



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
SAMARA UNIVERSITY

Проектирование сухого отсека  
ракеты-носителя из  
композиционных материалов  
с применением численной  
оптимизации.

Студент гр.1612-240501D,  
Старкова Алина Алексеевна.

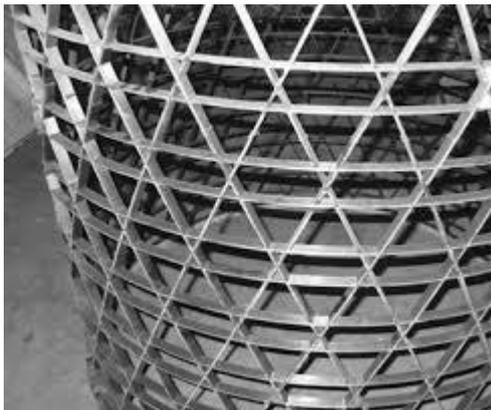
Самара 2021



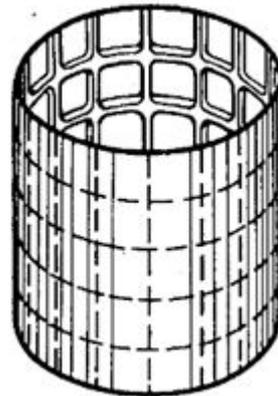
# ВЫБОР КОНСТРУКТИВНО-СИЛОВОЙ СХЕМЫ ХВОСТОВОГО ОТСЕКА ИЗ КМ

## Достоинства гофрированной оболочки при использовании КМ:

- Гофрированный лист и обшивка - целые оболочки без разрывов на протяжении всего отсека. Волокна материала этих оболочек не будут разорваны на их краях.
- обшивка и гофрированный лист соединяются друг с другом по большой поверхности - низкая нагрузка на клеевое соединение между ними;
- гофры выполняют функции продольного силового набора, что повышает поперечную жёсткость оболочки;
- гофры являются усиленным местом на оболочке и могут использоваться для крепления элементов оборудования.



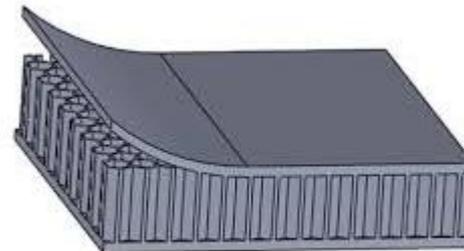
Сетчатая  
конструктивная



Вафельная  
оболочка



Стрингерная



Трёхслойная  
оболочка



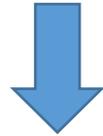
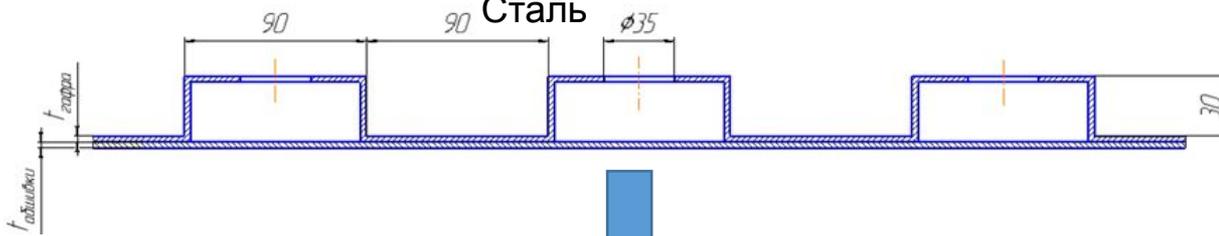
Гофрированная  
оболочка



# КОНСТРУКЦИЯ ХВОСТОВОГО ОТСЕКА PH BFR

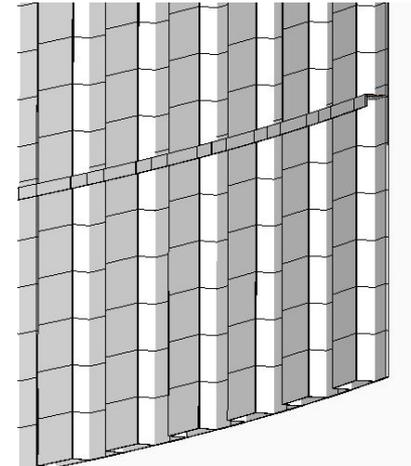
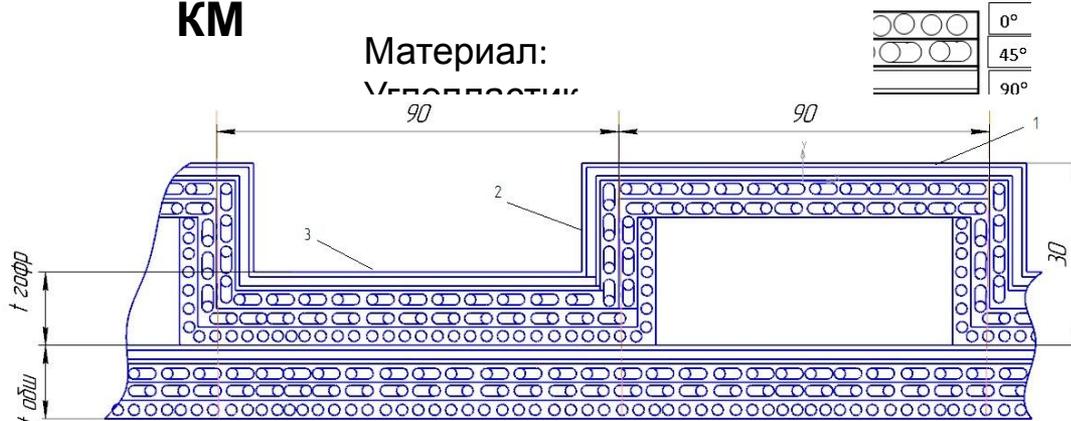
## Конструкция-прототип

Материал:  
Сталь



## Рассматриваемая конструкция из КМ

Материал:  
Углеродистик



Для конструкции из КМ:

- в первом приближении укладка выбрана таким образом, чтобы соотношение жёсткостей элементов сохранилось;
- отверстия делать нежелательно - для снижения продольной жёсткости убираем продольные волокна на внутренней стенке гофры (1).

