

3 Экспериментальная отработка космических аппаратов на механические воздействия: учеб. пособие / Н. А. Тестоедов // Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2008. – 152 с.

*L. P. NAZAROVA, I. V. ROMANENKO*

### **MODELING OF TRANSFORMABLE MECHANICAL DEVICES OPERATION AT THE WEIGHTLESSNESS SIMULATION AND THE STAGES OF GROUND EXPERIMENTAL TESTING**

The modeling peculiarities of spacecraft transformable mechanical devices operation in weightlessness conditions are considered in the article. It was described the process of creating a computational model for the tested spacecraft mechanical devices, the creation of the computational model for test equipment for ground experimental testing.

Получено 15.03.2013

**ISSN 2227-1104. Механика. Научные исследования  
и учебно-методические разработки. Вып. 7. Гомель, 2013**

---

УДК 629.4.023.14

*А. В. ПИГУНОВ<sup>1</sup>, С. В. ШЕСТАКОВ<sup>2</sup>, П. М. АФАНАСЬКОВ<sup>1</sup>,  
В. Г. ГУБАРЕВИЧ<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель*

<sup>2</sup>*Белорусский автомобильный завод, Жодино*

### **КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ПО СНИЖЕНИЮ МЕТАЛЛОЕМКОСТИ КОНСТРУКЦИИ УНИВЕРСАЛЬНОГО КРЫТОГО ВАГОНА С УВЕЛИЧЕННЫМ ОБЪЕМОМ КУЗОВА**

На основе сопоставления технико-экономических показателей универсальных крытых вагонов, которые производятся в Российской Федерации, Украине, с отечественной конструкцией определены преимущества и недостатки спроектированной конструкции вагона модели 11-9931. Выполнены прочностные расчеты и произведен анализ уровня напряжений для всех конструктивных групп металлоконструкции кузова вагона. Предложены конструктивные решения, позволяющие снизить массу тары вагона, правильность которых подтверждена результатами прочностных расчетов.

Наиболее распространённые модели универсальных крытых вагонов, эксплуатируемые на железных дорогах стран СНГ, – это 11-217 и 11-280. Конструкции кузовов данных вагонов отличаются прежде всего погрузочными объемами. У вагона модели 11-217 он составляет 120 м<sup>3</sup>, а у модели 11-280 – 140 м<sup>3</sup>. Однако на сегодняшний день они не в полной мере соответствуют структуре перевозимых в них грузов, в которой преобладают относительно легковесные. Это приводит к снижению конкурентоспособности железнодорожных перевозок по сравнению с другими видами транспорта и прежде

всего с автомобильным. Вагоностроительные и вагоноремонтные заводы Российской Федерации и Украины освоили выпуск вагонов с увеличенным объемом кузова. В частности, Крюковский вагоностроительный завод освоил выпуск вагонов моделей 11-7045 и 11-7038 с полезным объемом кузова 161,5 м<sup>3</sup>. Рославльский вагоноремонтный завод выпустил опытный образец модели 11-9799 с погрузочным объемом 185 м<sup>3</sup>.

На наш взгляд, наиболее перспективным направлением развития крытых вагонов является разработка конструкций, имеющих кузова увеличенного объема и способных эксплуатироваться с осевыми нагрузками как 23,5 т, так и с 25 т. Это будет соответствовать современным и перспективным условиям эксплуатации.

Конструкторским бюро по проектированию железнодорожного подвижного состава РУП «БелАЗ» была разработана конструкция универсального крытого вагона с кузовом в габарите 1-ВМ объемом 162 м<sup>3</sup>, грузоподъемностью 67 т и массой тары 27 т. Для сравнения технико-экономические показатели вагонов, выпускаемых вагоностроительными заводами Украины и Российской Федерации, а также спроектированной модели 11-9931 приведены в таблице 1.

*Таблица 1 – Техничко-экономические показатели универсальных крытых вагонов*

Показатель	Модель				
	11-217	11-280	11-7038	11-9799	11-9931
Грузоподъемность, т	68	68	68	62	67
Тара, т	24,7	26	26	31,5	27
Объем кузова полный, м <sup>3</sup>	120	138	161,5	185	162
База вагона, мм	10000	12240	13500	15690	14420
Коэффициент тары	0,363	0,382	0,382	0,508	0,403
Осевая нагрузка, кН	23,1	23,5	23,5	23,5	23,5
Габарит (ГОСТ 9238–83)	1-ВМ	1-ВМ	1-ВМ	1-Т	1-ВМ
Ширина дверного проема, мм	3794	3802	3900	6000	3973

Как видно из таблицы, вагон модели 11-9799 производства Рославльского вагоноремонтного завода предназначен в основном для перевозки легковесных грузов, о чем свидетельствует большой объем кузова 185 м<sup>3</sup>. Несомненным преимуществом данной модели представляется наличие дверного проема шириной 6 м. Неоспоримым «минусом» является малая грузоподъемность (62 т) и большая масса тары (31,5 т), что ставит под вопрос экономическую целесообразность применения вагона для перевозки грузов, имеющих большую плотность. Данная конструкция сильно отличается характеристиками от других моделей, и при дальнейшем анализе она учитываться не будет.

