

УДК 629.463.66

*А. В. ПИГУНОВ, В. В. ПИГУНОВ*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь*

## **КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ОБЪЕМА КУЗОВА ВАГОНА-ХОППЕРА**

Выполнен анализ конструктивных решений, которые позволяют увеличить погрузочный объем кузовов вагонов-хопперов, предназначенных для перевозки зерна. Предложен вариант исполнения торцевой стены, позволяющий получить дополнительный объем без изменения угла наклона торцевой стены. Выполненные предварительные расчеты кузова вагона-хоппера с учетом предлагаемого технического решения показали соответствие конструкции современным требованиям прочности.

**Ключевые слова:** вагон-хоппер, конструкция кузова, прочность, объем кузова, метод конечных элементов.

Увеличение объема кузова грузового вагона – один из путей повышения его грузоподъемности. В частности, эта задача является актуальной для вагонов-зерновозов. До недавнего времени на железных дорогах были наиболее распространены вагоны-хопперы для перевозки зерна моделей 11-739 и 19-752 производства Крюковского вагоностроительного завода, которые имеют схожую конструкцию и одинаковые линейные размеры. Основные их отличия заключаются в конструктивном исполнении крыши и загрузочных люков (в модели 19-752 они увеличенного размера) [1].

Цельнометаллический кузов вагона-хоппера модели 19-752 состоит из крыши, двух вертикальных боковых и двух наклонных торцевых стен, рамы и шести разгрузочных бункеров (по три на сторону) [2]. Каркас крыши вагона образован поперечными дугами, выполненными из уголка 75×50×5 мм, к которым сверху приваривается металлическая гофрированная обшивка, состоящая из среднего листа толщиной 3 мм и двух крайних – 1,8 мм. На среднем листе имеется четыре прямоугольных выреза, в которых расположены горловины загрузочных люков с крышками. Крышу с торцевыми стенами соединяют фрамуги, установленные по торцам кузова.

Торцевая стена включает верхнюю вертикальную и нижнюю наклонную части, основу которых составляет гладкая обшивка толщиной 4 мм. Верхняя часть вертикального листа содержит отбортовку, выполняющую роль верхней обвязки, а нижняя – загиб, образующий с нижним наклонным листом поперечный замкнутый профиль. Боковые обвязки торцевой стены, связывающие ее с боковыми стенами, выполнены из гнутого уголка 60×60×6 мм. Наклонный лист подкрепляется снаружи двумя наклонными и горизонтальным поясом, расположенным между ними, из гнутого швеллера толщиной 4 мм. Усиливающие пояса образуют с обшивкой замкнутое сечение. Для придания

торцевой стене необходимой прочности листы ее обшивки соединены с верхним горизонтальным листом шкворневой балки раскосами. Вертикальный лист усилен двумя стойками-раскосами из прокатного швеллера № 14, а нижний наклонный – тремя подкосами, связывающими горизонтальный усиливающий пояс со шкворневой балкой рамы.

Боковая стена включает верхнюю обвязку, десять вертикальных стоек из двутавра № 10, два раскоса (швеллер № 14) и стальную обшивку, которая на участке размещения вертикальных стоек выполнена гофрированной из листа толщиной 3 мм, а в концевых частях – из гладкого листа толщиной 4 мм. Верхняя обвязка имеет специальный профиль незамкнутого сечения (толщина металла 6 мм).

Рама вагона состоит из хребтовой, двух боковых продольных, двух основных поперечных, двух шкворневых и двух концевых балок. Дополнительно в консольных частях для связи концевых и шкворневых балок по бокам устанавливают четыре продольные концевые обвязки из уголка. Хребтовая балка сварена из двух зетовых профилей № 31 и внутри кузова сверху усилена коньком. Боковые продольные балки, выполненные из уголка 125×80×10 мм, расположены выше уровня хребтовой балки на участке расположения вертикальных стоек боковой стены. Далее они изогнуты вниз и привариваются к верхнему листу шкворневой балки, имеющей замкнутое коробчатое сечение, которое уменьшается к боковым балкам. Она образована верхним горизонтальным, вертикальными и нижним листами, на которых располагаются опорные скользуны. Основные поперечные балки, служащие опорой для бункеров, – сварные, имеют тавровое поперечное сечение.

Нижнюю часть кузова замыкают шесть бункеров, выполненных из гладкого листового металла толщиной 5 мм. Наклонные стенки бункеров дополнительно усилены подкрепляющими элементами в виде швеллера.

