

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СУХОГО ОТСЕКА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВИДЕ ОБОЛОЧКИ, ПОДКРЕПЛЁННОЙ ГОФРИРОВАННЫМ ЛИСТОМ

К. В. Пересыпкин, А. А. Старкова, Ю. Е. Галкина

Вес является одним из ключевых параметров ракетно-космических конструкций. Его снижение позволяет увеличить массу полезной нагрузки (ПН). Значительного снижения веса можно достигнуть, используя композиционные материалы (КМ), отличающиеся высокими прочностными характеристиками и низкой плотностью. Разработка ракетных блоков больших диаметров сопряжена с использованием специальных типов конструкций, позволяющих воспринять высокие по сравнению с традиционными ракетами нагрузки. Одна из таких конструкций для сухих отсеков ракета-носителя (РН) – оболочка, подкреплённая гофрированным листом. В работе исследуется возможность создания такой конструкции из КМ на основе перепроектирования существующей конструкции. Проводится сравнение конструкции прототипа и конструкции из КМ.

Ключевые слова: силовой корпус ракеты-носителя, сухой отсек, гофрированная оболочка, прочность, потеря устойчивости, метод конечных элементов.

Проектирование РН с ракетными блоками больших диаметров связано с проблемой обеспечения устойчивости оболочек силового корпуса РН. Эта проблема стоит острее, чем для РН с малыми диаметрами блоков, поскольку увеличение протяжённости силовых элементов снижает поперечные их жёсткости. Ведется поиск новых типов конструкций, позволяющих наиболее полно использовать возможности конструкционных материалов для ракетных конструкций больших диаметров.

Описание конструкции и её силовой работы

В данной работе проектируется конструкция, прототипом которой является хвостовой отсек второй ступени BFR – РН, разрабатываемой частной компанией Space-X. Он представляет собой обечайку, подкреплённую гофрированным листом.

Конструкция изготовлена из нержавеющей стали. Все основные параметры взяты из открытых источников компании Space-X [1]. Внешний вид прототипа представлен на рис. 1. На рис. 2 показаны основные размеры гофрированного листа прототипа [2].

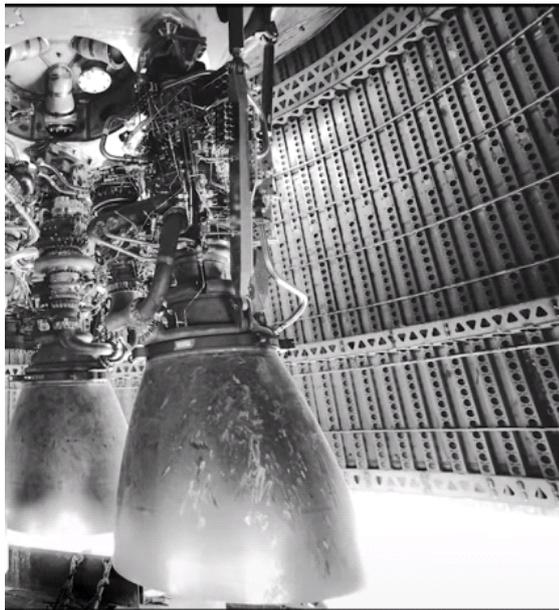
Способ силовой работы конструкции-прототипа: обшивка и гофры воспринимают продольную корпусную нагрузку. Гофры с обшивкой образуют частый силовой набор. Этот силовой набор сопротивляется общей потере устойчивости своими изгибной и крутильной жёсткостями. Внутренняя стенка гофры ослаблена отверстиями. Это снижает ее продольную жёсткость и уменьшает силу в ней. Это предотвращает местную потерю устойчивости стенки, которой данная конструкция слабо сопротивляется. Критическая нагрузка общей потери устойчивости увеличивается установкой рядовых шпангоутов.

© Пересыпкин К. В., Старкова А. А., Галкина Ю. Е., 2020.

