

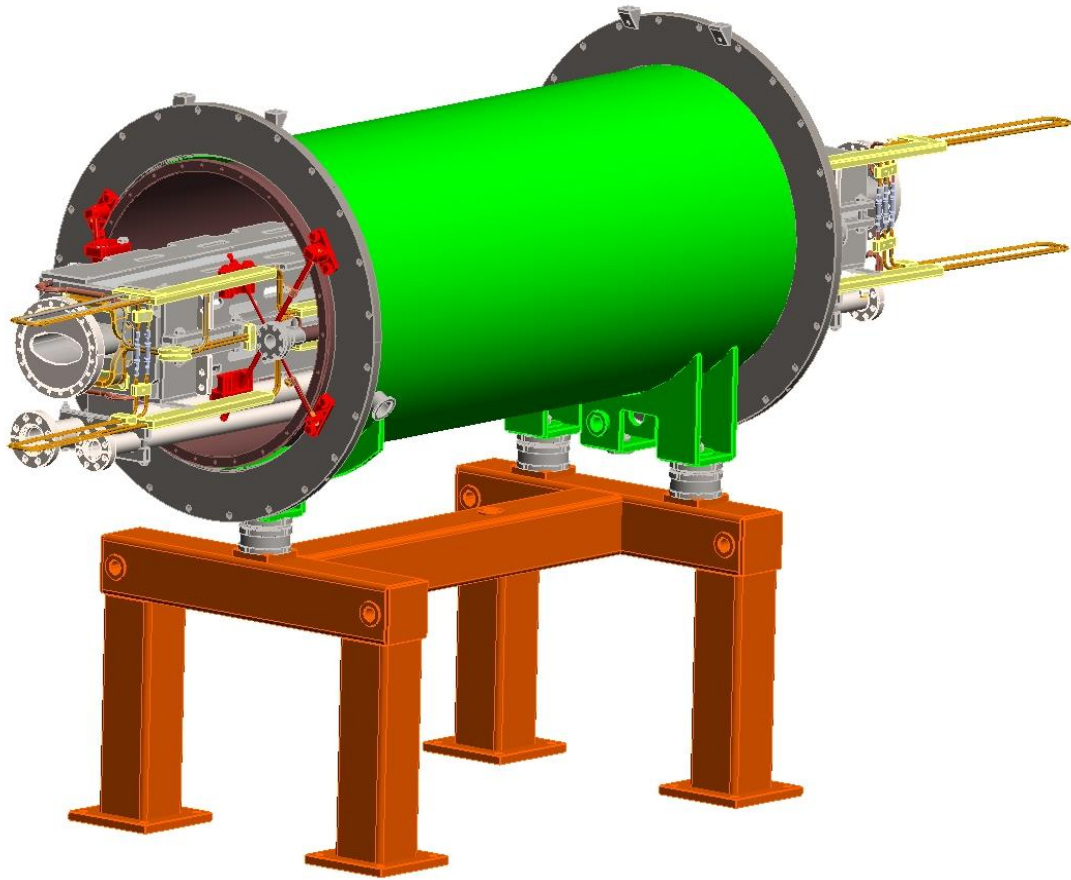
**Исследование смещений
СП-магнитов типа
«Нуклотрон»
при охлаждении /
отеплении**

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

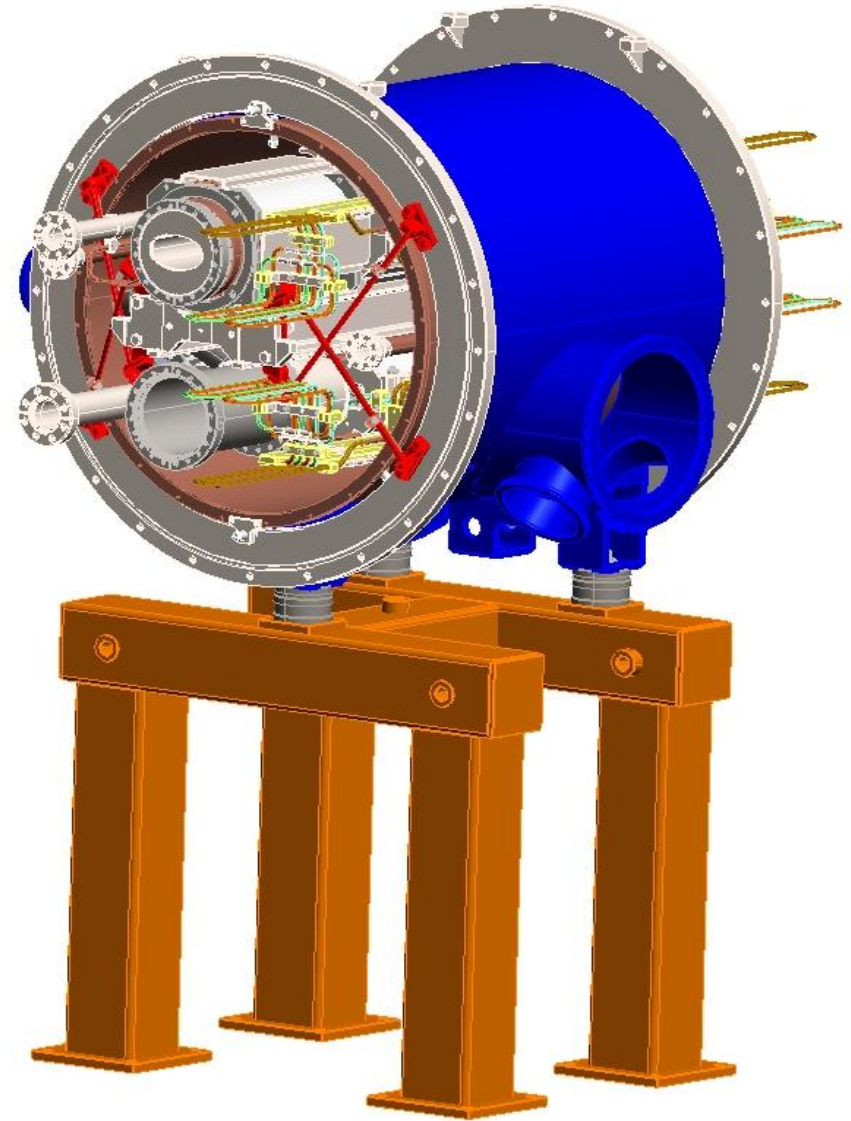
Цели исследований:

- 1. Экспериментально подтвердить правильность конструктивно-технических решений, принятых при создании системы подвеса магнитов типа «Нуклотрон».
- 2. Определение зависимостей поведения магнитов при охлаждении и отеплении для разработки методики юстировки элементов магнитно-криостатных систем Бустера и Коллайдера.

Система подвеса магнитов типа «Нуклотрон»



Дипольный магнит Бустера



Квадрупольный магнит Коллайдера

Таблица №1. Требования к максимальным смещениям от положения равновесной замкнутой орбиты магнитов Бустера

	Дипольный магнит	Квадрупольный магнит
Поперечные смещения относительно продольной оси $\Delta X, \Delta Y$	-	$\pm 0,1$ мм
Поворот вокруг продольной оси, α	0,5 мрад	1 мрад

Таблица №2. Требования к максимальным смещениям от положения равновесной замкнутой орбиты магнитов Коллайдера

	Дипольный магнит	Квадрупольный магнит
Поперечные смещения относительно продольной оси $\Delta X, \Delta Y$	-	± 0.1 мм
Поворот вокруг продольной оси, α	0.2 мрад	0.1 мрад

«Утверждаю»
Зам. директора ЛФВЭ
по научной работе,
начальник УО


Бутенко А.В.
«7» октября 2024 г.

РЕГЛАМЕНТ

на выставление и юстировку в кольце структурных магнитных элементов арок Коллайдера NICA

Для работы ускорителя принципиальное значение имеет положение медианных плоскостей дипольных магнитов и магнитных осей квадрупольных линз относительно равновесной замкнутой орбиты. Допуски на возможные смещения приведены в **Таблице 1**.

Таблица 1. Максимально допустимые смещения от равновесной замкнутой орбиты магнитов Коллайдера

	дипольный магнит	квадрупольный магнит
Поперечные смещения относительно продольной оси $\Delta X, \Delta Y$	-	± 0.1 мм
Поворот вокруг продольной оси, α	0.2 мрад	0.1 мрад

В квадрупольной линзе положение магнитной и геометрической осей может отличаться, также, как и положение медианной и средней-геометрической плоскостей в дипольном магните. Одной из задач серийных магнитных измерений является определение угла поворота α медианной плоскости относительно средней в дипольных магнитах, а также величины поперечного смещения ΔX и ΔY магнитной оси относительно геометрической в квадрупольных линзах.

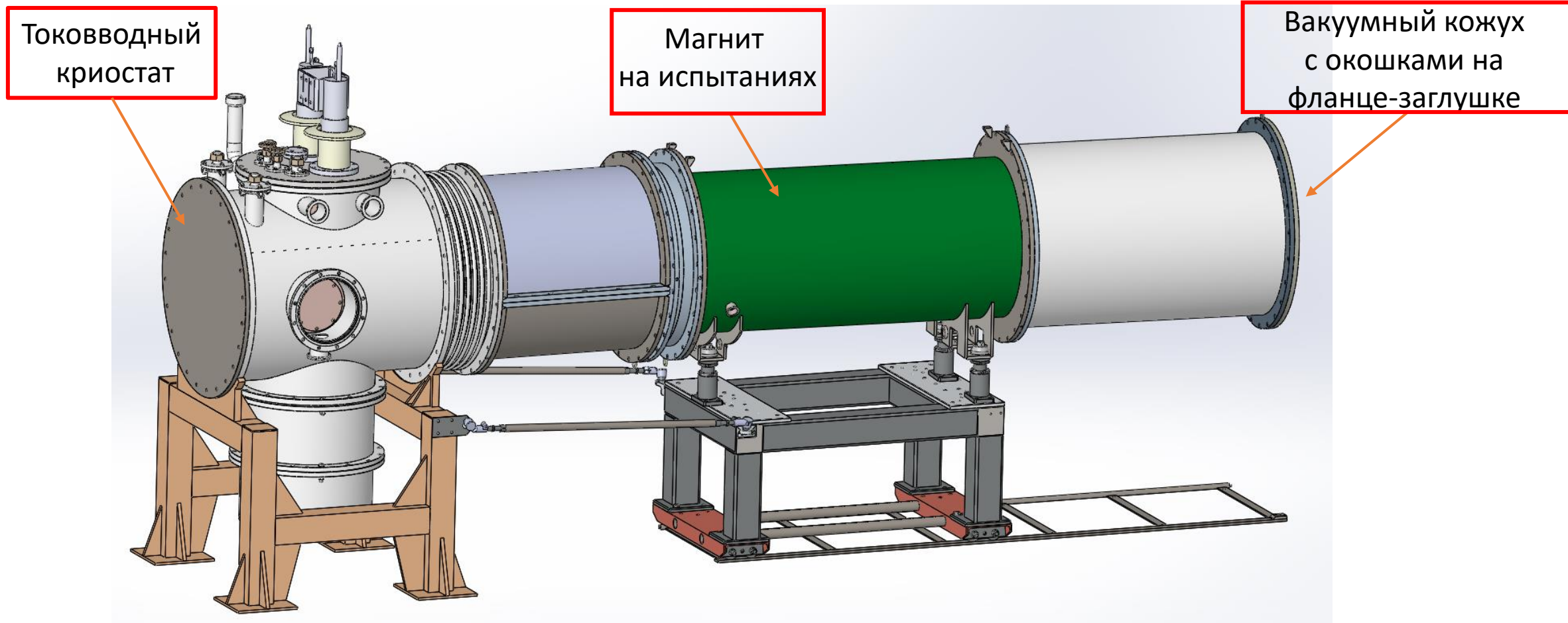
Для обеспечения возможности юстировки магнитных элементов в кольце необходимо провести:

1. Магнитные измерения

На основании магнитных измерений определить α для каждого дипольного магнита и $\Delta X, \Delta Y$ для квадрупольных линз для каждого из колец (верхнего и нижнего). Указанные параметры определяются относительно геометрии апертуры верхнего кольца ярма магнита.

