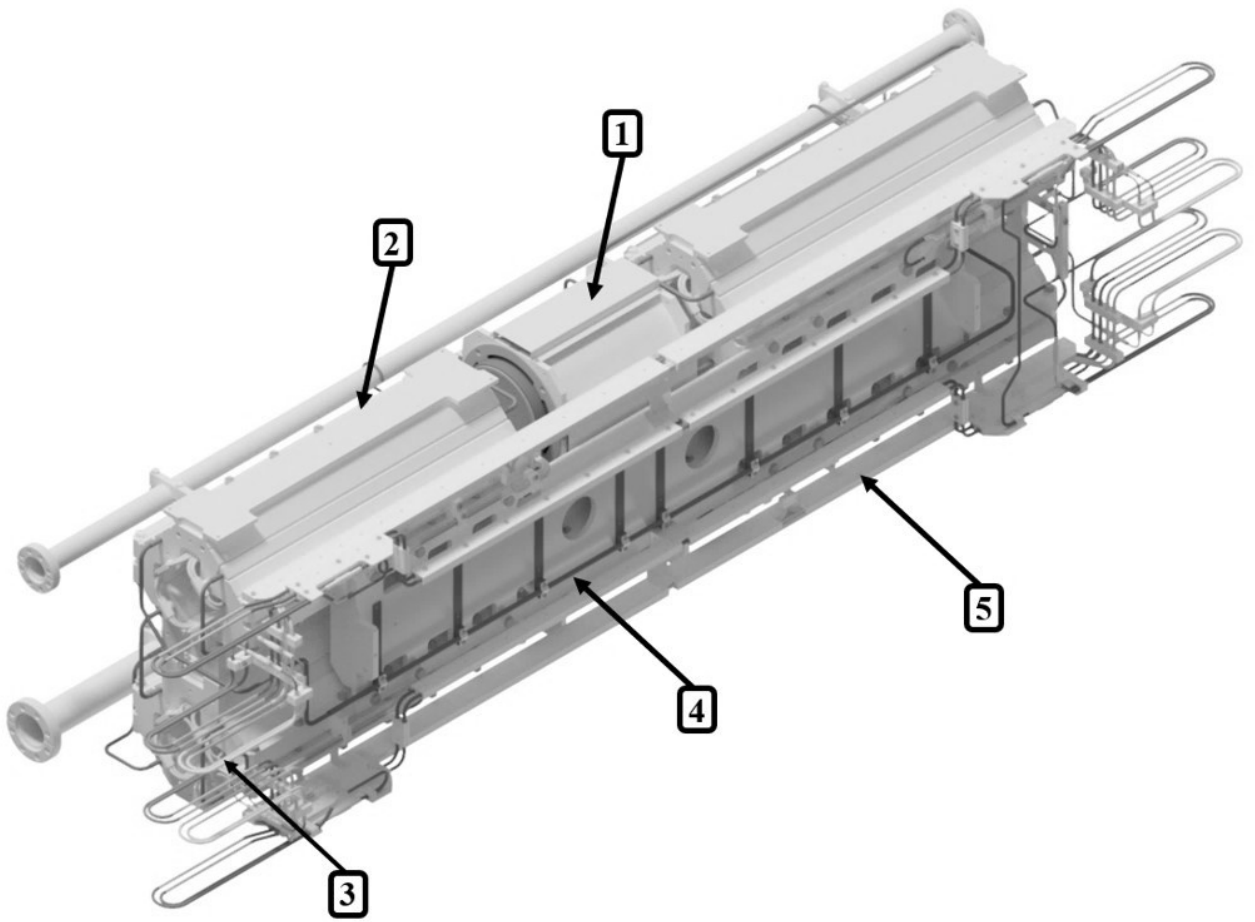
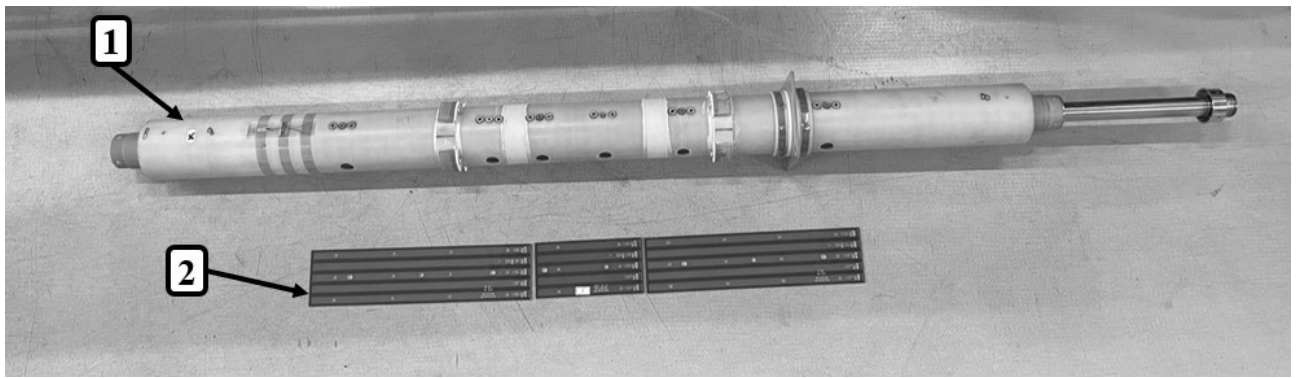
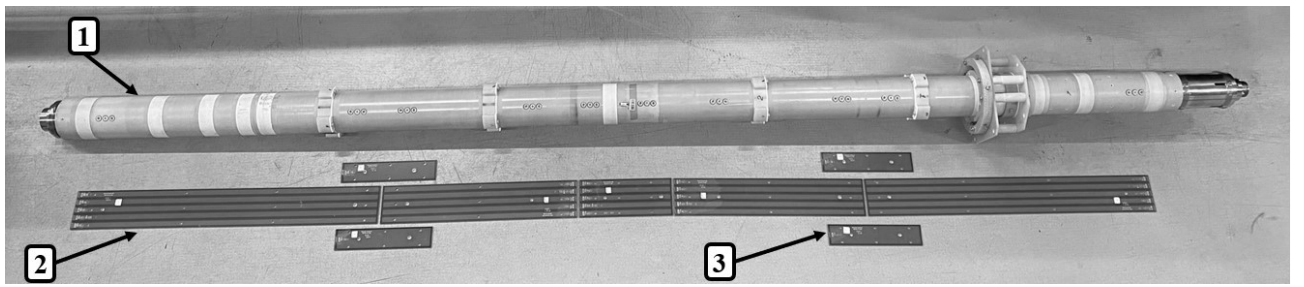


Рис. 2.