Описанная конструкция кузова объемом 94 м<sup>3</sup> проектировалась для осевой нагрузки 222,5 кН и отвечала требованиям того времени.

Большую работу по уточнению параметров типоразмерного ряда вагонов-хопперов с учетом повышения осевых нагрузок и применения более емких габаритов провели совместно специалисты ВНИИВа и МИИТа. Целью исследования было определение таких параметров вагонов, при которых были бы минимальными приведенные эксплуатационные затраты [3]. Было установлено, что для осевой нагрузки 226 кН и габарита 1–ВМ оптимальный объем кузова составляет 100 м<sup>3</sup>, при осевой нагрузке 245 кН и габарите 1–Т – 111 м<sup>3</sup>. Также было показано, что для всех перспективных конструкций вагонов длина рамы должна быть 13500 мм.

Руководствуясь результатами указанных исследований, для реализации осевой нагрузки 245 кН, на базе кузова модели 19-752 была разработана перспективная модель 19-756, объем кузова которой составил 111 м<sup>3</sup> при грузоподъемности до 76,5 т. Увеличение объема кузова было достигнуто, в основном, путем уменьшения угла наклона торцевых стен до 45° [4].

Дальнейшее развитие модельный ряд вагонов-хопперов для перевозки зерна получил в двух типах кузовов:

- каплевидной формы как с хребтовой балкой в консольных частях, так и со сквозной хребтовой балкой;
- традиционной конструкции с вертикальными боковыми стенами и сквозной хребтовой балкой.

В последнее десятилетие конструкции вагонов-хопперов для перевозки зерна проектировались с учетом осевых нагрузок 230,5 и 245 кН. Технические характеристики вагонов разных моделей приведены в таблице 1. Представленные данные показывают, что все вагоны имеют увеличенный объем кузова при одинаковой длине рамы и базе вагона, как и у модели 19-752. Увеличение объема кузова достигнуто в основном за счет уменьшения угла наклона торцевых стен и у моделей 19-1259 и 19-4152 он составляет 127 и 133 м<sup>3</sup> соответственно.

Таблица 1 – Техничко-экономические показатели крытых вагонов-хопперов

Показатель	Модель					
	11-739	19-752	19-756	19-9549	19-1259	19-4152
Завод-производитель	КВСЗ	КВСЗ	КВСЗ	ТВСЗ	РМ рейл	ДВЗ
Грузоподъемность, т	65	70	76,5	76	76	71,5
Масса тары вагона, т	22	22	23,5	23,5	24	22,5
Осевая нагрузка, кН (тс)	213,15 (21,75)	225,5 (23)	245 (25)	245 (25)	245 (25)	230,5 (23,5)
Объем кузова, м <sup>3</sup>	93	94	111	120	127	133
База вагона, мм	10500	10500	10500	1050	1050	1050
Длина по осям сцепления авто-сцепок, мм	14720	14720	14720	14720	14720	14720
Длина по концевым балкам рамы, мм	13500	13500	13500	13500	13500	13500
Ширина максимальная, мм	3250	3240	3280	3220	3250	3244
Высота от уровня головок рельсов максимальная, мм	4653	4565	4873	4840	4900	–
Углы наклона конструктивных элементов кузова, град:						
– торцевая стена	55	65	45	35	45	30
– стены бункера	55	55	55	50	40	–
Кол-во загрузочных люков, шт.	4	4	4	4	5	5
Кол-во разгрузочных люков, шт.	6	6	6	6	3	6
Габарит	1-ВМ	1-ВМ	1-Т	1-Т	1-Т	1-Т

Конструкция кузова вагона модели 19-1259, разработанного АО «РМ Рейл Инжиниринг» (рисунок 1), имеет вертикальные боковые стены с обшивкой 1, расположенной с внешней стороны кузова, а вертикальные стойки 2 примыкают к обшивке с внутренней стороны на длине расположения бункеров, что увеличивает полезный погрузочный объем. Торцевые стены кузова распо-

жены под углом  $45^\circ$ , что на  $20^\circ$  меньше, чем у модели 19-752. Это дает возможность увеличения объема кузова путем рационального заполнения пространства консольной части на участке между шкворневой и концевой балками рамы. В таком случае крыша кузова становится по длине практически равной раме вагона. Кузов оснащен тремя бункерами специальной конструкции 3 вместо шести, хотя конструкция рамы предусматривает хребтовую балку 4 на всей длине кузова. Каждый из бункеров имеет форму усеченной пирамиды с разгрузочным люком, расположенным по центру кузова, что позволяет получить дополнительный объем за счет пространства под хребтовой балкой [5].

