

УДК 629.4.02

*А. В. ПИГУНОВ, В. В. ПИГУНОВ, П. А. ДАШУК, Н. А. ЯСЬКО*  
*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель*

## **НАГРУЖЕННОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КУЗОВОВ ВАГОНОВ-ХОППЕРОВ**

Определены расчетные нагрузки от давления сыпучего груза на вертикальные, наклонные и образованные кривыми второго порядка стены кузовов вагонов, а также нагрузки, возникающие при ударе. Установлены максимальные значения расчетных нагрузок, приходящихся на торцевые стены вагонов-хопперов различных моделей.

**Ключевые слова:** вагон-хоппер, нагрузка, прочность, напряжения, давление груза, удар, сыпучий груз.

В настоящее время перевозчики заинтересованы в обеспечении перевозочного процесса по железным дорогам колеи 1520 мм грузовыми вагонами с улучшенными технико-экономическими характеристиками, позволяющими снизить издержки в сравнении с конструкциями выпуска прошлых лет.

Основными направлениями развития конструкций и параметров грузовых вагонов являются [1]:

- освоение нового поколения грузовых вагонов с осевой нагрузкой брутто 25 т и более, имеющих повышенные грузоподъемность и вместимость;
- дальнейшее развитие парка специализированных грузовых вагонов, создание новых типов вагонов, в том числе с применением габаритов  $T_{пр}$  и  $T_{ц}$ ;
- повышение надежности узлов и элементов грузовых вагонов с целью снижения их повреждаемости при эксплуатации, увеличения межремонтных периодов, повышение безопасности движения;
- использование новых высокопрочных, облегченных материалов с более высокими механическими характеристиками, обеспечивающих повышение грузоподъемности и снижение массы тары.

Наиболее массовая модель вагона-хоппера для зерна 11-739, выпускавшаяся с 1975 г. на Крюковском вагоностроительном заводе (КВСЗ), имела погрузочный объем 93 м<sup>3</sup> и осевую нагрузку 21,75 т. В дальнейшем она была усовершенствована (модель 19-752), что позволило увеличить погрузочный объем кузова до 94 м<sup>3</sup>, повысить грузоподъемность до 70 т и осевую нагрузку до 23,25 т. Переход на повышенную осевую нагрузку 25 т позволил существенно расширить возможности вагонов нового поколения.

Производители железнодорожных вагонов стремятся к увеличению погрузочного объема кузова. Как видно из данных, приведенных в таблице 1, на сегодняшний день у новых моделей он составляет 118–120 м<sup>3</sup>. При этом линейные размеры рамы вагона (база, длина рамы и др.) одинаковы у всех моделей. Благодаря этому выросла грузоподъемность. У вагонов постройки советского периода она составляла 65–70 т, а у современных моделей дости-

гает 77 т, что позволяет реализовать осевую нагрузку в 25 т. При этом масса тары вагона практически не увеличилась. Это можно объяснить применением сталей с улучшенными механическими характеристиками и новыми конструктивными решениями, позволяющими установить толщины обшивки и каркаса кузова, основанные на анализе несущей способности. Одним из новшеств, появившихся в конструкциях кузовов вагонов-хопперов, является наличие стен «каплевидной» формы, имеющих радиус скругления.

Таблица 1 – Технико-экономические характеристики вагонов для перевозки зерна

Параметр / модель	11-739	19-752	19-6870	19-3058	19-9549-02
Производитель	КВСЗ	КВСЗ	ЗМК	УК БМЗ	ТВСЗ
Грузоподъемность, т	65	70	76,2	70,5	77
Масса тары вагона, т	22	23,5	23,8	23,5	23
Осевая нагрузка, кН (тс)	213 (21,75)	225,5 (23,25)	245 (25)	230,5 (23,5)	245 (25)
Объем кузова, м <sup>3</sup>	93	94	120	118	120
База вагона, мм	10500	10500	10500	10500	10500
Длина по концевым балкам рамы, мм	13500	13500	13500	13500	13500
Габарит	1-ВМ	1-ВМ	1-Т	1-Т	1-Т

Обеспечение необходимой несущей способности конструкции кузова вагона-хоппера является необходимым условием для соответствия показателям надежности за срок службы вагона. При этом, для проектирования вагонов наименьшей массы и необходимой прочности требуется достоверная оценка действующих нагрузок, которые должны соответствовать эксплуатационным, и выбор расчетной схемы, отражающей реальные условия работы вагона.

