

УТВЕРЖДАЮ

Директор АО «ЦНИИСМ»

 А.Ф. Разин

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Технический отчет № 32/10-19  
по договору № 100-1631/717 от 03.04.2019 г.  
«Проектирование силового каркаса МРД»

Хотьково 2019

## Список исполнителей

Начальник отд. 10



А.Ф. Романов

Начальник отд. 104



А.Н. Палкин

Начальник сект. 911



В.В. Репинский

Инженер-конструктор II кат.



А.А. Кузьмин

## **Аннотация**

Настоящий отчет содержит результаты проработки конструктивно-технологической концепции композитного силового каркаса МРД.

## Содержание:

1	Исходные данные и технические требования, предъявляемые к силовому каркасу МРД.....	5
2	Проработка вариантов конструкции силового каркаса МРД, выбор конструктивной концепции .....	8
2.1.	Выбор конструктивной схемы каркаса .....	8
2.2.	Предварительный расчет силового каркаса, состоящего из внутренней и внешней сплошных композитных труб и перегородок.....	10
2.3	Предварительный расчет силового каркаса, состоящего из внутренней и внешней сетчатых композитных труб и перегородок .....	23
2.4	Анализ предварительных результатов и выбор варианта конструкции для дальнейшей проработки .....	28
3	Директивная технология изготовления элементов конструкции.....	32
4	Технико-экономическое обоснование работ.....	37

## **1 Исходные данные и технические требования, предъявляемые к силовому каркасу MPD**

Требования, предъявляемые к конструкции силового каркаса определены в Приложении №1 к договору № 100-1631/717 от 03.04.2019 г. между Объединенным институтом ядерных исследований и АО «ЦНИИСМ».

Композитный каркас MPD является силовой конструкцией и служит основой для установки модулей детекторов.

К композитному каркасу предъявляются следующие основные требования:

1. Каркас должен обеспечивать размещение и закрепление всех детекторных систем MPD (50 полусекторов ECAL, TOP, TPC, CPC-трекеров, Straw EC-трекеров) общим весом около 94 тонн. Для этого в каркасе должны быть предусмотрены соответствующие посадочные места и обеспечена необходимая прочность, жёсткость и устойчивость.
2. Полусектора ECAL должны устанавливаться в силовой каркас при помощи специальных приспособлений и быть надёжно закреплены в нем при любой ориентации полусектора в пространстве. Жёсткость каркаса должна обеспечивать прогибы не более 0,5 мм (при полной нагрузке каркаса) и быть достаточной для исключения вероятности заклинивания полусекторов ECAL в процессе установки.
3. Должны быть использованы только немагнитные материалы. Использование нержавеющей стали не допускается. Желательно использование токопроводящих материалов (для снятия статического заряда). Предпочтение отдается использованию углепластика, латуни и алюминиевым сплавам.
4. Конструкция силового каркаса должна позволять его эксплуатацию в температурном диапазоне от 15 до 40 °С.
5. Масса каркаса должна быть минимальной.

Общий вид МРД приведен на Рис. 1.1. Состав и габаритные размеры силового каркаса приведены на Рис. 1.2.

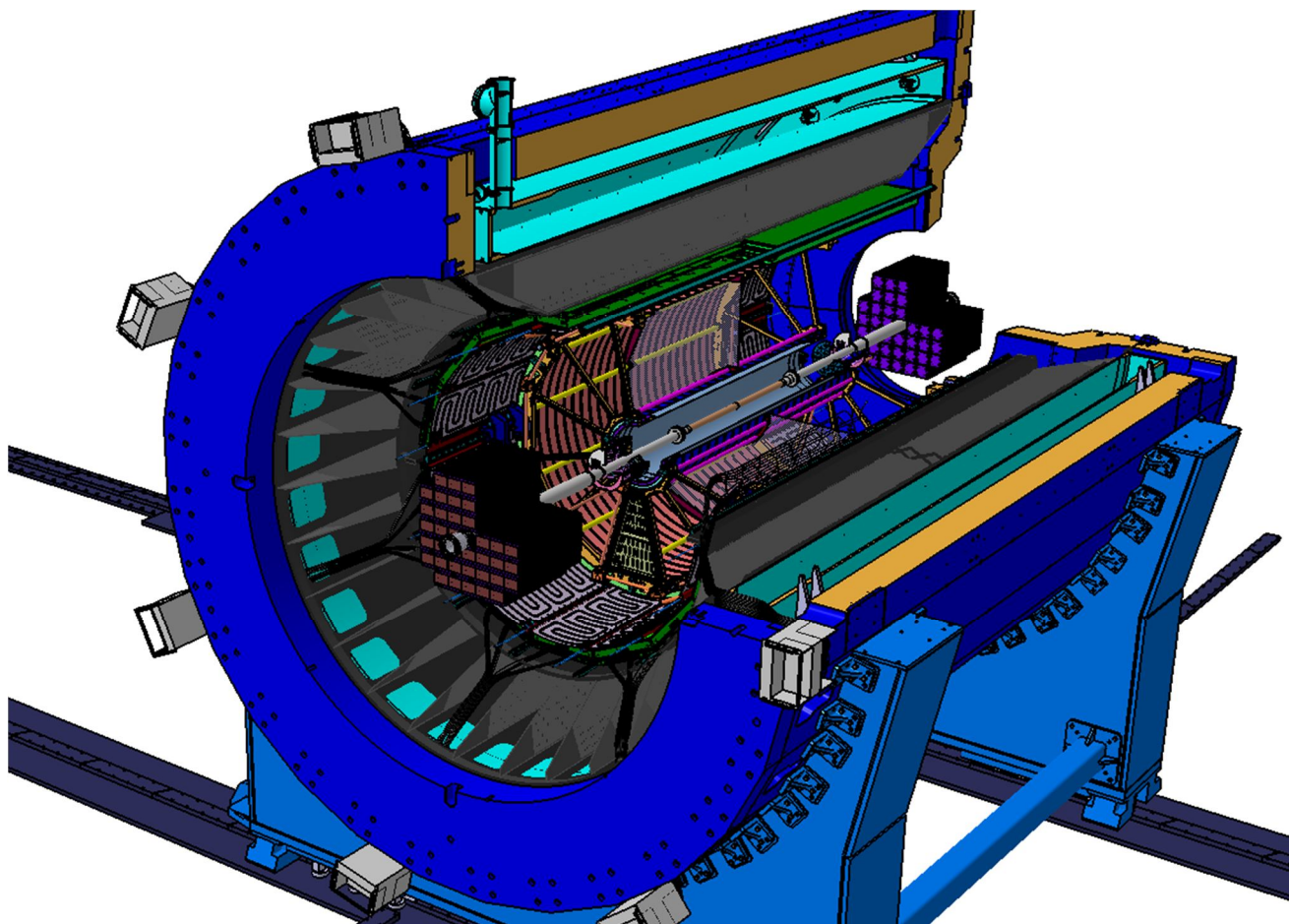


Рисунок 1.1. Общий вид МРД

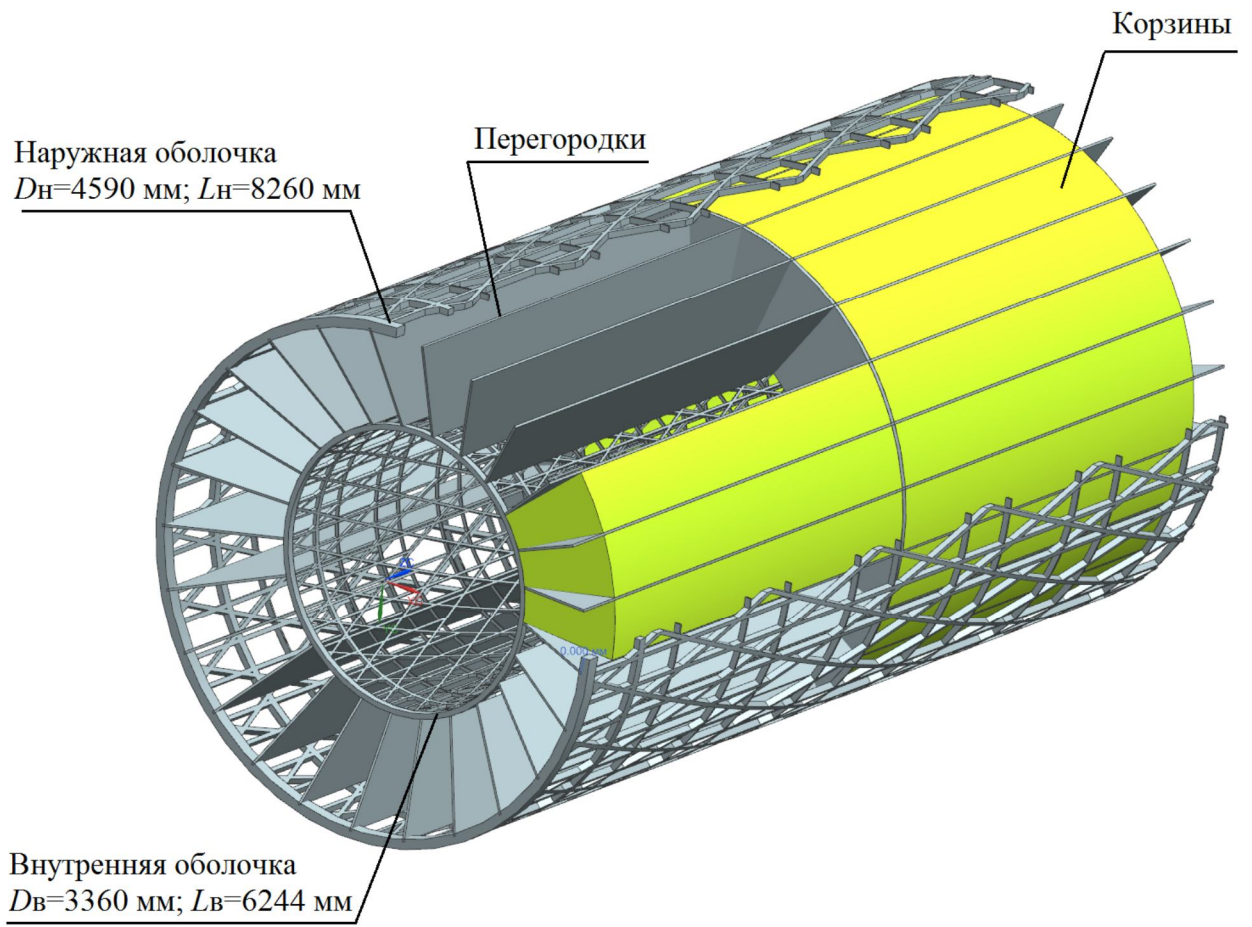


Рисунок 1.2. Состав и габаритные размеры силового каркаса МРД

## **2 Проработка вариантов конструкции силового каркаса МРД, выбор конструктивной концепции**

### **2.1. Выбор конструктивной схемы каркаса**

В ходе проработки конструкции было рассмотрено несколько вариантов силового каркаса МРД.