Модель 11-9931 уступает всем без исключения вагонам по грузоподъемности (она меньше на 1 тонну) из-за увеличенной массы тары, которая составляет 27 тонн. Однако очевидным преимуществом перед моделями 11-217 и

11-280 является увеличенный объем кузова, который составляет  $162 \text{ м}^3$ . Если сравнивать с моделью 11-7038 производства Крюковского ВСЗ, то это преимущество минимально, так как разность погрузочных объемов составляет всего  $0,5 \text{ м}^3$ . В то же время несомненным плюсом белорусской модели является наличие уширенного дверного проема для удобства и быстроты выполнения погрузочно-разгрузочных операций и перевозки большей номенклатуры объемных грузов, и, как следствие, сокращение простоя и ускорение оборота вагона.

Спроектированный вагон имеет цельнометаллическую конструкцию с двумя раздвижными двухстворчатыми дверями. Настил пола металлический, что повышает надежность его работы в эксплуатации. Рама кузова состоит из хребтовой балки, двух боковых, двух концевых, двух шкворневых, двух основных поперечных, восьми промежуточных поперечных балок и шести продольных балок для поддержания настила пола. Хребтовая балка сварена из двух Z-образных профилей № 31. Боковые балки выполнены из швеллеров № 20. Концевые балки – сварные Г-образного сечения и сварены из листов толщиной 10 мм. Шкворневые балки также сварные коробчатого сечения. Каждая состоит из двух вертикальных листов толщиной 8 мм, верхнего (10 мм) и нижнего (12 мм) горизонтальных листов. Основные поперечные балки – двутаврового сечения с толщиной вертикального 8 мм и двух горизонтальных (12 мм) листов. Промежуточные поперечные балки выполнены из гнутого П-образного профиля, толщина которого 5 мм.

Боковая стена имеет каркас и обшивку. Каркас стены включает в себя верхнюю обвязку и двенадцать стоек. Верхняя обвязка выполнена из уголка, стойки – из гнутого П-образного профиля толщиной 8 мм. Обшивка стен изготовлена из гофрированных листов толщиной 4,5 мм снизу и 4 мм сверху.

Торцевая стена изготовлена из каркаса и металлической обшивки. Каркас состоит из двух вертикальных стоек, верхней обвязки и трех горизонтальных усиливающих поясов. Металлическая обшивка выполнена из гладких листов толщиной 4,5 мм снизу и 4 мм сверху, а стойки – из двутавра. Горизонтальные пояса П-образного профиля толщиной 5 мм. Верхняя обвязка выполнена из специального профиля толщиной 5 мм. Нижней обвязкой стены служит концевая балка рамы.

Крыша кузова состоит из двенадцати дуг и обшивки. Дуги выполнены из гнутого швеллера толщиной 6 мм, а обшивка крыши из гофрированных листов толщиной 2 мм.

Таким образом, кузов универсального крытого вагона модели 11-9931 имеет цельнонесущую конструкцию в виде замкнутой подкрепленной тонколистовой оболочки с вырезами. Оболочка выполнена из набора продольных и поперечных элементов жесткости, связанных с обшивкой. Поэтому расчетная схема кузова принималась в виде пластинчатой пространственной системы. При построении модели использовались два типа конечных эле-

ментов: пластинчатые 3- и 4-угольные (рисунок 1). Параметры расчетной модели следующие: количество узлов – 81985, количество конечных элементов – 91604.

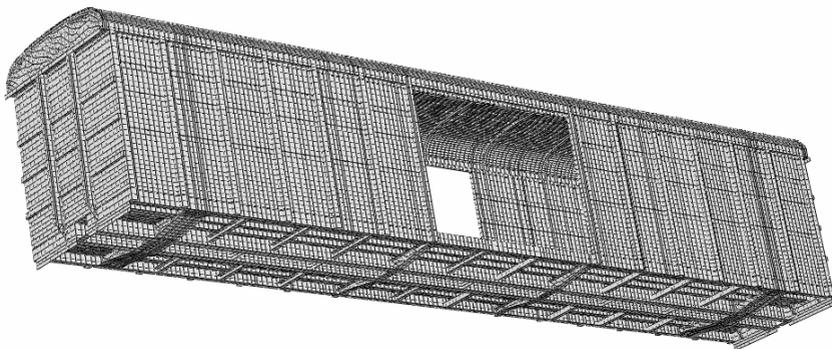


Рисунок 1 – Расчетная конечно-элементная модель

Кинематические граничные условия включают в себя ограничение степеней свободы в местах крепления упоров автосцепного устройства, пятников и скользунов.