**Рис.3.**



**Рис. 4.**

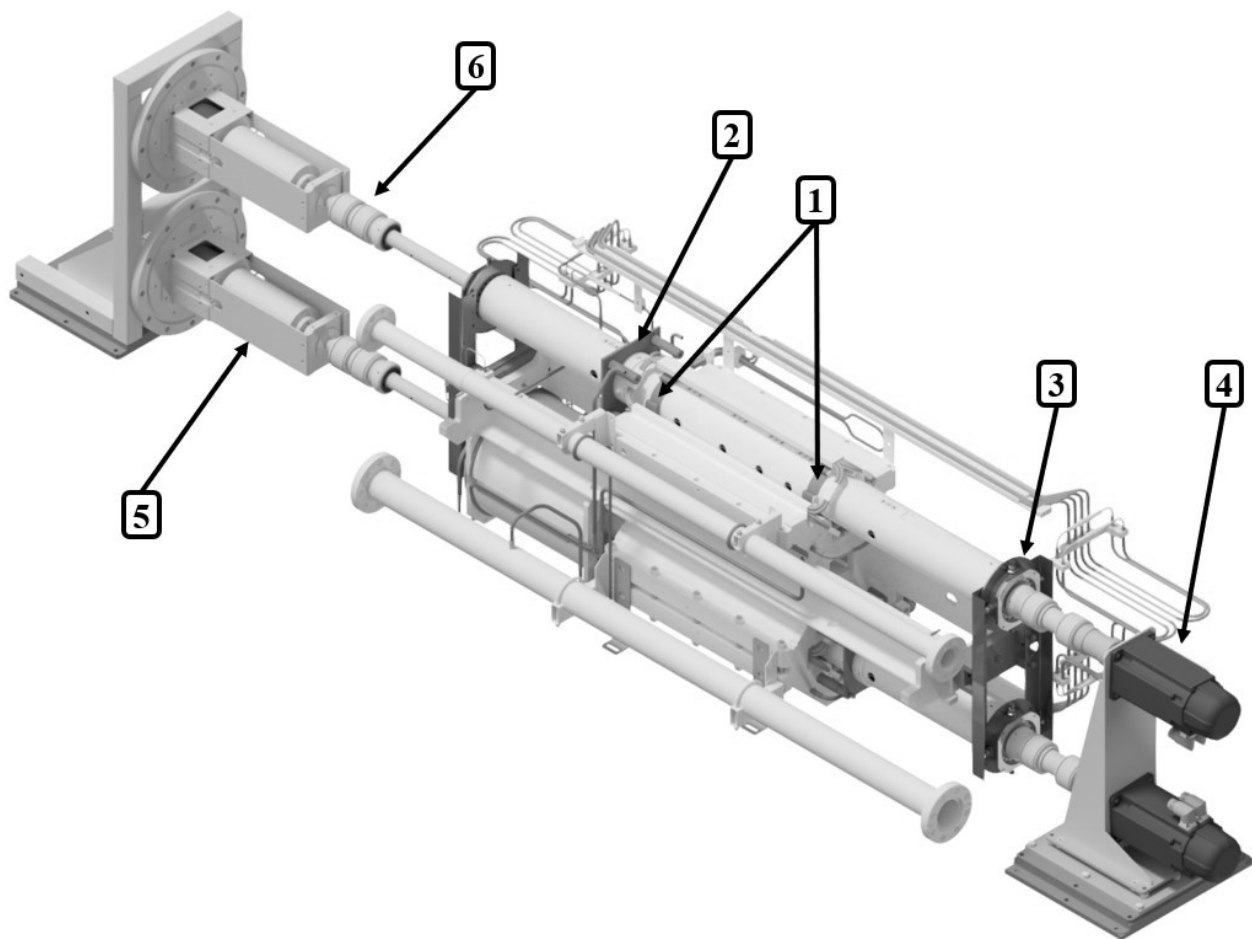
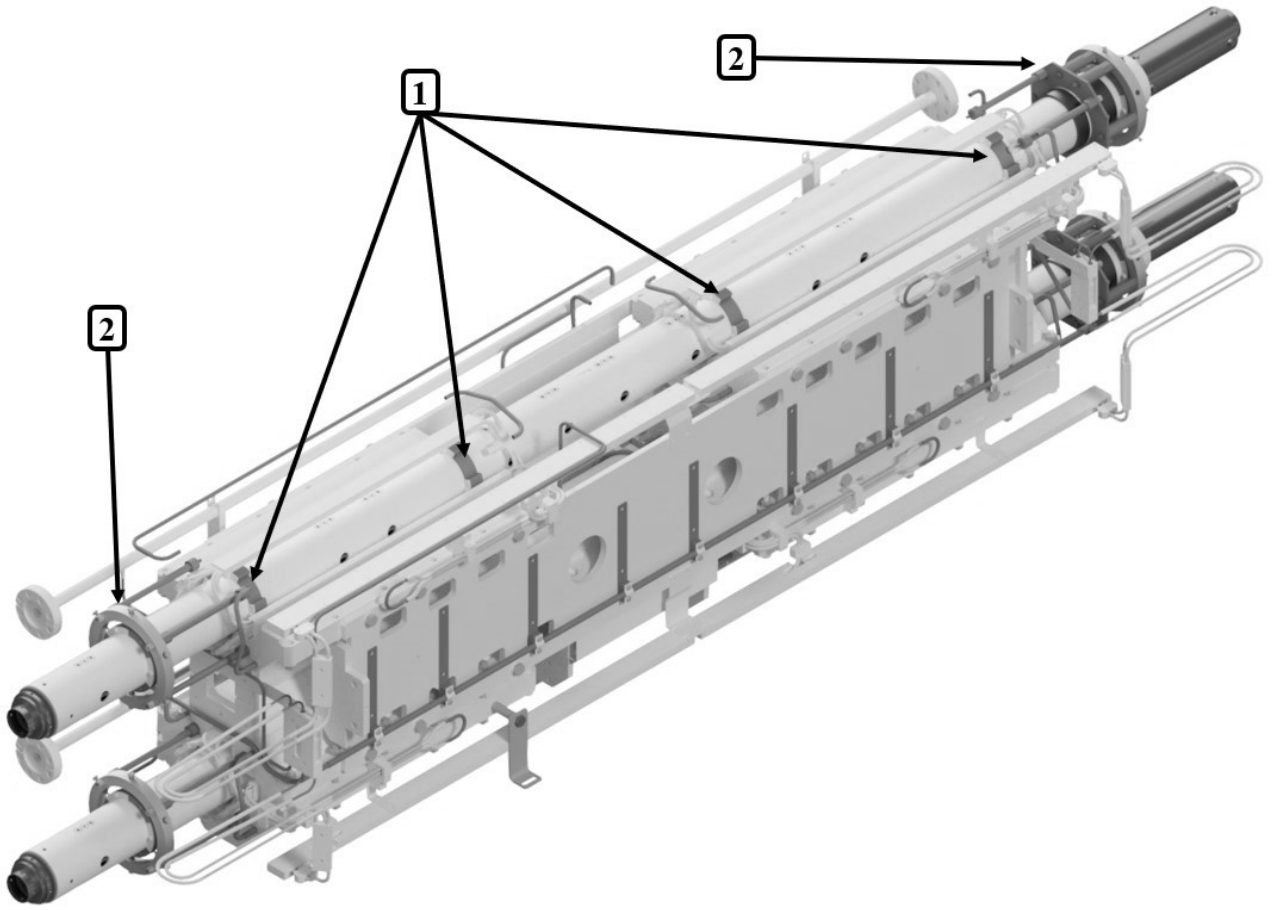


Рис.5.