С точки зрения конструктивного членения каркаса возможны следующие варианты:

а) каркас состоит из наружной трубы, внутренней трубы и 25 перегородок (рисунок 2.1а);

б) каркас состоит из внутренней трубы и 25 трапециевидных коробов (рисунок 2.1б)

в) каркас полностью составляется из 25 коробов и не включает в себя трубы (рисунок 2.1в);

г) каркас состоит из внутренней трубы и 25 угловых профилей (рисунок 2.1г)

д) каркас состоит из внутренней трубы, наружной трубы и 25 тонкостенных трапециевидных коробов (итоговая структура аналогична варианту 1, изображенному на рисунке 2.1а).

Критериями для выбора варианта является, с одной стороны, простота изготовления, с другой – возможность обеспечения требуемых прочностных и жесткостных характеристик конструкции.

Наиболее простым с точки зрения номенклатуры отдельных элементов и возможности их изготовления отдельных элементов является вариант (в), однако, для данного варианта обеспечение требуемых жесткостных характеристик представляется наиболее сложной задачей в силу отсутствия интегральных труб, обладающих высокой жесткостью и наличия большого



количества соединений. Кроме того, данный вариант конструкции предполагает достаточно сложный процесс сборки.

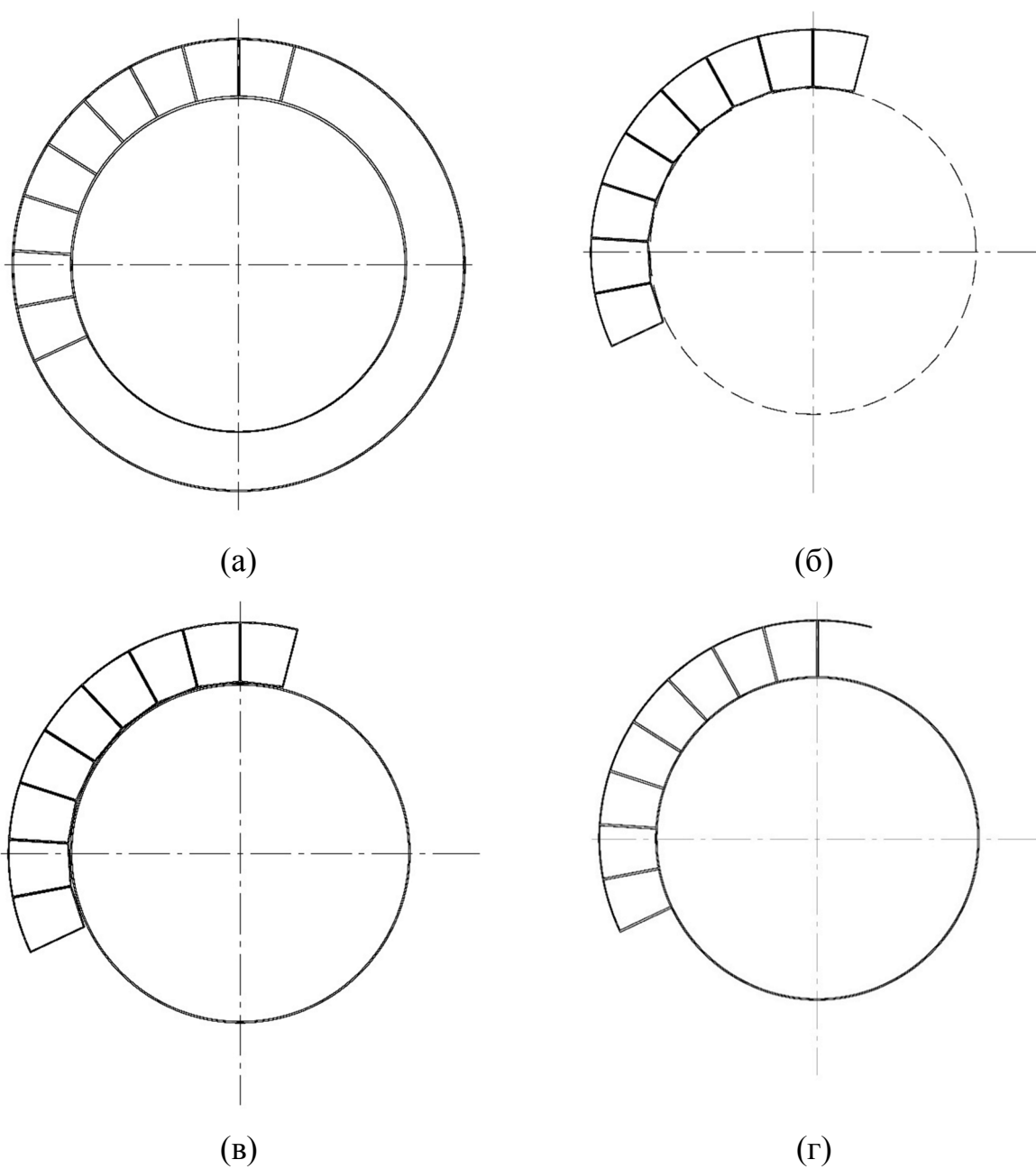


Рисунок 2.1. Варианты конструкции силового каркаса MPD

Варианты (б) и (в) похожи, и среди них более предпочтительным является вариант (б), так как содержит меньшее количество соединений, снижающих жесткость конструкции.

Варианты (а) и (д) являются наиболее предпочтительными с точки зрения прочностных и жесткостных характеристик получаемого изделия при умеренной сложности изготовления и сборки. В связи с этим данные варианты были выбраны для дальнейшей проработки.

Помимо состава каркаса в процессе его проектирования необходимо выбрать конструктивную схему труб и корзин. Возможны 2 варианта – сетчатая композитная конструкция и сплошная тонкостенная конструкция из композитного материала. В первом случае нагрузка воспринимается однонаправленными спиральными и кольцевыми ребрами, во втором – сплошной многослойной обшивкой, в которой слои материала могут быть уложены под различными углами к образующей конструкции.

Для сравнения этих двух конструктивных схем был проведен расчет конструкции методом конечных элементов.

## 2.2 Предварительный расчет силового каркаса, состоящего из внутренней и внешней сплошных композитных труб и перегородок

Рассмотрим силовой каркас, состоящий состоит из внутренней и наружной сплошных цилиндрических оболочек и расположенных между ними 25 шт. перегородок. Перегородки равномерно распределены по диаметру. Между перегородками должны размещаться 50 полусекторов ЕСАЛ.

Оболочки и перегородки выполнены из углепластика на основе ткани УТ-900, пропитанной связующим ЭХД-У.

На внутренней поверхности внутренней оболочки, вдоль образующей, установлены рельсы ТРС (2 шт.) и ТОФ (14 шт.). Геометрические параметры несущих элементов конструкции приведены в таблице 2.1

Таблица 2.1. Геометрические параметры элементов конструкции

	Наименование параметра	Значение		
1	Внутренний диаметр внутренней оболочки $D_B$ , мм	3360		
2	Длина внутренней оболочки $L_B$ , мм	6244		
3	Толщина внутренней оболочки $h_B$ , мм	32		
4	Наружный диаметр наружной оболочки $D_H$ , мм	4586		
5	Длина наружной оболочки $L_H$ , мм	8260		
6	Толщина наружной оболочки $h_H$ , мм	15		
7	Толщина перегородок $h_{п}$ , мм	10	15	20

Согласно заданным требованиям в силовом каркасе должны размещаться и закрепляться детекторные системы общим весом около 94 т, из них:

- 5 т действует на рельсы ТРС на центральном участке внутренней оболочки длиной 4300 мм;
- 0,25 т приходится на каждую рельсу ТОФ, по всей длине;
- 85,5 т приходится на оболочки от 50 полусекторов ЕСАЛ.

Жесткость каркаса должна обеспечивать прогиб не более 0,5 мм (при полной нагрузке каркаса).

Физико-механические характеристики углепластика на основе углеродной ткани УТ-900-3-240-ЭД, пропитанной связующим ЭХД-У, служащего для изготовления элементов каркаса, приведены в таблице 2.2.

В расчете принято, что в оболочках ткань УТ-900 ориентирована основой в окружном направлении, утком – в продольном.

В перегородках рассматривались два варианта схем армирования:

$$1) \underbrace{I \dots I}_{40};$$

$$2) \underbrace{IXI \dots IXI}_{10};$$

$$3) \underbrace{X \dots X}_{20},$$

где I – основа ткани направлена по высоте перегородки, уток – по ее длине;  
X – ориентация ткани под углом  $\varphi = \pm 45^\circ$ .

Таблица 2.2. Физико-механические характеристики углепластика на основе углеродной ткани УТ-900-3-240-ЭД, пропитанной связующим ЭХД-У

Наименование характеристики		Значение
Модуль упругости вдоль основы $E_1$ , (кгс/мм <sup>2</sup> )		6449
Модуль упругости вдоль утка $E_2$ , (кгс/мм <sup>2</sup> )		5437
Модуль сдвига в плоскости армирования $G$ , (кгс/мм <sup>2</sup> )		400
Коэффициент Пуассона	$\mu_{12}$	0,15
	$\mu_{21}$	0,13

Расчет проведен численным методом. Вид конечно-элементной модели (КЭМ) приведен на рисунке 2.2.