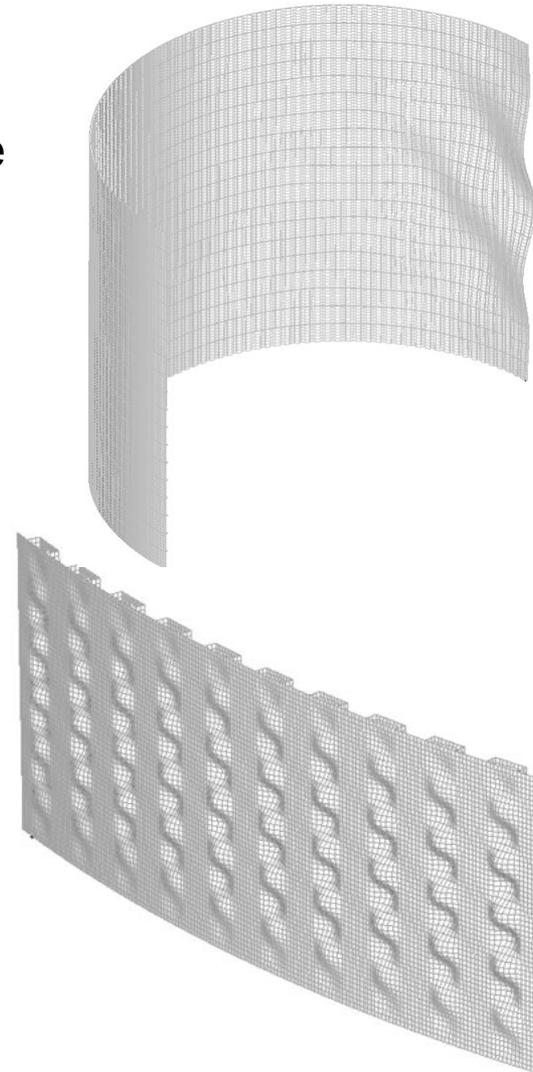


## ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ ХО

1) Напряжения в конструкции **превышают** допустимые значения;

2) **Общая** потеря устойчивости - изгибные деформации оболочки в целом;

3) **Местная** потеря устойчивости - отдельные стенки гофрированного листа испытывают изгибные деформации.

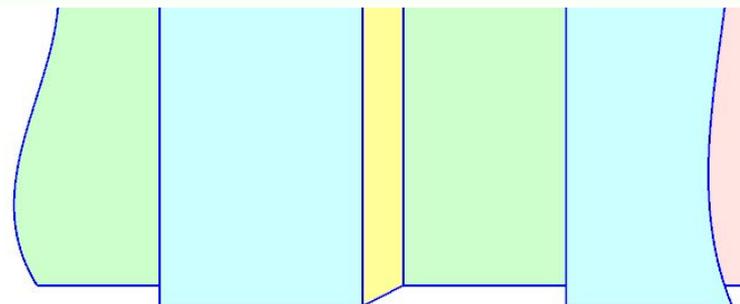




# ПАРАМЕТРЫ КОНСТРУКЦИИ – ПРОЕКТНЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ

Помимо основных габаритных параметров, в конструкции из КМ появляются толщины слоёв волокон разных направлений и углы укладки слоёв.

На разных участках гофры толщина наклонных и окружных слоёв связаны из технологических соображений.



- 1  стенка гофры, прилегающая к обшивке
- 2  стенка гофры, перпендикулярная обшивке
- 3  внутренняя стенка гофры
- 4  обшивка

Параметр									
Обозначение на рисунке	2	1	4	1,2,3	4	1,2,3	4	1,2,3	4
Начальное значение	0,786	0,786	0,786	0,550	0,550	0,550	0,550	45,0	45,0
Ограничения	$0,01 \leq t \leq 10$							$-90^\circ \leq \alpha \leq 0^\circ$ или $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	



# ЧИСЛЕННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ. ГРАДИЕНТНЫЙ МЕТОД

Подбор параметров в конструкции ХО в данной работе выполняется на основе численной оптимизации **градиентным методом**.

Используется алгоритм, реализованный в системе **Nastran**:

1) Выбираем начальное приближение  $x_0$ .

2) Отыскиваем градиент целевой функции  $\nabla F$ .

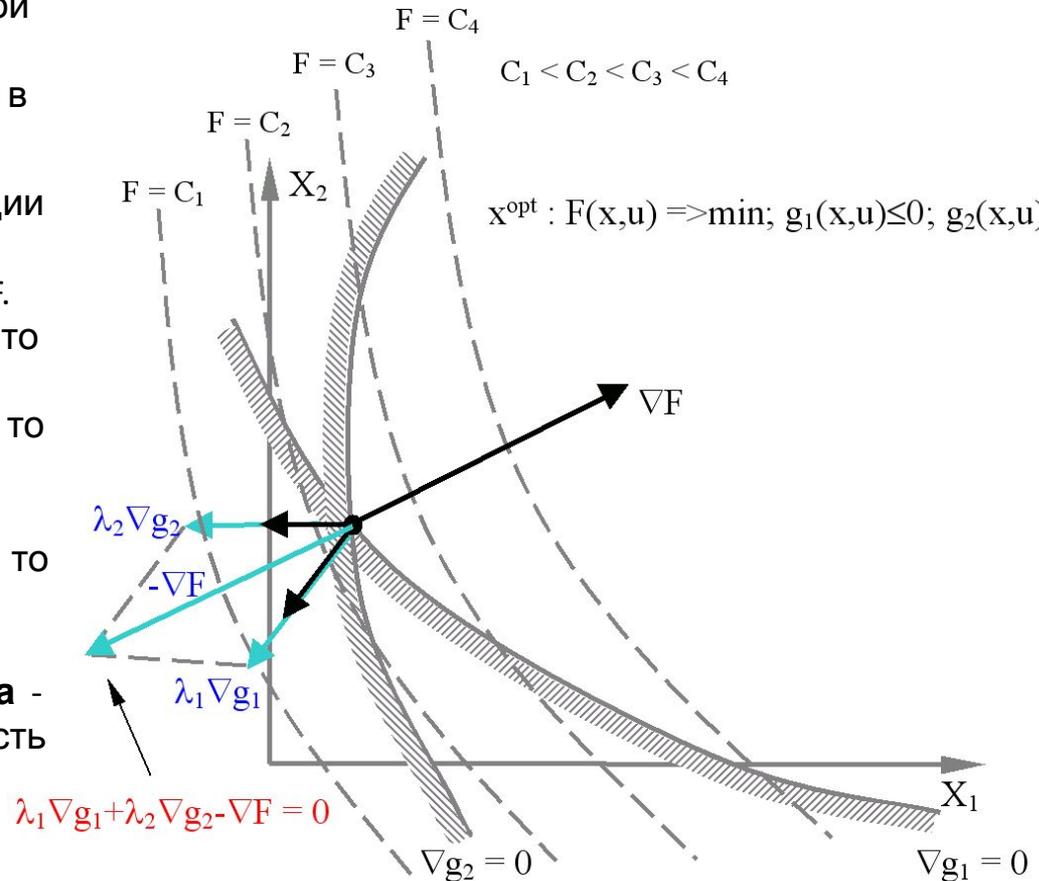
3) Ищем новое приближение  $x = x_0 - \alpha \cdot \nabla F$ .

4) Если ограничения **не нарушены**, то повторяем шаги 2 и 3.

5) Если ограничения **нарушены**, то целевая функция  $F = \sum_i g_i$

6) Если точка  $x$  **на границе** ограничений, то целевая функция  $F = \sum_i \lambda_i g_i + F$

7) Используется **критерий Куна-Такера** - оптимальная точка достигнута, если есть множители Лагранжа  $\lambda_i > 0$ , чтобы  $\nabla F = 0$ .