**Рис.6.**

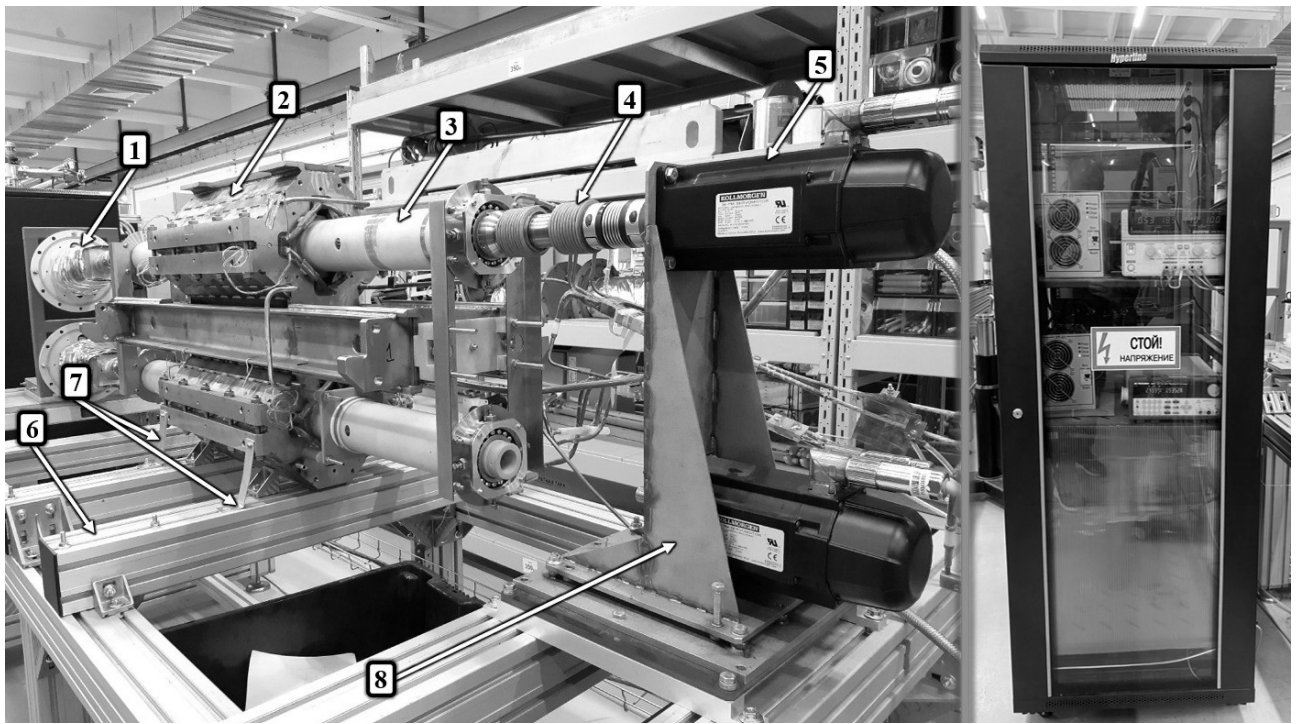
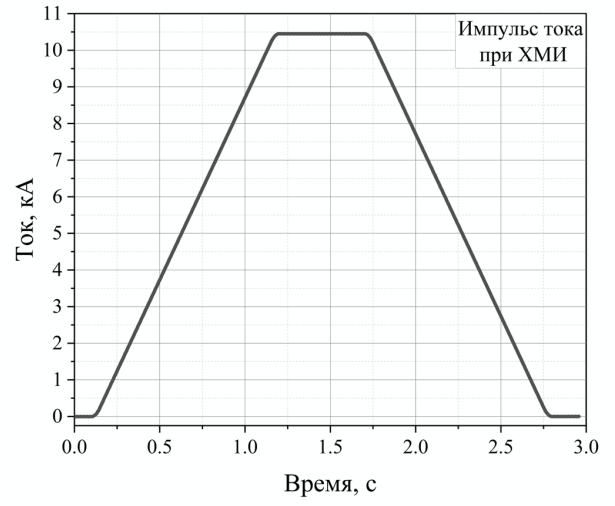
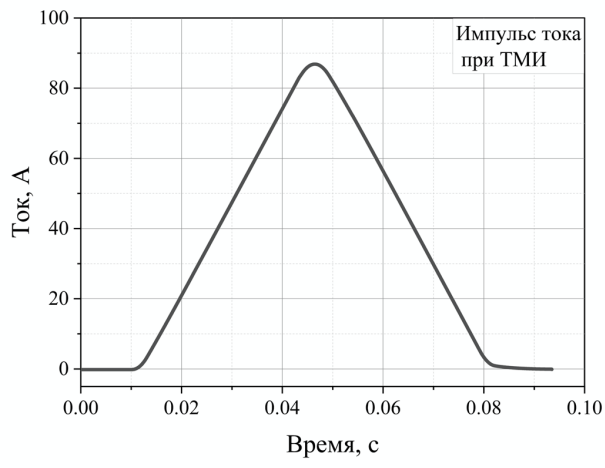


Рис.7.



**Рис.8.**

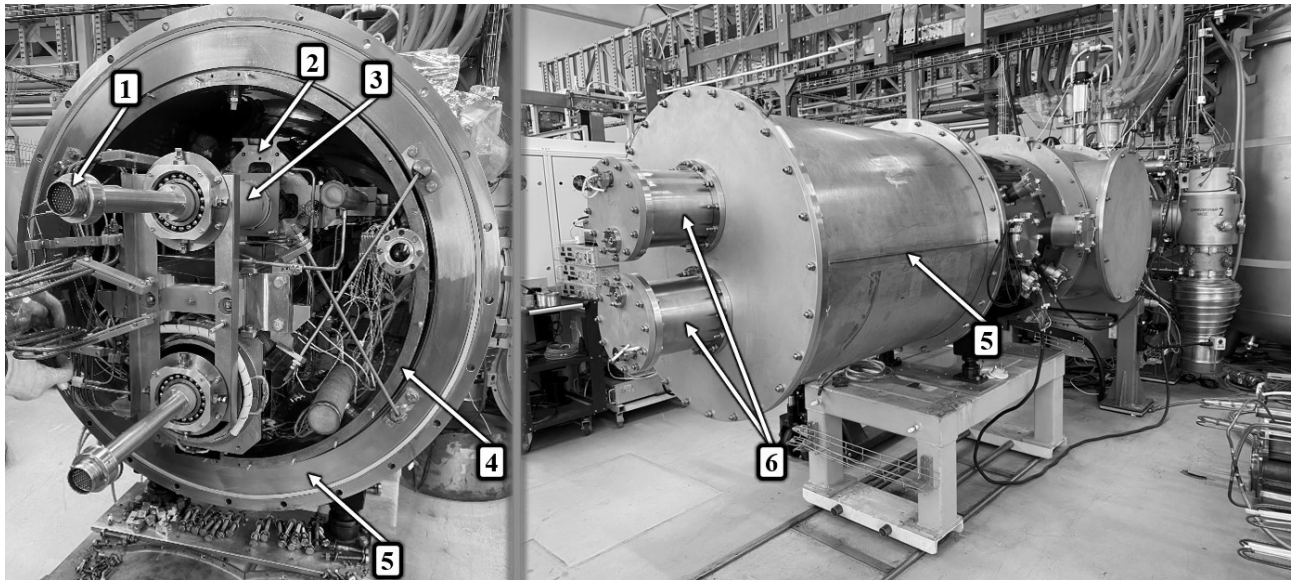


Рис.9.