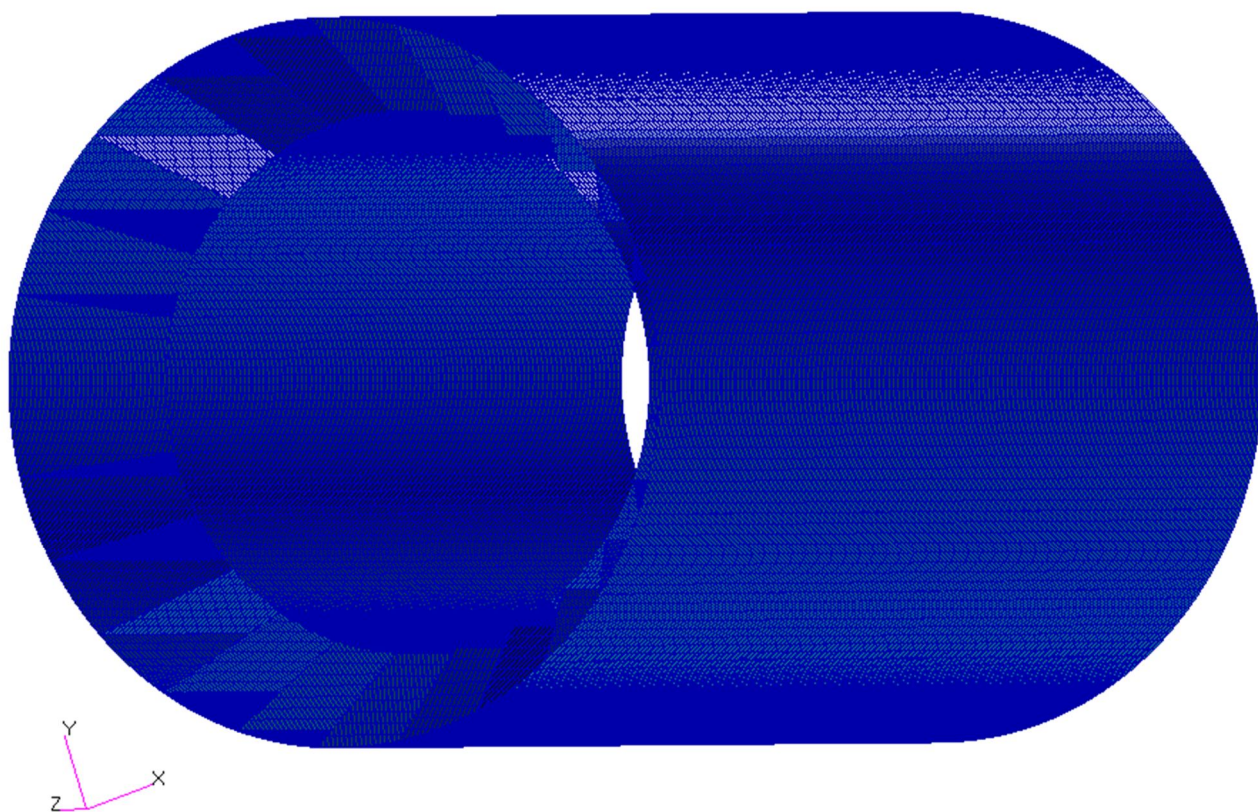


Рисунок 2.2 – Общий вид КЭМ

В узлах торцевых поверхностей наружной оболочки задавались кинематические граничные условия, соответствующие шарнирному опиранию.

Схема нагружения каркаса от ТРС (5 т) на центральном участке внутренней оболочки длиной 4300 мм представлена на рисунке 2.3

Схема нагружения каркаса через ТОФ (0,25 т) проиллюстрирована на рисунке 2.4, от 50 полусекторов ЕСАL – на рисунке 2.5.

Результаты расчета приведены в таблице 2.3

Деформированное состояние модели проиллюстрировано на рисунке 2.6, форма потери устойчивости модели – на рисунке 2.7.

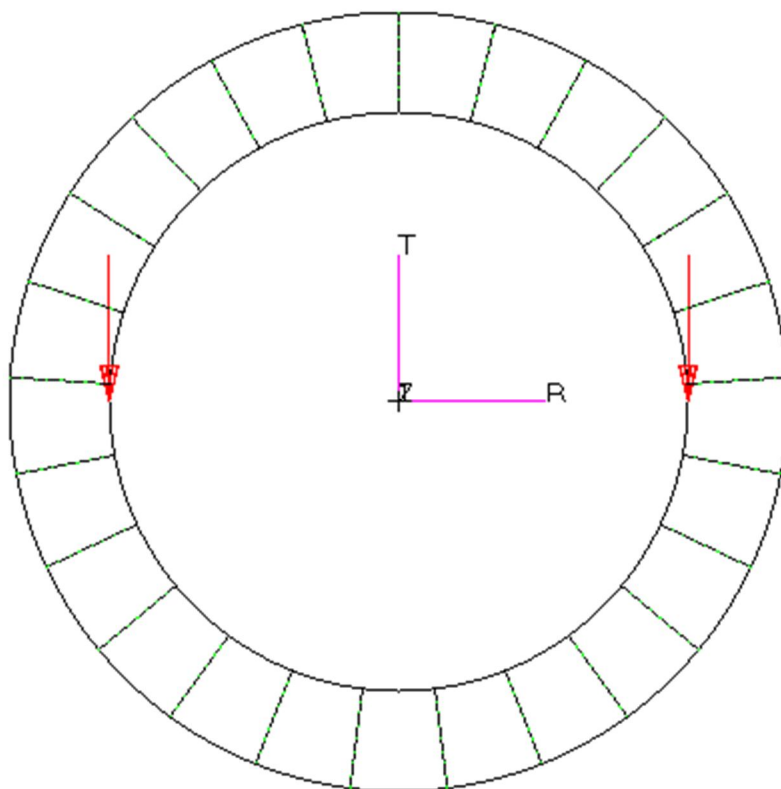


Рисунок 2.3. Схема нагружения каркаса от ТРС (5 т)

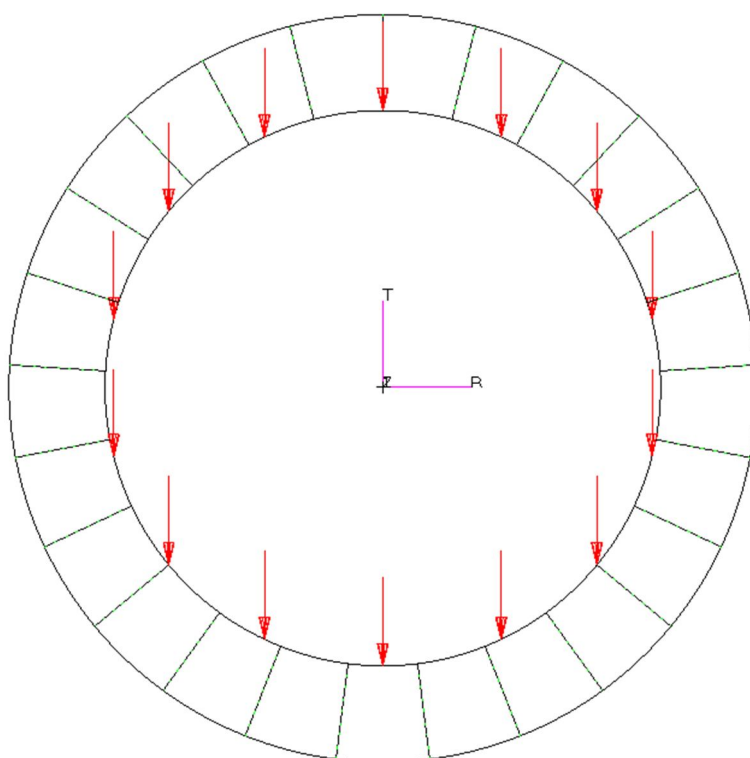


Рисунок 2.4. Схема нагружения каркаса через ТОФ (0,25 т)

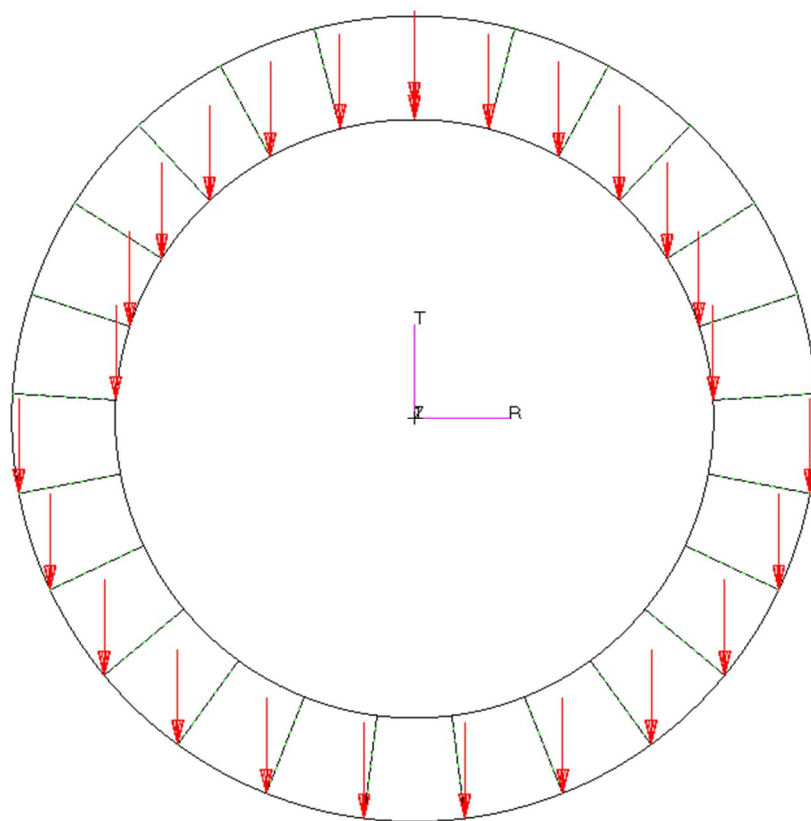


Рисунок 2.5. Схема нагружения каркаса от 50 полусекторов ECAL

Таблица 2.3 Результаты расчета силового каркаса их сплошных элементов

Параметры	Вариант исполнения перегородок						
	1			2			3
Толщина перегородки $h_{п}$ , мм	10	15	20	10	15	20	10
Максимальное перемещение $w$ , мм	1,74	1,66	1,59	1,57/1,49*/1,41**	1,48	1,42	1,59
Запас по устойчивости $\eta_{уст}$	7,4	17,8	31,0	5,04	12,8	20,6	-
Максимальные напряжения: Внутренняя оболочка							
основа	-0,9...+1,1	-0,9...+1,1	-0,9...+1,1	-1,1...+1,4	-1,1...+1,4	-1,1...+1,4	-1,2...+1,5
уток	-0,2...+0,3	-0,2...+0,3	-0,2...+0,2	-0,2...+0,3	-0,2...+0,3	-0,2...+0,3	-0,3...+0,3
Наружная оболочка							
основа	-1,1...+1,1	-1,0...+1,1	-1,0...+1,1	-1,5...+1,5	-1,5...+1,5	-1,4...+1,4	-1,7...+1,7
уток	-1,4...+1,4	-1,8...+1,9	-2,2...+2,3	-2,3...+2,4	-2,8...+2,9	-3,2...+3,4	-1,9...+1,9
Перегородки							
основа	-0,9...+1,0	-0,9...+0,9	-0,9...+0,9	-5,5...+5,5	-6,3...+6,3	-6,6...+6,7	-1,9...+1,9
уток	-1,6...+1,5	-1,8...+1,9	-2,2...+2,3	-4,6...+4,6	-5,2...+5,3	-5,5...+5,6	-1,6...+1,6
* - В варианте 2, в перегородках увеличен модуль упругости ( $E_1=9675$ кгс/мм <sup>2</sup> , $E_2=8156$ кгс/мм <sup>2</sup> )							
**- Схема армирования внутренней оболочки IXI							