Ситуация нахождения текущей точки на границе по двум ограничениям



# ПЕРЕПРОЕКТИРОВАНИЕ ХО-ПРОТОТИПА. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ НА СОВМЕСТНОЙ МОДЕЛИ

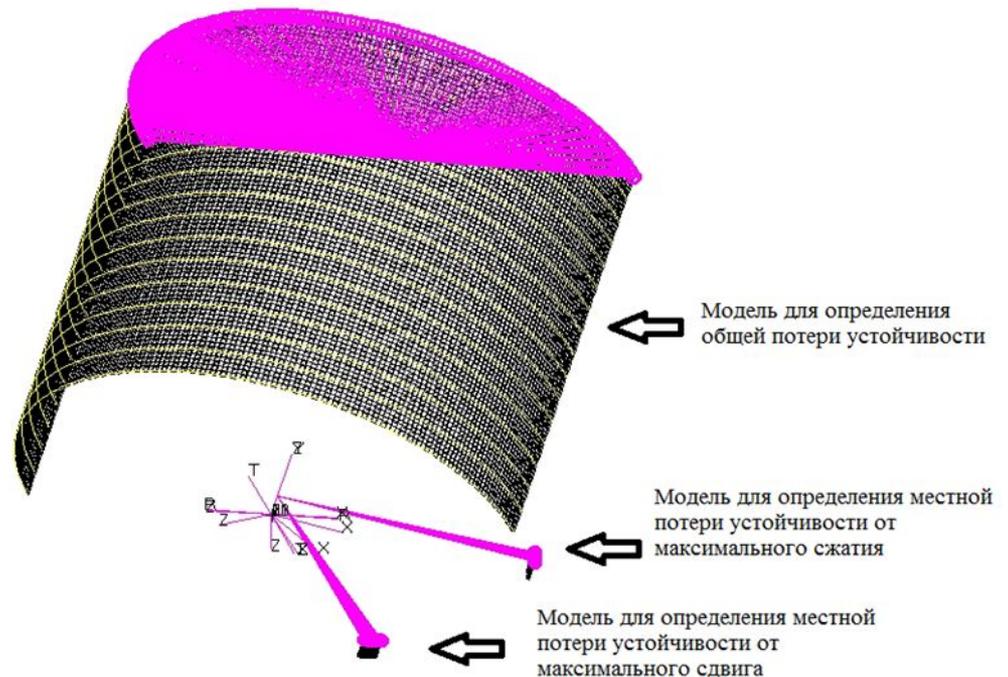
**Критерий оптимизации:** минимизация массы  
**Ограничения:**

- по прочности: напряжения по волокну не превышают допусковые;
- коэффициент критической нагрузки для местной потери устойчивости  $K_{кр}^M > 1$ ;
- коэффициент критической нагрузки для общей потери устойчивости  $K_{кр}^{об} > 1$ .

**Проектные переменные:** для гофрированного листа и обшивки толщины слоёв разных направлений и углы

Проектные переменные	Начальное значение	Значение после оптимизации
	0,786	0,859
	0,786	0,254
	0,786	0,209
	0,550	0,990
	0,550	0,312
	0,550	0,136
	0,550	0,213
	45,0	29,5
	45,0	51,7

укладки наклонных волокон.





# ПЕРЕПРОЕКТИРОВАНИЕ ХО. РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ПОТЕРЕ УСТОЙЧИВОСТИ И ПРОЧНОСТИ

Модель для определения:	Коэффициенты критической нагрузки	
	До оптимизации	После оптимизации
общей потери устойчивости	1,02	<b>1,00</b>
местной потери устойчивости от сжатия	1,99	<b>1,03</b>
местной потери		

В таблицах представлены запасы на коэффициенты критической нагрузки для общей и местной потери устойчивости и по ограничениям на напряжения в первом направлении материала.

Запас прочности

$$\eta = \frac{[\sigma]}{\sigma_1}$$

где  $\sigma_1$  – нормальные напряжения в первом направлении материала;  
 $[\sigma]$  – допускаемое напряжение.

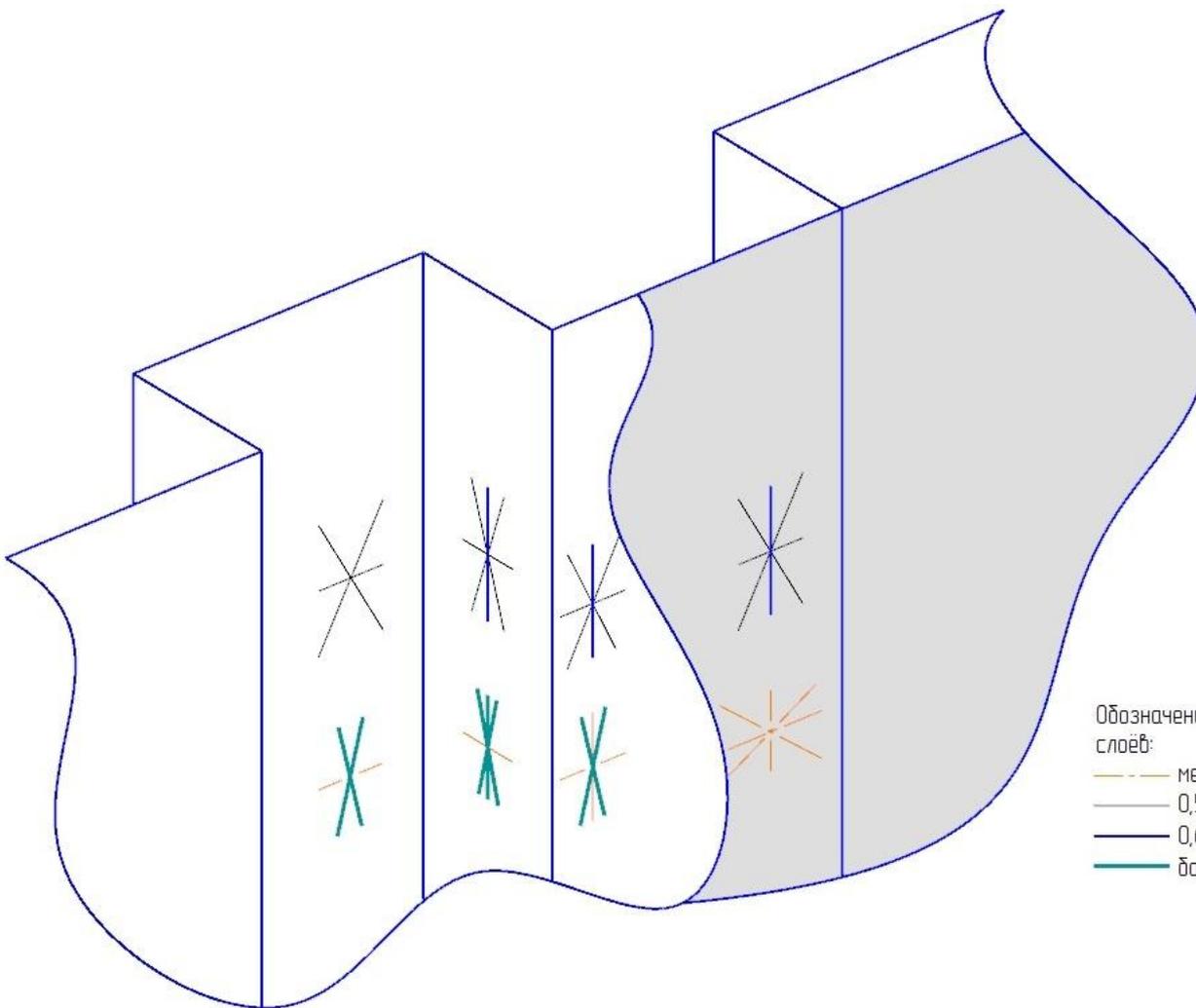
Расположение наибольших напряжений	Угол укладки, град	До оптимизации		После оптимизации	
		881	$\eta$	1561	$\eta$
гофрированная оболочка	0	584	1,11	629	<b>1,03</b>
	$\alpha$	230	2,83	484	1,34
	$-\alpha$	234	2,78	466	1,39
	90	206	3,16	554	<b>1,17</b>
гладкая оболочка	0	577	1,13	629	<b>1,03</b>
	$\alpha$	226	2,88	148	4,39
	$-\alpha$	232	2,80	158	4,11
	90	157	4,14	286	2,27

Коэффициенты запасов по трём ограничениям близки к единице.

