

# ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕЩЕНИЙ КВАДРУПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ КОЛЛАЙДЕРА NICA ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ДО КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР И ОТЕПЛЕНИИ

*Ю. А. Цветкова, Ю. Г. Беспалов, А. В. Бутенко, А. С. Жбанков,  
С. А. Костромин, Д. Н. Никифоров, Н. А. Филиппова*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Во время охлаждения структурных элементов — сверхпроводящих магнитов коллайдера NICA — происходят линейные деформации ярм и других элементов конструкции в пределах от 0,2 до 3,0 мм. Для формирования замкнутой орбиты вблизи идеальной ее конфигурации и обеспечения стабильной циркуляции пучка при запуске и эксплуатации установки необходимо исследовать характер смещений СП-магнитов типа «Нуклотрон» при охлаждении до рабочих температур и последующем отеплении для доказательства отсутствия систематических смещений. Обсуждается схема эксперимента и конструкция испытательного стенда для выполнения измерений смещения квадрупольного магнита коллайдера при захолаживании от 290 до 4,5 К и последующем отеплении магнитного элемента. Обсуждаются полученные результаты.

Linear deformations of the yokes and other structural elements occur in the range of 0.2–3.0 mm during cooling of the structural elements — superconducting magnets of the NICA collider. In order to form a closed orbit near its ideal configuration and ensure stable beam circulation, it is necessary to study the nature of the displacements of Nuclotron-type SC magnets during cool-down to operating temperatures and subsequent warm-up to prove the absence of the magnets' systematic displacements. The experimental layout and design of the test bench to perform measurements of the collider's quadrupole magnets' displacements during cool-down from 290 to 4.5 K and subsequent warm-up are discussed. The obtained results are presented.

PACS: 84.71.Ba; 07.55.–w; 29.20.dk

## ВВЕДЕНИЕ

В состав комплекса для экспериментов с пучками тяжелых ионов и поляризованных протонов, создаваемого в ОИЯИ, входят два кольцевых ускорителя — синхротроны бустер и нуклотрон, а также накопитель заряженных частиц коллайдер NICA [1].

Для работы кольцевого ускорителя или накопителя заряженных частиц принципиальное значение имеет положение медианных плоскостей дипольных магнитов и магнитных осей квадрупольных линз относительно положения равновесной замкнутой орбиты [2]. Поперечные смещения квадрупольных магнитов относительно «идеальной» орбиты, как правило, не должны превышать 0,1–0,2 мм [3], чтобы возмущения замкнутой орбиты не превышали 5–10 мм.

Величина итогового смещения складывается из смещения геометрической оси квадрупольного магнита относительно «идеальной» орбиты и сдвига магнитной оси относительно геометрической внутри магнита.

Правильное выставление магнитов относительно «идеальной» орбиты имеет большое значение для обеспечения устойчивой циркуляции пучка при запуске и эксплуатации установки [3–5].

Для обеспечения юстировки каждого квадрупольного магнита в кольце необходимо:

- на основании магнитных измерений определить  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  — отклонения положения магнитной оси (в центре линзы) от соответствующего положения «идеальной» орбиты для каждого из колец (верхнего и нижнего);

- определить положение реперных элементов на ярме относительно геометрической оси апертуры верхнего кольца. Реперные точки для юстировки на кольце в квадрупольной линзе располагаются на швеллере (рис. 1, точки P6–P11). Для определения координат этих точек задается система координат каждой линзы по юстировочной площадке и реперным точкам, расположенным на ней (рис. 1, точки P1–P5).

Процедура юстировки квадрупольного магнита: ярмо выставляется по высоте и в плановом положении так, чтобы одновременно выполнялось условие

$$\Delta X_1^2 + \Delta X_2^2 = \min, \quad \Delta Y_1^2 + \Delta Y_2^2 = \min,$$

где  $(\Delta X_1, \Delta Y_1)$ ,  $(\Delta X_2, \Delta Y_2)$  — отклонения положения магнитной оси (в центре линзы) от соответствующего положения идеальной орбиты нижнего и верхнего кольца соответственно (рис. 2).

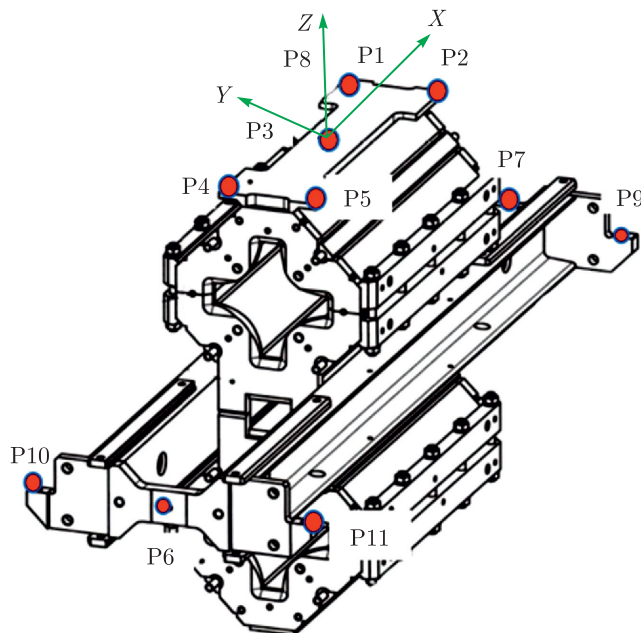


Рис. 1. Схема расположения реперных точек относительно системы координат на ярме квадрупольного магнита коллайдера (гелиевые коллекторы проходят слева)