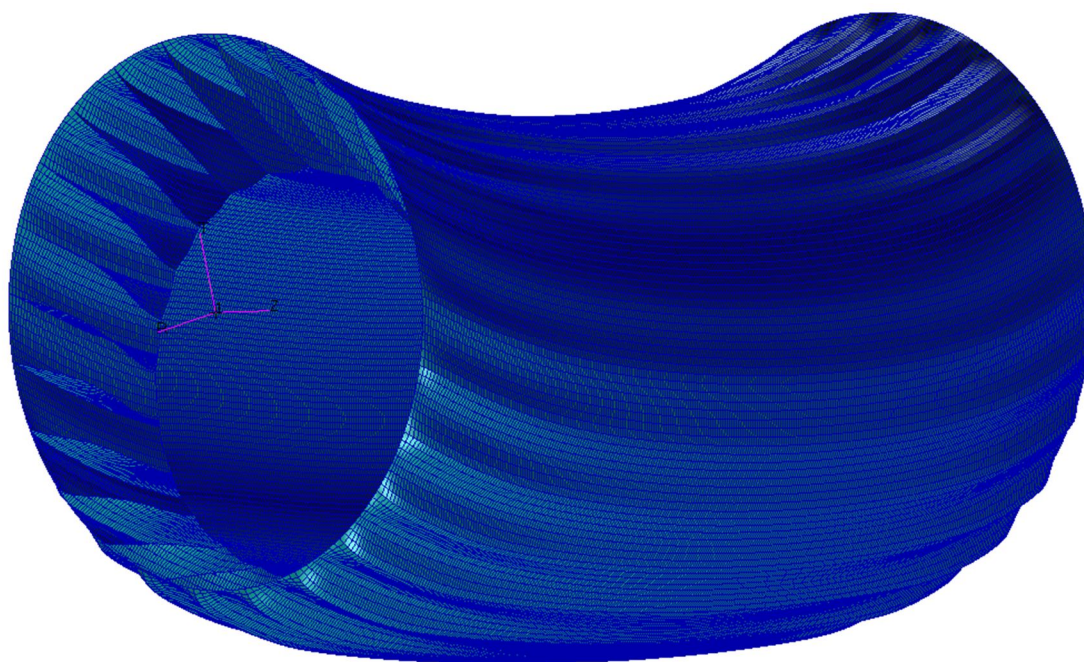


Рисунок 2.6. Деформированное состояние модели

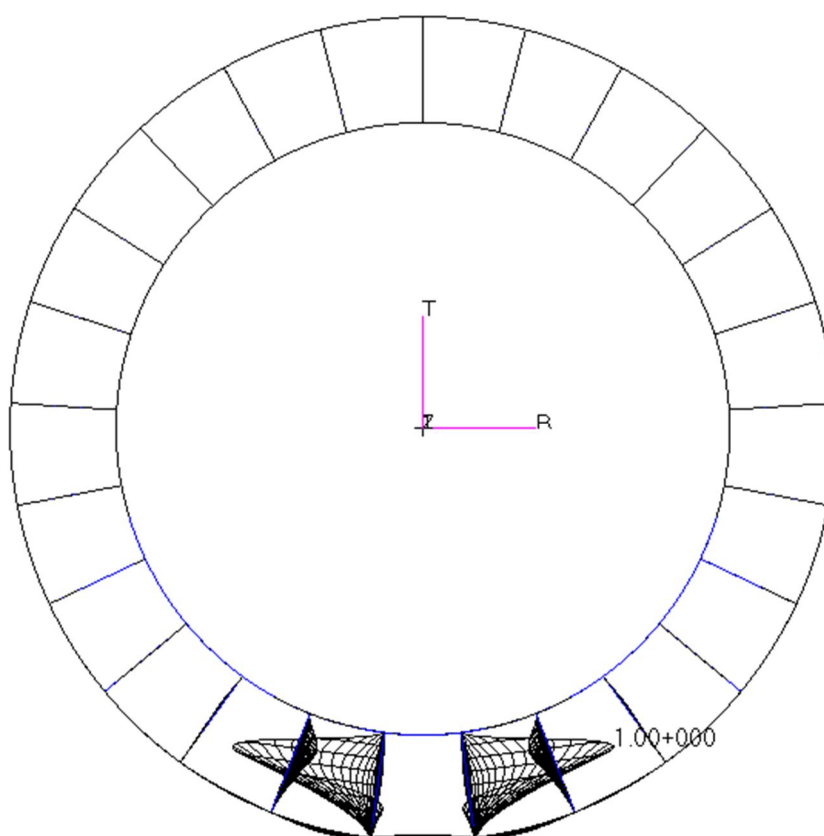


Рисунок 2.7. Форма потери устойчивости силового каркаса

На рисунках 2.8-2.10 представлено деформированное состояние модели в поперечных и продольном сечениях.

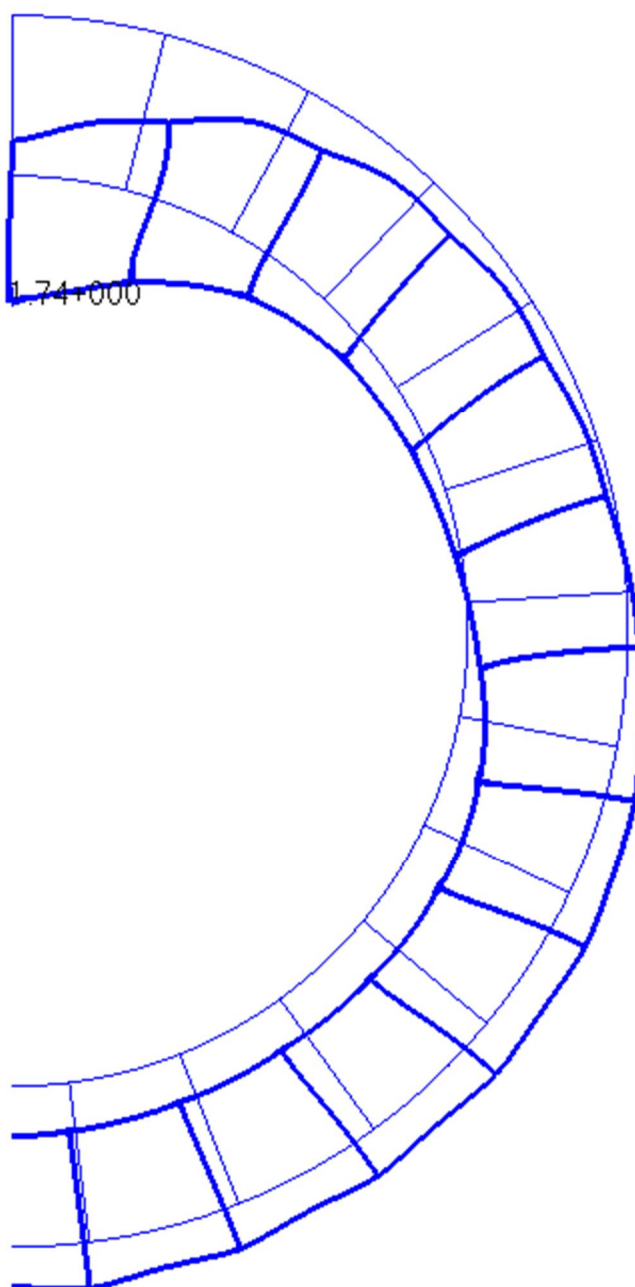


Рисунок 2.8 – Характер деформирования модели в поперечном направлении (1/2L силового каркаса)

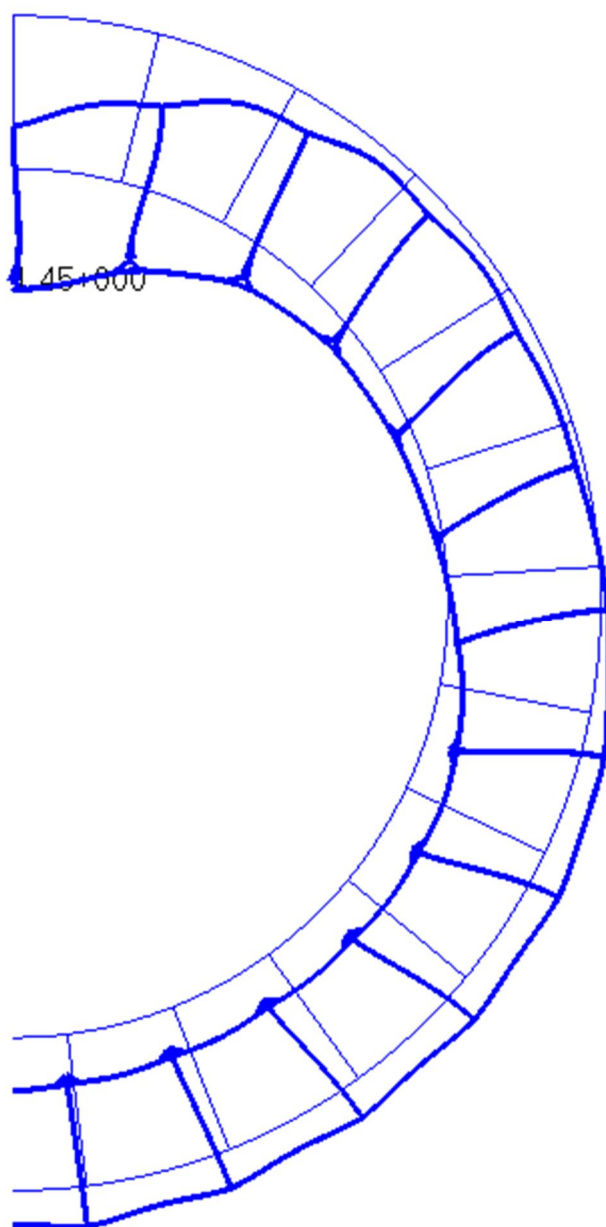
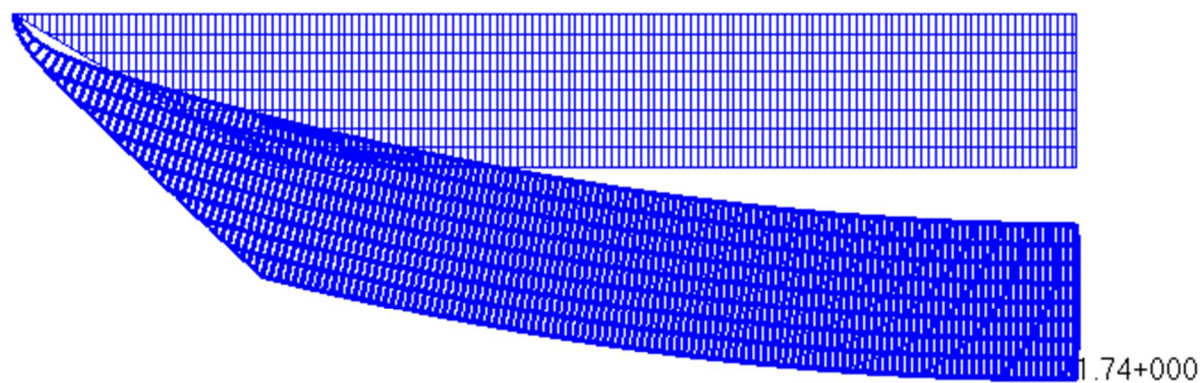