Конструкция получилась равнопрочной по всем возможным причинам разрушений.



# ПЕРЕПРОЕКТИРОВАНИЕ ХО. ИЗМЕНЕНИЕ ТОЛЩИН СЛОЁВ И УГЛОВ УКЛАДКИ



Обозначение толщин слоёв:

- менее 0,5 мм
- 0,5–0,65 мм
- 0,65–0,8 мм
- более 0,8 мм

В гофрированном листе усилено направление под наклонными углами, количество материала снижено по  $90^\circ$  и  $0^\circ$  в стенке гофры, прилегающей к обшивке. Это означает, что оптимизатор повысил крутильную жёсткость замкнутого контура (гофры).

В гладкой оболочке материала стало меньше во всех направлениях. Это говорит о том, что начальные значения проектных переменных были взяты с большими запасами.



## ПЕРЕПРОЕКТИРОВАНИЕ ХО. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ИЗ ДРУГИХ НАЧАЛЬНЫХ ТОЧЕК

Локальных оптимальных решений для конструкции может быть несколько. Определим насколько полученное оптимальное решение удачно. Для этого выполним оптимизационный расчёт из нескольких других начальных точек (см. таблицу)

Проектные переменные	Расположение волокон	Начальные значения				
		1-ая точка	2-ая точка	3-ая точка	4-я точка	5-ая точка
	продольное	0,786	0,5	0,8	0,1	0,3
		0,786	0,5	0,8	0,1	0,3
		0,786	0,5	0,8	0,1	0,3
	наклонное	0,550	0,3	1,0	0,1	0,2
		0,550	0,3	1,0	0,1	0,2
	окружное	0,550	0,3	0,8	0,1	0,2
		0,550	0,3	0,8	0,1	0,2
	-	45,0	10,0	80,0	20,0	15,0
		45,0	10,0	80,0	20,0	15,0



## ПЕРЕПРОЕКТИРОВАНИЕ ХО. ОПТИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ПРИ РАЗНЫХ НАЧАЛЬНЫХ ТОЧКАХ

Проектные переменные	Конечные значения					
	1-ая точка	2-ая точка	3-ая точка	4-я точка	5-ая точка	
	0,859	0,307	0,622	0,277	0,295	105
	0,254	0,169	0,384	0,202	0,186	158
	0,209	0,122	0,308	0,302	0,219	316
	0,990	1,076	0,948	0,936	1,016	838
	0,312	0,305	0,291	0,365	0,338	631
	0,136	0,144	0,199	0,245	0,193	419
	0,213	0,247	0,248	0,366	0,208	316
	29,46	27,46	30,84	28,86	28,22	-
	51,69	46,34	57,12	31,04	50,00	
Масса конструкции, кг	1561	1545	1578	1604	1556	-

$S_i$  – весовые параметры, с которыми проектные переменные участвуют в общей массе конструкции. Они рассчитываются как разница масс при утолщении на 1 мм конкретных слоёв.



# ПЕРЕПРОЕКТИРОВАНИЕ ХО. ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Для графического представления результатов введём осреднённые параметры:

- по толщине для продольных волокон

$$\bar{t}_0 = \frac{t_0^{r\phi} \cdot S_0 + t_0^{r\phi} \cdot S_0 + t_0^{об} \cdot S_0}{\sum S_0}$$

- по толщине для наклонных волокон

$$\bar{t}_\alpha = \frac{t_\alpha^{r\phi} \cdot S_\alpha + t_\alpha^{об} \cdot S_\alpha}{\sum S_\alpha}$$

- по толщине для поперечных волокон

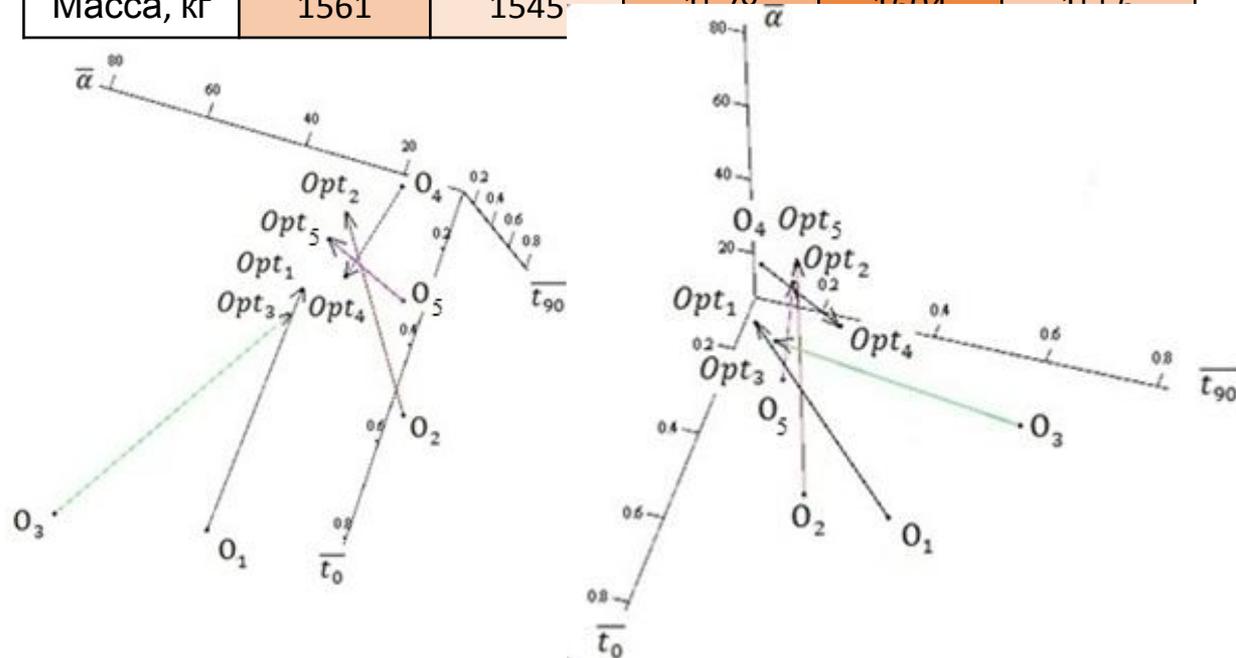
$$\bar{t}_{90} = \frac{t_{90}^{r\phi} \cdot S_{90} + t_{90}^{об} \cdot S_{90}}{\sum S_{90}}$$

- средневзвешенный угол

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha^{r\phi} \cdot t_\alpha^{r\phi} \cdot S_\alpha + \alpha^{об} \cdot t_\alpha^{об} \cdot S_\alpha}{\sum S_\alpha}$$

На графике не учитываются значения  $\bar{t}_\alpha$ , т.к. во всех начальных точках они близки между собой.