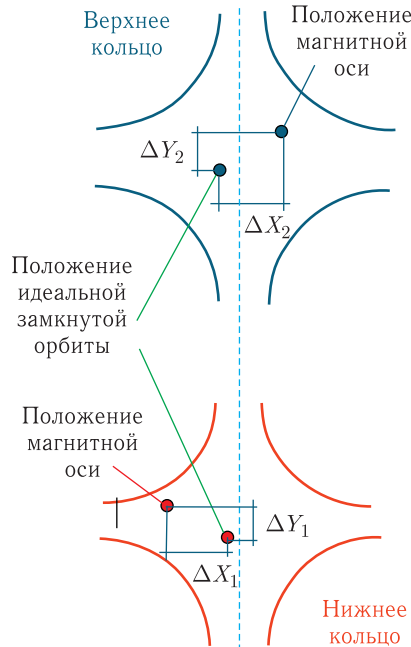


Рис. 2. Положение магнитных осей квадруполей в одном модуле относительно идеальной замкнутой орбиты при юстировке

Так как процедура юстировки проводится при температуре окружающей среды, а работа магнита в составе установки происходит при криогенных температурах, необходимо убедиться, что при охлаждении/отеплении магнита до рабочих температур осевая линия апертур для обоих колец остается в одном и том же положении при действии упругих деформаций.

### ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕЩЕНИЙ ПРИ ЗАХОЛАЖИВАНИИ/ОТЕПЛЕНИИ КВАДРУПОЛЬНОГО МАГНИТА КОЛЛАЙДЕРА

Для выполнения исследований по определению смещений характерных точек ярма во время охлаждения/отепления магнита изготовлен уникальный торцевой фланец для испытательного криостата с вырезанными отверстиями (окошками). В отверстия перед испытаниями закрепляются боросиликатные стекла, в составе которых есть оксид бора ( $B_2O_3$ ) — компонент, повышающий устойчивость стекла к низким (до  $-80^\circ C$ ) и высоким (до  $+525^\circ C$ ) температурам. Схема расположения и размер отверстий определялись по модели для обеспечения видимости реперных точек на ярме, криостате и швеллере с одной стойки измерительного прибора.

В качестве измерительного прибора на испытательном стенде использовался абсолютный трекер Leica AT401 — мобильная координатно-измерительная система. В лазерном трекере реализован полярный метод определения координат: измеряют горизонтальный и вертикальный углы и наклонное расстояние на отражатель, установленный на объекте, и из этих данных вычисляют координаты. Погрешность ( $2\sigma$ ) измерения расстояния абсолютным дальномером трекера Leica AT401 составляет 0,01 мм,

погрешность ( $1\sigma$ ) датчиков горизонтального и вертикального углов —  $0,5''$ . Погрешность ( $2\sigma$ ) встроенного электронного уровня компенсатора угла наклона оси вращения прибора —  $1''$ .

В лазерный трекер встроена специальная камера, позволяющая автоматически, за короткий промежуток времени, находить визирную цель в угле  $\pm 5^\circ$ . В качестве визирной цели для лазерных трекеров применяются отражатели CCR, TBR, BRR, RRR или RFI. Для измерений в криогенных условиях использовались ударопрочные отражатели BRR (Break Resistant Reflector). Ударопрочный отражатель BRR состоит из трех ортогональных пластин, изготовленных из полированного металла. Пластины центрированы в металлической сфере, и на их поверхности нанесено отражающее покрытие (рис. 3). Отражатели во время испытаний устанавливались на прецизионных подставках в реперные отверстия на ярме, швеллере и криостате (рис. 4).

В августе 2022 г. на участке сборки и испытаний сверхпроводящих магнитов [6, 7] были проведены испытания по определению деформаций ярма линзы коллайдера Л-28 и его смещений относительно реперных точек на криостате при захолаживании от 290 до 4,5 К и отеплении. Все измерения были выполнены с применением лазерного трекера Leica AT401.

Испытания проводились в два этапа: на первом этапе измерялись две реперные точки на реперной площадке ярма (точки P1 и P4) и две точки на швеллере (точки P9 и P11) (рис. 5, 6).



Рис. 3. Ударопрочный отражатель BRR (Break Resistant Reflector) для лазерного трекера AT401 (радиус  $(19,05 \pm 0,0025)$  мм, отклонение от сферы менее  $0,0015$  мм)

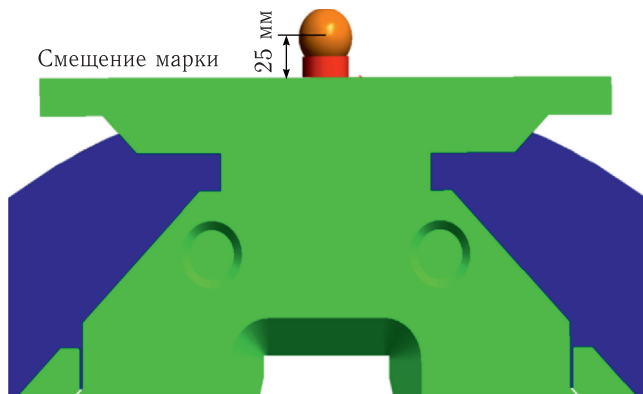


Рис. 4. Смещение центра реперной точки относительно базовой поверхности ярма линзы