Рисунок 2.9 – Характер деформирования модели в поперечном направлении  
(1/4L силового каркаса)



+

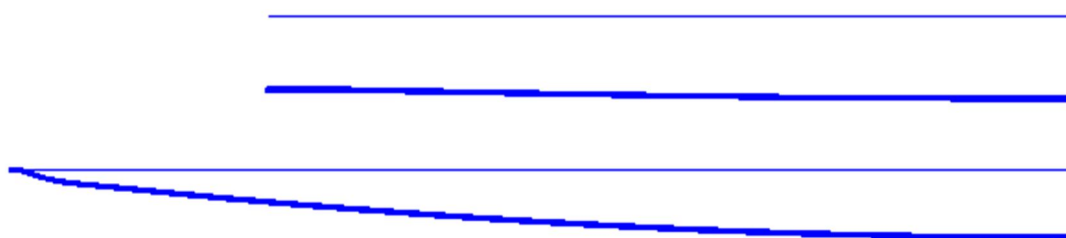


Рисунок 2.10 – Центральное сечение модели в продольном направлении

Для оценки степени деформации поперечных сечений секторов в таблице 2.4 приведены смещения угловых точек секторов относительно левых нижних угловых точек в центральном сечении (рисунок 2.8).

Нумерация секторов, угловых точек секторов и направление осей приведены на рисунке 2.11.

Таблица 2.4. Смещения угловых точек секторов относительно левых нижних угловых точек в центральном сечении

№ точки	Сектор 1		№ точки	Сектор 2		№ точки	Сектор 3	
	$\Delta x$ , мм	$\Delta y$ , мм		$\Delta x$ , мм	$\Delta y$ , мм		$\Delta x$ , мм	$\Delta y$ , мм
1	0.0	0.0	2	0.0	0.0	3	0.0	0.0
14	0.0	0.0265	15	-0.0117	0.0337	16	-0.0303	0.0572
15	0.0534	0.5412	16	0.1140	0.4252	17	0.0075	0.1487
6								
2	0.0651	0.5075	3	0.1443	0.3680	4	0.0461	0.0453
2								

№ точки	Сектор 4		№ точки	Сектор 5		№ точки	Сектор 6	
	$\Delta x$ , мм	$\Delta y$ , мм		$\Delta x$ , мм	$\Delta y$ , мм		$\Delta x$ , мм	$\Delta y$ , мм
4	0.0	0.0	5	0.0	0.0	6	0.0	0.0
17	-0.0386	0.1034	18	-0.0335	0.1293	19	-0.0493	0.1625
18	-0.0985	0.0750	19	-0.0766	0.1180	20	0.0079	0.1756
5	-0.0651	-0.0543	6	-0.0274	-0.0445	7	0.0219	0.0031

№ точки	Сектор 7		№ точки	Сектор 8		№ точки	Сектор 9	
	$\Delta x$ , мм	$\Delta y$ , мм		$\Delta x$ , мм	$\Delta y$ , мм		$\Delta x$ , мм	$\Delta y$ , мм
7	0.0	0.0	8	0.0	0.0	9	0.0	0.0
20	-0.0140	0.1725	21	0.0166	0.1288	22	0.0371	0.1031
21	0.0601	0.1647	22	-0.0126	0.1328	23	-0.0505	0.1460
8	0.0435	0.0359	9	-0.0497	0.0298	10	-0.0781	0.0727

№ точки	Сектор 11		№ точки	Сектор 12		№ точки	Сектор 13	
	$\Delta x$ , мм	$\Delta y$ , мм		$\Delta x$ , мм	$\Delta y$ , мм		$\Delta x$ , мм	$\Delta y$ , мм
10	0.0	0.0	11	0.0	0.0	12	0.0	0.0
23	0.0276	0.0733	24	0.0337	0.0466	25	0.0318	0.0424
24	-0.0475	0.1334	25	0.0037	0.0690	26	0.0173	0.0298
11	-0.0812	0.0869	12	-0.0282	0.0266	13	0.0064	0.0166

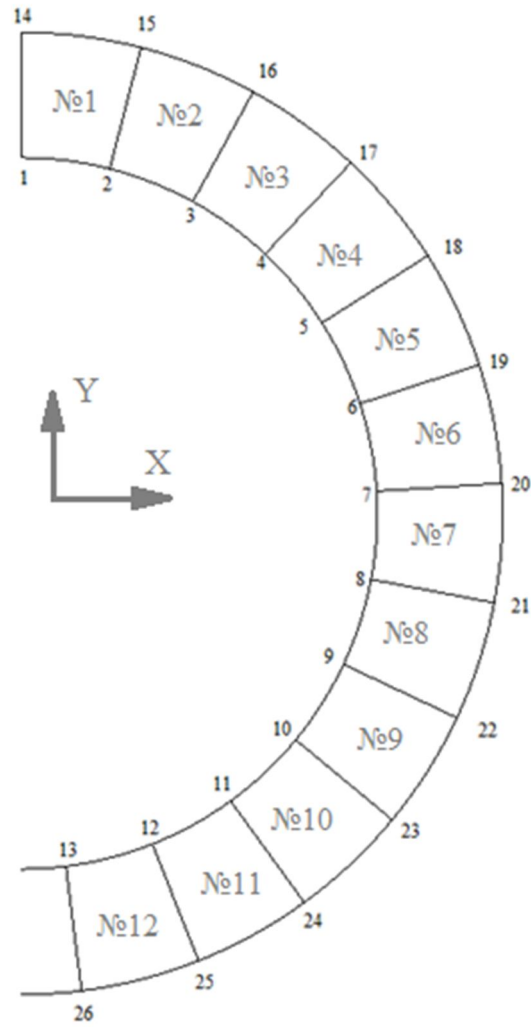


Рисунок 2.11 – Нумерация секторов, угловых точек секторов и направление осей

## 2.3 Предварительный расчет силового каркаса, состоящего из внутренней и внешней сетчатых композитных труб и перегородок

Рассмотрим теперь силовой каркас, состоящей из внутренней и наружной сетчатых цилиндрических оболочек. Перегородки равномерно распределены по окружности. Между перегородками должны размещаться 50 полусекторов ЕСАЛ.

Внутренняя и внешняя оболочка представляют собой цилиндрические оболочки из композиционных материалов с сетчатой структурой, образованной спиральными и кольцевыми ребрами. Ребра выполнены из однонаправленного углепластика на основе нити УКН-М-6К-1-7-380 ЭД ТУ 1916-146-05763346-96, пропитанной связующим ЭХД-МД ТУ ВЗ-734-2013.

Параметры сетчатой структуры приведены в таблице 2.5 и на рисунке 2.12.

Таблица 2.5. Параметры сетчатой структуры внутренней и внешней оболочек

Параметры ребра	Спиральные ребра	Кольцевые ребра
Высота ребра $h$ , мм	30	30
Ширина ребра $\delta$ , мм	10	5
Угол наклона ребра к образующей, °	30	90

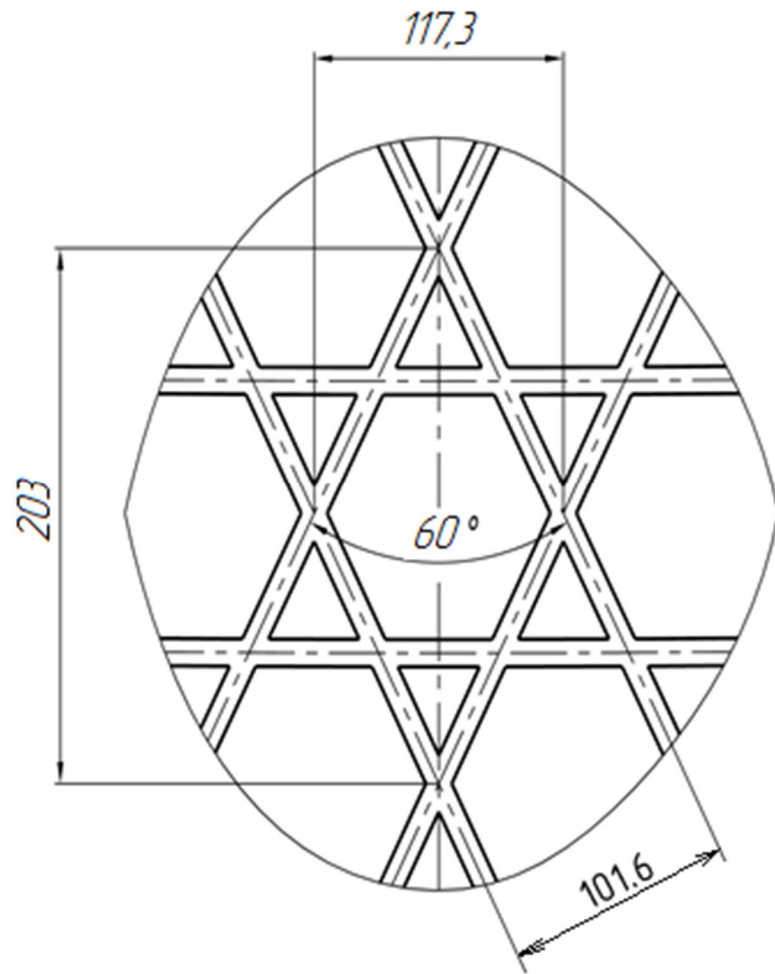


Рисунок 2.12. Параметры сетчатой структуры  
внутренней и внешней оболочек



Перегородки выполнены из углепластика на основе ткани УТ-900, пропитанной связующим ЭХД-У.

На внутренней поверхности внутренней оболочки, вдоль образующей, установлены рельсы ТРС (2 шт.) и ТОФ (14 шт.).

Механические характеристики однонаправленного материала ребер сетчатой структуры, использованные при расчете, приведены в таблице 2.6.

При расчете использовалась континуальная модель сетчатой структуры, т.е. структура, состоящая из ребер, моделировалась условно сплошной оболочкой, обладающей эффективными жесткостными характеристиками, соответствующими жесткостным характеристикам системы ребер.