Параметры	1-ая точка	2-ая точка	3-ая точка	4-я точка	5-ая точка
	0,339	0,168	0,385	0,270	0,224
	0,699	0,745	0,666	0,691	0,725
	0,169	0,188	0,220	0,297	0,199
	33,72	30,78	35,78	29,35	32,59
Масса, кг	1561	1545	1578	1604	1556



Найдено несколько оптимальных решений с близкими массами



# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ХО РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ РН. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Основные геометрические параметры отсека: диаметр  $D = 4,1$  м, высота  $H = 1,48$  м. Коэффициент безопасности  $f = 1,2$ . Проектирование конструкции ведётся для случая

нагрузки $\max q$ :	311,98
	-2939,0
	-4350,8
	7183,69

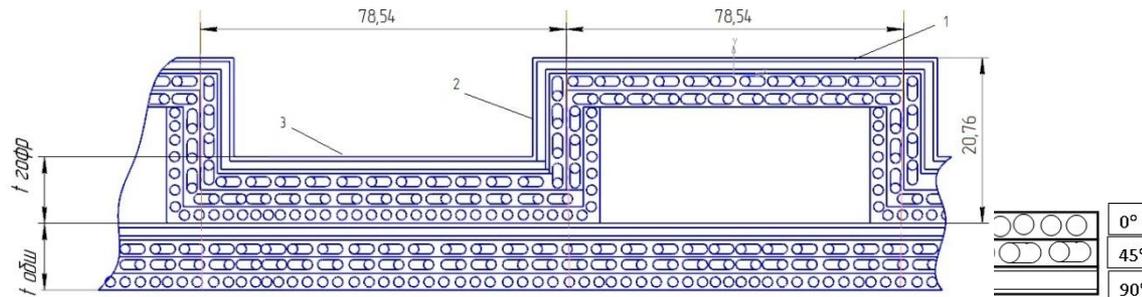
Необходимо оценить, как следует изменить размеры гофры  $l$  и  $h$  при изменении диаметра отсека и материала отсека, чтобы сохранить равнопрочность конструкции.

**Прочность и общую потерю устойчивости** оцениваем, рассматривая корпус РН как гладкую цилиндрическую оболочку толщиной  $\delta$  (силовой набор распределяем равномерно по оболочке).

$$\sigma_{кр}^{общ} = k \cdot \frac{E \cdot \delta}{D}$$
$$\sigma_{кр}^{общ} \sim I(h, \delta); \sigma_{max} = \frac{T_{ЭКВ}}{F}$$

**Местную потерю устойчивости** оцениваем, рассматривая потерю устойчивости внутренней стенки шириной  $l$  от сжатия.

$$P_{кр}^M \sim \frac{I \cdot E}{l^2}$$





# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ХО. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ НА СОВМЕСТНОЙ МОДЕЛИ

**Критерий оптимизации:** минимизация

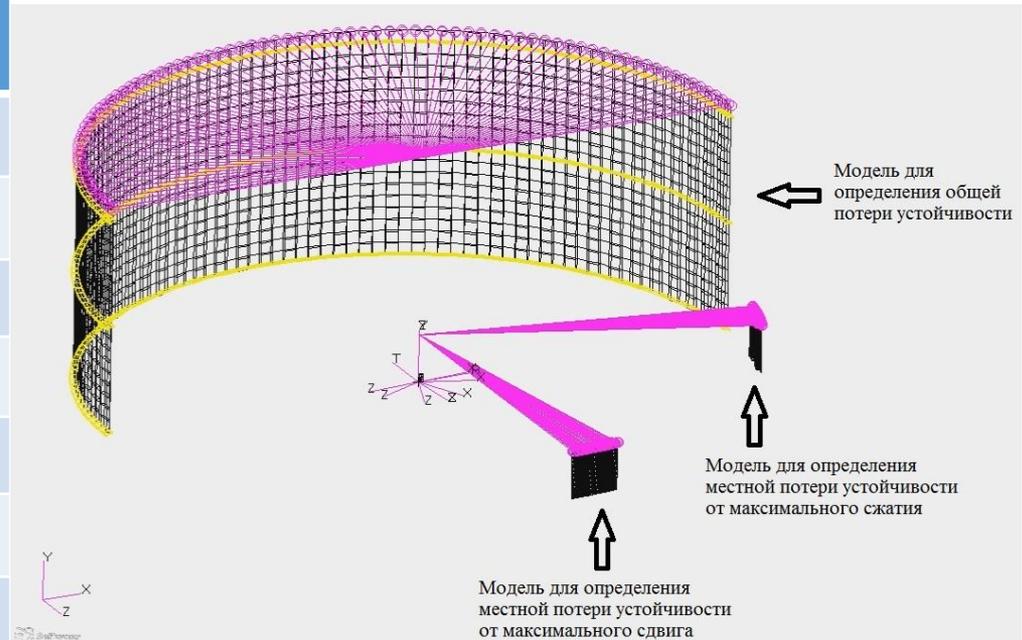
**Ограничения:**

- по прочности: напряжения по волокну не превышают допусковые;
- коэффициент критической нагрузки для местной потери устойчивости  $K_{кр}^M > 1$ ;
- коэффициент критической нагрузки для общей потери устойчивости  $K_{кр}^{об} > 1$ .

**Проектные переменные:** для гофрированного листа и обшивки толщины слоёв разных

Проектные переменные	Начальное значение	Значение после оптимизации
	0,5	0,183
	0,5	0,185
	0,5	0,177
	0,5	0,199
	0,5	0,189
	0,5	0,221
	0,5	0,246
	45,0	46,1
	45,0	45,5

укладки наклонных волокон.



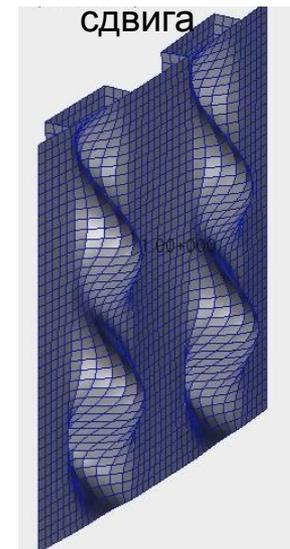
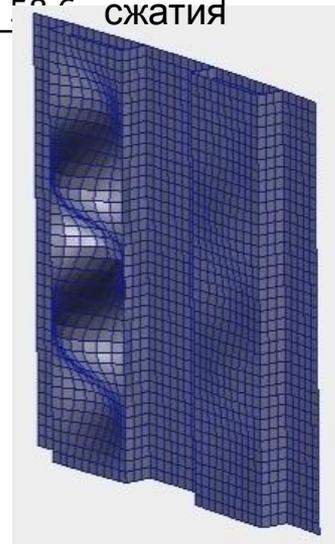


# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ХО. РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ПОТЕРЕ УСТОЙЧИВОСТИ