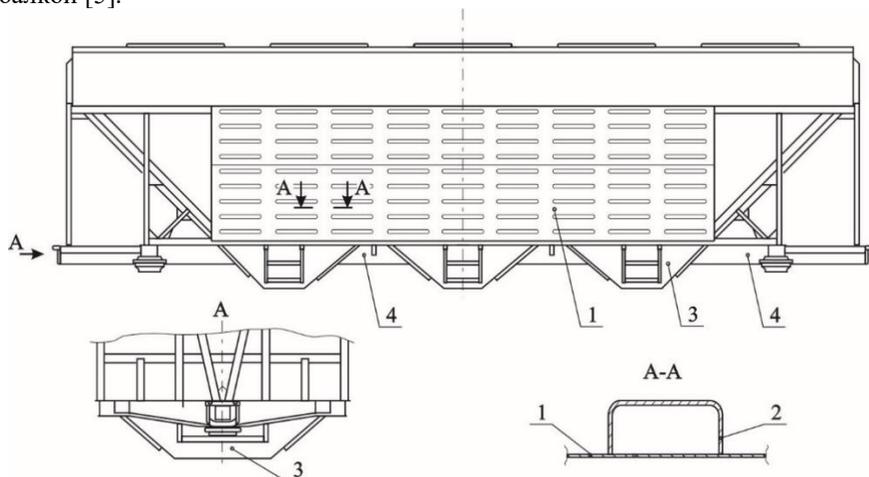


Рисунок 1 – Кузов вагона модели 19-1259

Вагон модели 19-4152 производства «Днепровагонмаш» (рисунок 2) имеет наибольший объем кузова, который составляет  $133 \text{ м}^3$ , что, несомненно, расширяет его функциональные возможности. Погрузочный объем удалось увеличить за счет использования полезного пространства между стойками 1, изготовленными из гнутого швеллера  $180 \times 70 \times 6 \text{ мм}$ . Для этого к швеллеру приваривается омегаобразный профиль 2 высотой 70 мм, образуя замкнутое коробчатое сечение стойки, к отогнутым концам которого крепятся гофрированные листы обшивки 3, образуя карман трапецевидной формы [6].

С учетом увеличения объема кузова также изменена конструкция хребтовой балки. Она имеет замкнутое коробчатое сечение и включает три части: две концевые 4 и среднюю 5. Толщина листов концевых частей хребтовой балки составляет 8 и 12 мм для вертикальных стенок, 12 и 16 мм для верхних и нижних листов соответственно. Хребтовая балка сразу после шкворневой занижается. Изгибы переходной зоны 6, расположенной между шкворневой балкой и бункером, выполнены плавными с определенными радиусами. Она

также имеет замкнутое коробчатое сечение, образованное вертикальными (8 мм) и горизонтальными листами (12 мм). Торцевая стена кузова имеет уменьшенный угол наклона, который составляет  $30^\circ$ , что также позволяет повысить объем кузова.

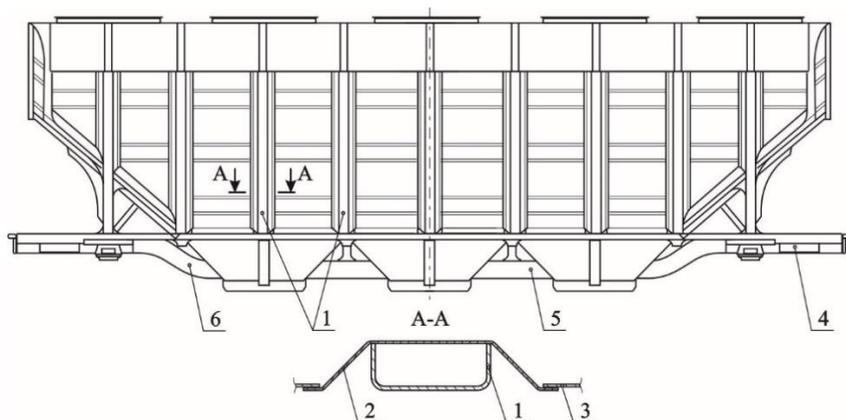


Рисунок 2 – Кузов вагона модели 19-4152

Таким образом, повышение полезного объема кузова в рамках неизменной длины рамы (13500 мм) достигнуто за счет применения следующих конструктивных решений:

- использования дополнительного пространства между стойками боковых стен;
- объединения двух соседних бункеров в единую конструкцию, что позволяет получить дополнительный объем под хребтовой балкой кузова;
- занижения уровня хребтовой балки в средней части кузова;
- уменьшения угла наклона торцевой стены.