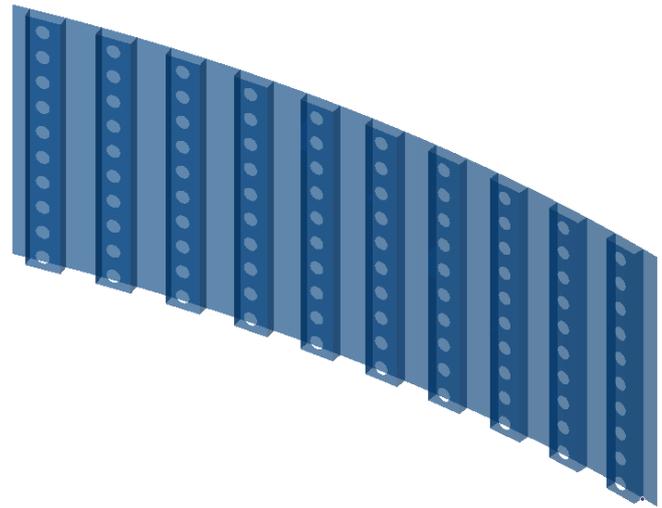
Пересыпкин Константин Владимирович (peresypkin_kv@mail.ru),
старший преподаватель кафедры космического машиностроения;

Старкова Алина Алексеевна (starkowa04@gmail.com),
студент V курса института ракетно-космической техники Самарского университета,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34.

Галкина Юлия Евгеньевна (yuliyagalkina531@gmail.com),
инженер-конструктор АО "РКЦ "Прогресс",
Россия, 443009, Самара, ул. Земеца, 18.



а)



б)

Рис. 1. Конструкция прототипа: а) оболочка хвостового отсека второй ступени ракеты BFR; б) геометрическая модель оболочки