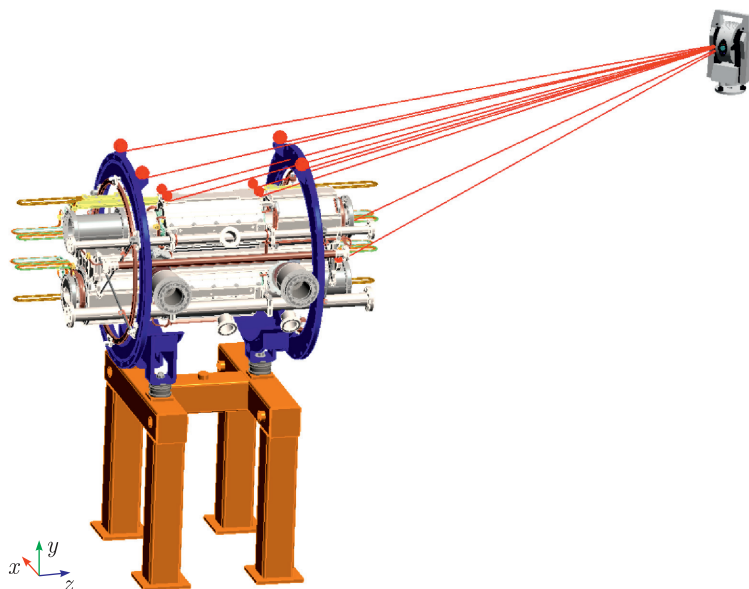


Рис. 5. Положение реперных точек на криостате, швеллере и ярме квадрупольного магнита во время испытаний с применением лазерного трекера

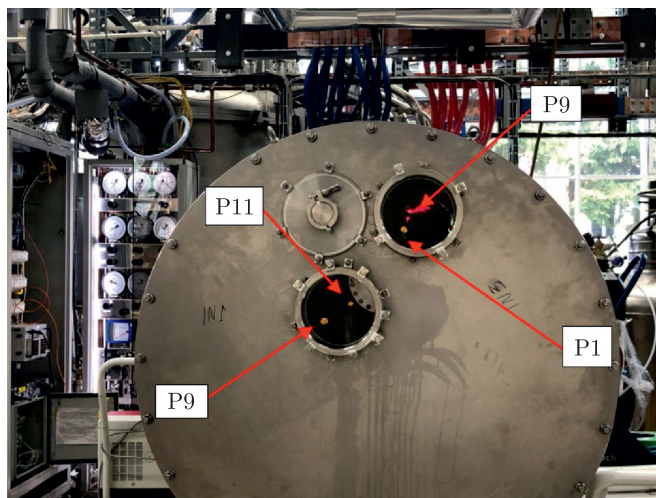


Рис. 6. Вид на отражатели на ярме и швеллере через окна в крышке криостата

## ПЕРВЫЙ ЭТАП ИСПЫТАНИЙ

На начальном этапе испытаний ярмо вывешивалось в горизонтальном положении с помощью системы подвеса внутри криостата. В четырех реперных отверстиях на швеллере устанавливались прецизионные подставки с хвостовиком диаметром 6 мм

и смещением 25 мм, на которых располагались отражатели для трекера. Так как на все точки на швеллере нет видимости с одного прибора, замеры проводились двумя приборами одновременно с двух противоположных сторон для выставления яра в горизонтальном положении. Протокол положения яра внутри криостата приведен на рис. 7.