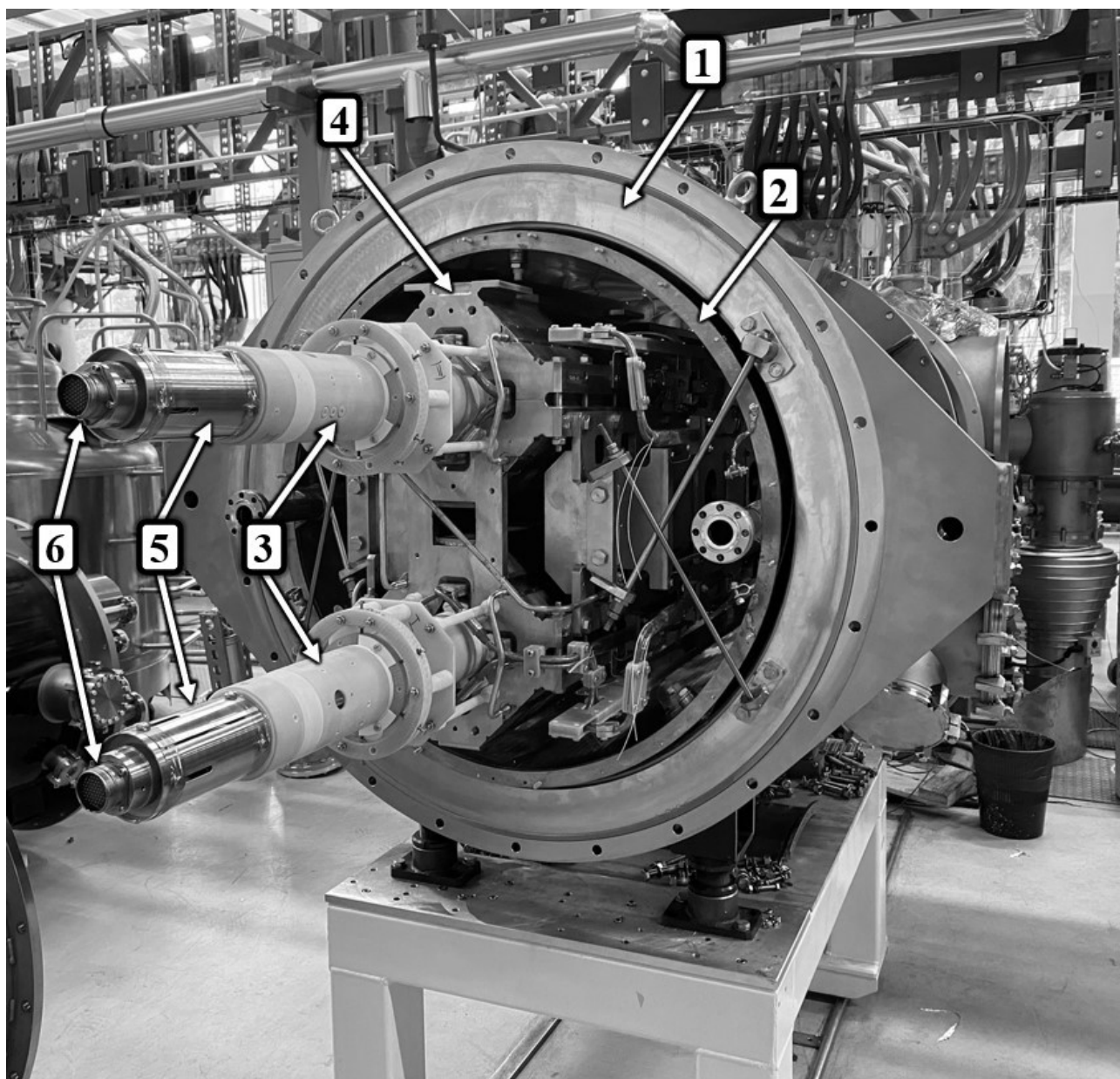


Рис.10.

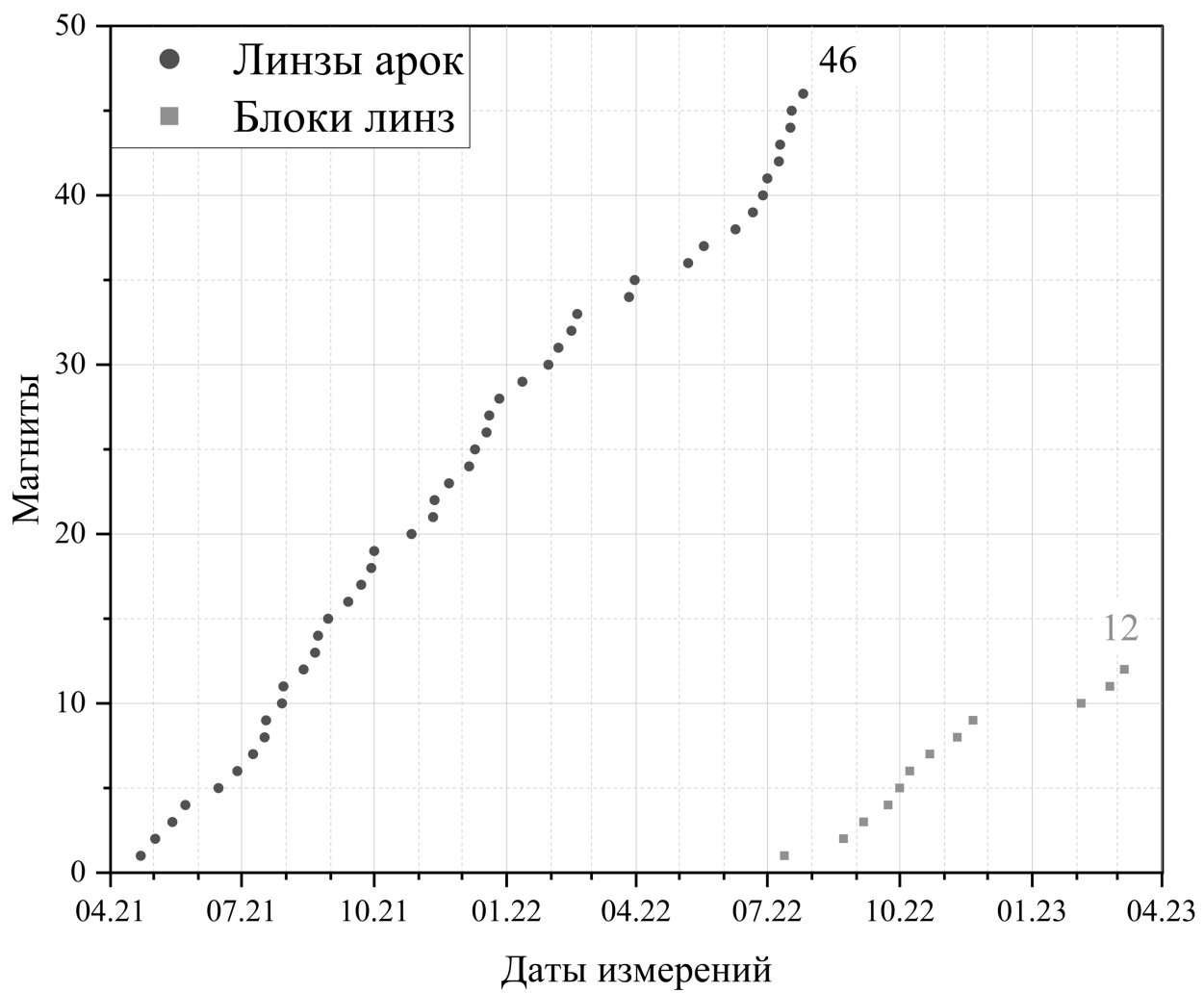


Рис.11.