Стратегией развития железнодорожного транспорта предусмотрено дальнейшее повышение осевых нагрузок до 27 т, и в дальнейшем до 30 т. При сохранении данной тенденции еще более актуальной становится задача точного определения нагруженности элементов кузовов вагонов-хопперов для возможности оптимизации металлоконструкций, основанной на анализе несущей способности при конечно-элементном моделировании.

В существующей нормативной документации предусмотрена оценка прочности конструкции кузова вагона с учетом сочетания нагрузок, возникающих при ударе, рывке, растяжении и сжатии. При этом активное давление сыпучего груза при воздействии на наклонные и вертикальные стены вагонов определяется исходя из выражения [2, 3]

$$p_a = \frac{(1 + K_d) \gamma g y \sin^2(\alpha + \varphi)}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha - \delta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2}, \quad (1)$$

где  $K_d$  – коэффициент вертикальной динамики;  $\gamma$  – насыпная плотность груза;  $g$  – ускорение свободного падения;  $y$  – расстояние от поверхности груза до точки, в которой определяется давление;  $\alpha$  – угол наклона стенки кузова к горизонту;  $\beta$  – угол наклона поверхности груза к горизонту;  $\delta$  – угол трения груза о металлические стенки кузова;  $\varphi$  – угол естественного откоса груза (образуемый конической поверхностью свободно насыпанного груза с горизонтальной плоскостью).

В теории расчета бункеров применяется выражение (2), которое дополнительно учитывает коэффициент внутреннего трения [4].

$$p = K_d \gamma [\varepsilon (h - h_0) (\cos^2 \alpha + K \sin^2 \alpha) + h_0 \cos^2 \alpha], \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент зависания (учитывает зависание груза на стенках), для низких бункеров  $\varepsilon = 1$ ;  $h$  – высота до поверхности груза над рассматриваемой точкой стенки;  $h_0$  – высота свободно стоящей стенки;  $\alpha$  – угол наклона поверхности к горизонту;  $K$  – коэффициент, зависящий от свойств груза,

$$K = \frac{1}{1 + 2f^2 + \sqrt{1 + f^2} \cdot \left( f + \sqrt{f^2 - f_1^2} \right)};$$

$f$  – коэффициент внутреннего трения;  $f_1$  – коэффициент трения груза о стенки.

Для вертикальных стенок ( $\alpha = 90^\circ$ ) при загрузке без «шапки» ( $\beta = 0$ ) и без учета трения груза о стенки кузова ( $\delta = 0$ ) формула (1) принимает вид:

$$p_a = (1 + K_{DB}) \gamma g y t g^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right). \quad (3)$$

Используя приведенные выше выражения, определяют активное давление, действующее на вертикальные боковые стены (формула 3) и на наклонные торцевые стены (формулы 1 и 2).

Как указывалось выше, одной из конструктивных особенностей кузовов вагонов-хопперов нового поколения является наличие стен, имеющих в сечении не вертикальную или наклонную линию, а кривую второго порядка, т. е. имеющих «отрицательный» угол наклона. Возникает закономерный вопрос, как определить давление, действующее на стены при описанном конструктивном исполнении?

Для стен, образованных кривыми второго порядка, можно воспользоваться следующим выражением, которое применяется в практических расчетах для определения внутреннего давления от силы тяжести жидкого груза при  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\beta = 0$  и  $\varphi = 0$

$$p_a = \gamma g y. \quad (4)$$

Из этой формулы следует, что давление груза на стенку линейно зависит от высоты. Однако она не позволяет учитывать такие свойства сыпучего гру-

за, как угол трения груза о металлические стенки кузова, угол естественного откоса и др., а также кривизну или радиус образующей стены кузова.

Выполнена оценка сил, действующих на кузов вагона, исходя из приведенных формул.