Испытательный стенд (модель)

Участок криогенных испытаний



Испытательный стенд



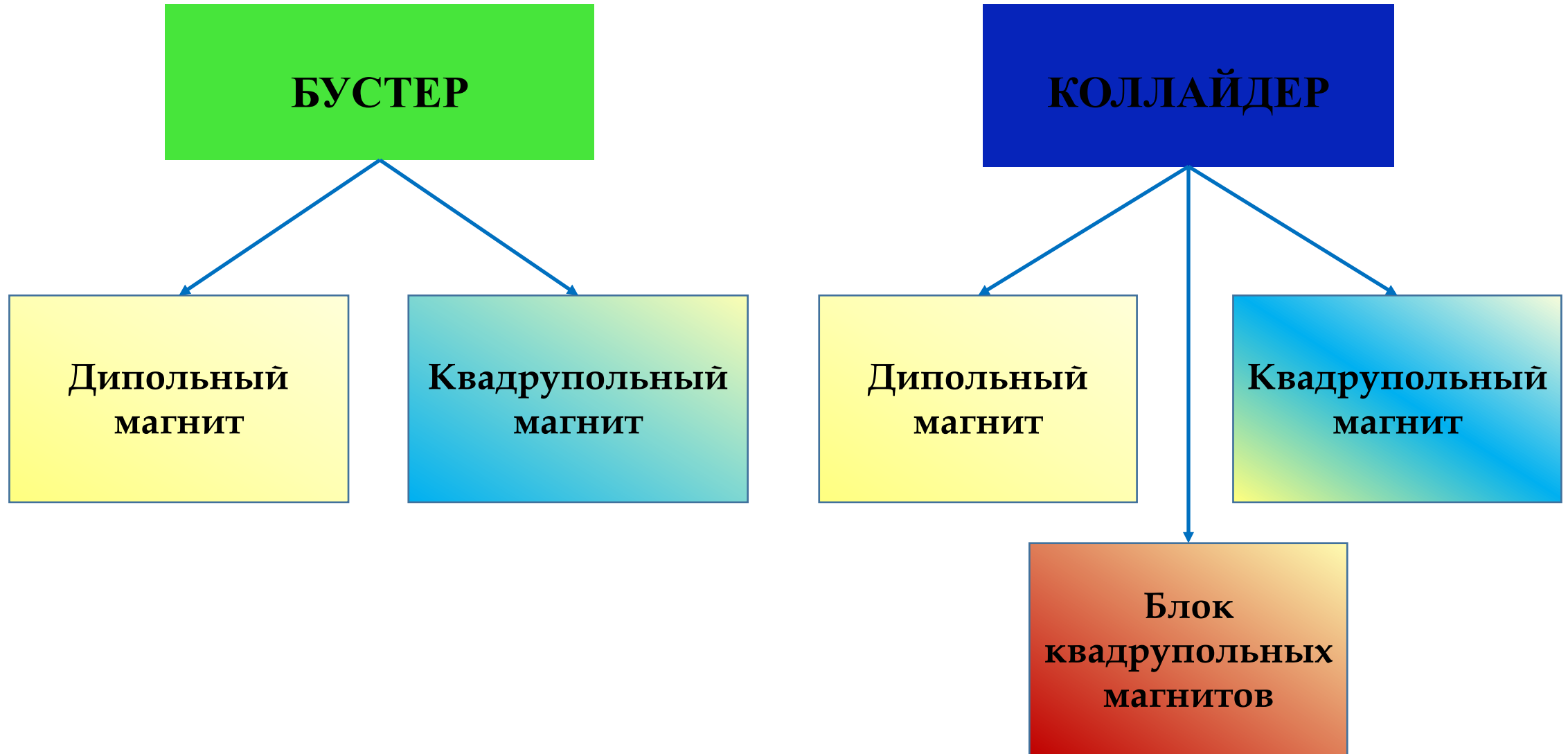
Лазерный Трекер
Leica AT-401

Фланец-заглушка
с окнами

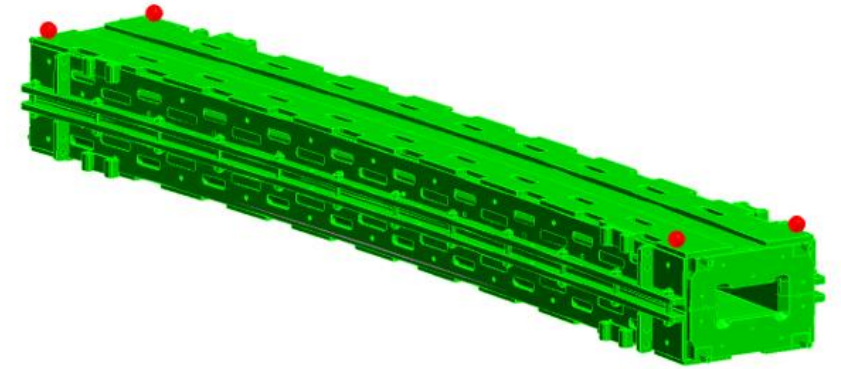
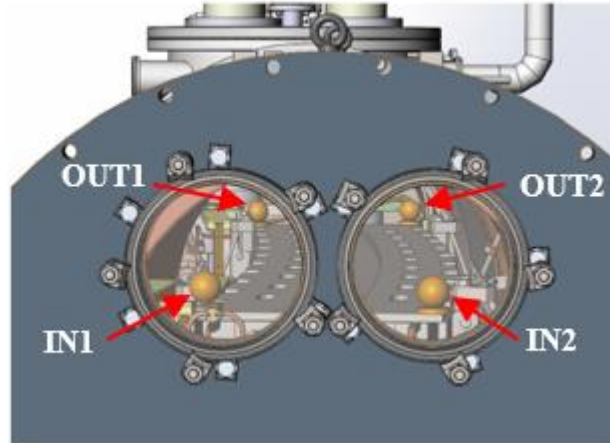
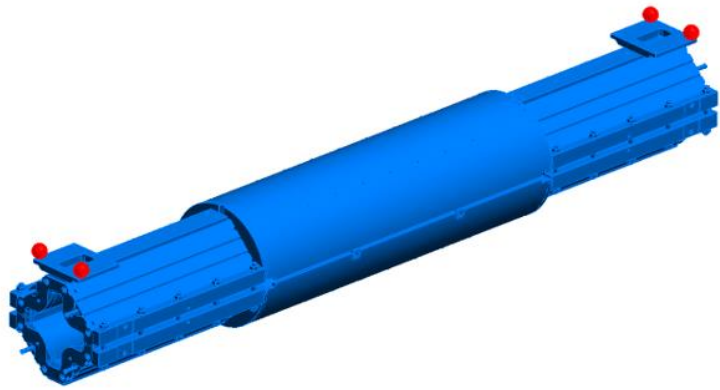


Трекер АТ401 во время испытаний был установлен на расстоянии 4 м от испытательного стенда .

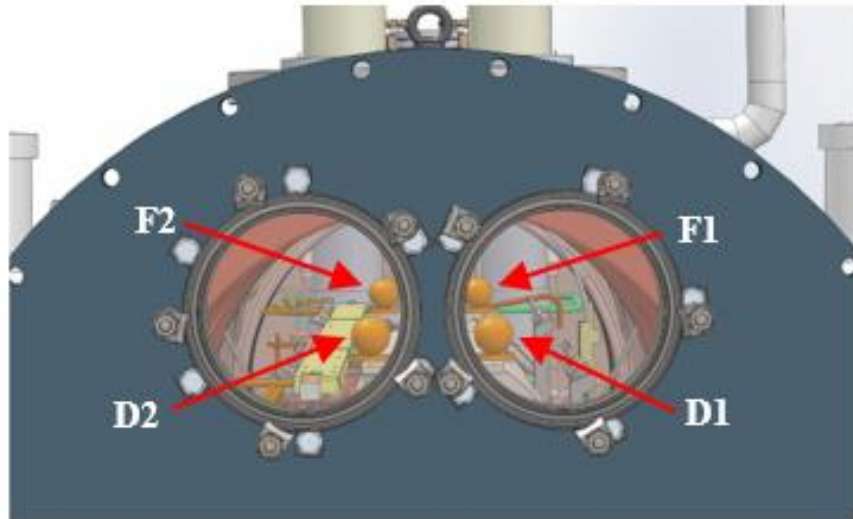
Виды магнитов на испытаниях



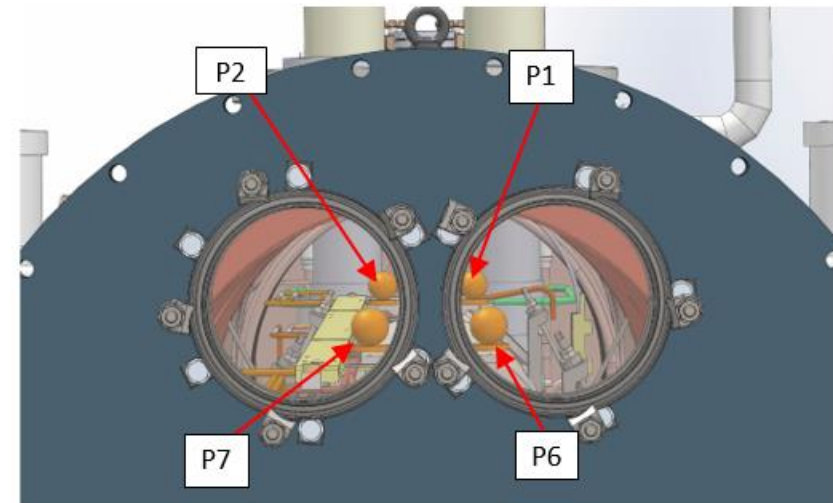
Вид на отражатели через окна в крышке криостата (модель)