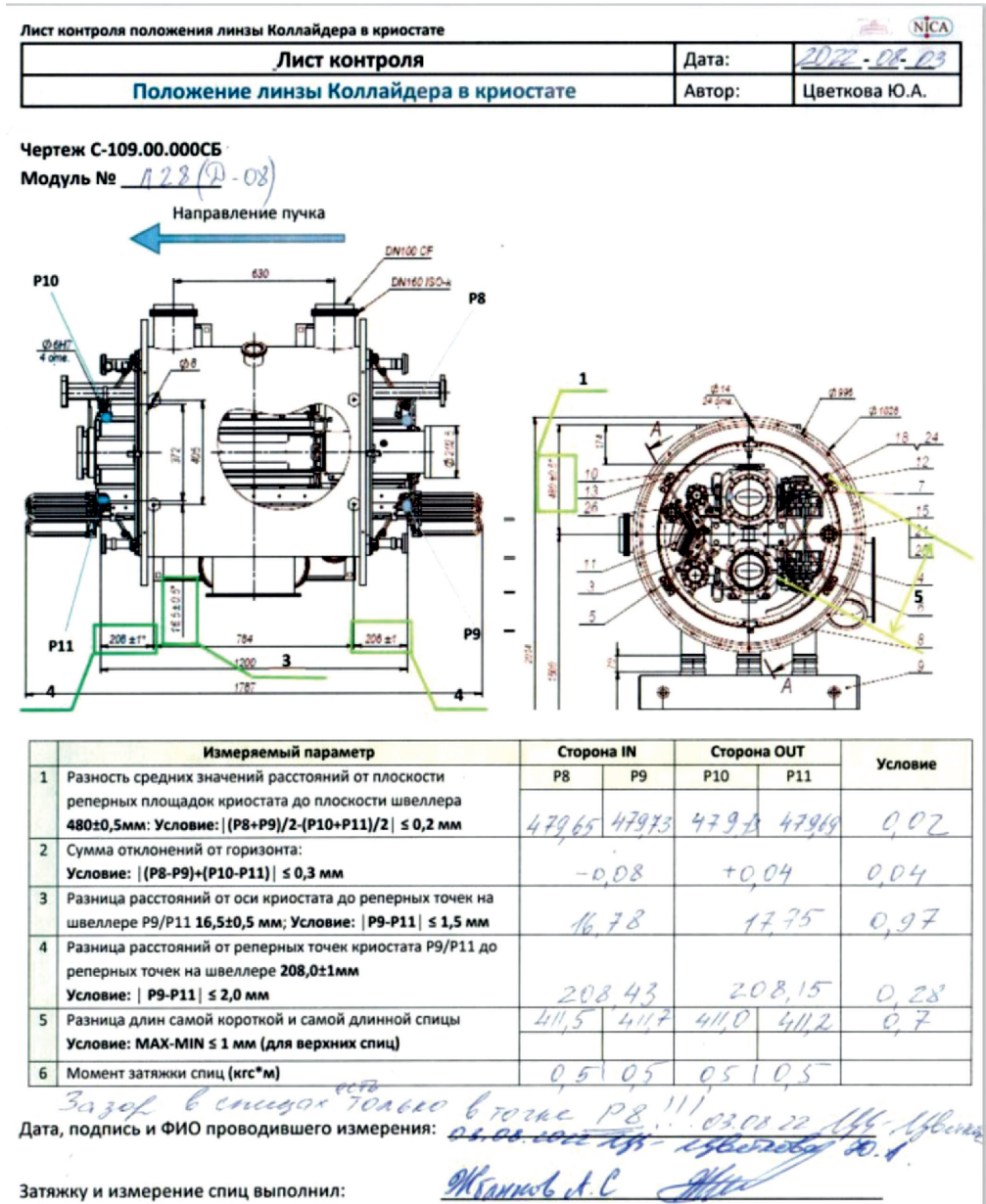


Рис. 7. Копия протокола измерения положения линзы коллайдера в криостате. Этап 1

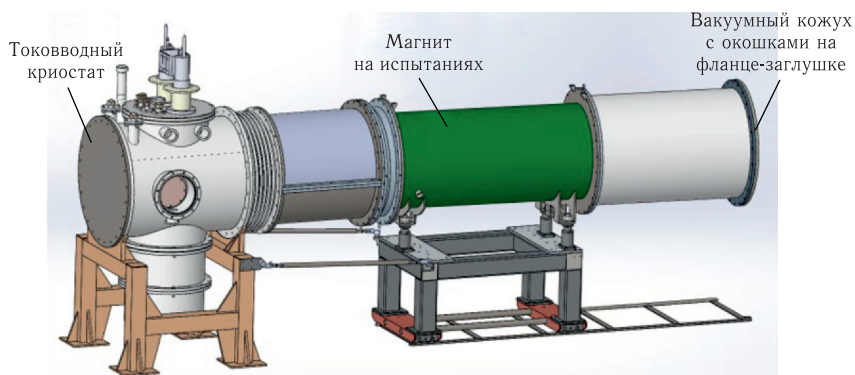


Рис. 8. Модель испытательного стенда



Рис. 9. Испытательный стенд

На следующем этапе была проведена сборка испытательного стенда, установлен вакуумный кожух с окошками на фланце-заглушке, выполнена обтяжка всех фланцевых соединений (рис. 8).

Трекер АТ401 был установлен на расстоянии 4 м от испытательного стенда (рис. 9).

В ходе испытаний через каждое изменение температуры на 10 К определялось положение реперных точек на ярме (P1, P4, см. рис. 5) и швеллере (P9, P11, см. рис. 5) относительно реперных точек, закрепленных сверху на фланцах криостата (K1–K4, рис. 10).

Для анализа результатов измерений была принята следующая система координат (см. рис. 8):

- начало системы координат расположено в реперной точке K1 на фланце криостата;
- ось  $+Z$  направлена вверх, перпендикулярно плоскости четырех бобышек на фланцах криостата;

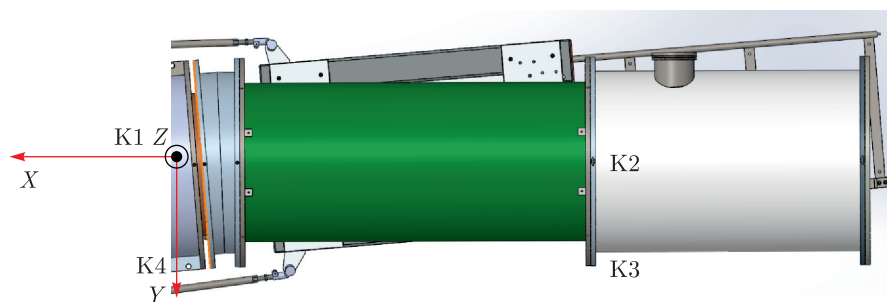


Рис. 10. Система координат испытательного стенда

- ось  $-X$  направлена в реперную точку K2 на фланце криостата;
- ось  $+Y$  добавляет систему координат до правосторонней системы координат.

Первое измерение было выполнено после окончательной сборки и обтяжки испытательного стенда до откачки воздуха. Второе измерение проведено после откачки воздуха. Температура внутри криостата во время двух измерений равнялась 290 К. По результатам измерений видно, что после откачки воздуха произошли заметные деформации корпуса криостата. Для анализа деформаций и смещения яра при снижении температуры от 290 до 4,5 К за базовые реперные точки принимаем результаты измерений, полученные после откачки воздуха. При совмещении всех последующих замеров с замером после откачки воздуха при охлаждении и отеплении среднеквадратическое отклонение не превышало 0,05 мм.

При охлаждении были выполнены измерения при каждом изменении температуры на 10 К. Каждое измерение было совмещено по реперным пунктам на криостате K1–K4 с измерением, сделанным после откачки воздуха. При этом перемещались измеренные реперные точки на яре и швеллере на величину смещения криостата. Разница между первым положением яра (базовые точки после откачки) и последующими измерениями по трем координатам представлена на графиках (рис. 11–13).

После того, как температура яра достигла 4,5 К, начался его нагрев. Измерения при нагреве выполнялись также через 10-К изменения температуры. Все замеры при нагреве совмещались с замером после откачки воздуха.