При квазистатических нагружениях определение давления сыпучего груза на наклонные стены осуществляют в соответствии с выражением (1), которое учитывает насыпную плотность, угол трения по металлу, угол естественного откоса, т.е. основные характеристики перевозимого груза. Как отмечалось выше, в теории расчета бункеров находит применение выражение (2), которое позволяет дополнительно учесть коэффициент внутреннего трения. После вычисления давления по формулам (1) и (2) и приложения его к наклонным торцевым стенам с учетом линейного градиента и пересчета на составляющие нагрузки были получены следующие результаты: для выражения (1) продольная составляющая составила 70 кН, а вертикальная – 53 кН, для выражения (2) – продольная составляющая составила 49 кН, вертикальная – 37 кН. Следовательно, формула (1) дает значения в 1,4 раза большие, чем формула (2).

Также выполнен анализ расчетных давлений на вертикальные стены. Если определить их, применяя выражения (1) и (3), то получим различия в величинах в 1,3 раза. Для стен, образованных кривыми второго порядка, в настоящее время рассматривается использование только выражения (4).

При воздействии максимально допускаемой ударной продольной нагрузки на кузов вагона, равной 3,5 МН, торцевая стена с ударной стороны дополнительно испытывает воздействие продольной силы инерции, определяемой выражением [2]

$$N_{и} = N \frac{m}{m_{\text{ваг}}}, \quad (5)$$

где  $N$  – продольная сила удара;  $m$  – масса груза;  $m_{\text{ваг}}$  – максимальная расчетная масса вагона.

Для вагонов, перевозящих сыпучие грузы, продольную силу инерции прикладывают равномерно распределенной по внутренней стороне торцевой стены, расположенной со стороны действия силы  $N_{и}$ , составляющей 0,35  $N$ .

Приведенные выше формулы дают возможность определить расчетные нагрузки, действующие на стены кузовов вагонов-хопперов для любого их конструктивного исполнения.

Для оценки прочности кузовов вагонов-хопперов и анализа их напряженно-деформированного состояния были разработаны расчетные конечно-элементные модели. Они создавались на основании конструкторской документации вагонов моделей 11-739 и 19-752. Для моделирования применялись трех- и четырехугольные плоские пластинчатые элементы (рисунок 1).

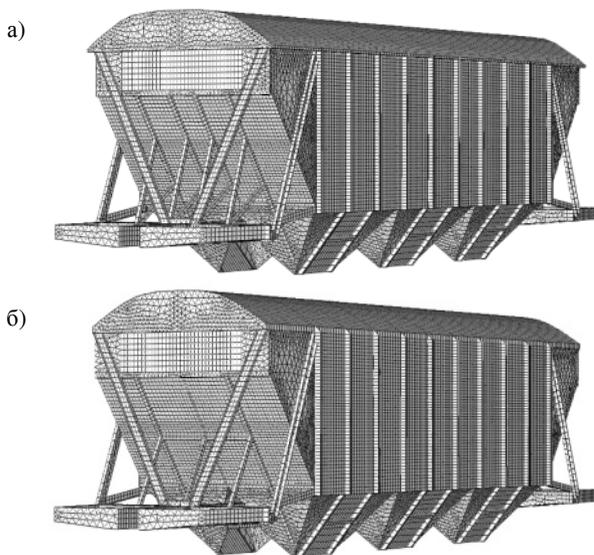


Рисунок 1 – Конечно-элементные модели кузовов вагонов-хопперов:  
*а* – модель 11-739; *б* – модель 19-752

С использованием зависимости (5) были получены следующие значения равнодействующей равномерно распределённой нагрузки, действующей с ударной стороны на торцевые стены: для вагона модели 11-739 она составила 933 кН, а для модели 19-752 – 935 кН. Полученные значения отличаются только на 2 кН, хотя грузоподъемность отличается на 5 т.

Проведенные прочностные расчеты с учетом сочетания нагрузок, возникающих при ударе, показали, что прочность торцевых стен не обеспечивается. Расчетные напряжения в элементах каркаса и обшивки торцевых стен намного превышают предел текучести стали равный 310 МПа. При полученном уровне расчетных напряжений в элементах торцевой стены вагонов моделей 11-739 и 19-752 должны наблюдаться пластические деформации, как элементов каркаса, так и элементов обшивки.