Модель для определения:	Коэффициенты критической нагрузки	
	До оптимизации	После оптимизации
общей потери устойчивости	5,02	1,33
местной потери устойчивости от сжатия	6,41	<b>1,00</b>
местной потери устойчивости от сдвига	22,95	2,06
Масса, кг	135,5	52,6

Минимальный запас по напряжениям  $\eta = 1,20$

местная потеря устойчивости от сдвига





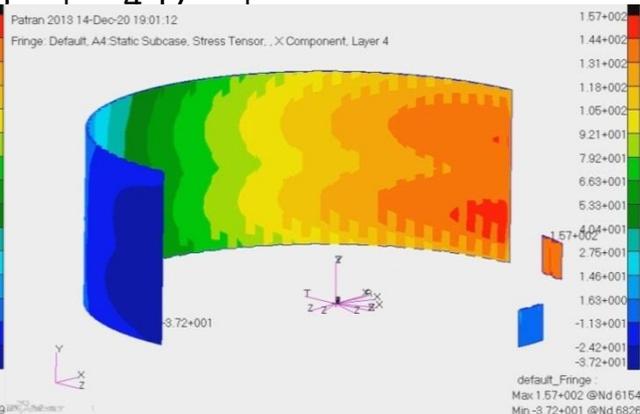
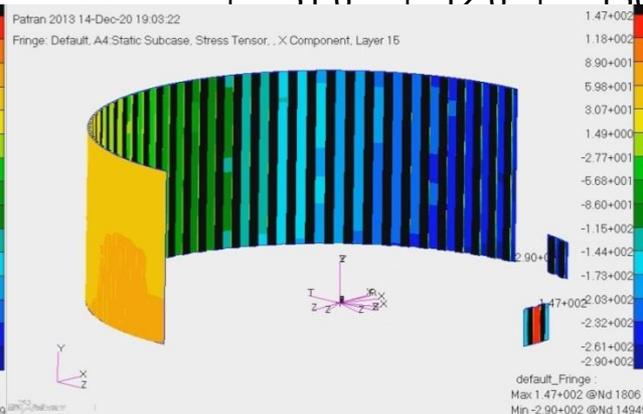
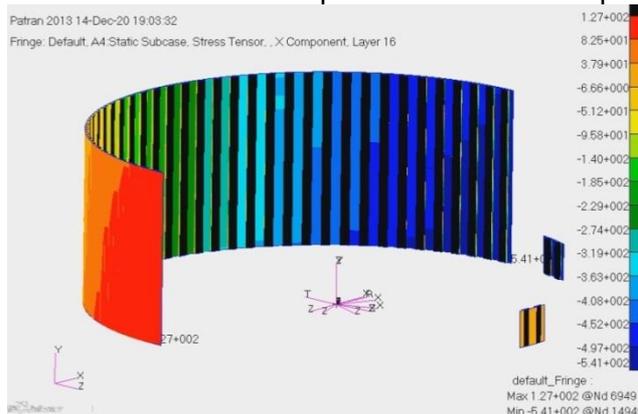
# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ХО. РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ЗАПАСАМ ПРОЧНОСТИ

Расположение наибольших напряжений	Угол укладки, град	До оптимизации		После оптимизации	
			$\eta$		$\eta$
гофрированная оболочка	0	195	3,33	525	<b>1,24</b>
	$\alpha$	89,3	7,28	260	2,50
	$-\alpha$	88,5	7,34	260	2,50
	90	63,3	10,3	157	4,14
гладкая оболочка	0	198	3,28	541	<b>1,20</b>
	$\alpha$	80,6	8,06	288	2,26
	$-\alpha$	79,0	8,23	290	2,24
	90	51,6	17,6	156	4,17

продольная укладка

наклонная укладка

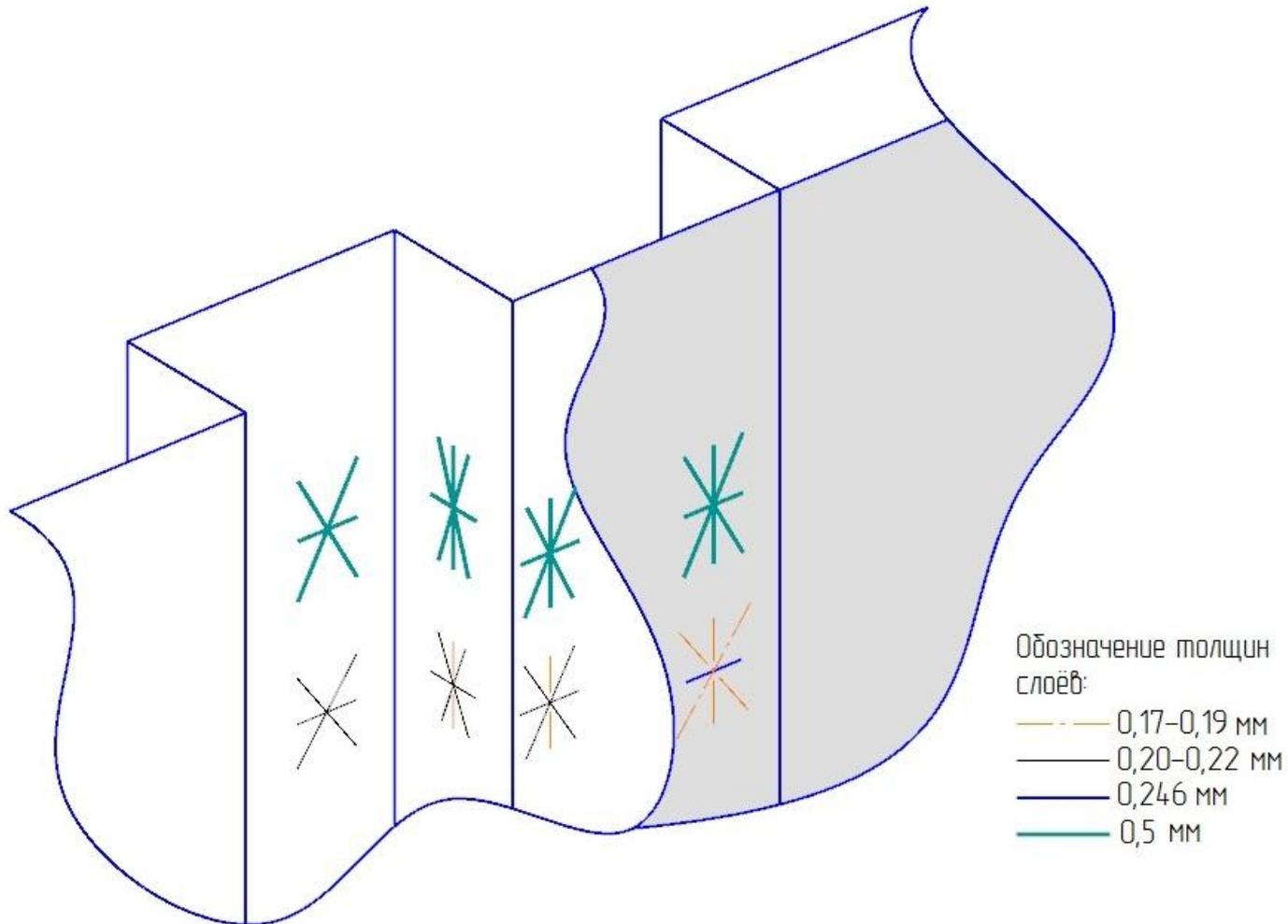
окружная укладка





# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ХО. ИЗМЕНЕНИЕ ТОЛЩИН СЛОЁВ И УГЛОВ УКЛАДКИ