На рис. 11 приведены смещения точек P1, P4, P9 и P11 в принятой системе координат (СК) по оси  $X$  (вдоль пучка). Точки P1 и P9 смещаются по направлению оси  $+X$ , поэтому смещение с положительным значением. Точки P4 и P11 смещаются в противоположную сторону по отношению оси  $+X$ , поэтому смещение с отрицательным значением. Разность между этими точками характеризует величину сближения реперных точек на яре и швеллере при охлаждении.

На рис. 12 приведены смещения точек P1, P4, P9 и P11 в принятой СК по оси  $Y$  (влево от пучка). Точки на яре P1 и P4 расположены с одной стороны по оси  $Y$  и должны располагаться рядом. Аналогичное расположение точек на швеллере P9 и P11. На графике видно, что между точками на яре P1 и P4 есть расхождение на 0,2 мм после начала охлаждения азотного экрана. Это означает, что яро относительно криостата повернулось. Кроме того, после отепления реперные точки на яре не вернулись в исходное положение по боковому смещению на 0,1 мм.

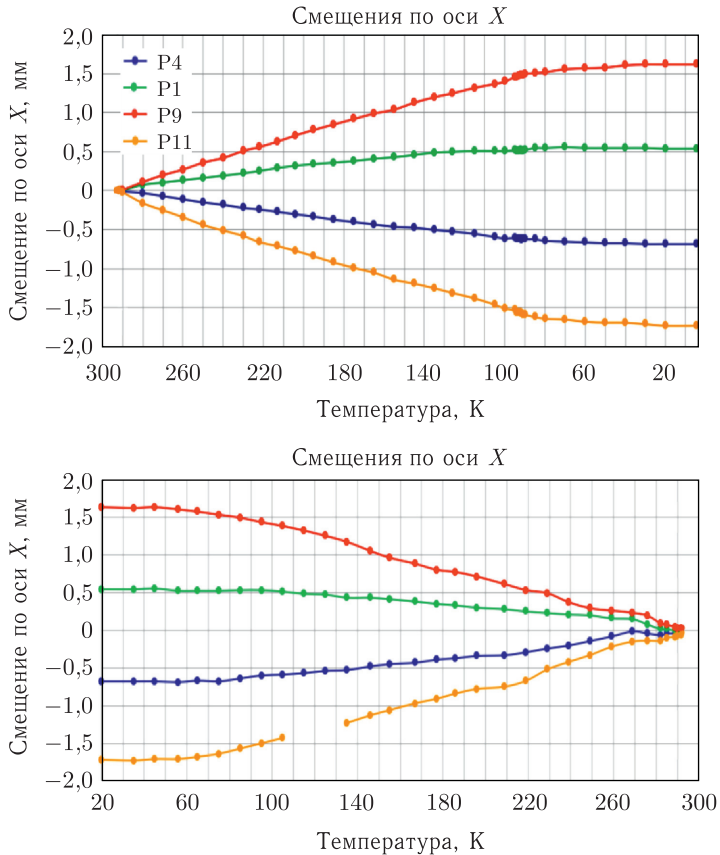


Рис. 11. Смещения реперных точек на ярме квадрупольного магнита по оси  $X$  при захлаждении до рабочих температур и отеплении

На рис. 13 приведены смещения точек P1, P4, P9 и P11 в принятой СК по оси  $Z$  (вверх от пучка). Из графика видно, что точки, расположенные на швеллере (в центре ярма) в результате охлаждения, остались на месте, а после начала охлаждения азотных экранов поднялись на 0,1 мм. Точки на ярме опускались до начала охлаждения азотных экранов одинаково, а после начала охлаждения азотного экрана от 90 К одна точка на ярме (P4) поднялась на 0,3 мм. Точки P4 и P1 сблизилась только после отепления ярма до 55 К. После отепления точки на ярме не вернулись в первоначальное положение  $-0,1$  мм.

Для выяснения причины смещения точки P4 по осям  $Y$  и  $Z$  было принято решение о проведении повторных испытаний. Момент затяжки спиц перед испытаниями составлял 5 Н·м на каждой спице. После отепления и открытия заглушки со стороны тоководного криостата [8] спица со стороны реперной точки на швеллере P11 полностью ослабла, а со стороны точки P4 момент затяжки стал в 2 раза меньше. После отстыковки задней крышки с окнами от криостата магнита спицы на магните вновь приобрели момент затяжки. Из этого следует вывод: вес задней крышки действует на систему подвеса ярма магнита в криостате, таким образом, во время первого



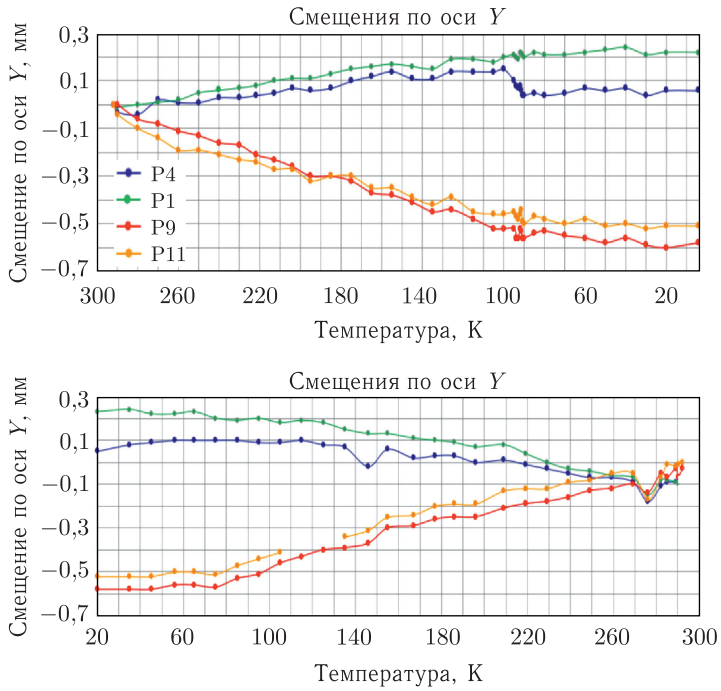


Рис. 12. Смещения реперных точек на ярме квадрупольного магнита по оси Y при захлаждении до рабочих температур и отпелении