При проектировании вагонов-хопперов должно выполняться условие, при котором угол наклона как торцевых стен, так и стен бункеров должен быть больше угла естественного откоса транспортируемого сыпучего груза. По результатам проведенных исследований для максимально лучшей выгрузки перевозимого груза разница должна составлять не менее  $10^\circ$  [7]. Эта рекомендация в модели 19-4152 производства «Днепровагонмаш» не выполняется, так как угол наклона торцевых стен в ней составляет  $30^\circ$  при угле естественного откоса зерна  $25^\circ$  [8].

Во всех представленных выше конструкциях кузовов торцевая стена образована двумя плоскостями: вертикальной сверху, наклонной снизу. Соединение с боковой стеной осуществляется под прямым углом.

Возможен вариант конструктивного исполнения торцевой стены, при котором каждая из ее частей (наклонная и вертикальная) образуется двумя плос-

костями, расположенными под углом друг к другу. В таком случае угол между плоскостями, образующими торцевую стену, может быть от  $179$  до  $90^\circ$  и угол между боковой и торцевой стеной – от  $91$  до  $135^\circ$ .

Практическую реализацию данного решения рассмотрим на примере кузова вагона-хоппера модели 19-752 постройки Крюковского ВЗЗ, хорошо зарекомендовавшего себя в эксплуатации. Наклонная и верхняя вертикальная части торцевой стены кузова образуются двумя плоскостями, стыкующимися посередине вагона, в результате чего получаем клиновидный выступ ( $500$  мм), который дает возможность увеличения полезного объема кузова. Помимо этого, он является дополнительным силовым элементом металлоконструкции торцевой стены. Геометрические характеристики сечений всех остальных ее подкрепляющих элементов остались неизменными, лишь незначительно изменилось их расположение.

Для сравнительной оценки прочности базовой конструкции и кузова, в схему которого внесены предлагаемые изменения, были разработаны их расчетные конечно-элементные пространственные модели. В них использовались два типа пластинчатых конечных элементов: плоские трех- и четырехугольные. В качестве кинематических граничных условий принимались ограничения степеней свободы в местах крепления упоров автосцепного устройства и пятников.

Полученные конечно-элементные модели конструкций: существующей кузова и с предлагаемыми конструктивными изменениями торцевой стены, представлены на рисунке 3.

При расчетах учитывались следующие сочетания нагрузок.

При квазистатическом сжатии продольная сила  $T = 2,5$  МН прикладывалась к задним упорам автосцепного устройства, в случае растяжения – к передним упорам ( $T = 2,0$  МН). Одновременно учитывалась сила тяжести кузова и груза, а также принималось во внимание давление сыпучего груза, которое прикладывалось к наклонным торцевым стенам, стенкам бункеров и вертикальным боковым стенам [9, 10].

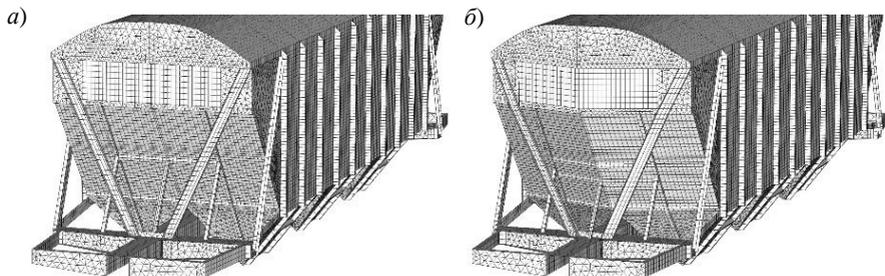


Рисунок 3 – Конечно-элементные модели вагонов-хопперов:  
а – базовой модели 19-752; б – модернизированного кузова

Проведенные расчеты конструкции кузова вагона базовой модели позволили определить значения расчетных напряжений для всех конечных элементов модели. Их максимумы при действии сжимающей нагрузки в зависимости от конструктивной группы составляют от 10 до 92 % от допускаемых напряжений. В случае действия растягивающей нагрузки они составляют 19–95 % от допускаемых значений и также их не превышают.