Дипольный магнит Бустера

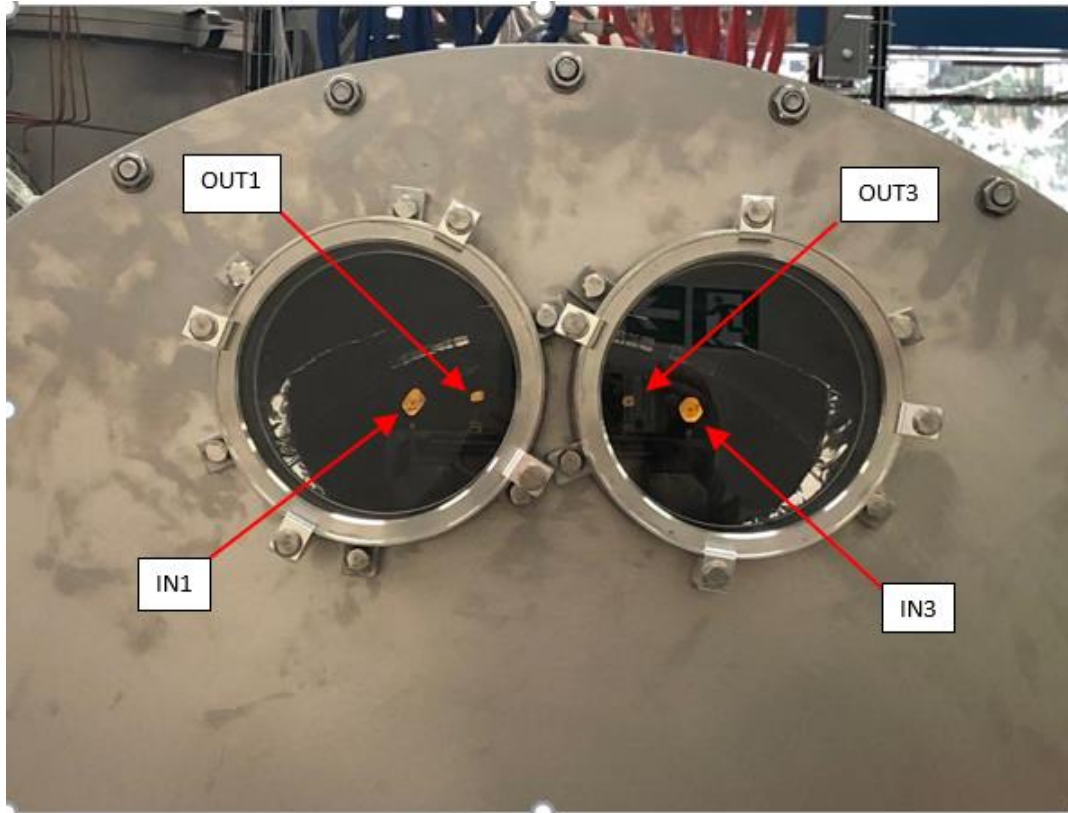


Квадрупольный магнит Бустера

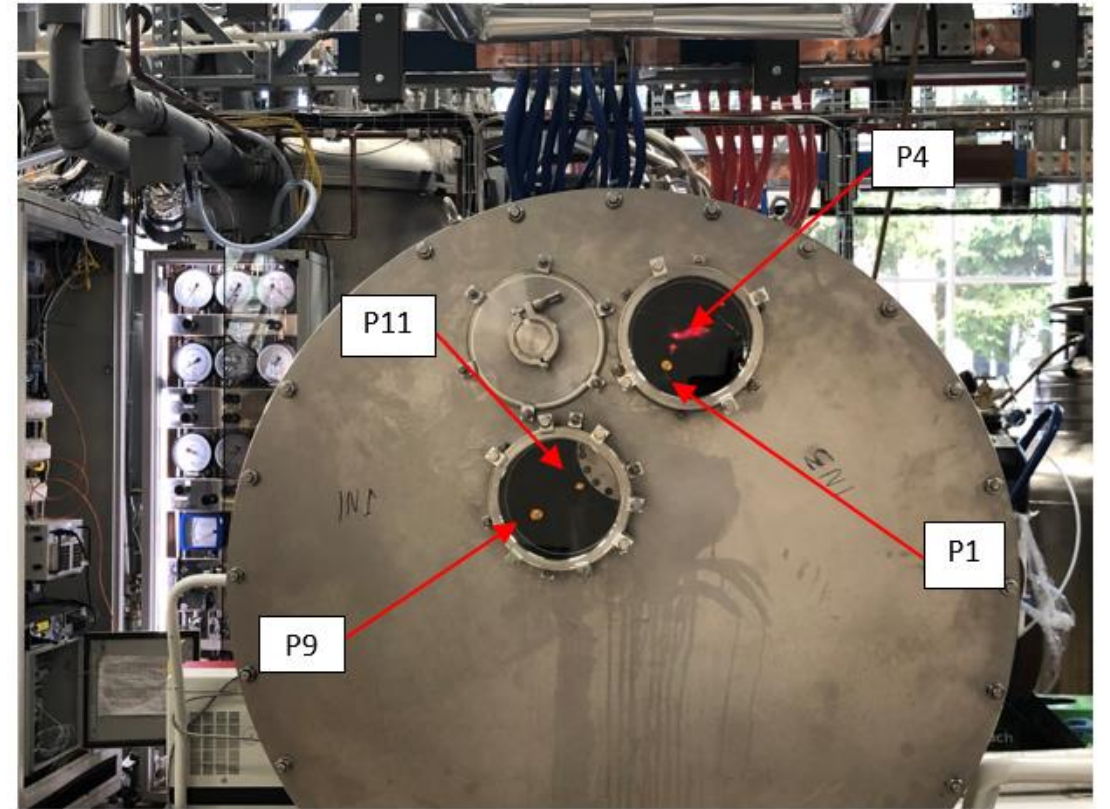


Блок квадрупольных линз Коллайдера

Вид на отражатели через окна в крышке криостата



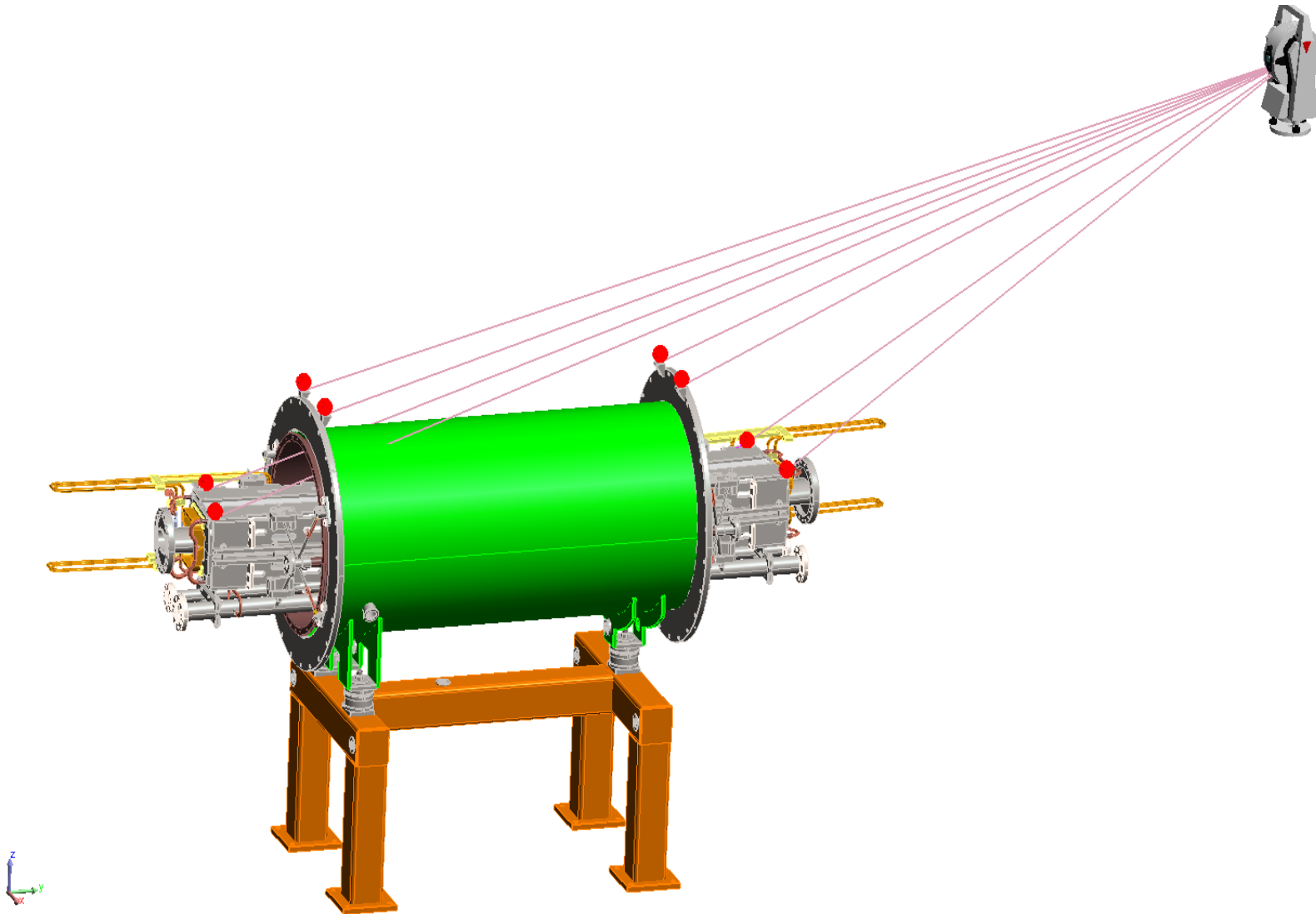
Дипольный магнит Коллайдера



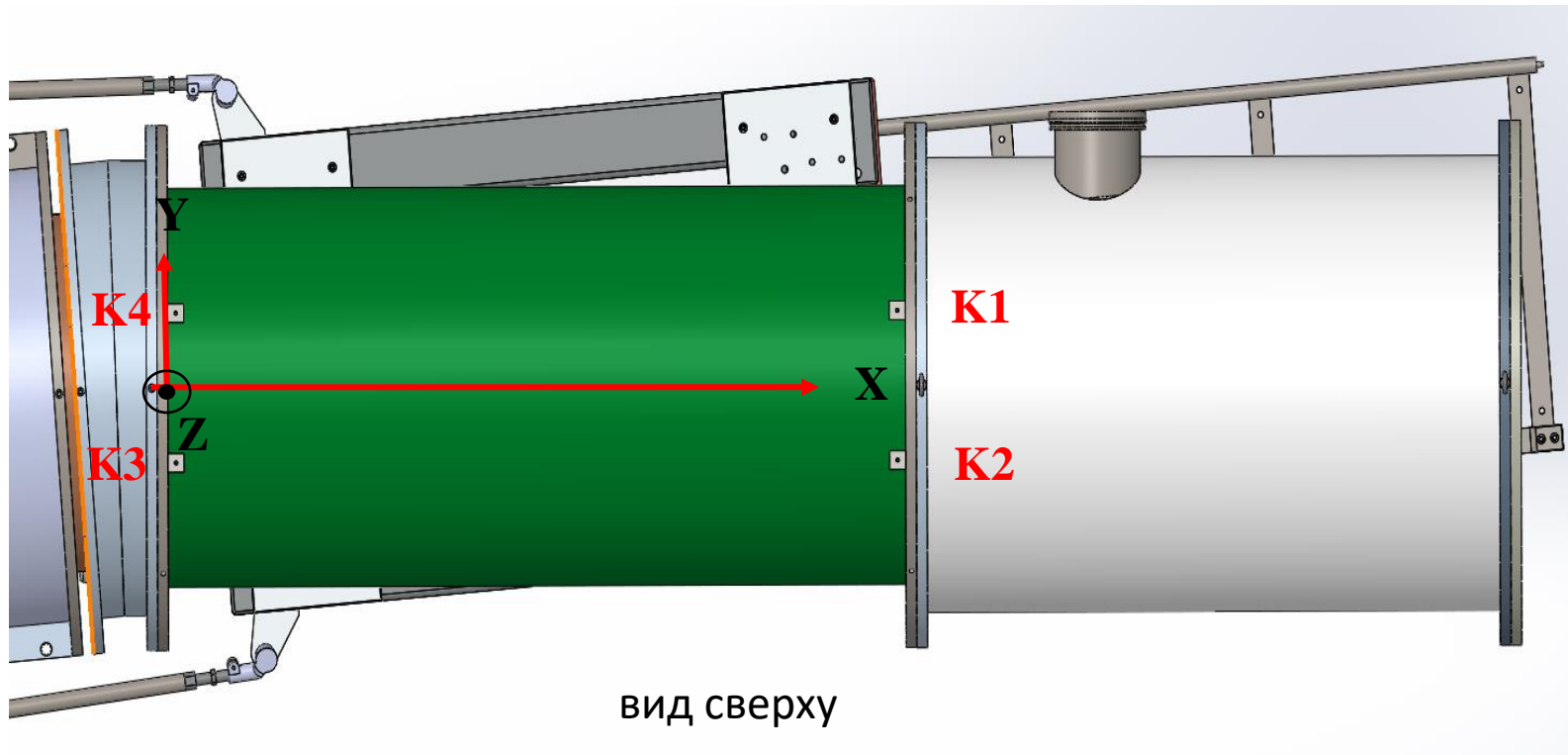
Квадрупольный магнит Коллайдера

Все измерения были выполнены с применением лазерного трекера Leica AT401 (точность измерений **0,020мм**).

Во время испытаний измерялись координаты точек на реперной площадке ярма и реперные точки на криостате через каждые **10 градусов** изменения температуры.



Для анализа результатов измерений принята следующая система координат:



- Начало системы координат расположено между реперными точками K3 и K4 на фланце криостата;
- Ось +Z направлена вверх перпендикулярно плоскости 4-х бобышек на фланцах криостата;
- Ось +X направлена в точку, лежащую посередине между реперными точками K1 и K2 на фланце криостата;
- Ось +Y добавляет систему координат до правой.

С 2018 года на данном стенде криогенных испытаний было проведено **17 испытаний**, в которых было испытано **8 магнитов** различной конфигурации, каждый по 2-3 этапа. Общее время проведенных испытаний заняло более 200 суток.