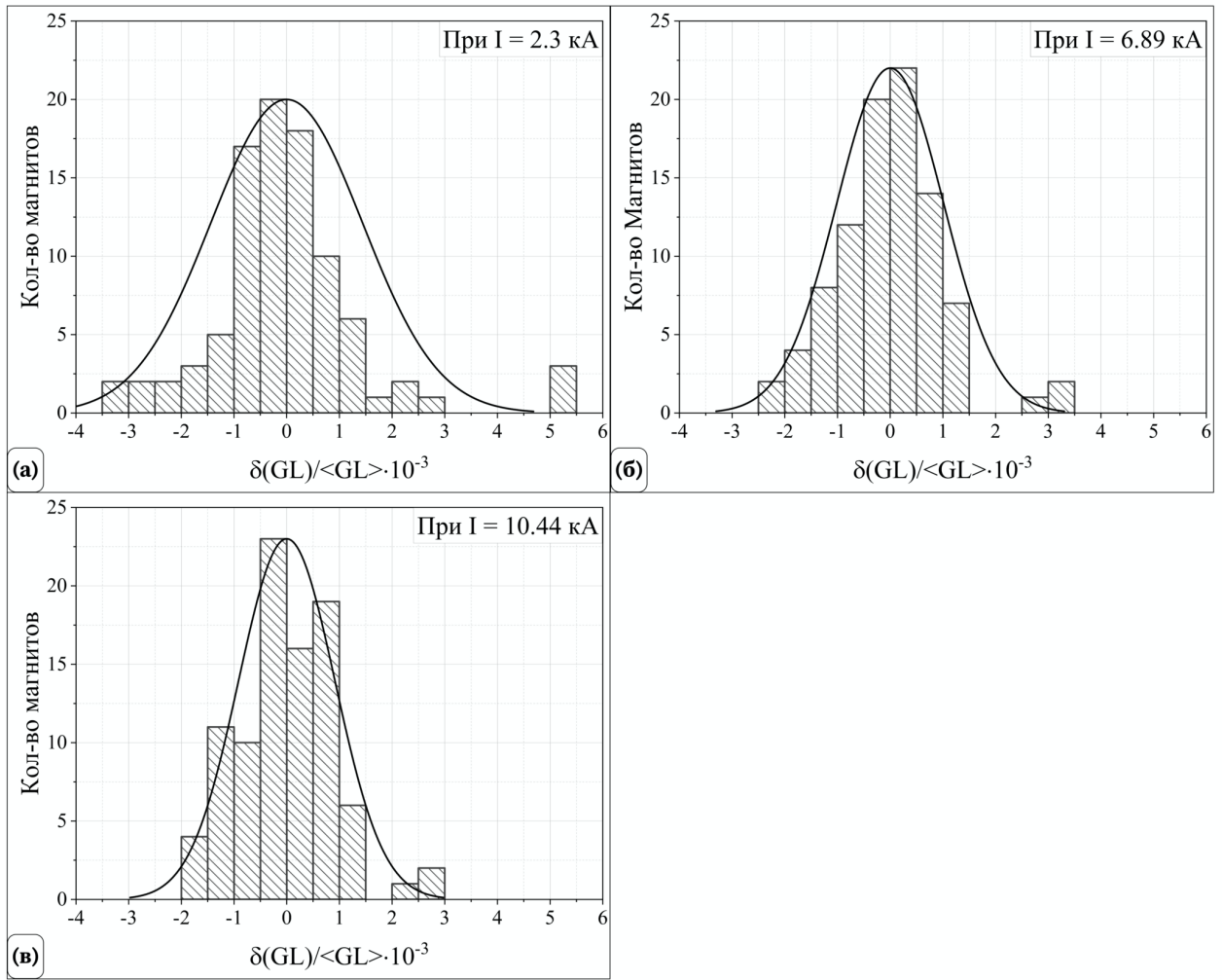
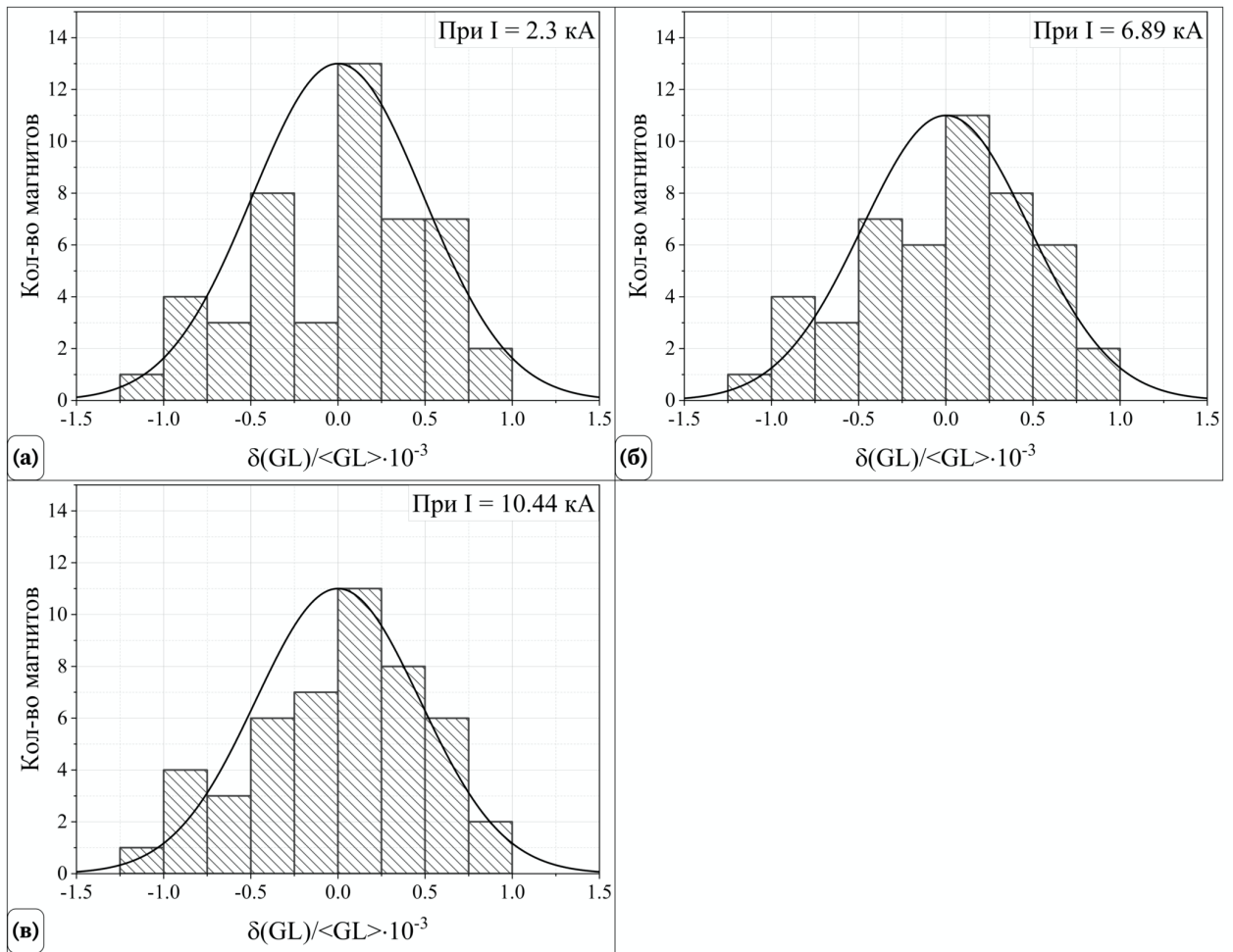
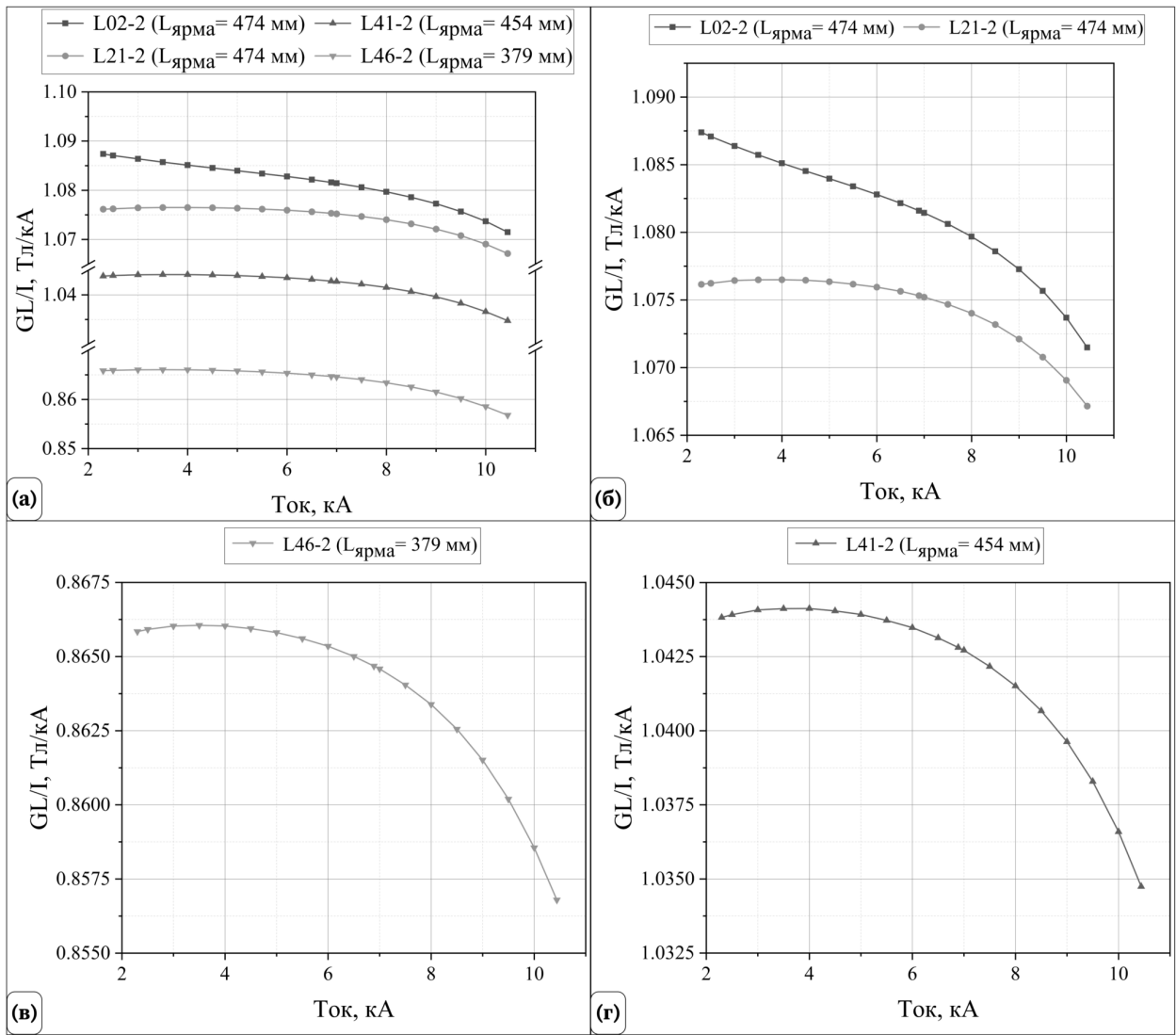