Таблица 2.6. Механические характеристики однонаправленного материала ребер сетчатой структуры

Наименование характеристики		Значение
Модуль упругости при растяжении в направлении армирования $E_1$ , МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )		88290 (9000)
Модуль упругости при растяжении в трансверсальном направлении $E_2$ , МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )		6376,5 (650)
Модуль сдвига в плоскости слоя $G_{12}$ , МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )		3434 (350)
Коэффициент Пуассона	$\mu_{12}$	0,2
	$\mu_{21}$	0,014
Плотность $\rho$ , кг/мм <sup>3</sup>		$1,5 \cdot 10^{-6}$

Деформированное состояние конструкции под действием нагрузки от 50 полусекторов ЕСАL (рисунок 2.5) показано на рисунке 2.14.

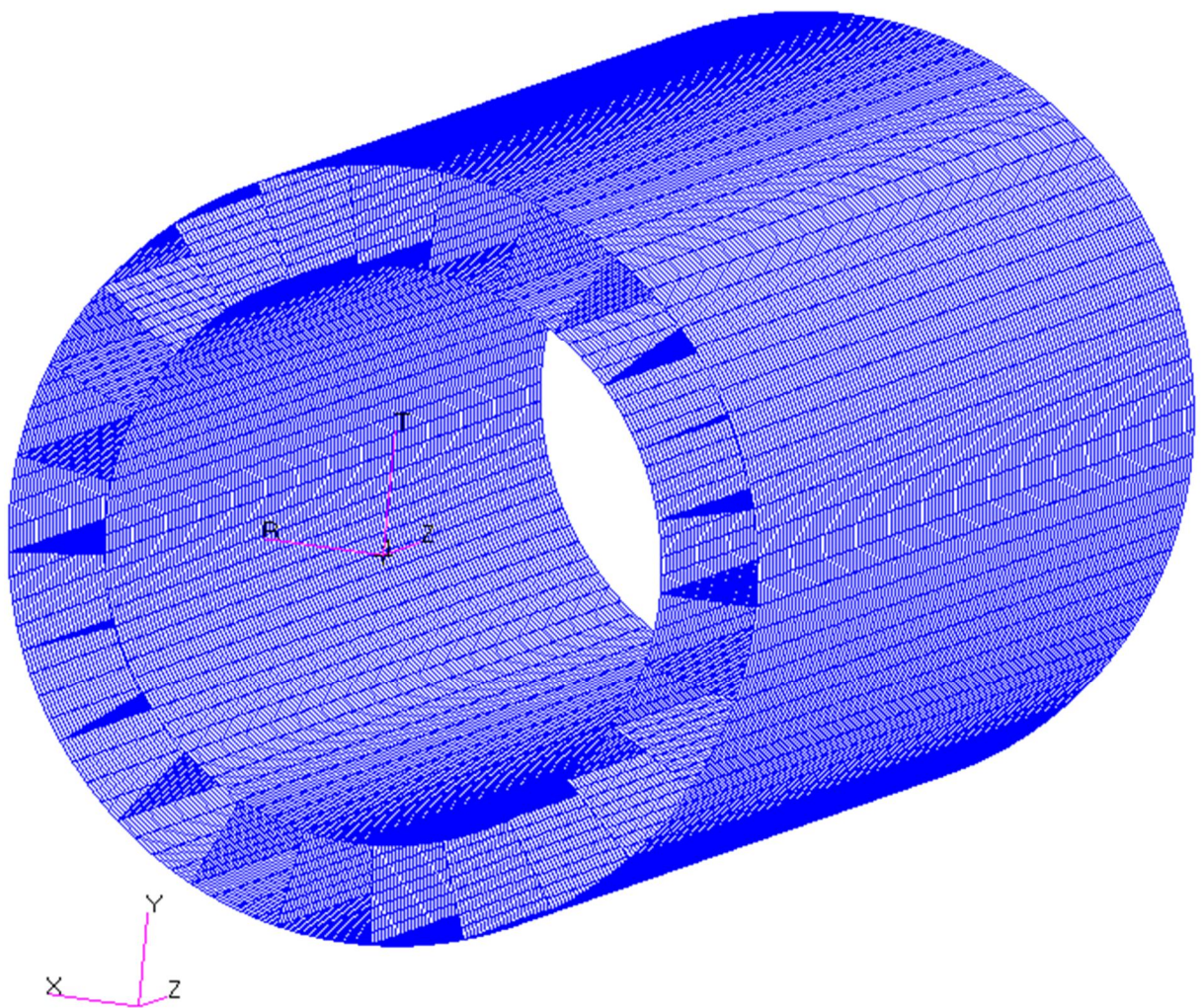


Рисунок 2.13. Общий вид КЭМ конструкции, состоящей из сетчатых КОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.

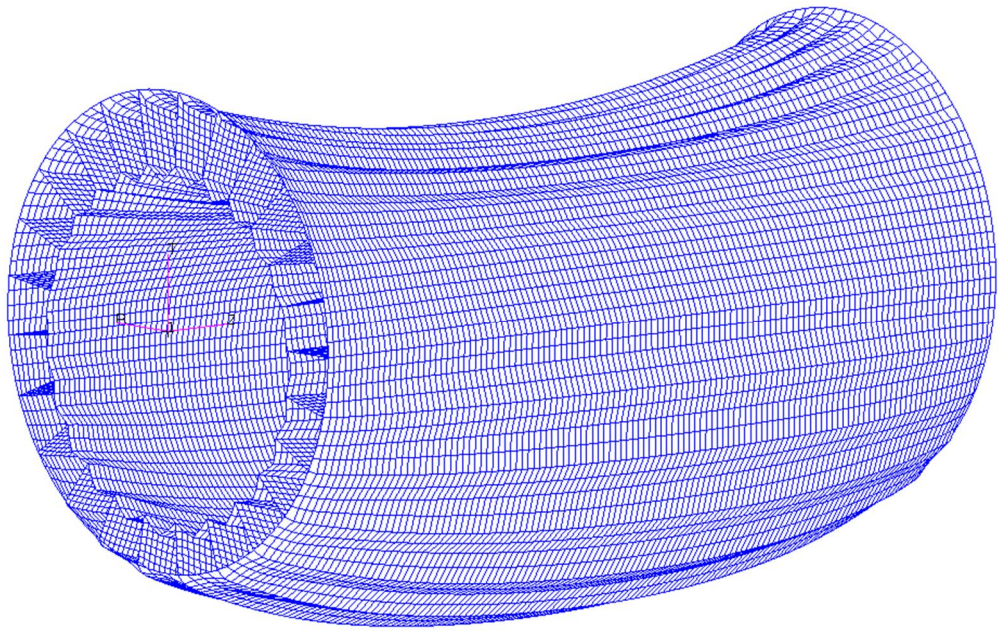


Рисунок 2.14. Деформированное состояние модели. Зеленым цветом изображена модель в исходном состоянии, синим – деформированная модель.

В таблице 2.7 приведены результаты расчета перемещений конструкции в зависимости от продольной координаты  $Z$ . Максимальные перемещения в середине оболочки составляют 1,01 мм.

Таблица 2.7 Результаты расчета силового каркаса из сетчатых элементов

$Z$ , мм	1400	2800	4130
$w$ , мм (по базе I)	0,60	0,85	1,01
$w$ , мм (по базе IV)	0,42	0,68	0,77

#### 2.4 Анализ предварительных результатов и выбор варианта конструкции для дальнейшей проработки

Согласно полученным на данном этапе результатам, ни конструкция, состоящая из сетчатых оболочек, ни конструкция, состоящая из сплошных оболочек, не удовлетворяет заданным требованиям по жесткости.

В связи с наличием ограничений на максимальную толщину силовых элементов, более целесообразным представляется выбор конструкции из сплошных элементов, так как при равной жесткости конструкция из сплошных элементов имеет меньшую толщину. В связи с этим для дальнейшей проработки выбрана структура, состоящая из сплошных элементов. Общий вид конструкции показан на рисунках 2.15 – 2.17.

Габаритно-массовые характеристики силового каркаса МРД представлены в D-045.000.000 ГЧ.

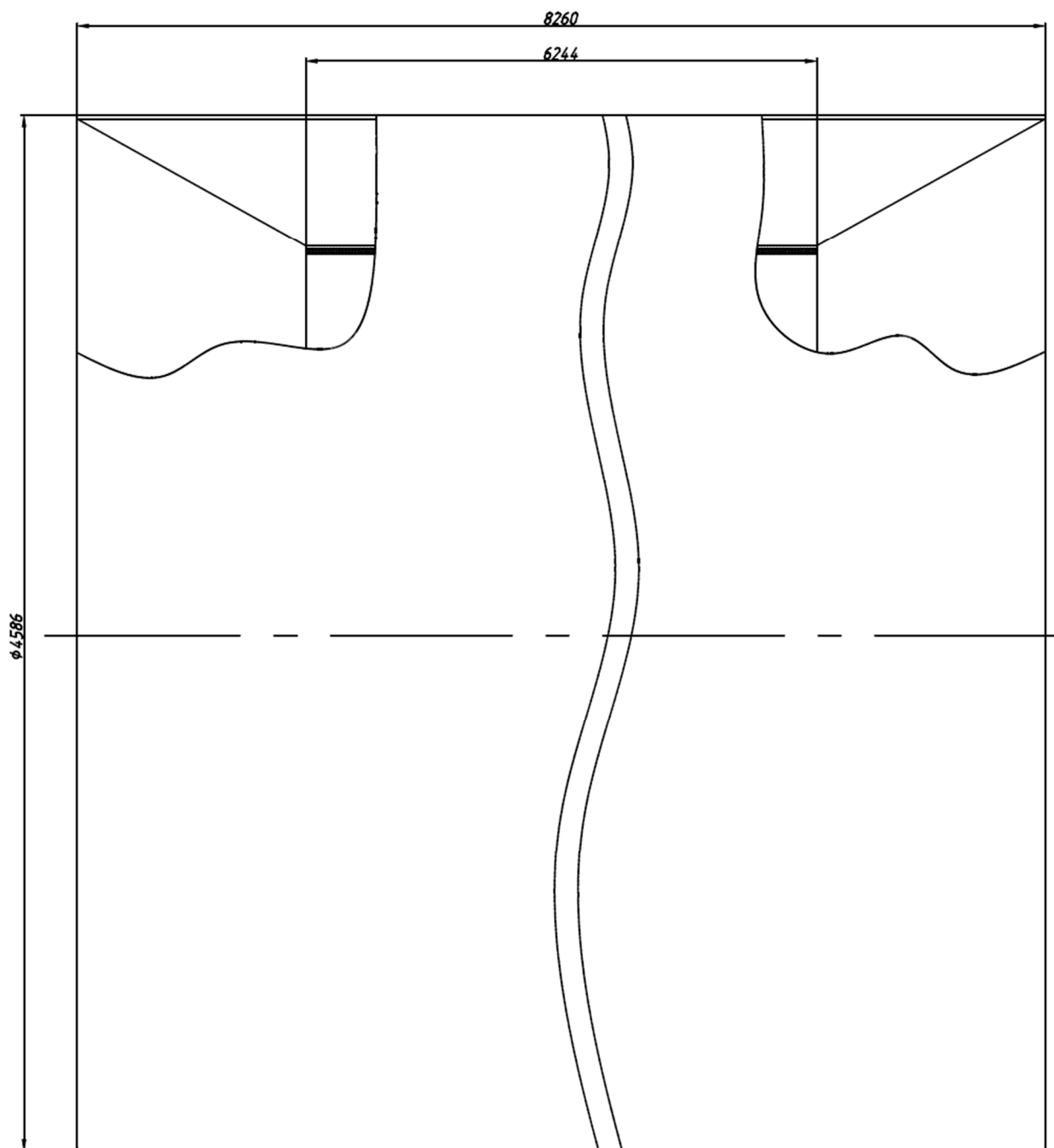


Рисунок 2.15. Общий вид силового каркаса (вид сбоку)