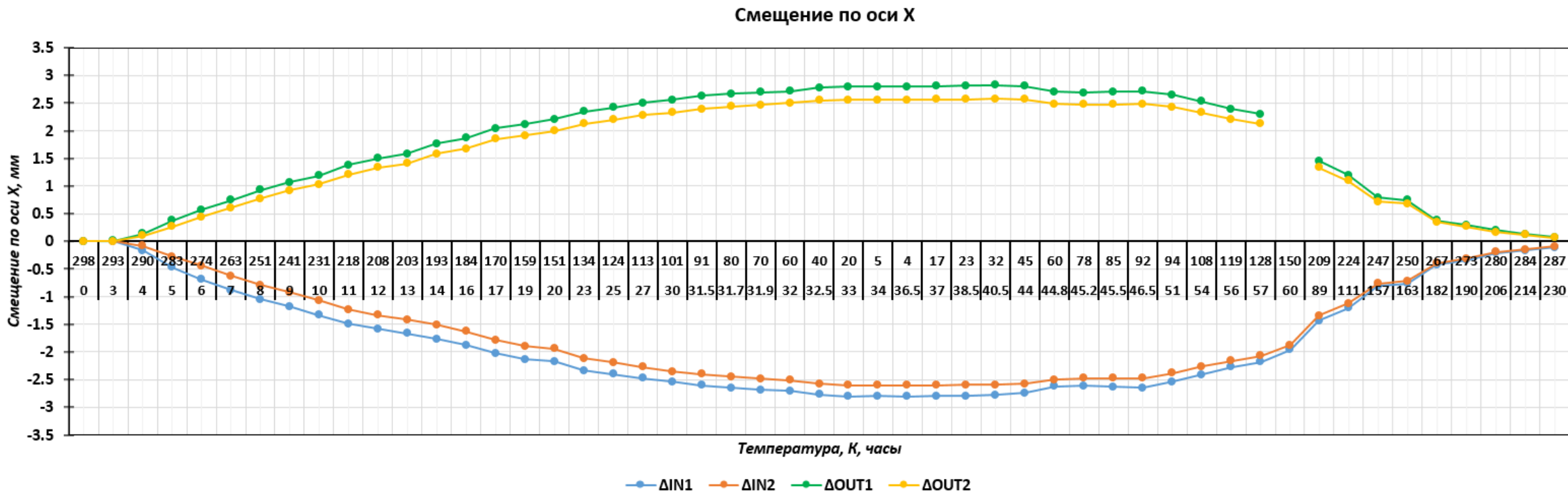
Первое измерение координат реперных точек для каждого испытания выполняется после окончательной сборки и обтяжки испытательного стенда при давлении **$1 \times 10^5 \text{Па}$** (до откачки изоляционного объема).

Второе измерение выполняется при давлении **1Па** (после откачки изоляционного объема) . Температура внутри криостата во время двух измерений равняется 290К. По результатам измерений видно, что после откачки изоляционного объема происходят деформации корпуса криостата на **0,2мм-0,5мм**. Для анализа деформаций и смещения ярма при снижении температуры от 290К до 4.5К за базовые реперные точки принимаем результаты измерений, сделанные при давлении **1Па**.

Каждое последующее измерение было совмещено по реперным пунктам на криостате с базовым измерением (при давлении **1Па**). При этом перемещались измеренные реперные точки на ярме на величину смещения криостата . Разница между первым положением ярма (базовые точки после откачки) и последующими измерениями по трем координатам представлена в графиках .

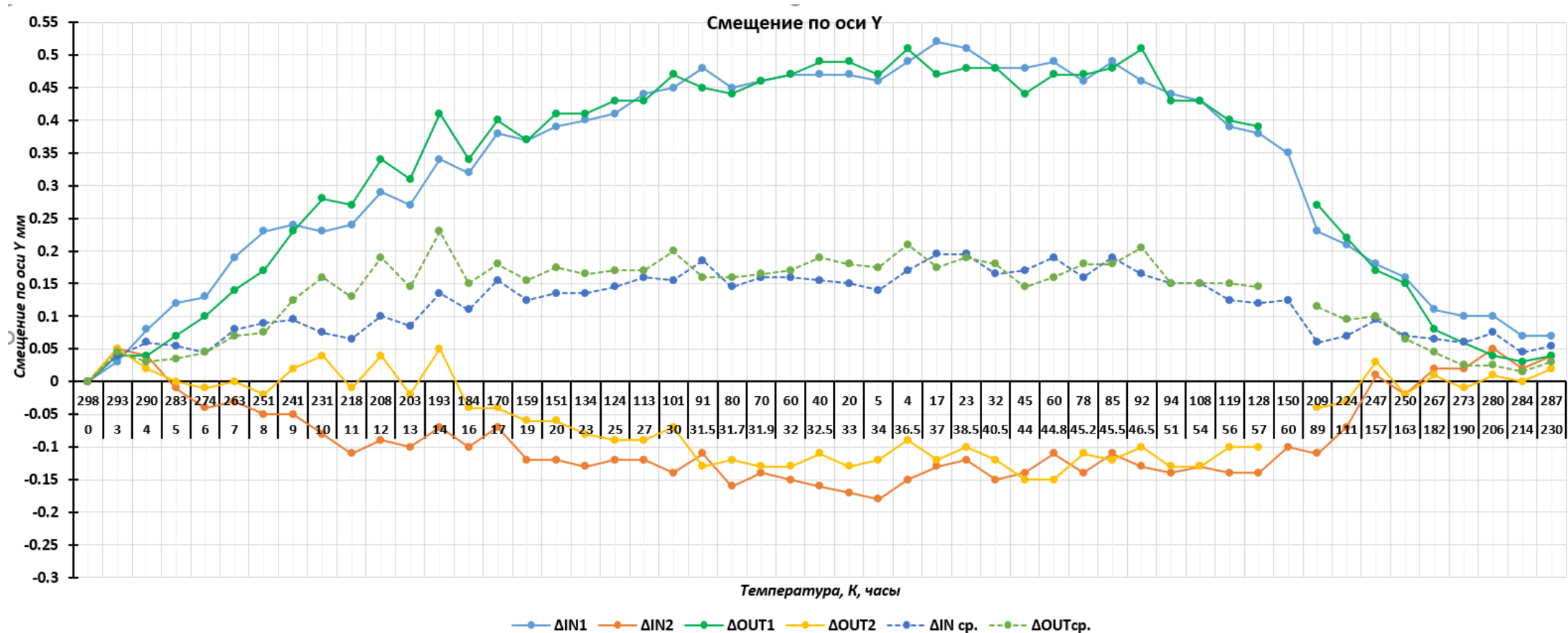
Диполь Бустера

Смещения реперных точек ярма по оси X (вдоль пучка) в зависимости от температуры во время цикла охлаждения и отепления



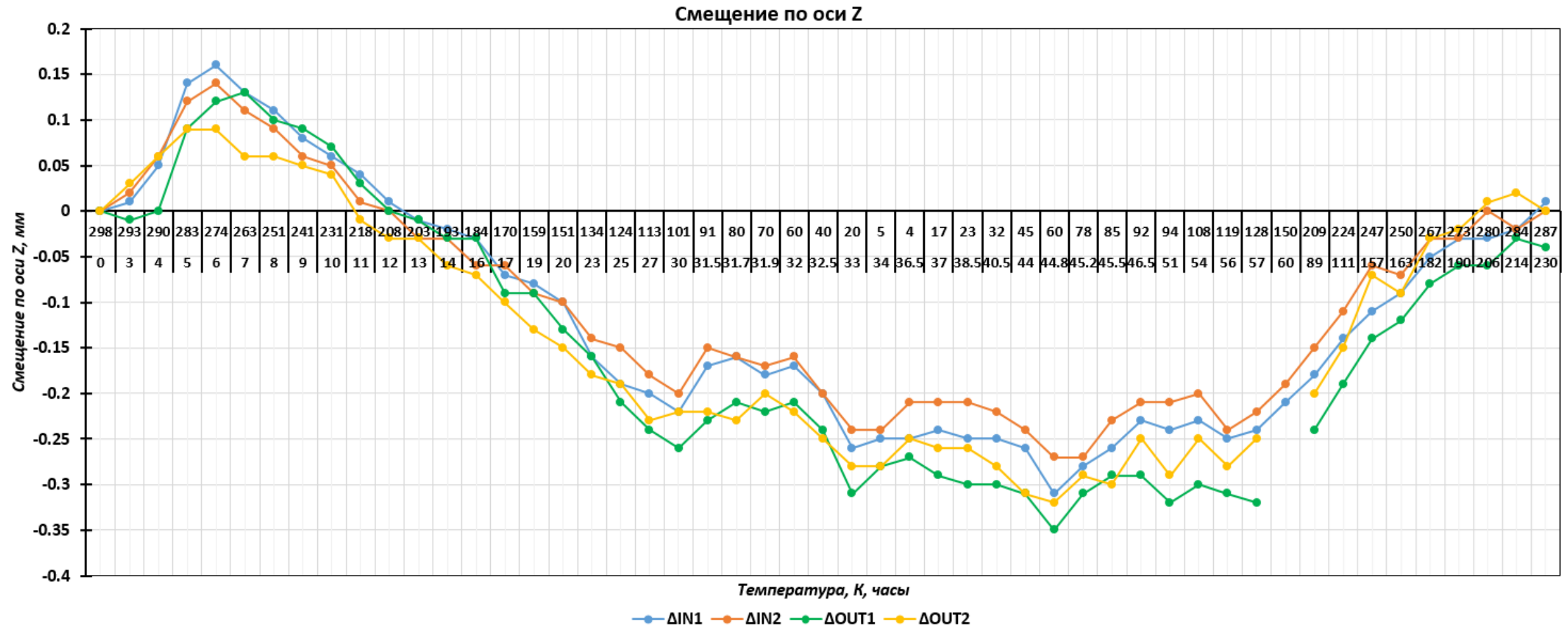
По оси X: Точки OUT1 и OUT2 смещаются по направлению оси +X, поэтому смещение с положительным значением. Точки IN1 и IN2 смещаются в противоположную сторону по отношению оси +X, поэтому смещение с отрицательным значением. Разность между точками IN и OUT показывает величину сближения реперных точек на ярме при охлаждении. После отепления магнит вернулся в исходное положение. В месте разрыва графика пропадала видимость на отражатели. Во время испытаний ярмо дипольного магнита Бустера уменьшается по длине на **5,50 мм**.

Смещения реперных точек ярма по оси Y (вправо от пучка) в зависимости от температуры во время цикла охлаждения и отепления



По оси Y: Точки на ярме IN1 и OUT1 расположены с одной стороны по оси Y и должны располагаться рядом. Аналогичное расположение точек IN2 и OUT2. На графике видно, что отклонение точек со стороны IN1-OUT1 составило **max 0,53мм** во время охлаждения, со стороны IN2-OUT2 составило **max 0,18мм**. После отепления все реперные точки вернулись в первоначальное положение с точностью **0,05мм**.

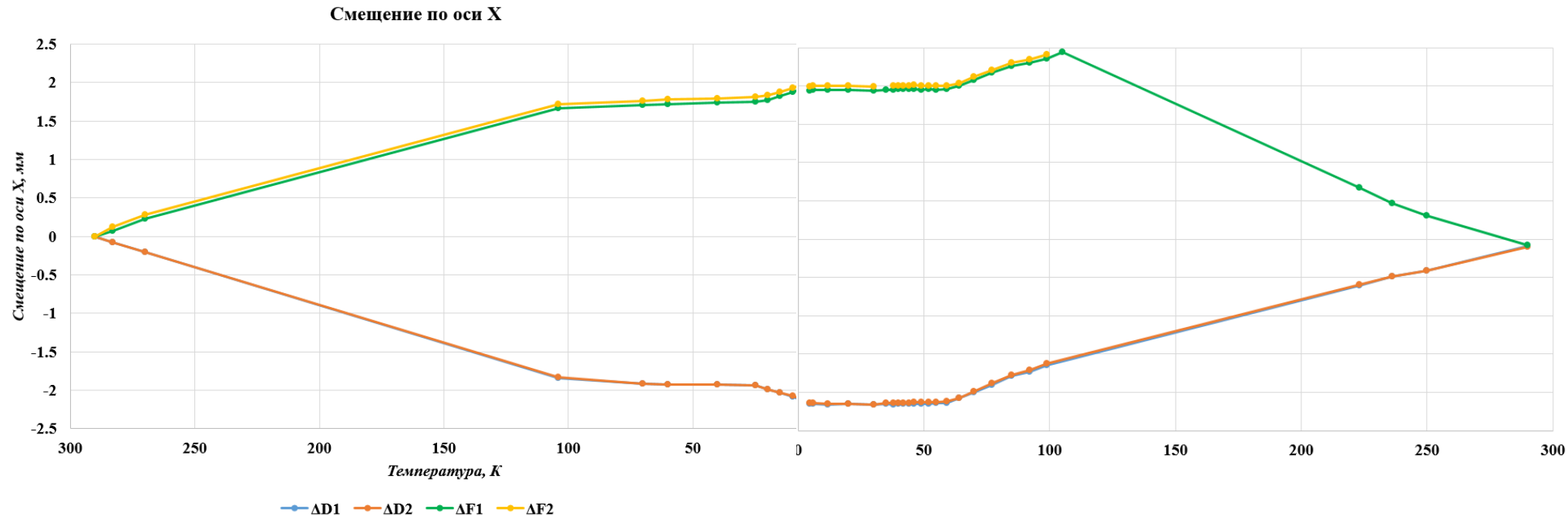
Смещения реперных точек ярма по оси Z (вверх от пучка) в зависимости от температуры во время цикла охлаждения и отепления



По оси Z: Во время охлаждения от 290К до 270К ярмо сначала поднималось на **0,15мм**, затем опускалось до **-0,35мм**. После отепления все реперные точки вернулись в исходное положение с точностью **±0,05мм**.