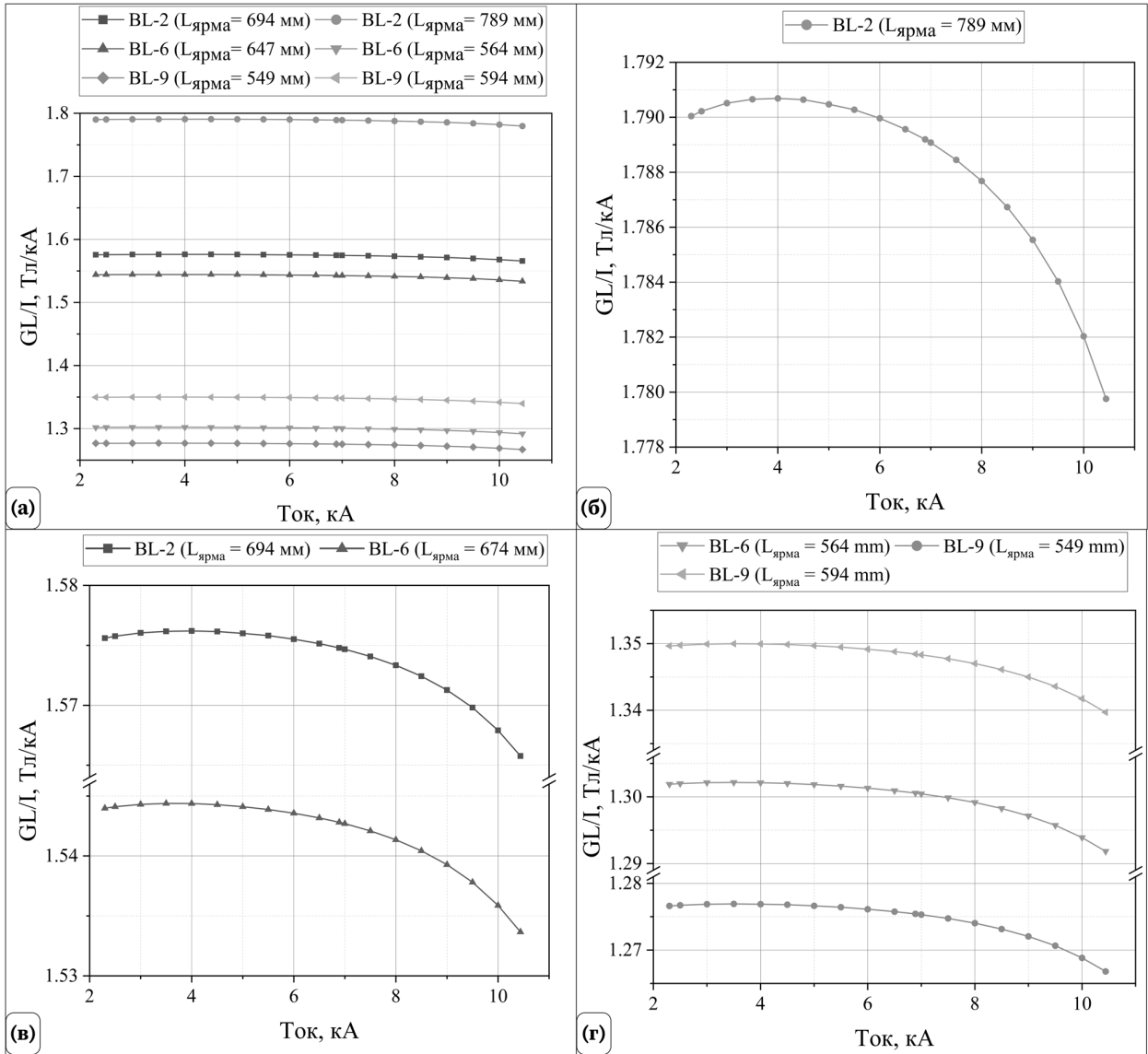
Рис.12.