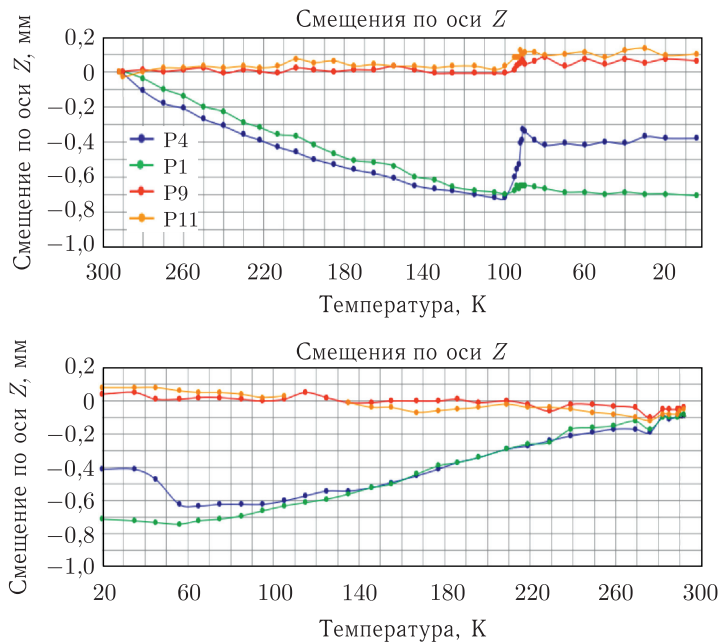


Рис. 13. Смещения реперных точек на ярме квадрупольного магнита по оси Z при захлаждении до рабочих температур и отпелении

этапа испытания спицы подвеса ярма со стороны токовводного криостата находились с нулевым моментом затяжки.

## ВТОРОЙ ЭТАП ИСПЫТАНИЙ

Так как реперные точки на швеллере по графикам ведут себя стабильно, было принято решение для следующего этапа взять четыре точки на реперной площадке ярма. Для исключения перевеса задней крышки под нее установлена поддерживающая подставка.

Наблюдения за точками на реперной площадке ярма велись через одно окно (рис. 14), так как располагающиеся друг за другом точки в два окна не давали видимости. Это сильно сузило угол зрения за отражателями, и одну точку на криостате пришлось перенести на торцевую плоскость, так как не хватало высоты прибора до видимости на все реперные точки криостата. Ярмо в криостате вне плеча повторно перевешивалось.

Протокол положения ярма внутри криостата переведен на рис. 15.

На рис. 16 приведены смещения точек P1, P2, P4 и P5 в принятой СК по оси X (вдоль пучка). Точки P1 и P2 смещаются по направлению оси +X, поэтому смещение с положительным значением. Точки P4 и P5 смещаются в противоположную сторону по отношению оси +X, поэтому смещение с отрицательным значением. Разность между этими точками характеризует величину сближения реперных точек на ярме при охлаждении.

На рис. 17 приведены смещения точек P1, P2, P4 и P5 в принятой СК по оси Y (влево от пучка). Точки на ярме P1 и P4 расположены с одной стороны по оси Y и должны располагаться рядом. Аналогичное расположение точек P2 и P5. На графике видно, что все точки в момент отепления изменили свое положение на +0,4 мм. В этот момент был отключен насос, отвечающий за вакуум в камере. После возвращения

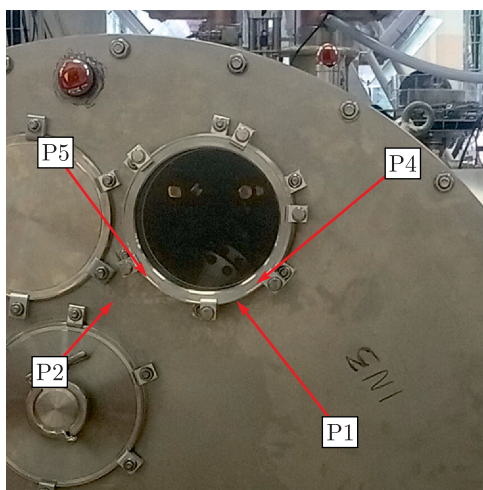


Рис. 14. Вид на отражатели BRR через окна в крышке криостата

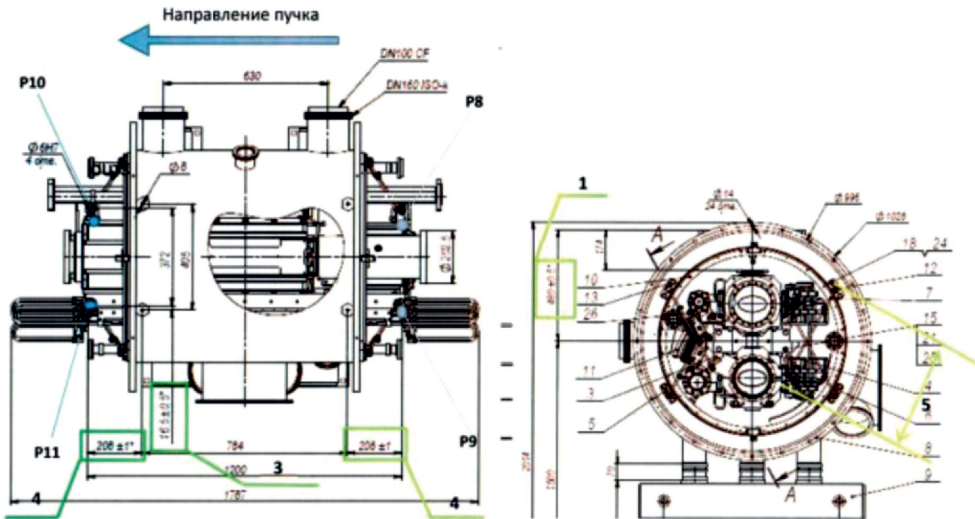
Лист контроля положения линзы Коллайдера в криостате



<b>Лист контроля</b>	Дата:	2022-08-23
<b>Положение линзы Коллайдера в криостате</b>	Автор:	Цветкова Ю.А.