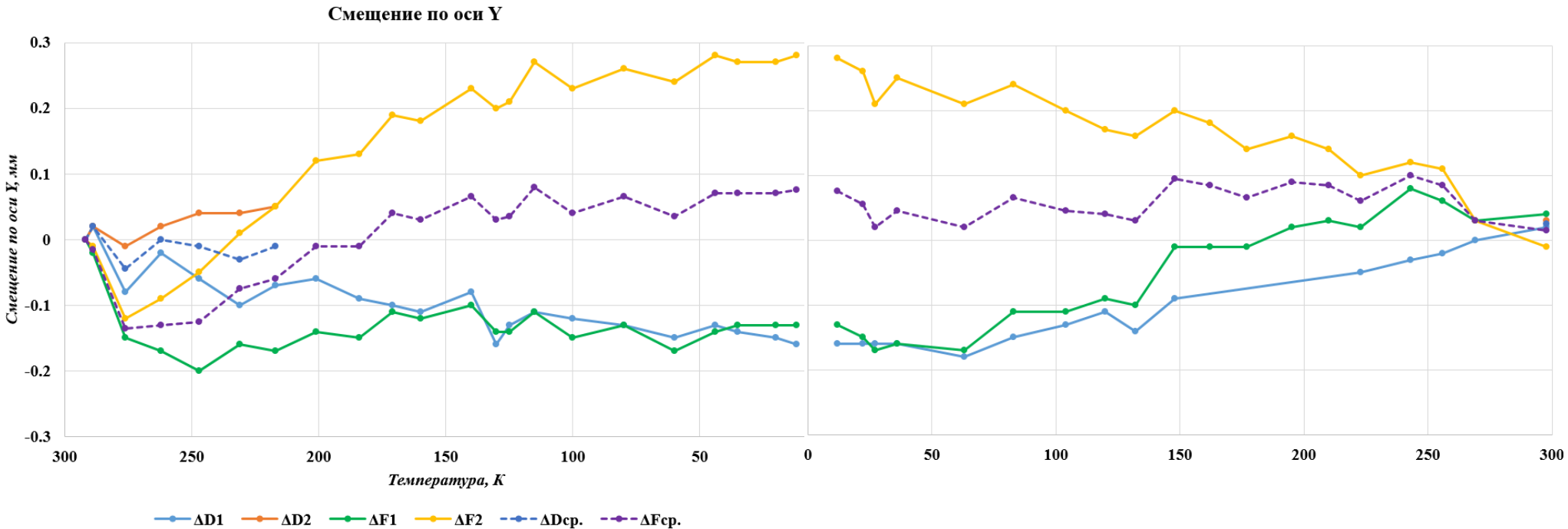
Линза Бустера

Смещения реперных точек ярма по оси X (вдоль пучка) в зависимости от температуры во время цикла охлаждения и отепления



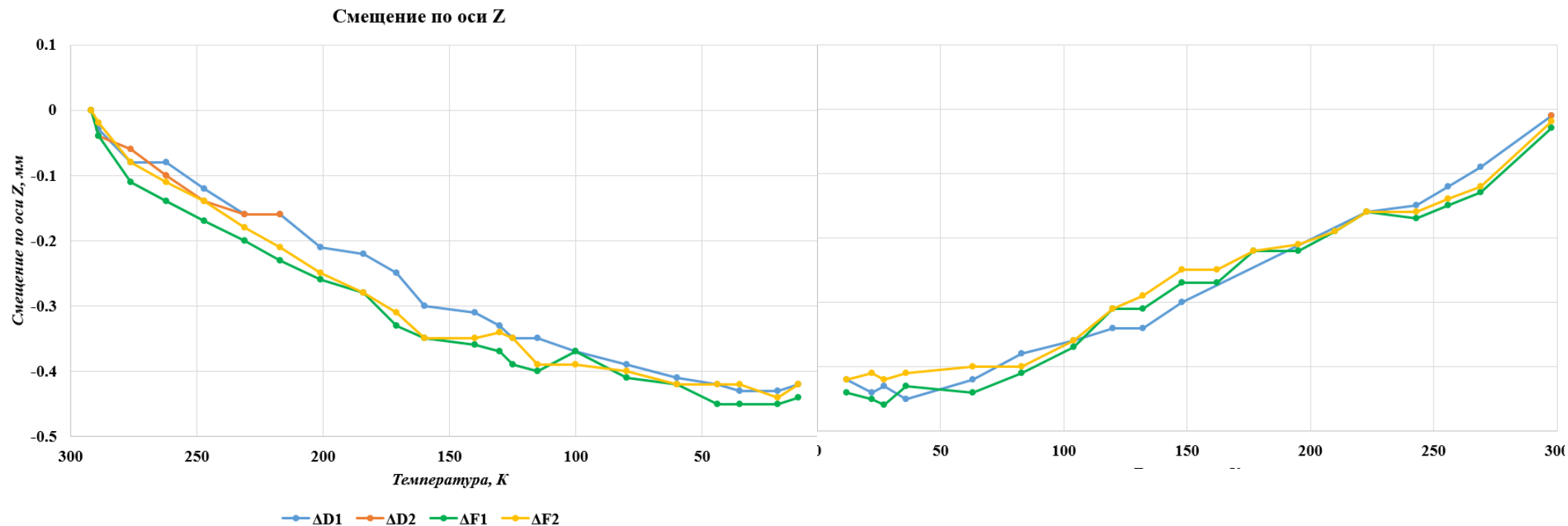
По оси X: Точки F1 и F2 смещаются по направлению оси +X, поэтому смещение с положительным значением. Точки D1 и D2 смещаются в противоположную сторону по отношению оси +X, поэтому смещение с отрицательным значением. Разность между точками D и F показывает величину сближения реперных точек на ярме при охлаждении. После отепления магнит вернулся в исходное положение. Во время испытаний ярмо квадрупольного магнита Бустера уменьшается по длине на **4,70 мм**.

Смещения реперных точек ярма по оси Y (вправо от пучка) в зависимости от температуры во время цикла охлаждения и отепления



По оси Y: Поперечное смещение ярма при захлаживании и отеплении находилось в диапазоне **-0.2 мм** для точек D1-F1, и до **+0,3мм** для точек D2-F2. При отеплении по оси Y точки D1, F1, F2 вернулись в свое исходное положение с точностью **0,02мм**. На точку D2 при температуре 220K пропала видимость.

Смещения реперных точек ярма по оси Z (вверх от пучка) в зависимости от температуры во время цикла охлаждения и отепления

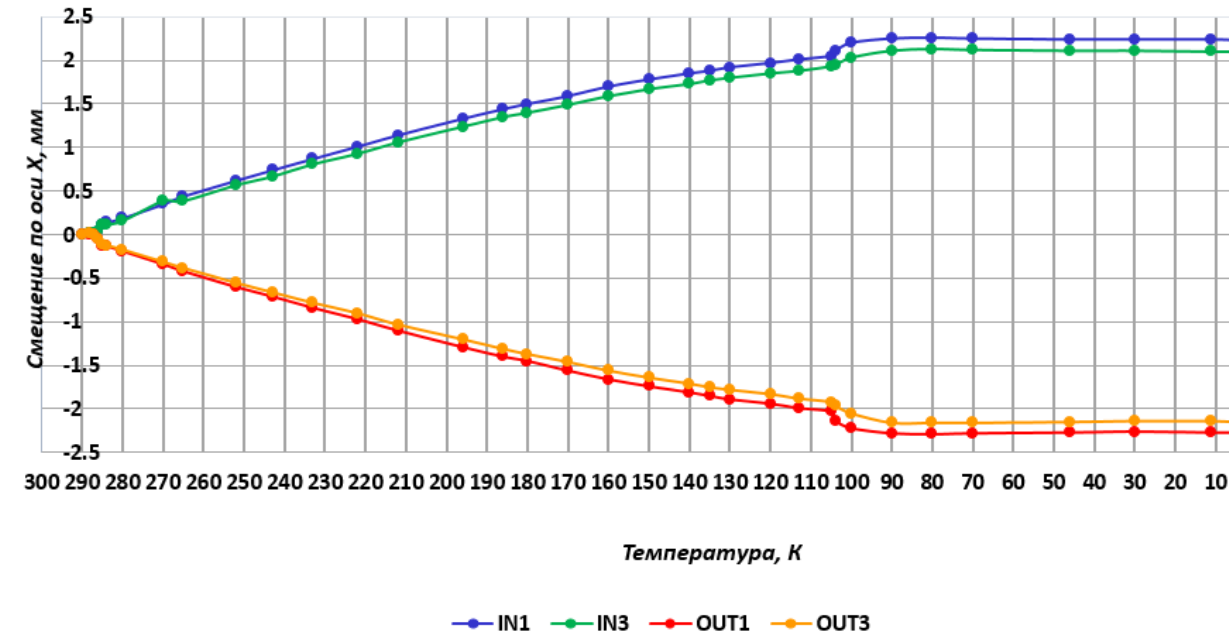


По оси Z: В процессе захлаживания от 298К до 12К наблюдалось равномерное смещение точек D1, F1, F2 вниз на величину **- 0.42 ÷ - 0.45 мм** (ось Z). При отеплении по оси Z точки D1, F1, F2 вернулись в свое исходное положение. На точку D2 при температуре 220К пропала видимость.

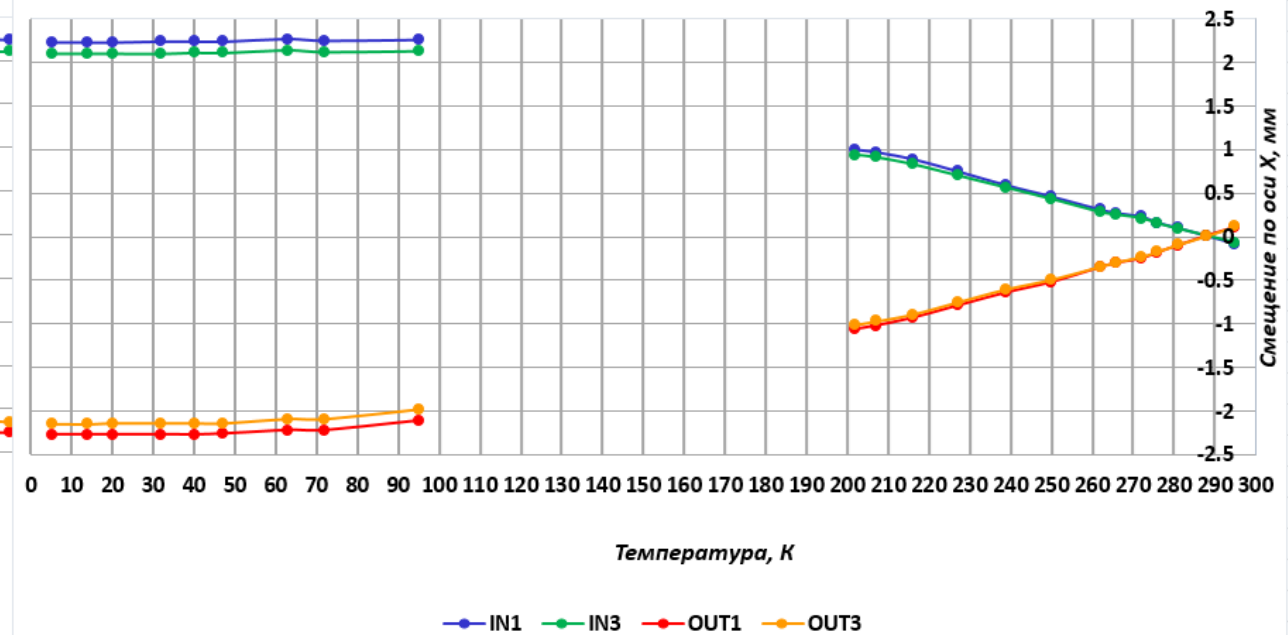
Диполь Коллайдера

Смещения реперных точек ярма по оси X (вдоль пучка) в зависимости от температуры во время цикла охлаждения и отепления