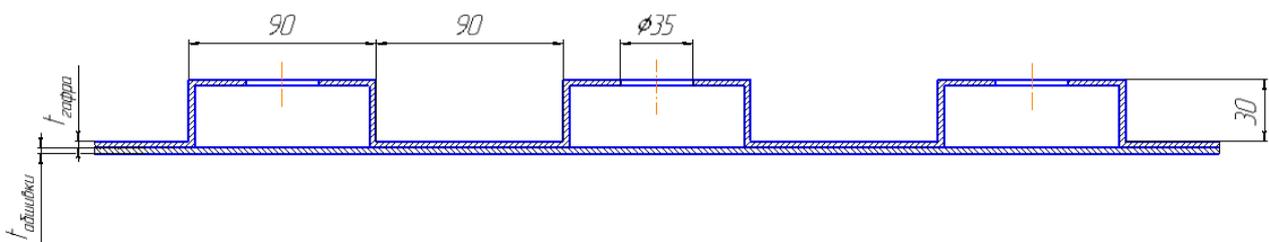


Рис. 2. Размеры гофры прототипа

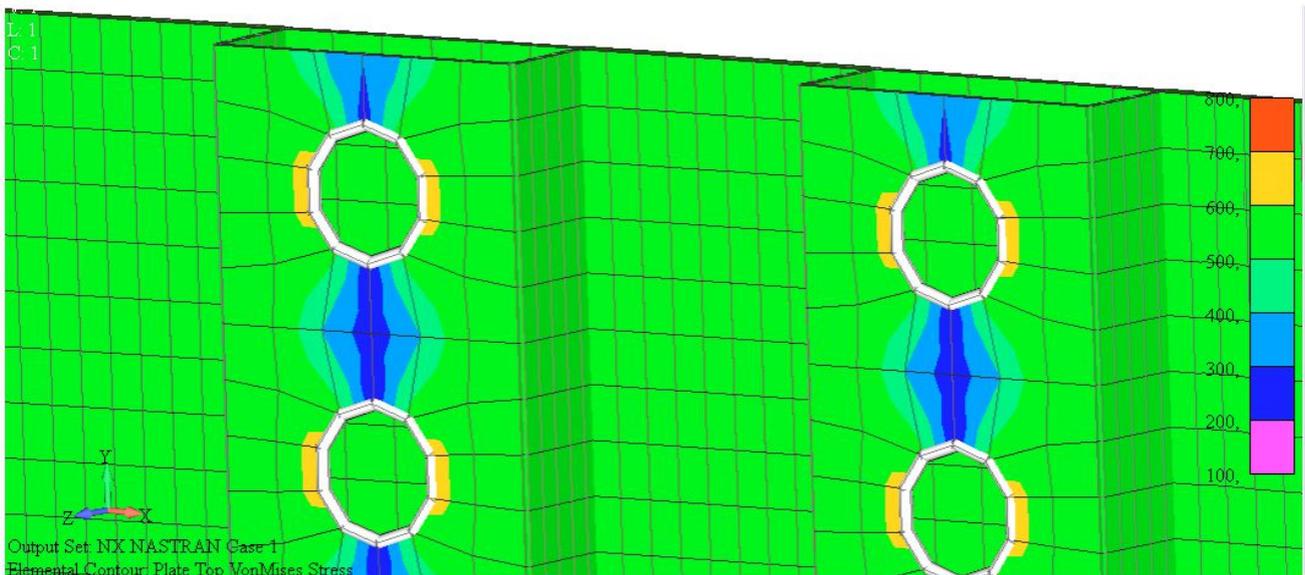


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений в конструкции прототипа: максимальные напряжения – 689 МПа, напряжения в отбортовке – 194 МПа; допускаемые напряжения 780 МПа

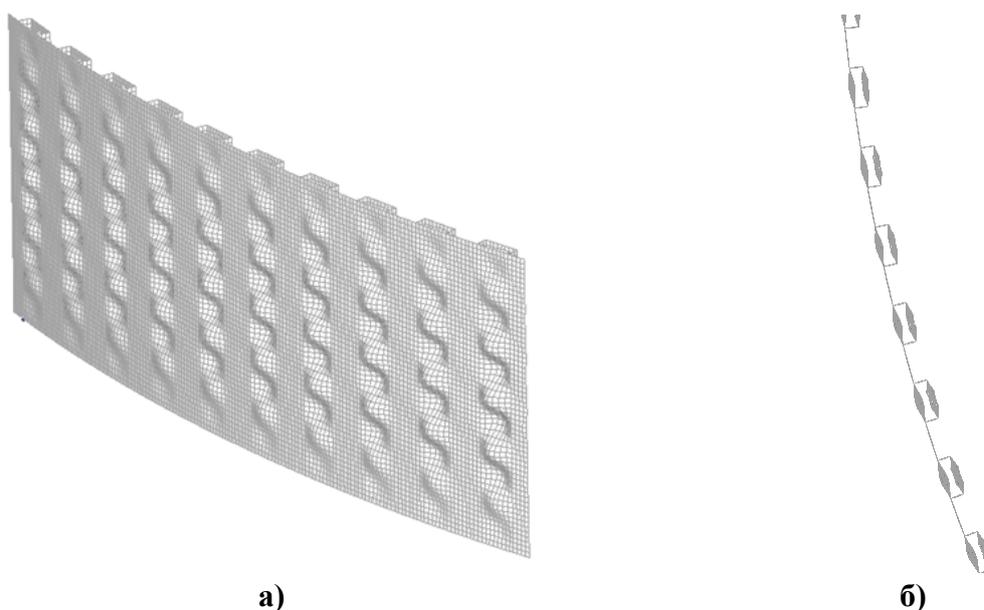


Рис. 4. Местная форма потери устойчивости конструкции прототипа: а) общий вид; б) поперечное сечение. Коэффициент критической нагрузки 1,01