Чертеж С-109.00.000СБ

Модуль № 1-28(2-08)



Измеряемый параметр	Сторона IN		Сторона OUT		Условие
	P8	P9	P10	P11	
1 Разность средних значений расстояний от плоскости реперных площадок криостата до плоскости швеллера 480±0,5мм: Условие:  (P8+P9)/2-(P10+P11)/2  ≤ 0,2 мм	480,11	479,9	479,83	479,88	0,2
2 Сумма отклонений от горизонта: Условие:  (P8-P9)+(P10-P11)  ≤ 0,3 мм	0,21		0,05		0,26
3 Разница расстояний от оси криостата до реперных точек на швеллере P9/P11 16,5±0,5 мм; Условие:  P9-P11  ≤ 1,5 мм	16,63		15,63		1,00
4 Разница расстояний от реперных точек криостата P9/P11 до реперных точек на швеллере 208,0±1мм Условие:  P9-P11  ≤ 2,0 мм	208,48		207,93		0,85
5 Разница длин самой короткой и самой длинной спицы Условие: MAX-MIN ≤ 1 мм (для верхних спиц)	411,8	411,4	411,7	411,8	0,2
6 Момент затяжки спиц (кгс*м)	0,5	0,5	0,5	0,5	

Зазор между спицами есть только между с репером P8  
Дата, подпись и ФИО проводившего измерения: 23.08.2022 Ю.А. Цветкова

Затяжку и измерение спиц выполнил:

*Жуков А.С.*

Юстировка выполнена с точностью 1мм:

Оборудование: Лазерный трекер Leica AT40X. Погрешность измерения ±0,015 мм,  
Штангенциркуль 700 мм. Погрешность измерения ±0,1 мм (№ В10003)

Рис. 15. Копия протокола измерения положения линзы коллайдера в криостате. Этап 2 насоса в рабочее состояние точки на ярме вернулись. После отопления все реперные точки вернулись в первоначальное положение.



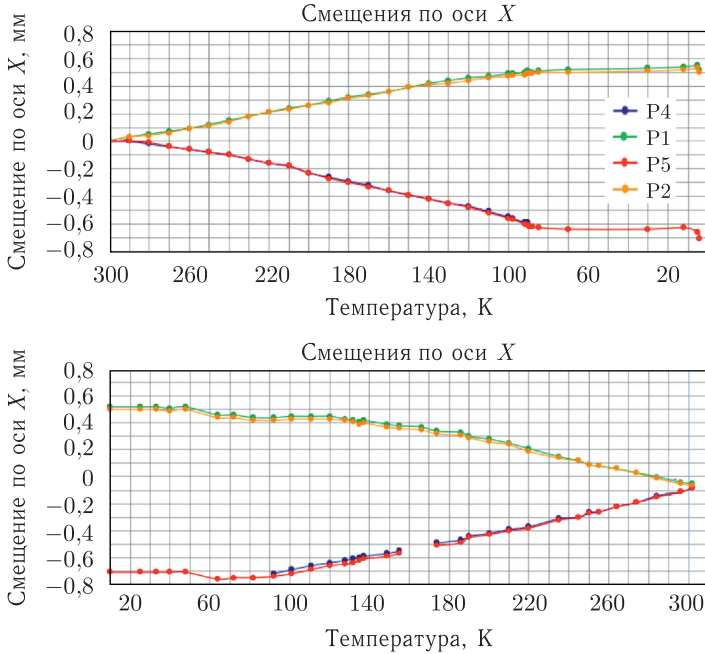


Рис. 16. Смещения реперных точек на ярме квадрупольного магнита по оси X при захлаждении до рабочих температур и отеплении

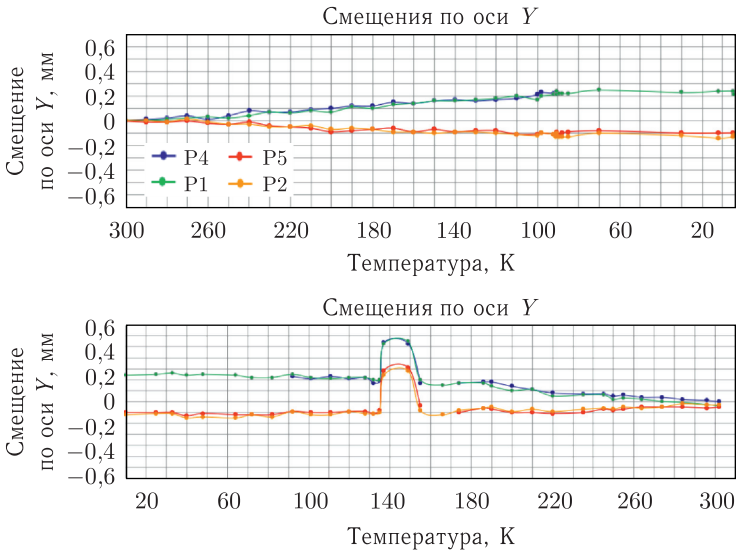


Рис. 17. Смещения реперных точек на ярме квадрупольного магнита по оси Y при захлаждении до рабочих температур и отеплении