Смещения по оси X 2 этап

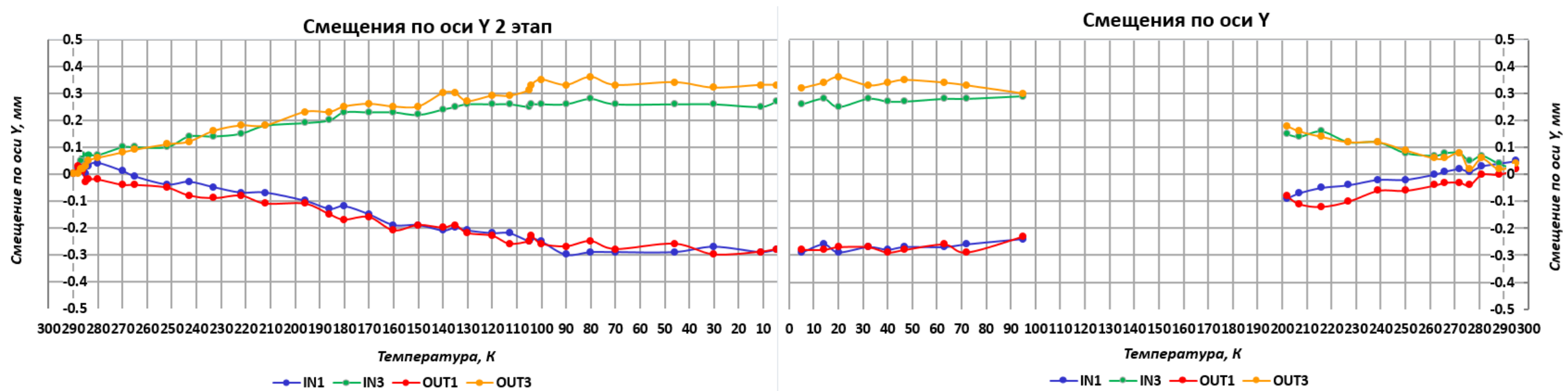


Смещения по оси X



По оси X: Точки IN1 и IN3 смещаются по направлению оси +X, поэтому смещение с положительным значением. Точки OUT1 и OUT3 смещаются в противоположную сторону по отношению оси +X, поэтому смещение с отрицательным значением. Разность между точками IN и OUT показывает величину сближения реперных точек на ярме при охлаждении. После отепления магнит вернулся в исходное положение с точностью **0,03мм**. Разрыв в графике на отеплении — во время измерений не откачивали вакуум, поэтому не корректные измерения. Во время испытаний ярмо дипольного магнита Коллайдера уменьшается по длине на **4,60 мм**.

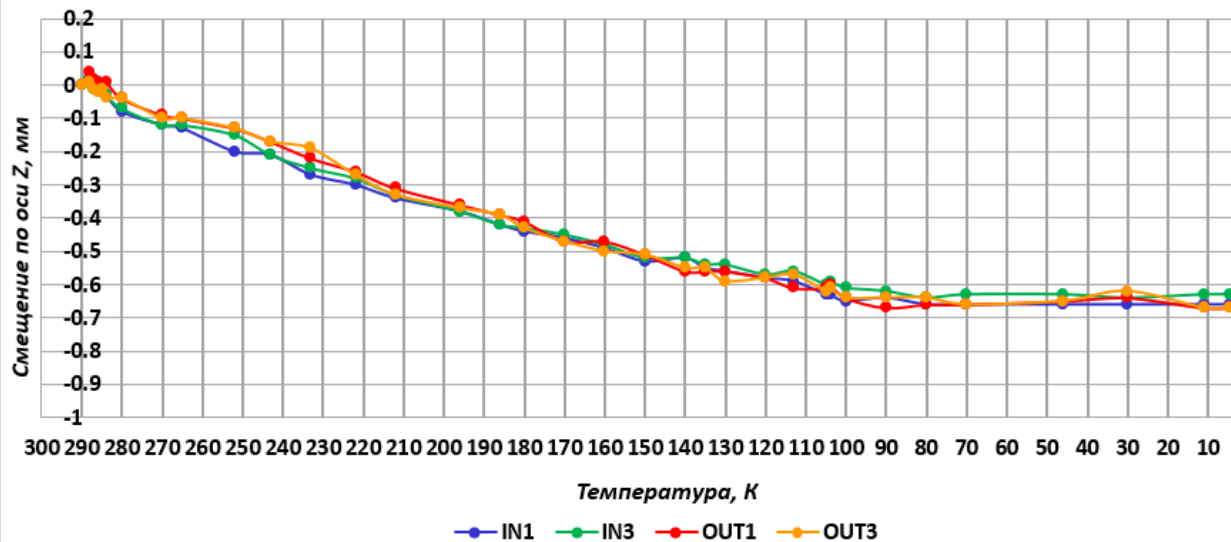
Смещения реперных точек ярма по оси Y (вправо от пучка) в зависимости от температуры во время цикла охлаждения и отепления



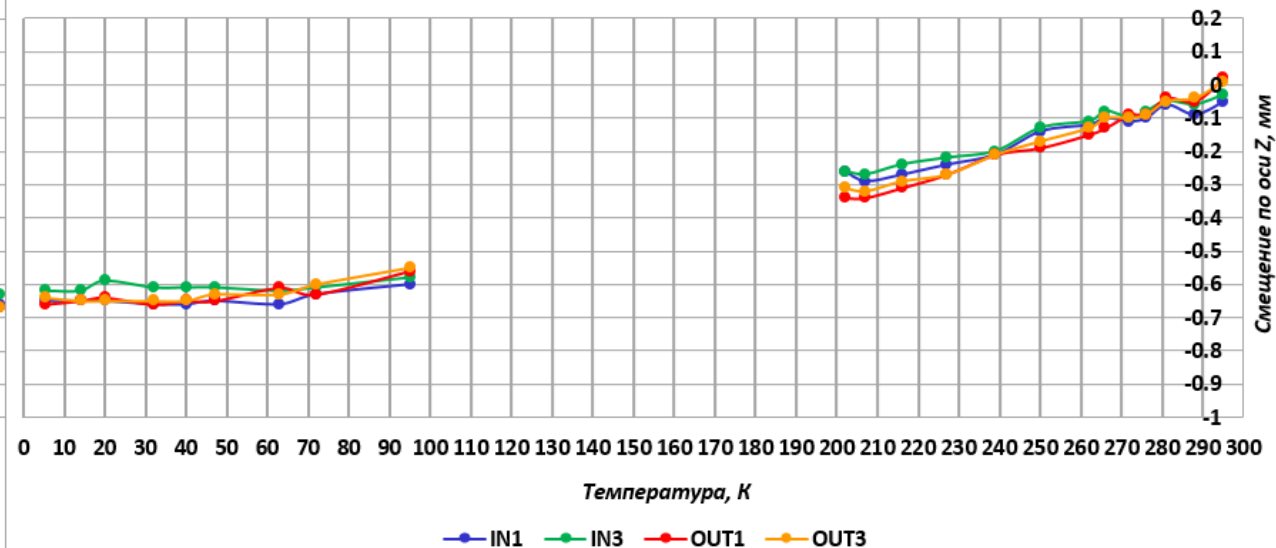
По оси Y: Точки IN1 и OUT1 расположены с одной стороны оси Y, точки IN3 и OUT3 с противоположной стороны. Из графика видно, что при повторных испытаниях парные точки располагаются близко друг к другу, это означает, что поворота магнита удалось избежать. **Были внесены изменения в схему охлаждения: азотный экран охлаждался после достижения на ярме температуры 90К.** Отклонение точек со стороны IN1-OUT1 составило max **0,30мм** во время охлаждения, со стороны IN3-OUT3 составило max **0,40мм**. После отепления магнит вернулся в исходное положение с точностью **0,05мм**.

Смещения реперных точек ярма по оси Z (вверх от пучка) в зависимости от температуры во время цикла охлаждения и отепления

Смещения по оси Z 2 этап



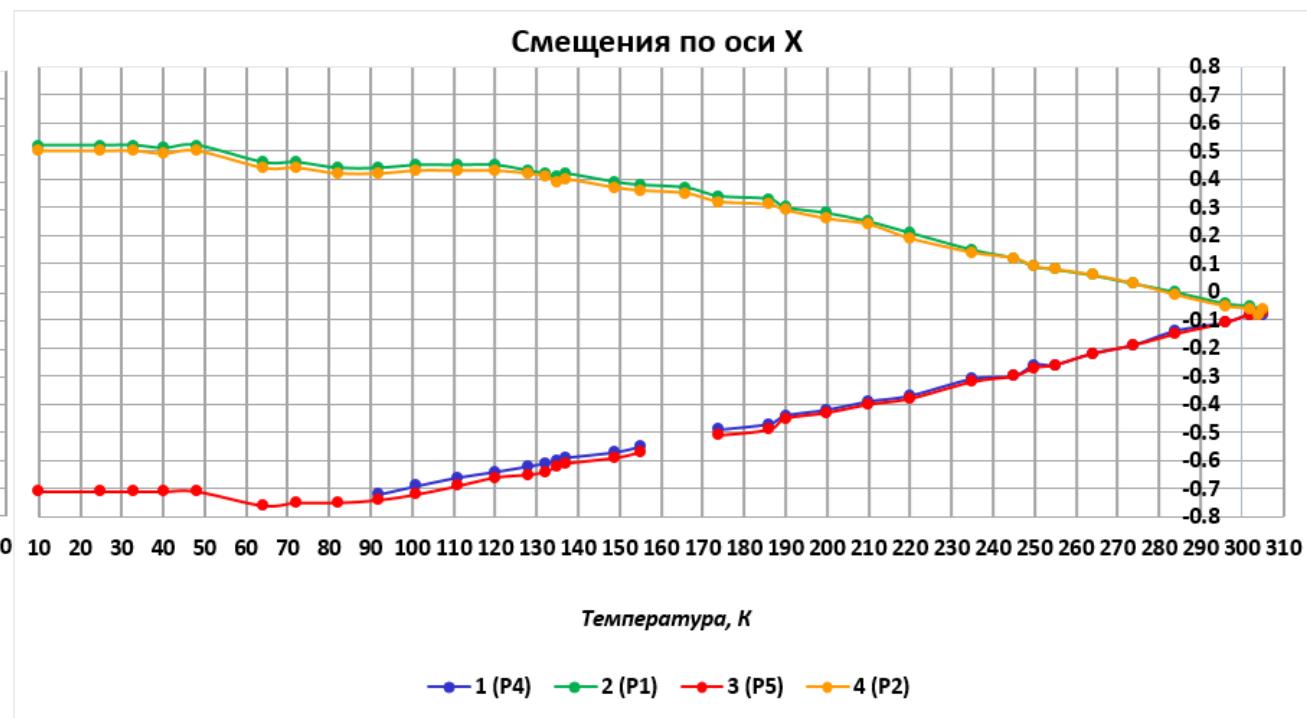
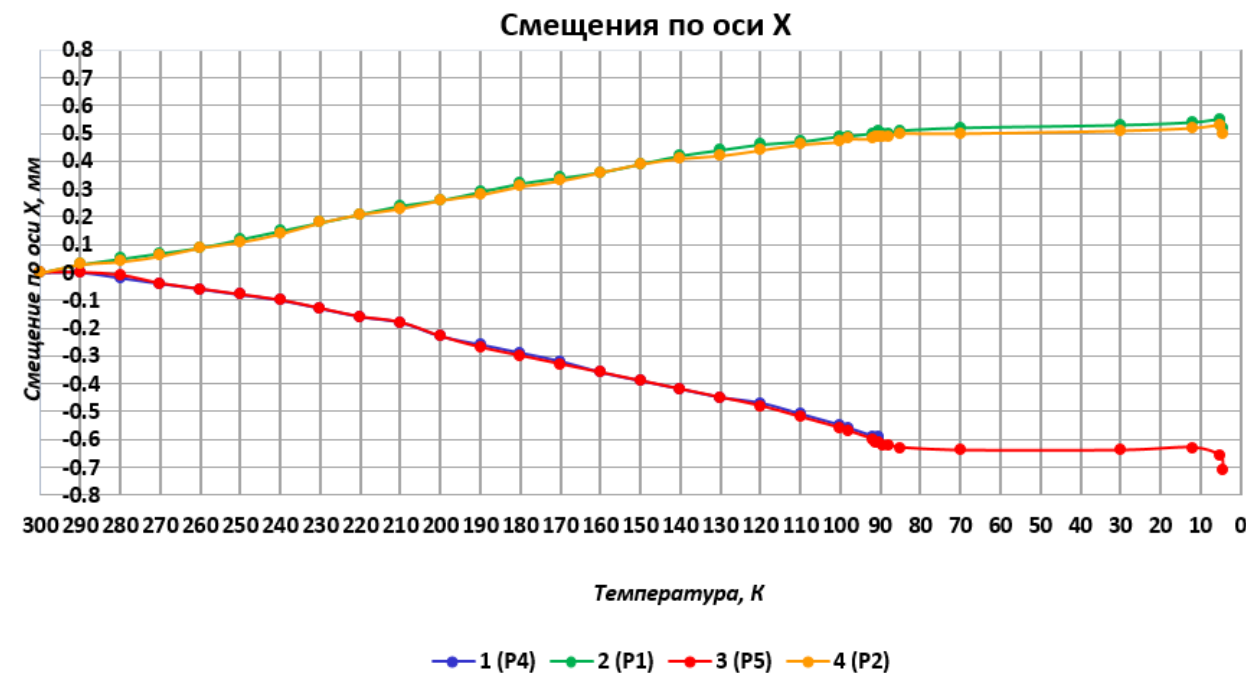
Смещения по оси Z



По оси Z: Все точки в результате охлаждения опустились на одинаковое значение **-0,7мм**, то есть перекоса в сторону токовводного криостата удалось избежать. При выставлении в горизонт в повторных испытаниях была поднята часть криостата с окошками до уровня криостата со стороны токовводного криостата. После отепления магнит вернулся в исходное положение с точностью **$\pm 0,03$ мм**.