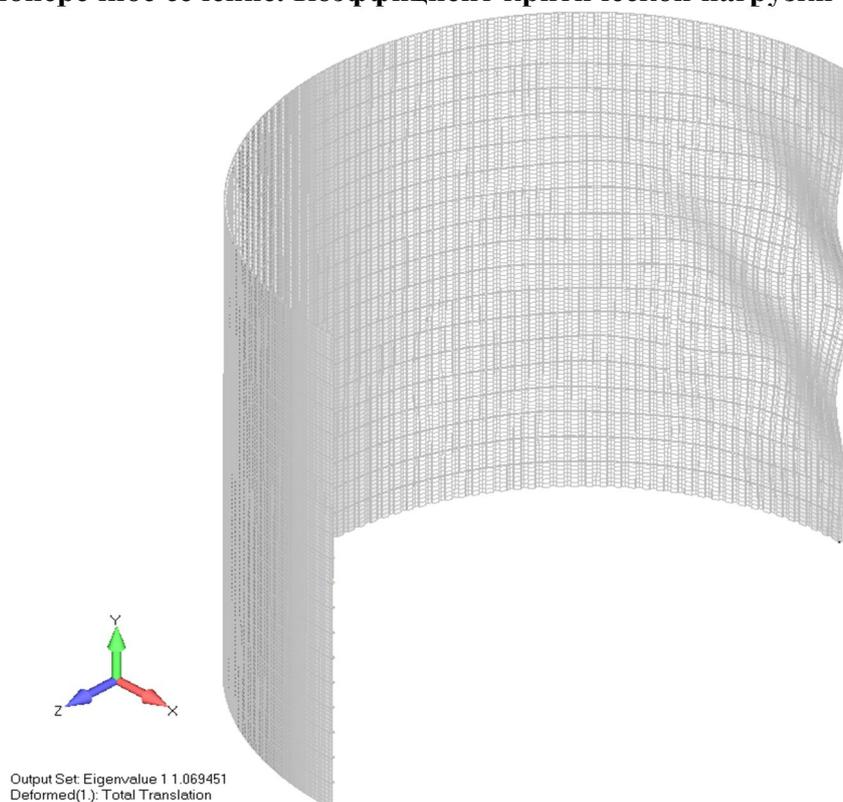


Рис. 5. Общая форма потери устойчивости. Коэффициент критической нагрузки 1,07

Параметры конструкции прототипа подобраны так, что она была равнопрочна по прочности материала (рис. 3), местной потере устойчивости (рис. 4) и общей потере устойчивости (рис. 5). Под общей потерей устойчивости подразумевается отклонение конструкции от положения равновесия в виде изгибных деформаций оболочки в целом. Поперечные сечения гофр при этом сохраняют свою форму. При местной потере устойчивости

наоборот, оболочка в целом сохраняет свою форму, в то время как отдельные стенки оболочки испытывают изгибные деформации.

Целью данной работы является проектирование конструкции, подобной прототипу, из КМ. Геометрическая конфигурация конструкции и нагрузки будут такими же, как и в прототипе. Заменяем элементы конструкции прототипа, выполненные из стали, аналогичными элементами из углепластика, так,

чтобы соотношение жёсткостей элементов сохранилось, как в конструкции прототипе.

Конструкция-прототип изготовлена из изотропного материала. Для создания элементов конструкции с такими же жёсткостями используем углепластик с квазиизотропной укладкой волокон. Волокна уложены по 4 направлениям.

В конструкции из КМ отверстия изготавливаются плохо – разрываются волокна. Если волокно в углепластике разорвано, то оно включается в силовую работу на большом расстоянии от места разрыва. Это происходит из-за большой разницы в упругих свойствах матрицы и волокон. Матрица слабее передает силы с одного волокна на другое по сравнению с тем, как происходит включение в силовую работу в изотропных материалах [3]. Поэтому отверстия делать нельзя. Снизим продольную жёсткость внутренней стенки, изменив укладку волокон в ней. Для снижения продольной жёсткости убираем продольные волокна на внутренней стенке гофры (рис.6).

Моделирование конечно-элементной модели и результаты расчетов

В табл. 1 представлены материалы элементов конструкции прототипа и конструкции из КМ. Толщины гофрированного листа и обшивки подбираются из условий прочности. Для этого выполняется линейный статический расчет методом конечных элементов в системе MSC.Nastran. Для удовлетворения условиям прочности изменялись два параметра: толщина обшивки и толщина гофры. Толщины слоёв пластика с волокнами по разным направлениям в этих оболочках изменяются пропорционально общим толщинам оболочек. Прочность пластика оценивалась по величине напряжения по волокну. Допускаемое напряжение принималось равным 600 МПа.

В табл. 2 представлены максимальные напряжения по разным стенкам. Из этой таблицы видно, что конструкцию можно облегчить, если уменьшить количество материала в слоях со всеми направлениями волокон кроме продольного.