Из рисунка видно, что толщины волокон во всех направлениях снизились, т.е. начальные толщины были взяты с большим запасом. Укладка после оптимизации осталась кваз





## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ХО. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ИЗ ДРУГИХ НАЧАЛЬНЫХ ТОЧЕК

Локальных оптимальных решений для конструкции может быть несколько. Определим насколько полученное оптимальное решение удачно. Для этого выполним оптимизационный расчёт из нескольких других начальных точек (см. таблицу)

Проектные переменные	Начальные значения				
	1-ая точка	2-ая точка	3-ая точка	4-я точка	5-ая точка
	0,5	0,2	0,9	0,3	0,6
	0,5	0,2	0,9	0,3	0,6
	0,5	0,2	0,9	0,3	0,6
	0,5	0,1	0,7	0,4	0,8
	0,5	0,1	0,7	0,4	0,8
	0,5	0,1	0,7	0,3	0,9
	0,5	0,1	0,7	0,3	0,9
	45,0	10,0	70,0	30,0	55,0
	45,0	10,0	70,0	30,0	55,0



# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ХО. КОНЕЧНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

Проектные переменные	Конечные значения					
	1-ая точка	2-ая точка	3-ая точка	4-я точка	5-ая точка	
	0,183	0,340	0,202	0,116	0,140	8,2
	0,185	0,199	0,185	0,115	0,128	15,0
	0,177	0,304	0,236	0,112	0,183	30,1
	0,199	0,170	0,163	0,199	0,208	76,3
	0,189	0,171	0,201	0,247	0,196	60,1
	0,221	0,232	0,162	0,210	0,211	38,2
	0,246	0,235	0,197	0,233	0,228	30,1
	46,08	35,70	57,33	43,31	43,10	-
	45,47	35,30	67,50	37,86	50,46	
Масса конструкции, кг	58,57	60,59	54,65	57,58	57,63	-

$S_i$  – весовые параметры, с которыми проектные переменные участвуют в общей массе конструкции. Они рассчитываются как разница масс при утолщении на 1 мм конкретных слоёв в конструкции.



# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ХО. ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Для графического представления результатов введём осреднённые параметры:

- по толщине для продольных волокон

$$\bar{t}_0 = \frac{t_0^{рф} \cdot S_0 + t_{0*}^{рф} \cdot S_0 + t_0^{об} \cdot S_0}{\sum S_0}$$

- по толщине для наклонных волокон

$$\bar{t}_\alpha = \frac{t_\alpha^{рф} \cdot S_\alpha + t_\alpha^{об} \cdot S_\alpha}{\sum S_\alpha}$$

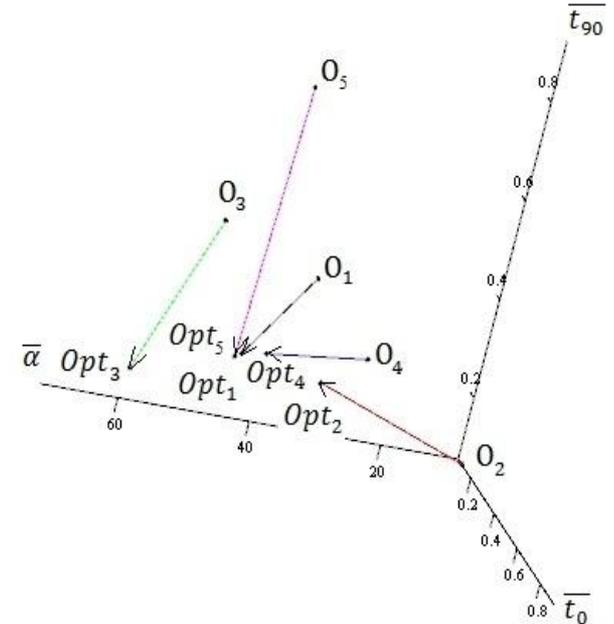
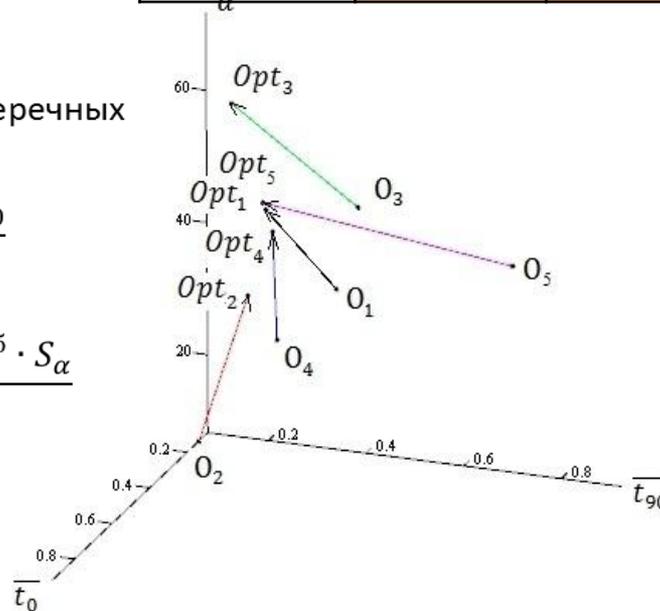
- по толщине для поперечных волокон

$$\bar{t}_{90} = \frac{t_{90}^{рф} \cdot S_{90} + t_{90}^{об} \cdot S_{90}}{\sum S_{90}}$$

- средневзвешенный угол

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha^{рф} \cdot t_\alpha^{рф} \cdot S_\alpha + \alpha^{об} \cdot t_\alpha^{об} \cdot S_\alpha}{\sum S_\alpha}$$

Параметры	1-ая точка	2-ая точка	3-ая точка	4-я точка	5-ая точка
	0,180	0,280	0,216	0,113	0,161
	0,195	0,170	0,180	0,220	0,202
	0,232	0,233	0,177	0,220	0,218
	45,82	35,52	62,35	40,61	46,24
Масса, кг	58,57	60,59	54,65	57,58	57,63



Оптимальные решения в 1-ой, 4-ой и 5-ой точке близки между собой.

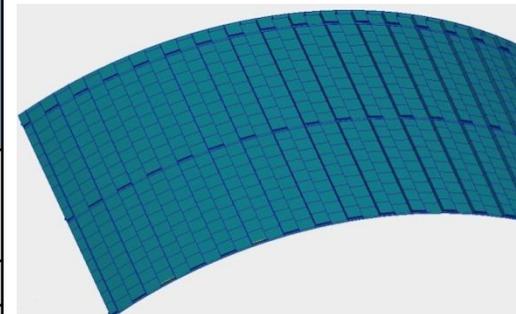


# АНАЛИЗ МАССЫ КОНСТРУКЦИИ ХО

## Вклад элементов конструкции в массу гофрированной оболочки



Элементы конструкции	Масса, кг	Доля в массе конструкции, %
Гофрированная обшивка	51,18	44,85
Гладкая обшивка	49,82	43,65
Рядовые шпангоуты	13,12	11,50
Все элементы	114,12	100,0



## Сравнение масс ХО разных конструкций

Конструкция	Масса, кг	Δ, %
Гофрированная углепластиковая оболочка, оптимальное решение из точки 4	114,12	-
Проект сетчатой конструкции из углепластика на основе	102,30	10,3

Изученная гофрированная оболочка по массе оказалась тяжелее сетчатой конструкции на 10,3%. Однако, незакрытый сетчатый отсек не может защитить содержимое ХО от влаги или ветра, а также в нём невозможно изготовить люк.