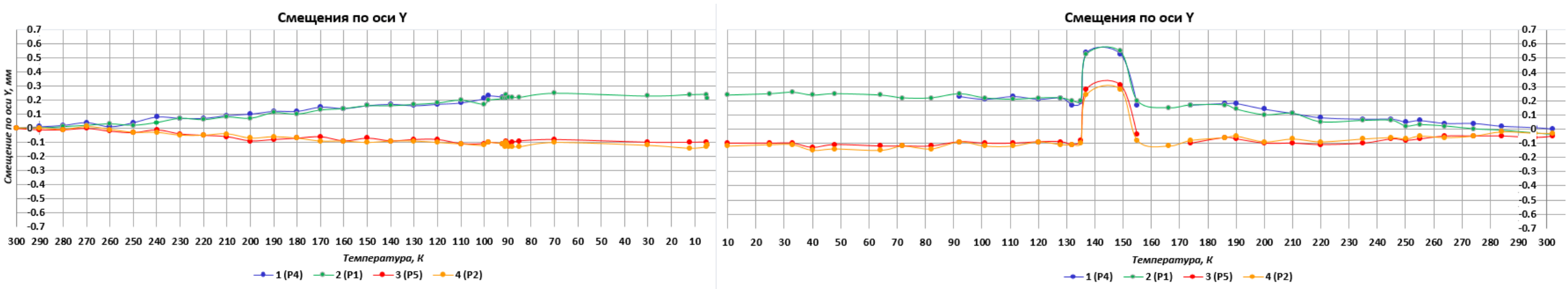
Линза Коллайдера

Смещения реперных точек ярма по оси X (вдоль пучка) в зависимости от температуры во время цикла охлаждения и отепления



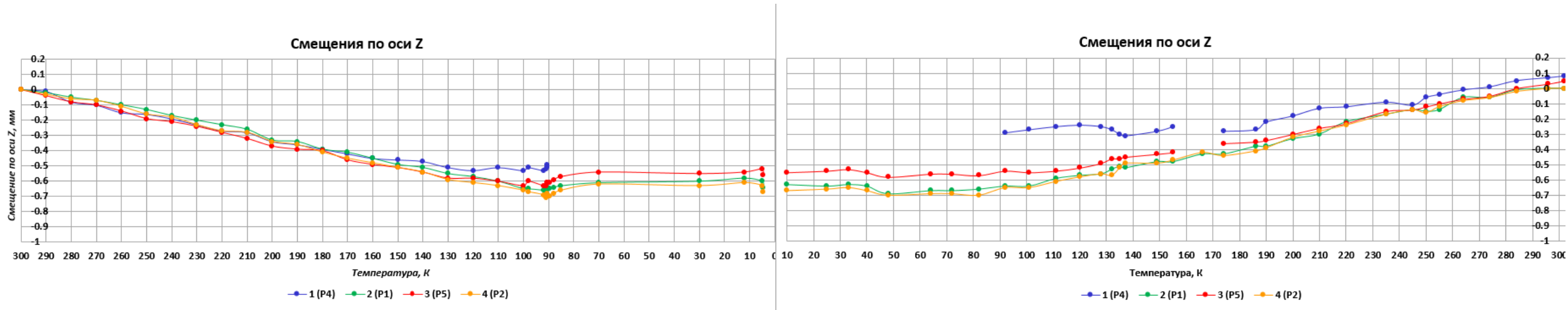
По оси X: Точки P1 и P2 смещаются по направлению оси +X, поэтому смещение с положительным значением. Точки P4 и P5 смещаются в противоположную сторону по отношению оси +X, поэтому смещение с отрицательным значением. Разность между этими точками показывает величину сближения реперных точек на ярме при охлаждении. После отепления магнит вернулся в исходное положение с точностью **0,05мм**.

Смещения реперных точек ярма по оси Y (вправо от пучка) в зависимости от температуры во время цикла охлаждения и отепления



По оси Y: 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 **+0,4мм**. В этот момент был отключен насос, отвечающий за вакуум в камерах. После возвращения насоса в рабочее состояние точки на ярме вернулись. После отепления все реперные точки вернулись в первоначальное положение с точностью **0,05мм**.

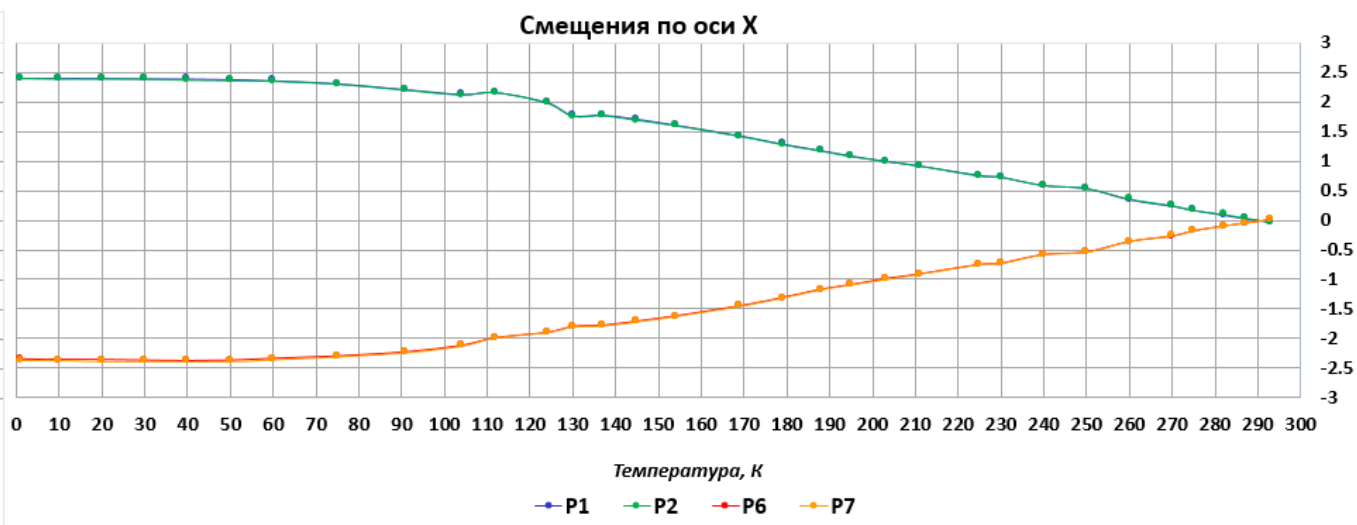
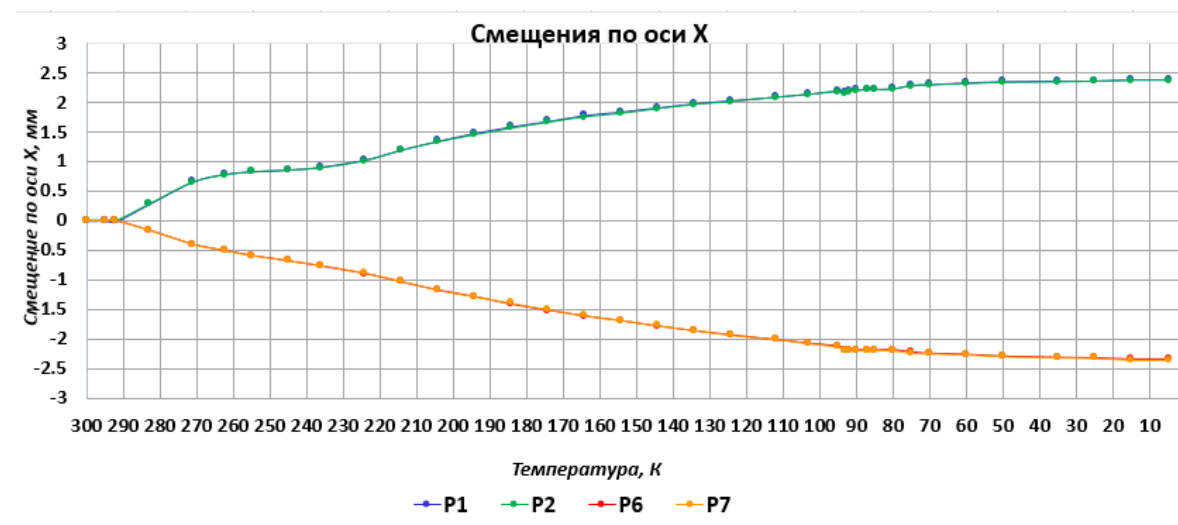
Смещения реперных точек ярма по оси Z (вверх от пучка) в зависимости от температуры во время цикла охлаждения и отепления



По оси Z: Точки на ярме опускались одинаково, а после 120К одна точка на ярме (P4) перестала опускаться и пропала видимость на эту точку. Все остальные точки после охлаждения азотных экранов поднялись на **0,1мм**, и вернулись после отепления ярма до 50К. Видимость на точку P4 появилась после отепления ярма до 90К, 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 **0,1мм** других точек. Точки P4 и P5 после отепления имели значение **+0,1мм** по оси Z.

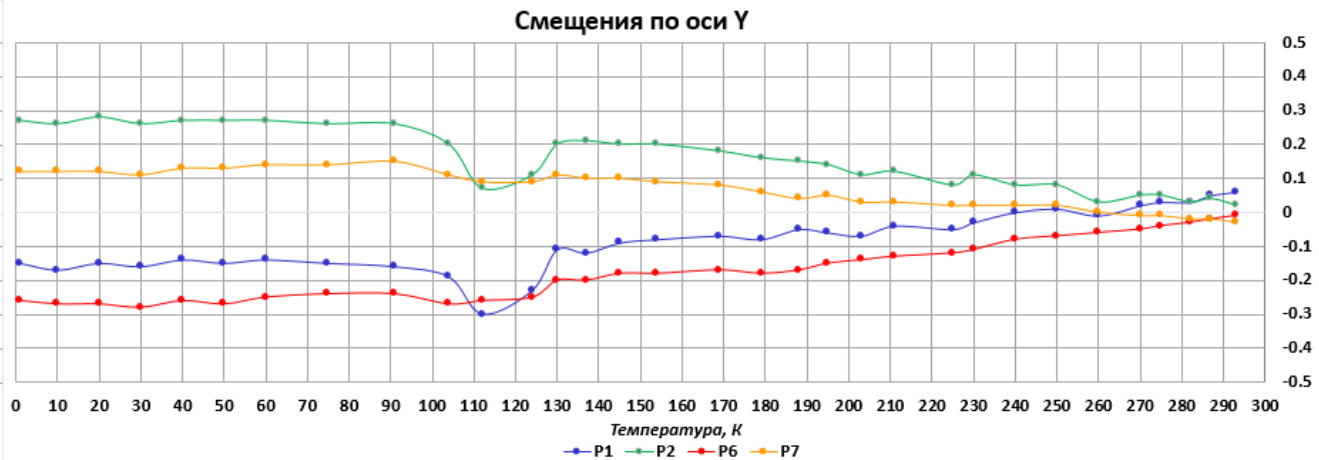
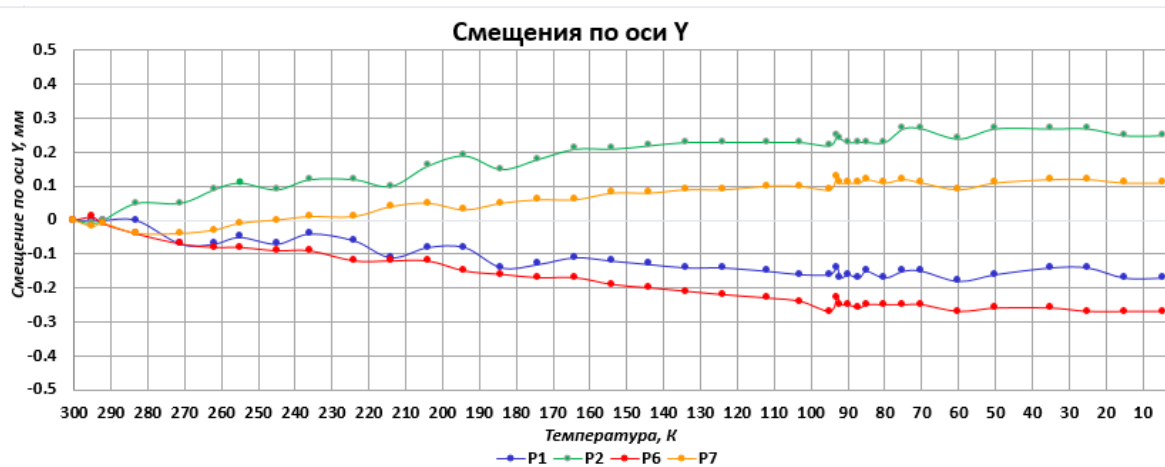
Блок линз Коллайдера