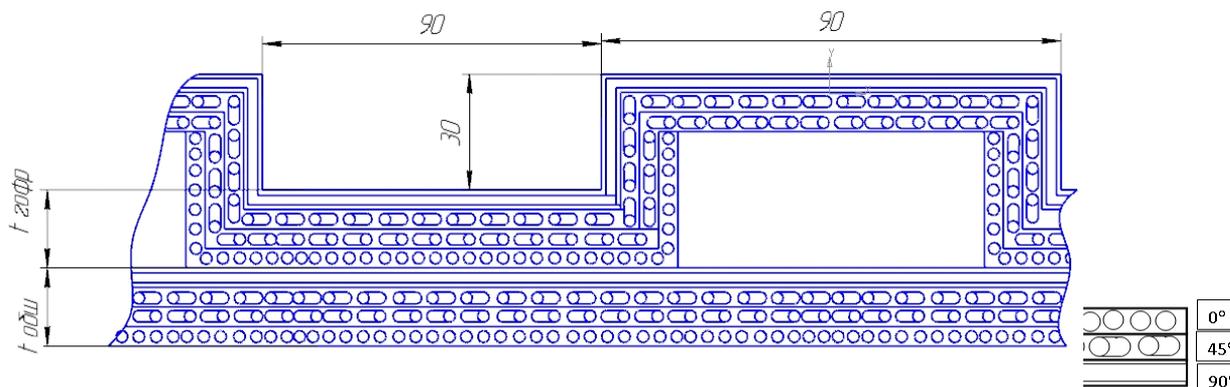


Рис. 6. Размеры гофры из КМ

Таблица 1

Материалы элементов конструкций

Элемент конструкции	Конструкция прототип	Конструкция из КМ
Внутренняя стенка гофры	Нержавеющая сталь (стенка с отверстиями)	Углепластик под 45,-45,90°
Перпендикулярные обшивке стенки гофры	Нержавеющая сталь	Углепластик 0,45,-45,90°
Обшивка и прилегающая стенка гофры	Нержавеющая сталь (толщина: $t_{обш} + t_{гофр}$)	Углепластик 0,45,-45,90° (толщина: $t_{обш} + t_{гофр}$)

Таблица 2

Максимальные напряжения

№ слоя	Угол укладки волокон, град				Толщина слоя, мм	Максимальные напряжения, МПа
	Перпендикулярные обшивке стенки гофры	Внутренняя стенка гофры	Обшивка	Прилегающая стенка гофры		
1	0	45	0	0	0,786	584
2	45	-45	45	45	0,55	236
3	-45	-45	-45	-45	0,55	230
4	90	45	90	90	0,55	200
5	90		90	90	0,55	163
6	-45		-45	-45	0,55	245
7	45		45	45	0,55	251
8	0		0	0	0,786	534
9				0	0,786	579
10				45	0,55	211
11				-45	0,55	211
12				90	0,55	162
13				90	0,55	163
14				-45	0,55	212
15				45	0,55	212
16				0	0,786	581

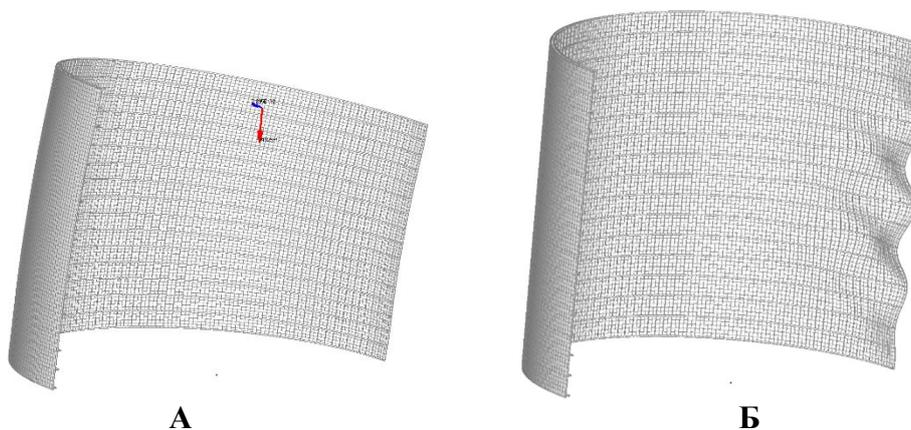


Рис. 7. Общая потеря устойчивости конструкции: А – статическая деформация под нагрузкой; Б – форма потери устойчивости