На рис. 18 приведены смещения точек P1, P2, P4 и P5 в принятой СК по оси Z (вверх от пучка). Из графика видно, что точки на ярме опускались одинаково, а после 120 К одна точка на ярме (P4) перестала опускаться. И после начала охлаждения

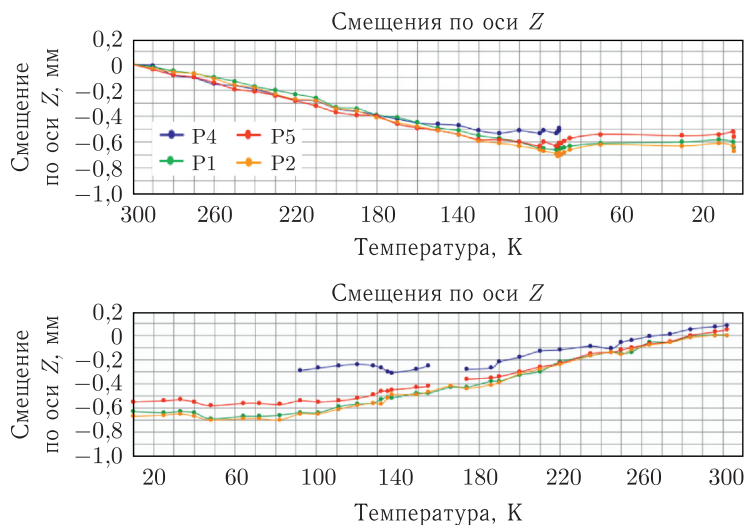


Рис. 18. Смещения реперных точек на ярме квадрупольного магнита по оси Z при захлаждении до рабочих температур и отеплении

азотных экранов пропала видимость на эту точку. Все остальные точки после охлаждения азотных экранов поднялись на 0,1 мм и вернулись после отепления ярма до 50 К. Видимость на точку P4 появилась после отепления ярма до 90 К, но по графику точка располагалась выше. Возможно, из-за узкого обзора и опускания азотного экрана во время охлаждения прибор снимал не точку P4, а отражение от азотного экрана. Во время охлаждения азотных экранов точка P5 по графику была выше на 0,1 мм других точек. Точки P4 и P5 после отепления имели значение +0,1 мм по оси Z.

Момент затяжки спиц перед началом испытаний составлял 5 Н·м на каждой спице. После отепления момент затяжки со стороны точки P4 составлял 2,9 Н·м, P1 — 2,6 Н·м, P2 — 2,8 Н·м, P5 — 2,5 Н·м. Измерения момента проводились динамометрическим ключом с точностью до 0,1 Н·м.

Таким образом, выполненные на стенде эксперименты показали следующее:

- из-за сжатия металла при охлаждении реперная площадка верхнего ярма магнита опускается на 0,7 мм, следовательно, центр апертуры в рабочем состоянии установки будет располагаться ниже проектного значения на 0,35 мм. Можно предположить, что по аналогии с верхним ярмом центр апертуры нижнего ярма при охлаждении будет располагаться выше на 0,35 мм;

- при захлаживании и последующем отеплении квадрупольного магнита коллайдера реперные точки возвращаются в исходное положение с точностью до  $\pm 0,05$  мм;

- оптимальный для данного вида магнитов режим затяжки поджимающих спиц в системе подвеса ярма внутри криостата равен 5 Н·м, что позволит избежать пластических деформаций спиц во время охлаждения/отепления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кекелидзе В. Д. и др. Технический проект объекта «Комплекс NICA» / Под ред. В. Д. Кекелидзе, Ю. К. Потребеникова. Дубна, 2018. 90 с.

2. *Billinge R.* Magnet Mixing to Reduce the High Field Closed Orbit Distortion. CERN-LABII-MA/74-1. Geneva: CERN, 1974.
3. *Бутенко А. В., Казинова О., Костромин С. А., Михайлов В. А., Тузиков А. В., Ходжибагиян Г. Г.* Сообщ. ОИЯИ Р9-2017-18. Дубна, 2017.
4. *Динев Д. Х., Михайлов В. А., Щепунов В. А.* Сообщ. ОИЯИ 9-88-302. Дубна, 1988.
5. *Никифоров Д. Н., Беспалов Ю. Г., Ходжибагиян Г. Г., Борисов В. В., Гусаков Ю. В., Золотых Д. А., Коровкин С. А., Котова А. А., Кудашкин А. В., Кудряшов П. И., Кузнецов Г. Л., Петров М. В., Сергеева Е. В., Талызин Р. В.* Статус производства элементов магнитно-криостатной системы коллайдера NICA. Результаты криогенных испытаний сверхпроводящих магнитов // Матер. 28-й конф. по ускорителям заряженных частиц «RuPAC'23». Новосибирск, 2023; ПТЭ (направлено).
6. *Nikiforov D. N. et al.* Cryogenic Test Facility of Superconducting Magnets for the Accelerator Complex NICA // *J. Phys. Conf. Ser.* 2014. V. 507. P. 032034.
7. *Kotova A., Nikiforov D., Bespalov Yu., Khodzhibagiyani H., Fischer E., Kuznetsov G.* Cryogenic Tests Results of the Regular Superconducting Magnets of the NICA Collider // *Proc. of the 17th IIR Intern. Conf. "Cryogenics 2023"*, Drezden, Germany, April 25–28, 2023.

Получено 8 июля 2024 г.