**Рис.13.**



**Рис.14.**



**Рис.15.**

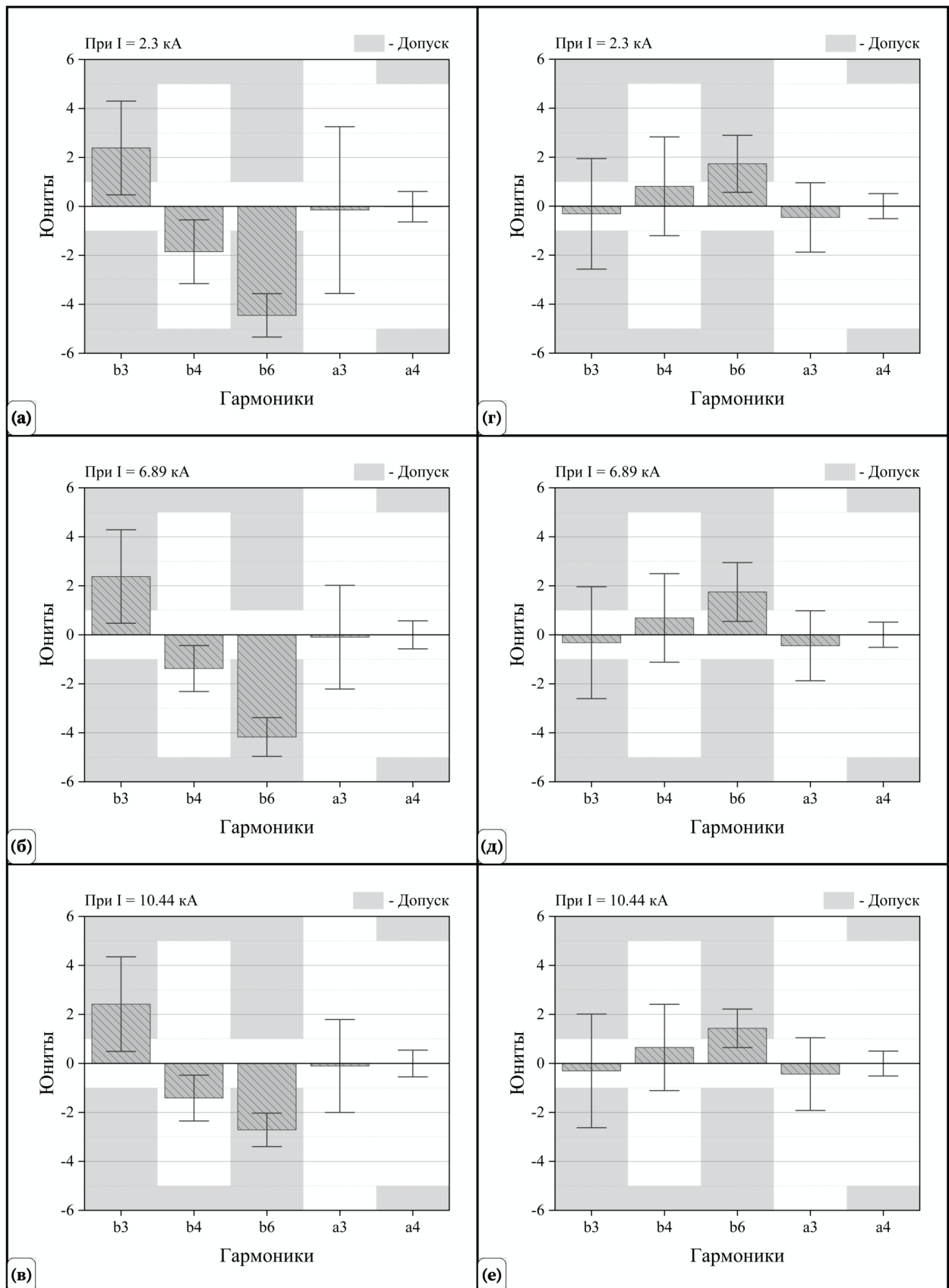


Рис.16.