Результаты вычислений для кузова с измененной конструкцией торцевой стены показали, что максимальный уровень напряжений в некоторых конструктивных элементах, которых коснулись изменения, возрос, хотя и не превысил допускаемого значения 327 МПа. В частности, увеличились значения максимальных напряжений в верхнем горизонтальном листе шкворневой балки в месте опирания раскоса торцевой стены, что связано со смещением места его расположения. В остальных конструктивных группах произошло перераспределение напряжений. В одних случаях они возросли, в других – остались на том же уровне, а в третьих – снизились.

По результатам проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы.

Увеличение погрузочного объема достигается путем уменьшения угла наклона торцевых стен, рационального расположения обшивки боковых стен, позволяющего использовать дополнительный объем между стойками, и занижения уровня хребтовой балки в средней части кузова, а также увеличения объема бункеров. Возможности уменьшения угла наклона торцевых стен ограничены, поскольку этот угол не должен быть меньше угла естественного откоса груза, увеличенного на 10°.

Предложенное техническое решение, связанное с использованием клиновидной формы торцевой стены, позволяет увеличить вместимость кузова без изменения угла наклона данной стены при незначительном уменьшении угла наклона стенки бункера. Проведенные прочностные расчеты кузова с учетом предлагаемых изменений подтвердили соответствие модернизированной конструкции современным требованиям прочности.

Полученные в работе результаты также могут быть полезны при усовершенствовании конструкций вагонов-хопперов, которые предназначены для транспортировки иных видов грузов [11–13].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Пастухов, И. Ф. Вагоны : учеб. для техникумов ж.-д. трансп. / И. Ф. Пастухов, В. В. Лукин, Н. И. Жуков. – М. : Транспорт, 1988. – 280 с.
- 2 Вагон для зерна. Модель 19-752. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 752.00.000-1ТО. – Кременчуг : КВСЗ, 1981. – 31 с.
- 3 Созданию специализированных вагонов – системный подход / Г. И. Осадчук [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 1982. – № 5. – С. 51–54.

4 **Пигунов, В. В.** Конструкция, теория и расчет вагонов : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 2 / В. В. Пигунов, А. В. Пигунов. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 466 с.

5 Вагоны-хопперы для перевозки зерна и других сыпучих грузов модели 19-1259, 19-1259-01. Руководство по эксплуатации 1259.00.00.000 РЭ. – Саранск : АО «РМ Рейл Инжиниринг», 2017. – 78 с.

6 Вагон-хоппер крытый для зерна и других пищевых грузов модели 19-4152. Руководство по эксплуатации 4152.00.000 РЭ. – Каменское : Днепровагонмаш, 2017. – 51 с.

7 Расчет вагонов на прочность : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / С. В. Вершинский [и др.]. – М. : Машиностроение, 1971. – 432 с.

8 ГОСТ 33211–2014 Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Введ. 2016–07–01. – М. : Стандартинформ, 2016. – 54 с.

9 Analysis of the strength of the supporting structure of a TwoSection hopper wagon under operating loading conditions / G. Vatulia [et al.] // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, is. 2. – Article 859. – 17 p.

10 **Senko, B.** Evaluation of stress-strain state bodies of the hopper cars, taking into account the impact of bulk cargo / B. Senko, A. Pihunou, P. Afanaskou // Mechanika 2017 : Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Scientific Conference. – Kaunas : Kaunas University of Technology, 2017. – P. 331–335.

11 Substantiating the optimization of the load-bearing structure of a hopper car for transporting pellets and hot agglomerate / O. Fomin [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 1, no. 7 (103). – P. 65–74.

12 **Molavitabrzi, D.** Methodology for multiscale design and optimization of lattice core sandwich structures for lightweight hopper railcars / D. Molavitabrzi, J. Laliberte // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2020. – Vol. 234, is. 21. – P. 4224–4238.

13 **Rahimov, R. V.** Scientific substantiation of technical solutions for the improvement of the construction of the body of a hopper car for transportation of cement produced in the Republic of Uzbekistan / R. V. Rahimov, S. A. Khatamov, Z. X. Rakhmatov // European Science Review. – 2017. – No. 3–4. – P. 13–17.

*A. V. PIHUNOU, V. V. PIHUNOU*

*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

## **STRUCTURAL SOLUTIONS FOR INCREASING THE HOPPER CAR BODY VOLUME**

The analysis of design solutions for increasing the loading volume of the hopper cars bodies for the grain transportation is carried out. There is proposed a variant of the end wall design, that makes it possible to obtain an additional volume without changing the angle of inclination of the end wall. The preliminary calculations of the hopper car body take into account the proposed technical solution and show that the design corresponds to the modern strength requirements.

**Keywords:** hopper car, car body design, strength, body volume, finite element method.

Получено 10.11.2022