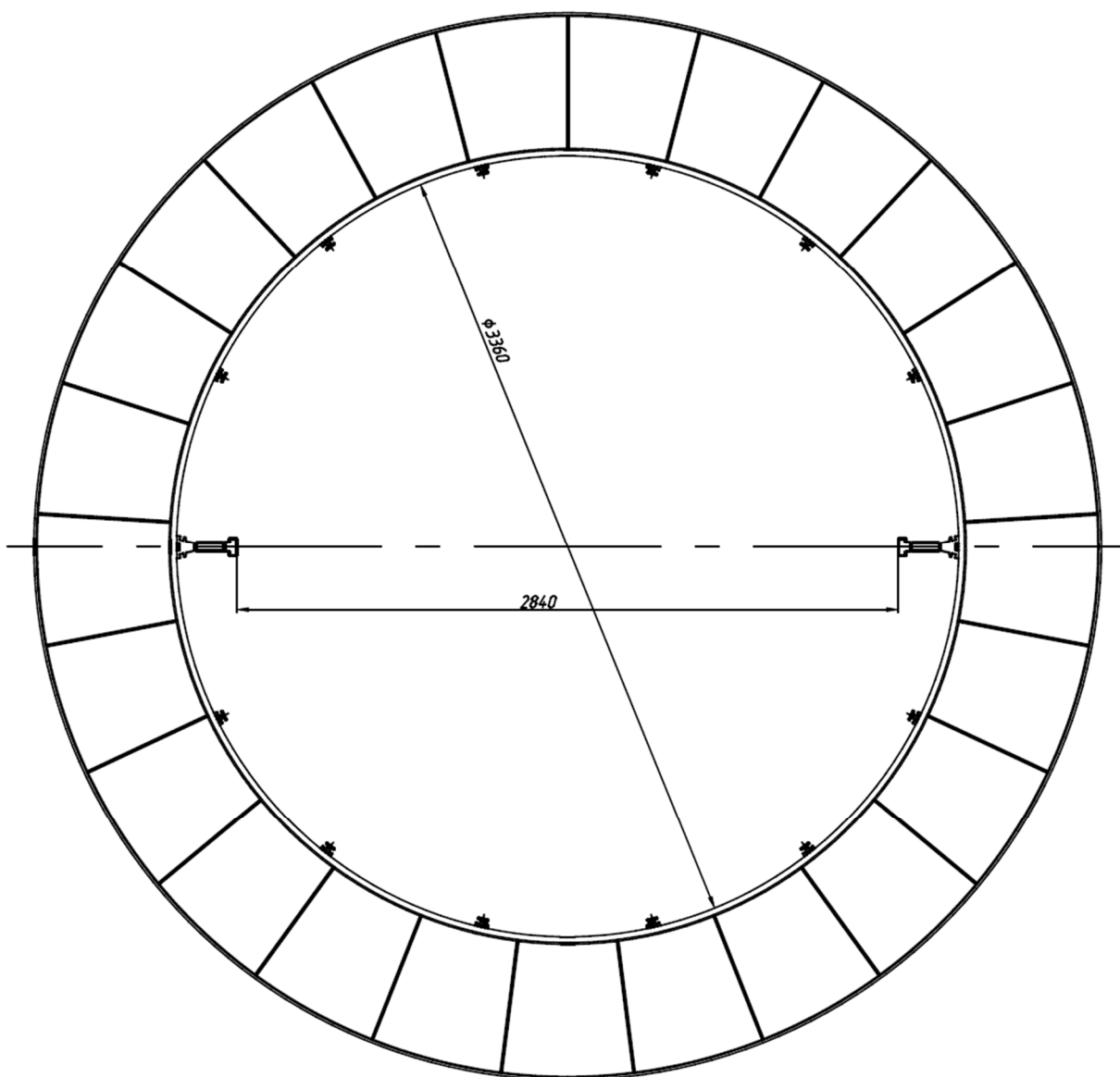


Рисунок 2.16. Общий вид силового каркаса (вид с торца)

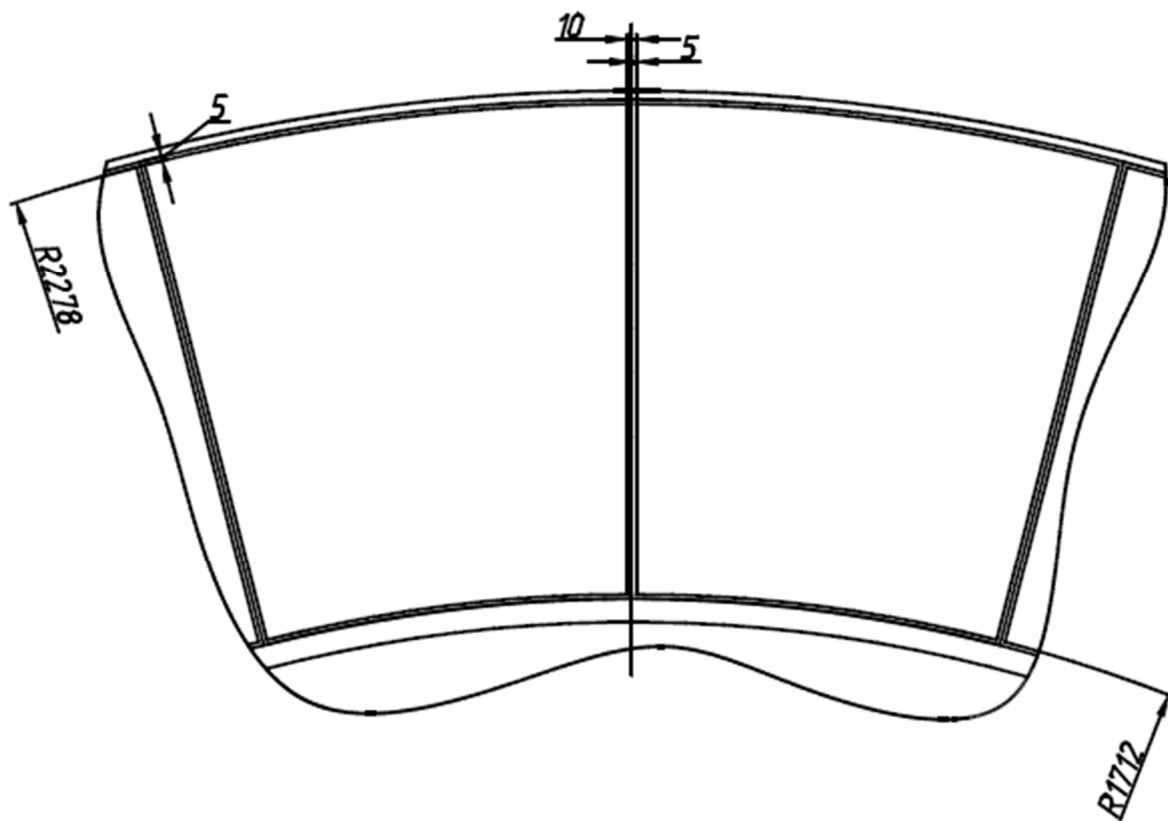


Рисунок 2.17. Общий вид силового каркаса (область корзин)

### **3 Директивная технология изготовления элементов конструкции изделия**

Технология изготовления силового каркаса МРД представлена в виде параллельного изготовления его составных частей и узлов. Принципиальные блок-схемы, в виде взаимосвязанных в определенной последовательности технологических операций, представлены на рисунках 3.1 - 3.3.

Операция намотки силового каркаса и его составных частей будет производиться на станках с системами управления, предназначенными для изготовления изделий сложной геометрической формы методом «мокрой» намотки по отработанной технологии и программе в соответствии со схемой армирования и контролем всех технологических параметров намотки, унифицированных с параметрами ранее изготавливаемых изделий.

Все станки имеют или оснащены приспособлениями для намотки широких рулонных материалов (тканей-препрегов). Последовательность операций, их содержание и способы исполнения соответствуют, в целом, типовому технологическому процессу изготовления мотанных конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ), разработанному на предприятии.

Токарная обработка заготовок производится на токарном станке при помощи стандартных резцов с пластинами и специальных резцов на оптимальных режимах. Так же используются стандартные и специальные режущие и мерительные инструменты.

Токарно-сверлильная операции производится на специальном установочном приспособлении, зафиксированном на токарно-сверлильно-фрезерном станке

Для механической обработки используются стандартные режущие и мерительные инструменты. Механическая обработка производится по угловой привязке при помощи фрезерной головки специальными режущими инструментами (свёрла, фрезы) на самых оптимальных режимах. Для



контроля параметров на соответствие чертежу используется стандартный и специальный мерительный инструмент.

Сборка каркаса производится на специальном установочном приспособлении, зафиксированном на намоточном станке. Работы по сверлению, зачистке поверхностей, креплению деталей выполняются с использованием стандартного и специального режущего инструмента.

Контроль качества выполнения слесарно-сборочных работ проводится универсальными средствами измерения.