Таким образом, в совокупности своих характеристик, спроектированная гофрированная оболочка не уступает сетчатой конструкции.



## Роль шпангоута в силовой работе:

- распределяет силы по оболочке;
- обеспечивает место для замка;
- увеличивает жёсткость оболочки по торцу отсека;
- обеспечивает соединение конструкции из КМ со смежным металлическим баком.

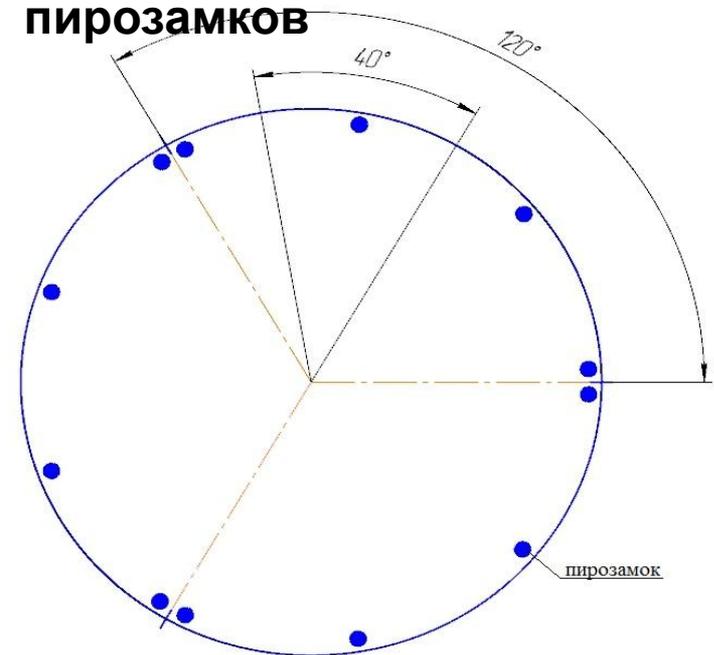
## Случай

максимальная  
сила в замке.

## нагружения:

растягивающая

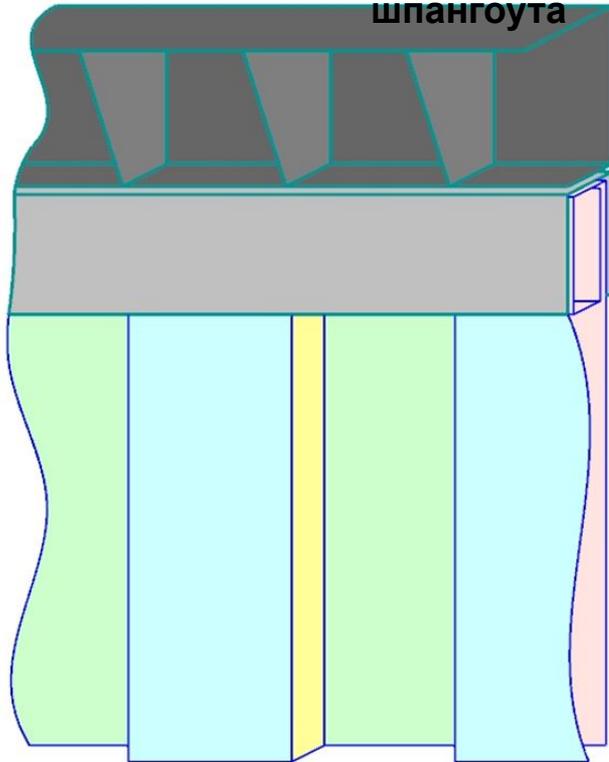
## Расположение пирозамков



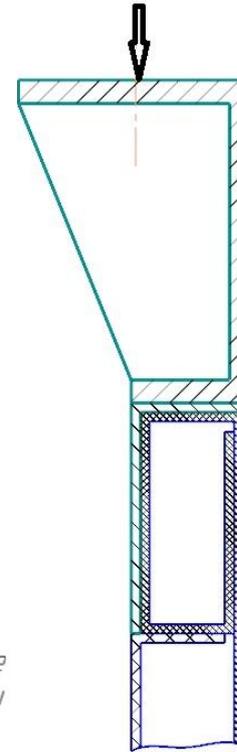


# РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СТЫКОВОГО ШПАНГОУТА

Конструкция стыкового шпангоута



- алюминий
- углепластик
- 1 — неравнополочный швеллер
- 2 — косынки
- 3 — стенки обшивки и стенка гофры
- 4 — прилегающая к обшивке
- 5 — стенка гофры, перпендикулярная обшивке
- 6 — внутренняя стенка гофры
- 7 — обшивка



Композиционная часть конструкции заканчивается прямоугольным тонкостенным профилем, к которому приклеивается и приклепывается металлическая часть шпангоута.

Металлическая часть имеет габариты, достаточные для установки пирозамков.

Металлическая часть шпангоута обеспечивает взаимодействие со смежным металлическим отсеком традиционным для металлических конструкций образом.

Параметры	Толщина алюминиевых стенок на кессоне	Толщина швеллер а	Толщина косынок	Толщина накладки
Конечные значения, мм	1	1	1	1,5



# РАСЧЁТ НА ПРОЧНОСТЬ И ЗАПАСЫ ПРОЧНОСТИ СТЫКОВОГО ШПАНГОУТА

Расположение наибольших напряжений	Угол укладки, град		$\eta$
гофрированная оболочка	0	14,2	45,77
	$\alpha$	12,3	52,85
	$-\alpha$	12,4	52,42
	90	13,9	46,76
гладкая оболочка	0	26,1	24,90
	$\alpha$	13,8	47,10
	$-\alpha$	14,0	46,43
	90	1,23	52,85

Расположение наибольших напряжений		$\eta$
алюминиевые стенки и кессон	19,5	<b>4,00</b>
швеллер	10,2	7,65
косынки	2,86	27,27
накладка	10,8	7,22

Случай максимального растяжения не опасен – запасы прочности большие.

Толщины алюминиевых элементов не могут быть снижены из конструктивных соображений.

Масса конструкции ХО с учётом стыкового шпангоута выросла на 15,10 кг и составляет 130,26 кг.

## Деформации в конструкции





**САМАРСКИЙ** УНИВЕРСИТЕТ  
SAMARA UNIVERSITY

**БЛАГОДАРЮ  
ЗА ВНИМАНИЕ**

ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086  
Тел.: +7 (846) 335-18-26 , факс: +7 (846) 335-18-36  
Сайт: [www.ssau.ru](http://www.ssau.ru), e-mail: [ssau@ssau.ru](mailto:ssau@ssau.ru)