Разработанная модель предназначена для оценки несущей способности кузова и построена для кузова в целом с учетом возможности приложения любого сочетания и вида эксплуатационных нагрузок. Она с достаточной точностью аппроксимирует металлоконструкцию кузова универсального крытого вагона.

«Нормами...» [1] для оценки прочности конструкции кузова вагона предусмотрены два расчетных режима I и III. Первый расчетный режим предусматривает приложение к конструкции продольной сжимающей (растягивающей) силы  $T = -2,0$  МН ( $T = 2,5$  МН) в местах расположения задних (передних) упоров автосцепного устройства. Учитывается нагрузка от собственной массы кузова и массы перевозимого груза, а также давление распора сыпучего груза, которое прикладывается к боковым и торцевым стенам. Вместе с тем учитываются силы, возникающие при прохождении вагоном кривых участков пути. Они прикладываются в местах пятников и упоров автосцепки в горизонтальной плоскости.

При третьем расчетном режиме значение продольной силы уменьшено и составляет  $T = \pm 2,0$  МН, а полезная нагрузка и собственный вес увеличиваются на величину вертикальной динамической составляющей.

После нагружения расчетной модели конструкции приведенными выше сочетаниями нагрузок была произведена серия прочностных расчетов. Максимальные расчетные эквивалентные напряжения для I и III расчетных ре-

жимов составляют 220,3 и 236,7 МПа (91 и 98 % от допускаемых значений). В первом случае наиболее напряженным является металлический настил пола, а во втором – обшивка боковой стены в районе шкворневой стойки. Если детально проанализировать уровень напряжений, возникающих в металлоконструкции при первом расчетном режиме, то можно констатировать, что расчетные эквивалентные напряжения, составляющие немногим более 50 % от допускаемых, наблюдаются в боковой продольной балке рамы, шкворневой и хребтовой балках и в обшивке боковой стены. По остальным конструктивным группам конструкции расчетные значения напряжений варьируются от 9 до 47 % от допускаемых.

Анализ распределения расчетных эквивалентных напряжений для III расчетного режима показал, что наиболее напряженными являются три элемента конструкции: боковая продольная балка рамы, поперечные балки в районе дверного проема и металлический настил пола. В элементах данных конструктивных элементов конструкции уровень максимальных напряжений находится в диапазоне от 186,0 до 123,2 МПа. В остальных элементах конструкции кузова уровень напряжений не превышает 50 % от допускаемых.

На основе анализа уровня напряжений, возникающих в элементах металлоконструкции кузова, можно говорить о неравнопрочности конструкции, что ведет к неоправданному увеличению металлоемкости.

Вагоны старых моделей имеют конструкцию рамы, обеспечивающую крепление деревянного настила пола. Для создания необходимой прочности она включает в себя дополнительное количество поддерживающих продольных и поперечных балок. Помимо этого деревянный настил пола в районе дверного проема усилен металлическим листом толщиной 4 мм [2]. В спроектированной конструкции настил пола металлический, а конструкция рамы имеет аналогичный набор и расположение балок, что, на наш взгляд, негативно сказывается на массе конструкции в целом и, как следствие, ухудшает ее технико-экономические показатели.

Для снижения массы тары было принято решение о внесении изменений в конструкцию кузова вагона. При этом толщина обшивки боковой стены была уменьшена на 1 мм, а стоек на 3 мм. Также было уменьшено количество продольных поддерживающих балок с шести до четырех и изменена их ориентация таким образом, чтобы, примыкая к металлическому настилу пола, они образовывали замкнутое коробчатое сечение (рисунок 2). Аналогичным образом были сориентированы и вспомогательные поперечные балки рамы. Максимальная высота поперечного сечения основных поперечных балок была увеличена на 100 мм и вместе с тем уменьшена толщина горизонтальных и вертикального листов с 1,2 мм и 1,0 мм до 0,8 мм соответственно. Дуги крыши, примыкающие к дверному проему в средней части кузова, были смещены к середине кузова, так чтобы они образовывали с дверными стойками и основными поперечными балками рамы замкнутый силовой шпангоут.