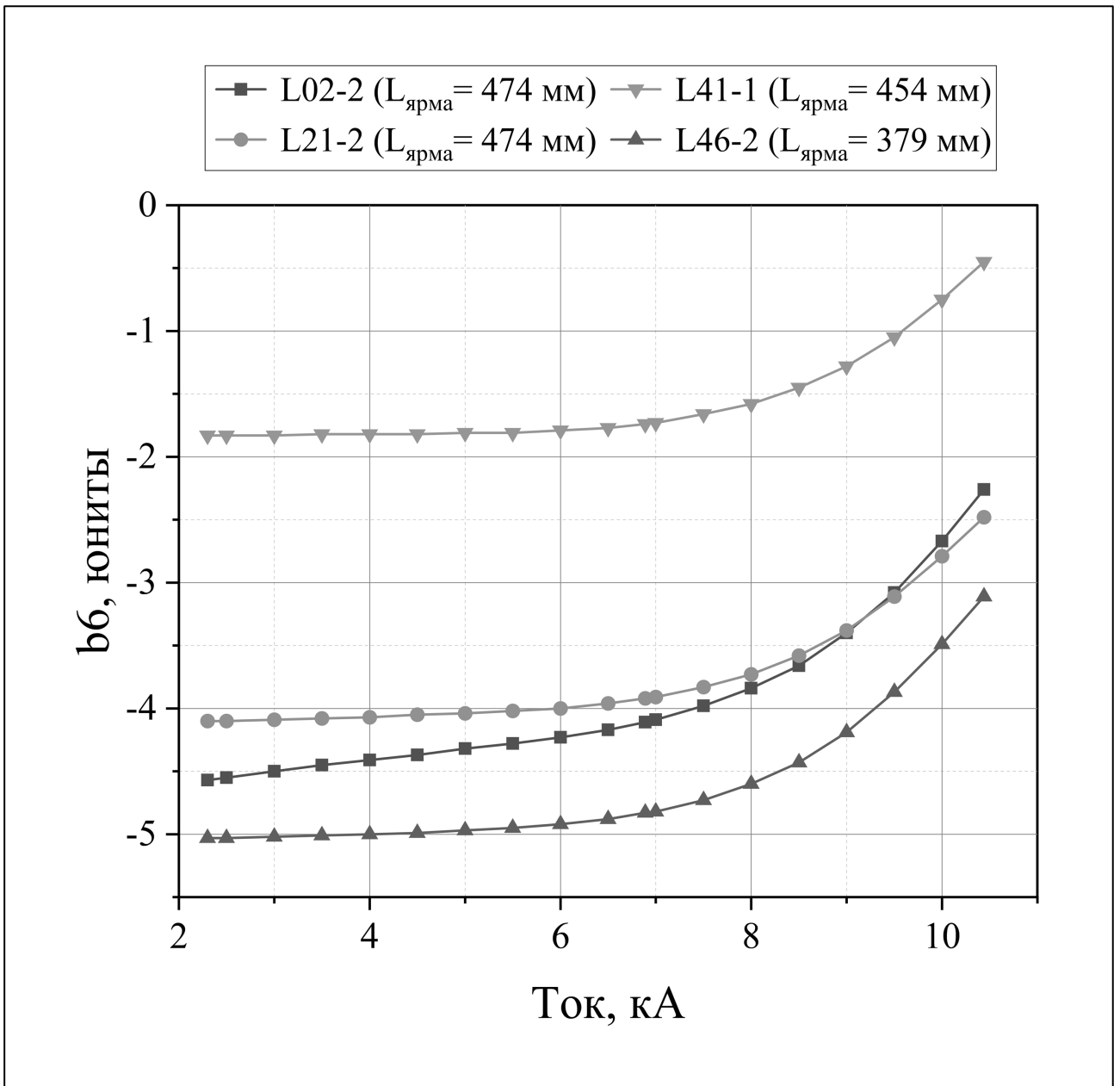


Рис.17.

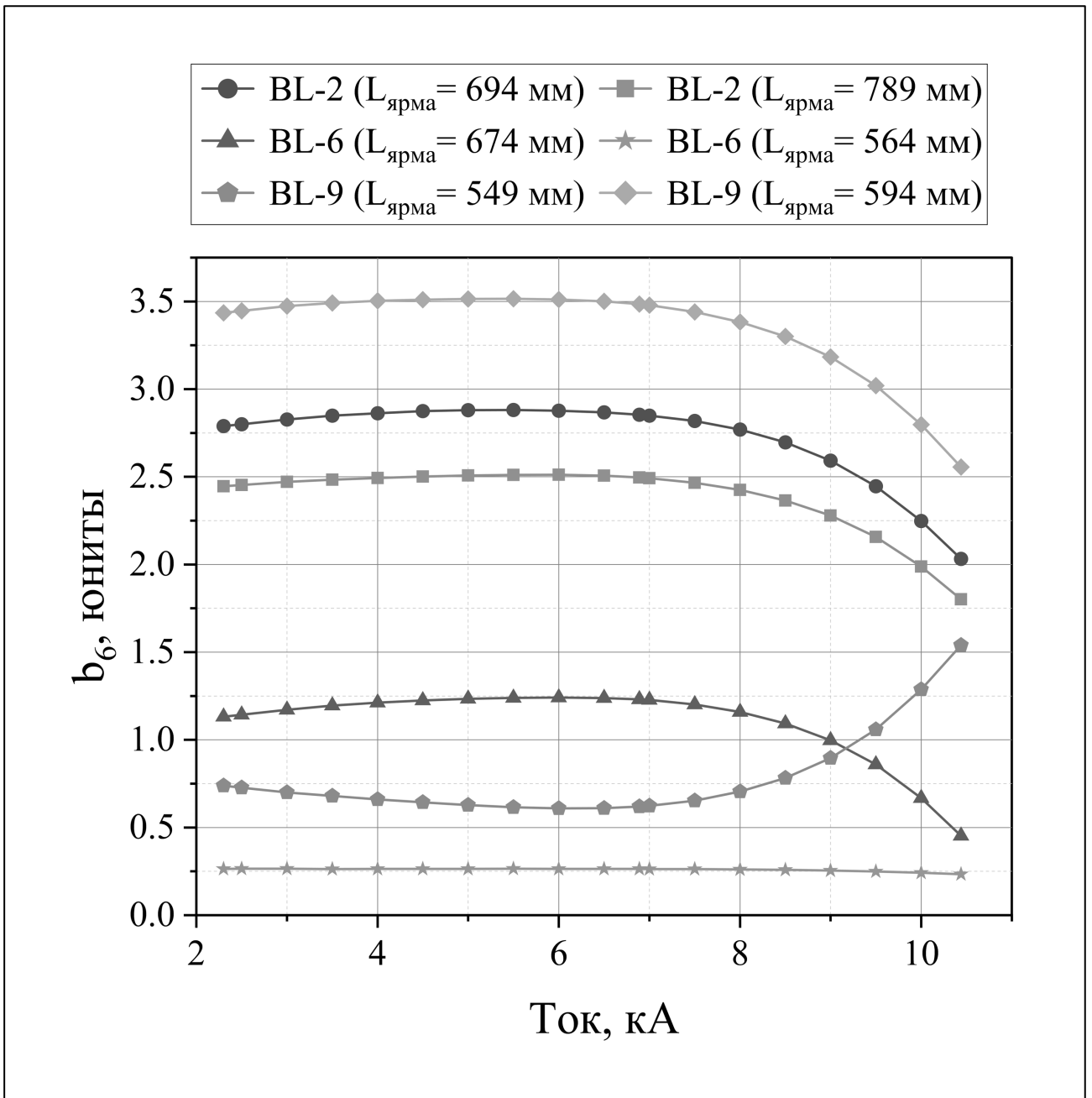


Рис.18.

**Золотых Дмитрий Александрович**

**Е-mail: [zolotykh@jinr.ru](mailto:zolotykh@jinr.ru)**

**Тел.: 8-968-560-63-07 (моб.)**

**Для авторов:**

Serial magnetic measurements of the NICA Collider lattice quadrupoles

Аннотация:

NICA Collider includes 70 twin-apertures quadrupole superconducting magnets. Assembling and testing of superconducting magnets are performed in Scientific and Experimental Department of Superconducting Magnets and Technologies (SEDSMT) in Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics (VBLHEP) Joint Institute for Nuclear Research (JINR, Dubna, Moscow region, Russian Federation). Magnetic measurements are one of the most important stages of superconducting magnets' production. It allows to control the quality of the magnet assembly and output, which are used for arrangement in the tunnel of the NICA complex. Magnets were measured by a specially designed magnetic measurement system (MMS) at the ambient and operating (4.5 K) temperatures. This paper contains specification of MMS and results of magnetic measurements of the NICA Collider structural arcs` quadrupoles and blocks of quadrupoles.