Смещения реперных точек ярма по оси X (вдоль пучка) в зависимости от температуры во время цикла охлаждения и отепления



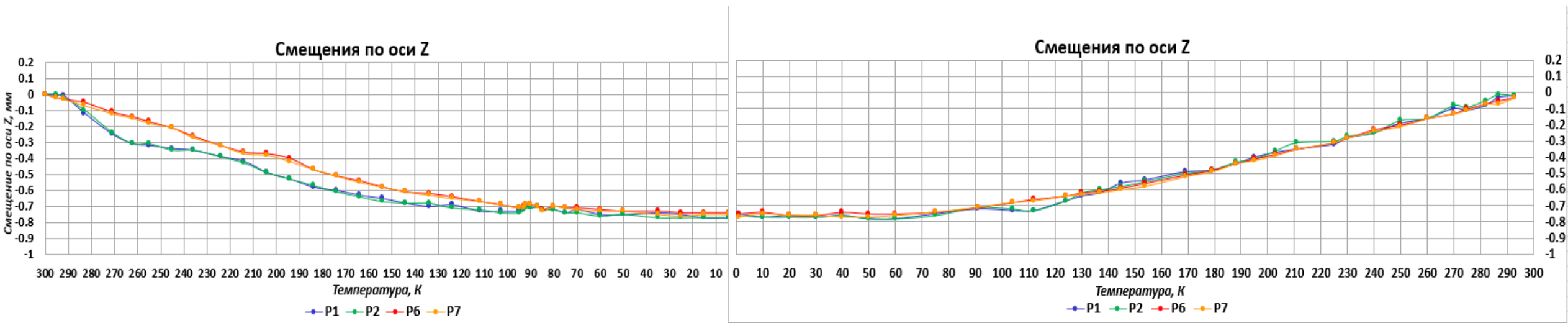
По оси X: Точки P1 и P2 смещаются по направлению оси +X, поэтому смещение с положительным значением. Точки P6 и P7 смещаются в противоположную сторону по отношению оси +X, поэтому смещение с отрицательным значением. Разность между этими точками показывает величину сближения реперных точек на ярме при охлаждении. После отепления все реперные точки вернулись в первоначальное положение с точностью **0,05мм**.

Смещения реперных точек ярма по оси Y (влево от пучка) в зависимости от температуры во время цикла охлаждения и отепления



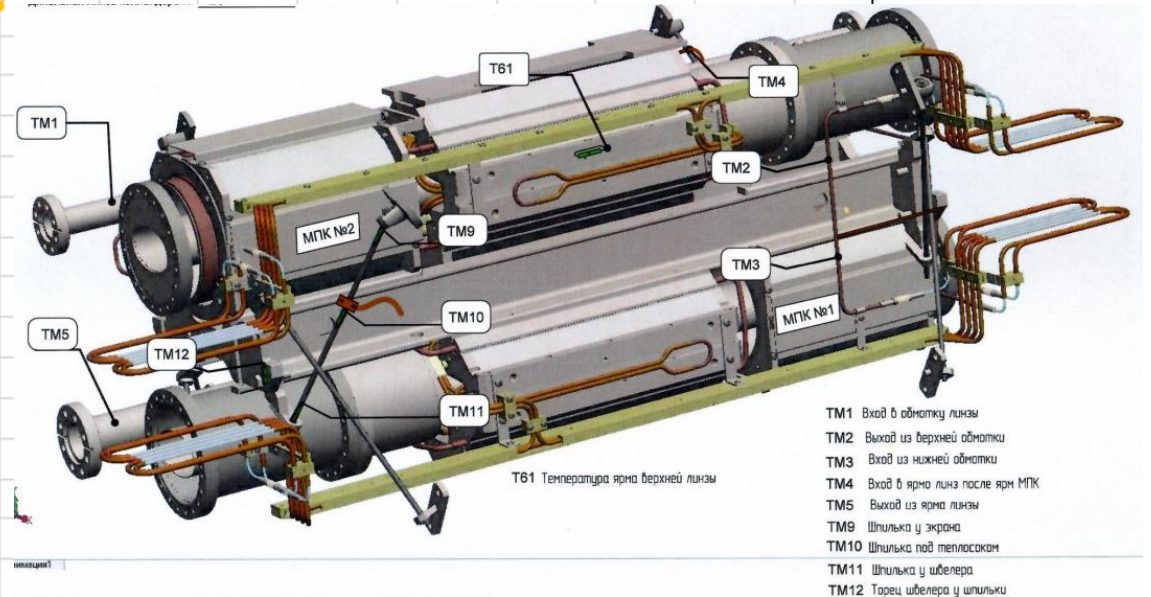
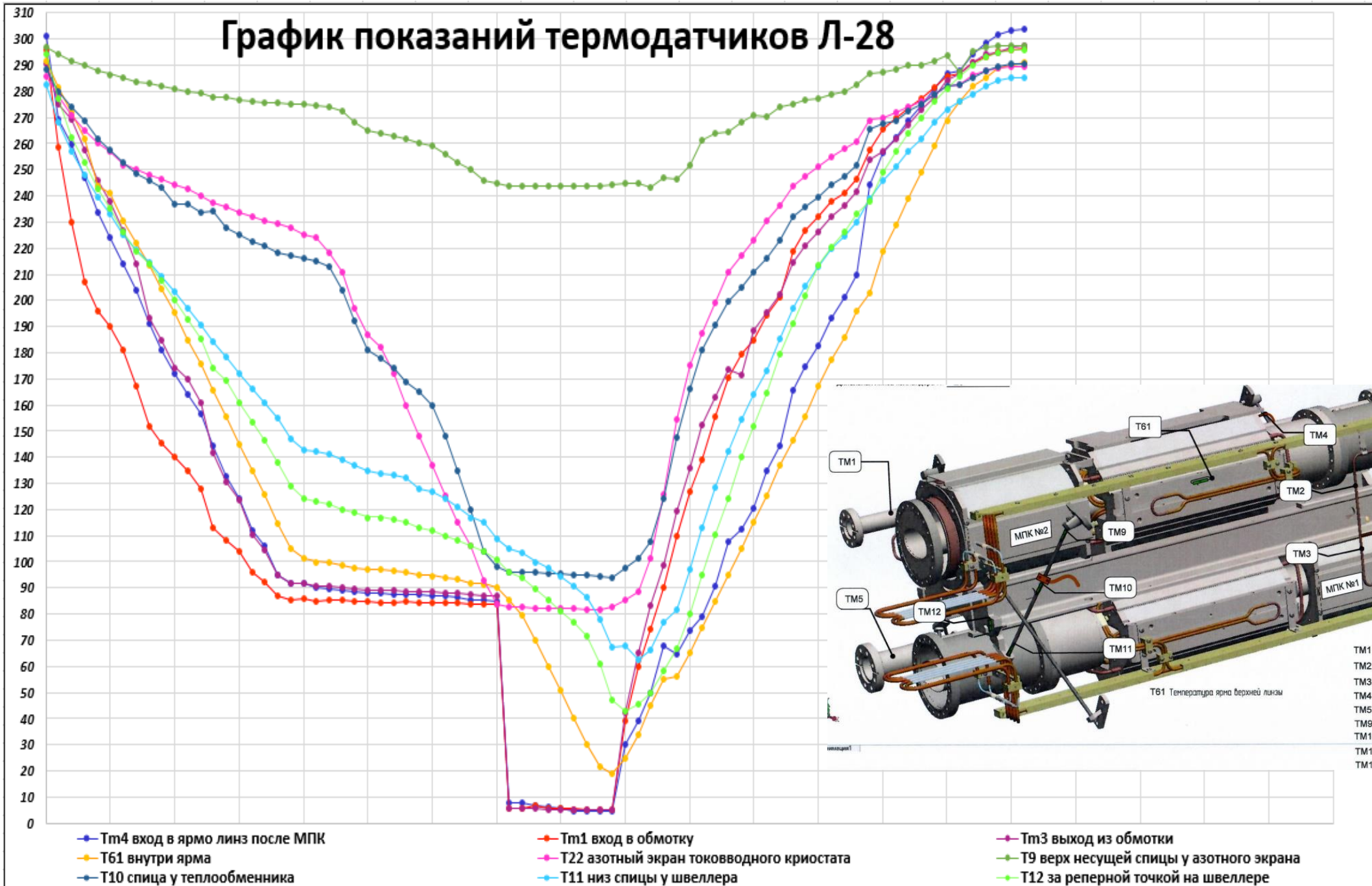
По оси Y: Точки на ярме P1 и P6 расположены с одной стороны по оси Y и должны располагаться рядом. Аналогичное расположение точек P2 и P7. После отепления все реперные точки вернулись в первоначальное положение с точностью **$\pm 0,05$ мм**.

Смещения реперных точек ярма по оси Z (вверх от пучка) в зависимости от температуры во время цикла охлаждения и отепления



По оси Z: До охлаждения азотных экранов (до 100К) точки P1 и P2 со стороны токовводного криостата при охлаждении опускались быстрее, чем точки P6 и P7, располагающиеся со стороны «окон». Разница составляла от **0,1мм** до **0,2мм**. Ярмо со стороны токовводного криостата охлаждалось быстрее. После охлаждения азотных экранов охлаждение ярма выравнивалось. После отепления все реперные точки вернулись в исходное положение.

График показаний термодатчиков Л-28



ВЫВОДЫ:

1. Экспериментально установлено, что первые два испытанных магнита (диполь и квадруполь Бустера) не вернулись в первоначальное положение после охлаждения и последующего отепления, и в итоге имели смещения в боковом направлении относительно орбиты пучка на величину **0,2мм**.
2. Наблюдаемое смещение происходило из-за того, что изначально ярмо магнита не занимало горизонтальное положение. Необходимо выполнять вывешивания магнита в криостате на спицах в горизонтальное положение с точностью не хуже, чем **0,2мм**.
3. На основании полученных результатов составлена методика вывешивания магнитов в криостате, которая применялась в дальнейшем при серийной сборке СП-магнитов.
4. Экспериментально установлено, что при соблюдении разработанной методики вывешивания магнитов при криогенных испытаниях (охлаждение - отепление) **ярмо магнита сохраняет** свое изначальное положение в криостате (с точностью **0,05мм**).
5. Подтверждена правильность конструкторских решений, выбранных для системы подвеса магнита в криостате.
6. На основании полученных экспериментальных данных разработан режим охлаждения, при котором ярмо магнита не изменяет своего положения в криостате при охлаждении/ отеплении: **на первом этапе охлаждается только ярмо до 90 К, на втором этапе охлаждается азотный экран до 90К, на третьем этапе происходит охлаждение от 90К до 4,5К Гелием.**