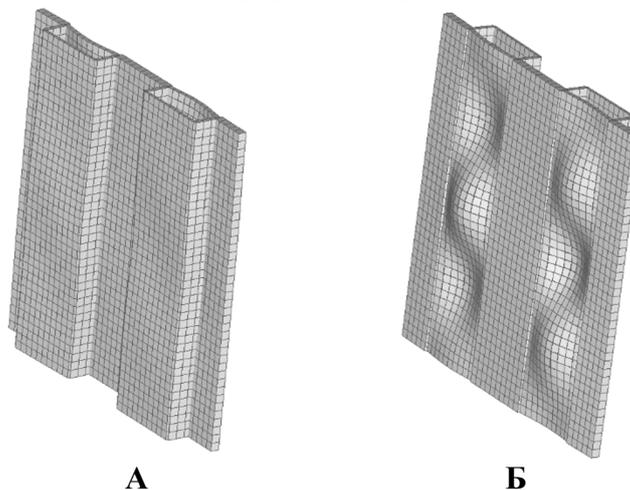


Рис. 8. Местная потеря устойчивости конструкции: А – вид изнутри; Б – вид снаружи

Таблица 2

Сравнительная таблица характеристик конструкций

Характеристики конструкции	Конструкция-прототип	Конструкция из КМ
Коэффициент запаса прочности по напряжениям	1,13	1,11
Коэффициент критической нагрузки при общей потере устойчивости	1,07	1,004
Коэффициент критической нагрузки при местной потере устойчивости	1,01	3,398
Масса конструкции, кг	7540	3326
Толщина перпендикулярных обшивке стенок гофр, мм	2,07	4,87
Толщина внутренней стенки гофр, мм	2,07	3,30
Толщина обшивки, мм	1,93	4,87
Суммарная толщина, мм	4	9,74

В результате моделирования общей потери устойчивости (рис. 7) и местной (рис. 8) получили коэффициенты критической нагрузки 1,004 и 3,398 соответственно [4].

В табл. 2 представлены полученные характеристики конструкций прототипа и из КМ: коэффициенты запаса прочности по напряжениям, коэффициенты критической нагрузки местной и общей потери устойчивости и масса конструкции.

Конструкция из композиционного материала обладает высоким запасом по местной потере устойчивости. Это произошло, потому что оболочка из КМ получилась толще, чем из стали. Изгибная жёсткость тонкой оболочки пропорциональна толщине в кубе, так что оболочка из углепластика сопротивляется местной потере устойчивости сильнее, чем стальная. Ввиду этого, возможно, не было необходимости ослаблять внутреннюю полку гофры по продольному направлению, как это было в конструкции прототипе.

Заключение

Таким образом, была спроектирована конструкция сухого отсека из КМ в виде оболочки, усиленной гофрированным листом.

Эта конструкция из КМ отличается от конструкции прототипа из стали большим запасом по местной потере устойчивости. Масса композитной конструкции в 2,27 раз меньше, чем конструкции прототипа.

Литература

1. The fully reusable second stage STARSHIP. URL: <https://www.spacex.com/starship> (дата обращения: 5.04.2020).
2. Галкина Ю. Е. «Проектирование оболочки сухого отсека ракеты-носителя, усиленной гофрированным листом»
3. Бойцов А. Г., Дудаков В. Б., Плешаков А. В. Новое в обработке композитов. URL: <http://mirprom.ru/public/novoe-v-obrabotke-kompozitov.html> (дата обращения: 7.04.2020).
4. Пересыпкин К. В., Пересыпкин В. П., Иванова Е. А. Проектирование силовых конструкций ракет-носителей с применением метода конечных элементов [Электронный ресурс]: Минобрнауки России, СГАУ им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). 3,19 Мбайт. Самара, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

DESIGN OF THE LAUNCH VEHICLE DRY COMPARTMENT FROM COMPOSITE MATERIALS IN THE FORM OF A SHELL REINFORCED WITH CORRUGATED SHEET

K. V. Peresyarkin, A. A. Starkova, J. E. Galkina

Weight is one of the key parameters of space rocket constructions. Its decrease allows increasing the mass of the payload. Significant weight reduction can be achieved by using composite materials (CM), which have high strength characteristics and low density. The development of missile compartments of large diameters is associated with the use of special types of constructions that allow absorbing high loads compared to traditional missiles loads. One of such design for launch vehicle dry compartment is a shell reinforced with a corrugated sheet. In this research considered possibility of creating such a construction from CM based on the redesign of the existing construction. A comparison is made between the prototype construction and the construction made of CM.

Key words: launcher hull, dry compartment, corrugated shell, strength, buckling, finite element method.

Статья поступила в редакцию 08.07.2020 г.