Оценка технического состояния элементов моделей вагонов-хопперов, проведенное сотрудниками ОНИЛ «ТТОРЕПС» БелГУТа, пластических деформаций элементов кузова не выявило. При этом, все вагоны были с истекшим нормативным сроком службы. Основным видом повреждений у элементов торцевых и боковых стен был коррозионный износ, величина которого в отдельных зонах металлоконструкции достигала 15 % от номинальной толщины металла (рисунок 2). Техническое состояние кузовов с истекшим нормативным сроком службы позволяет сделать вывод, что значения нагрузки, действующей на торцевую стену при ударе, которые определяются по выражению (5), слишком завышены.



Рисунок 2 – Техническое состояние торцевых стен вагонов-хопперов:  
*а* – модель 11-739; *б* – модель 19-752

С целью определения реального значения нагрузок, которые могут выдержать торцевые стены вагонов-хопперов, была проведена серия прочностных расчетов. При каждом шаге расчета значения нагрузки, приложенной к торцевой стене, уменьшались на 50 кН и расчетные напряжения сравнивались с допускаемыми, равными пределу текучести. В результате были получены следующие значения равнодействующей равномерно распределенной нагрузки, действующей на торцевые стены, при которых они удовлетворяли критерию прочности. Для вагона модели 11-739 ее величина составила 400 кН, а для 19-752 – 200 кН, что составляет 43 и 21 % соответственно от значений, определенных с использованием выражения (5).

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы.

1 Расчет давления на наклонные торцевые стены с использованием выражений (1) и (2) не позволяет для одного и того же груза получить близкие значения. Они различаются в 1,4 раза.

2 Проведенные прочностные расчеты вагонов-хопперов моделей 11-739 и 19-752 с учетом сочетания нагрузок, возникающих при ударе, показали, что расчетные напряжения, возникающие в элементах торцевых стен, намного превышают предел текучести материала. Следовательно, торцевые стены должны, как минимум, иметь деформации обшивки и каркаса. Однако обследование технического состояния вагонов с истекшим сроком службы и с коррозионным износом, достигающим 20 % от номинальной толщины металла, указанных повреждений торцевых стен не выявило.

3 Вариантные прочностные расчеты с последовательным уменьшением нагрузки на торцевые стены показали, что нагрузка, при которой они удовлетворяют требованиям прочности, для вагона модели 11-739 составляет 400 кН, а для вагона модели 19-752 – 200 кН. Несмотря на большую грузоподъемность второй модели, она выдерживает в 2 раза меньшую нагрузку на торцевую стену. Аналогичные исследования, проведенные ранее для вагона-хoppers модели 11-740, предназначенного для транспортировки минеральных удобрений, продемонстрировали сходные результаты – нагрузка на торцевую стену составила 500 кН [5, 6].

4 Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что зависимость (5) дает завышенные значения нагрузок, действующих на торцевые стены при ударе. Также не подтверждается и гипотеза о том, что она должна прикладываться в виде равномерно распределенной нагрузки. Закон ее распределения нуждается в дальнейшем изучении.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Основные принципы и критерии технических требований к техническим средствам для использования их на пространстве 1520. Согласованы в г. Баку 23.11.2007 на 47-м заседании Совета по железнодорожному транспорту СНГ.

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

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

4 **Зенков, Р. Л.** Бункерные устройства / Р. Л. Зенков, Г. П. Гриневич, В. С. Исав. – М. : Машиностроение, 1977. – 222 с.

5 **Пигунов, А. В.** Несущая способность кузовов грузовых вагонов для перевозки сыпучих грузов с учетом современных требований / А. В. Пигунов, П. М. Афанасьев, П. М. Буйленков // Актуальные вопросы машиноведения. – 2017. – Вып. 6. – С. 26–30.

6 **Senko, B.** Evaluation of stress-strain state bodies of the hopper cars, taking into account the impact of bulk cargo / B. Senko, A. Pigunov, P. Afanaskou // *Mechanika-2017 : Proceedings of the 22<sup>nd</sup> international scientific conference.* – Kaunas : KTU, 2017. – P. 331–335.

*A. V. PIHUNOU, V. V. PIHUNOU, P. A. DASHUK, M. A. YASKO*  
*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

#### LOADING OF THE HOPPER CARS BODIES ELEMENTS

There are calculated the loadings from the pressure of a bulk cargo on the car bodies walls: vertical, inclined and formed by the curves of the second order; as well as the loads caused by the impact. The maximal values of the calculated loads located on the end walls of hopper cars of various models are established.

Получено 29.11.2019