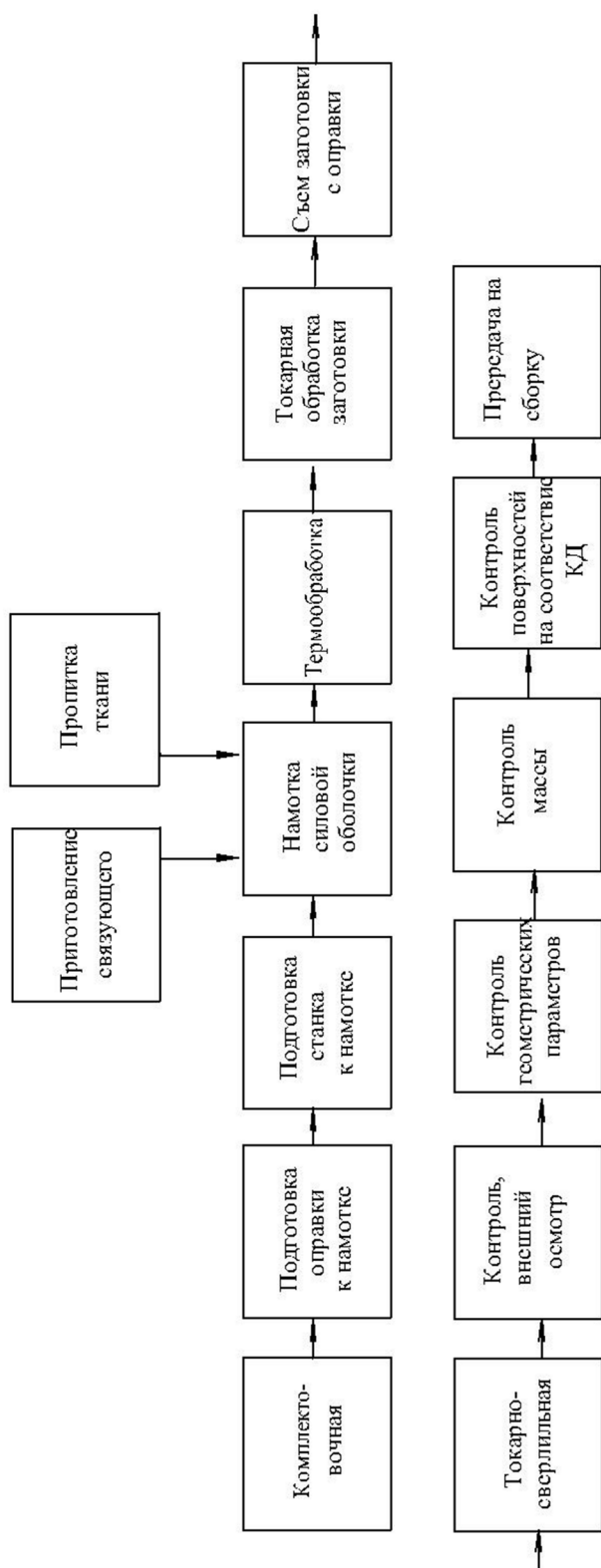


Рисунок 3.1 Блок-схема изготовления внутреннего силового каркаса

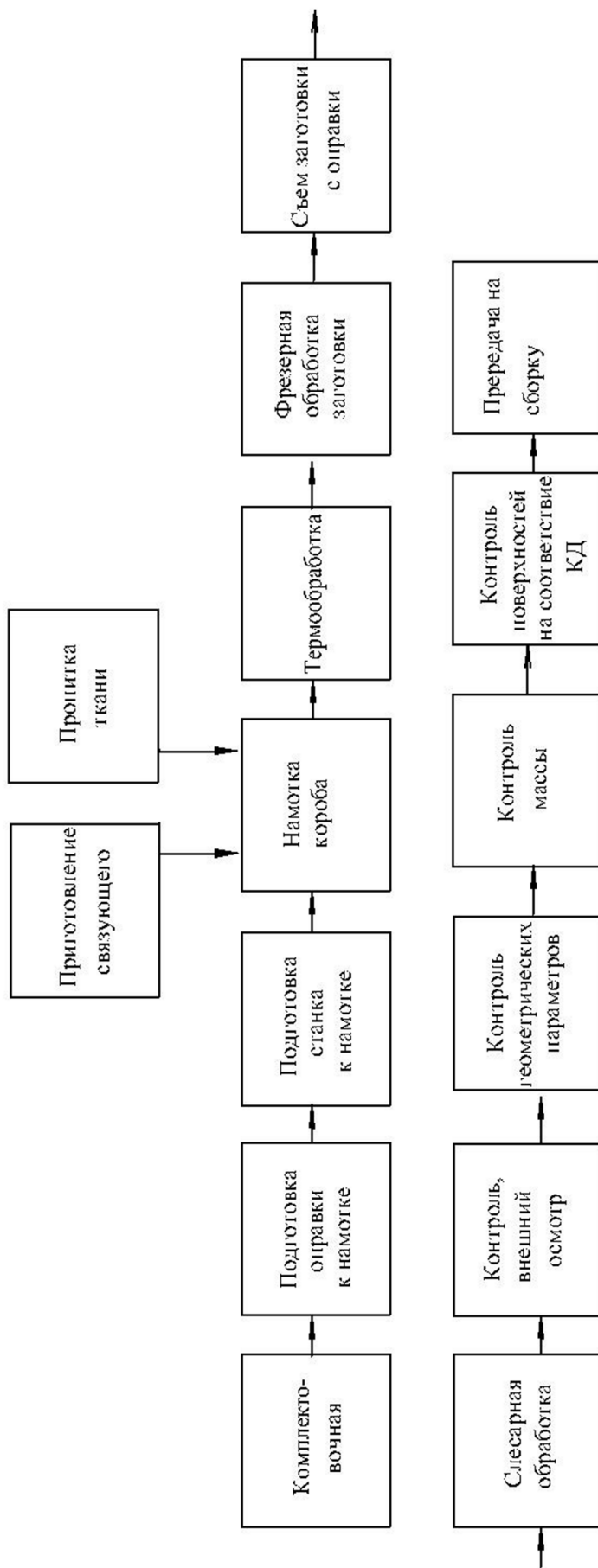


Рисунок 3.2 Блок-схема изготовления коробов

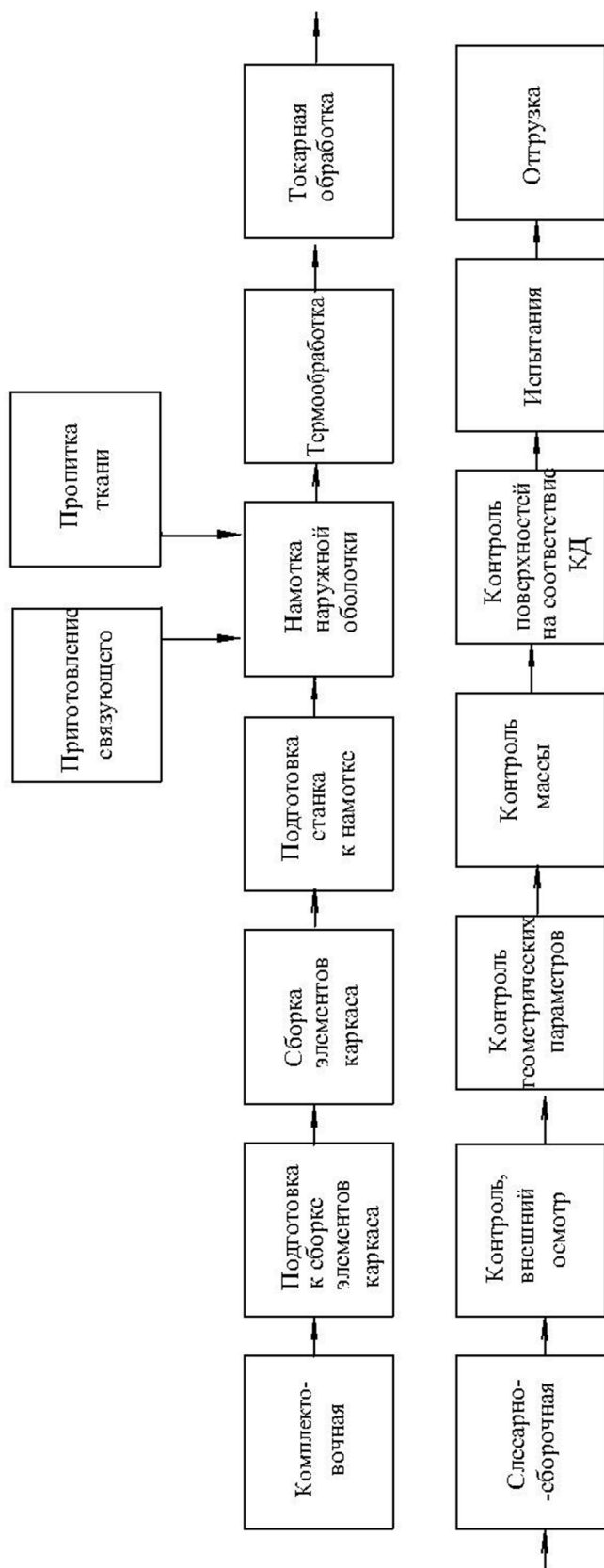


Рисунок 3.3 Блок-схема изготовления силового каркаса МРД

#### **4 Техничко-экономическое обоснование работ**

Шифр темы: «Силовой каркас МРД»

Определение цены работы, предусмотренной техническим заданием и календарным планом работ, проведено прямым счетом. Состав затрат принят согласно Налоговому кодексу РФ, часть II от 5 августа 2000 г. № 117-ФЗ глава 25.

При расчете стоимости работ использованы исходные данные, базирующиеся на экономические нормативы АО «ЦНИИСМ» 2018 года, утвержденные Генеральным директором и нормативы общегосударственного уровня.

1. Общая стоимость работ составляет 281810,45 тыс. рублей. Распределение данной суммы по этапам и статьям затрат приводится в прилагаемых формах.

2. Номенклатура материалов определена в соответствии с необходимыми работами. Затраты на материалы, для выполнения работы, определены в сумме 116555,61 тыс. рублей.

3. Трудозатраты на выполнение работ оцениваются в 425,2 чел. мес. и 32328,57 н/час. и определены на основе экспертных оценок их трудоёмкости, продолжительности, а так же фактических данных по выполнявшимся ранее работам аналогичного характера.

4. Затраты на оплату труда составляют 30650,0 тыс. рублей.

Планируемая заработная плата рассчитана исходя из:

- трудоемкости выполняемых работ,
- среднемесячной заработной платы одного работающего, занятого НТП 62 000 рублей и ОП 51 100 рублей

5. Страховые взносы составляют 9777,35 тыс. рублей.

Страховые взносы определены от статьи ЗОТ в размере - 31,9 %, в том числе: тариф страховых взносов – 30 % (Федеральный закон от 03.12.2011 г. № 379 - ФЗ); страховой тариф – 1,9 % (уведомление о размере страховых

взносов на обязательное медицинское страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний).

6. Затраты на специальную оснастку определены в соответствии с необходимыми работами и составляют 55960,0 тыс. рублей.

7. Накладные расходы составляют 46901,065 тыс. рублей, рассчитаны в соответствии с

утверждённой Генеральным директором АО «ЦНИИСМ» сметой:

общепроизводственные, в том числе:

- цеховые – 208,0 %

- институтские – 29,7 %

общехозяйственные – 45 %

8. Прибыль определена в размере до 13,5 % от себестоимости собственного объема работ за вычетом суммы НДС и ТЗР по статье "Затраты на материалы" и по статье "Затраты на специальную технологическую оснастку". Ее сумма оценивается в 21966,44 тыс. рублей.