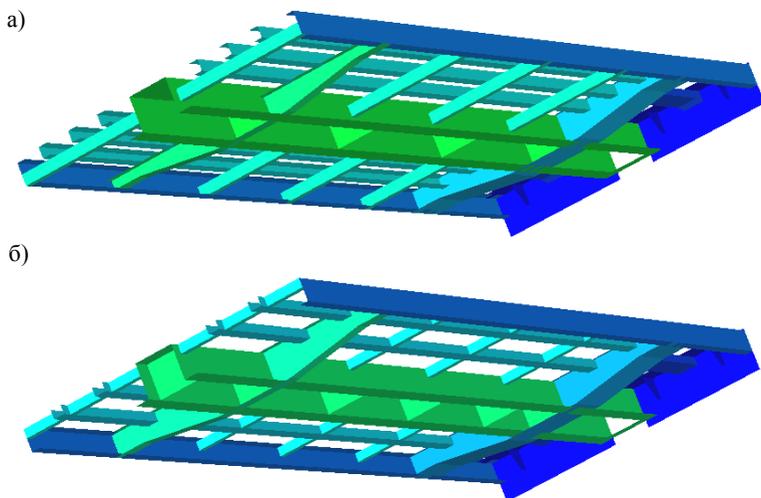


Рисунок 2 – Конструкция рамы: *а* – первоначальная; *б* – модернизированная

Эффективность принятых конструктивных изменений проверена на расчетной схеме кузова, в которую были внесены соответствующие изменения. Выполненные прочностные расчеты показали, что напряжения не превышают допускаемых для рассмотренных режимов нагружения, и конструкция удовлетворяет современным нормативным требованиям прочности.

Сопоставление полученных результатов расчетов модернизированной и первоначальной конструкции показало, что для I и III расчетных режимов произошло перераспределение уровня напряжений между составными элементами. Для одних конструктивных элементов он остался неизменным, для других – увеличился или уменьшился.

При расчете на нагрузки, соответствующие I расчетному режиму с учетом действия продольной сжимающей силы, оказалось, что максимальные напряжения увеличились в основных и вспомогательных поперечных балках рамы, а также в металлическом настиле пола. Больше всего уровень максимальных напряжений возрос в элементах основных поперечных балок с 68,8 до 176,9 МПа, но по отношению к допускаемому составил всего 54 %. В элементах боковых и вспомогательных продольных балок рамы уровень максимальных напряжений наоборот снизился на 14 и 18 % соответственно. Для остальных конструктивных групп максимальные значения напряжений остались без изменений.

При воздействии на конструкцию продольной растягивающей силы на 12 % увеличились напряжения в элементах основных и вспомогательных поперечных балок, однако при этом они не превышают 49 % от допускаемых

значений. Снижился уровень напряжений в боковых и вспомогательных продольных балках рамы. Причем в боковых балках он уменьшился с 165,4 до 95,3 МПа.

Для III расчетного режима также наблюдается изменение напряженного состояния элементов конструкции. При действии продольной сжимающей силы уровень максимальных напряжений увеличился в основных и вспомогательных поперечных балках рамы на 11 и 16 % соответственно. В стойках боковой стены и в боковых продольных балках рамы наблюдается значительное снижение (до 46 %) уровня максимальных расчетных эквивалентных напряжений.

При действии продольной растягивающей нагрузки наблюдается та же тенденция для всех конструктивных элементов. У одних – уровень напряжений увеличивается, у других – снижается, а третьих – остается неизменным. Исключения составляют хребтовая балка и продольные вспомогательные балки, в которых значения расчетных эквивалентных напряжений уменьшились.

Сравнение напряженного состояния первоначально спроектированной металлоконструкции кузова и модернизированной с учетом приведенных выше конструктивных изменений позволяет сделать вывод о том, что конструкция стала более равнопрочной, а это привело к снижению массы тары на 12,3 % или на 1,72 тонны.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1 **Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колес 1520 мм (несамоходных).** – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.

2 **Конструирование и расчет вагонов:** учеб. для студентов вузов / В. В. Лукин [и др.]; под ред. В. В. Лукина. – М.: УМК МПС РФ, 2000. – 731 с.

*A. V. PIGUNOV, S. V. SHESTAKOV, P. M. AFANASKOV, V. G. GUBAREVICH*

#### **DESIGN SOLUTIONS FOR SPECIFIC QUANTITY OF METAL REDUCING FOR THE UNIVERSAL BOXCARS CONSTRUCTION WITH INCREASED CAPACITY**

The advantages and disadvantages of the designed model 11-9931 of boxcar construction were established on the base of the comparison of technical and economic parameters of universal boxcars produced in the Russian Federation and Ukraine, with the domestic design. Strength calculations were performed and the stress level for all metal car body design groups was analyzed. There were suggested the constructive solutions reducing the car tare weight. The validity of these solutions is confirmed by the results of the strength calculations.

Получено 28.10.2013