

УДК 629.463.65: 629.4.023.14

*А. В. ПИГУНОВ, В. В. ПИГУНОВ, П. М. БУЙЛЕНКОВ*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь*

## **КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ КУЗОВА ПОЛУВАГОНА ПОВЫШЕННОЙ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ В СООТВЕТСТВИИ С СОВРЕМЕННЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ К ПРОЧНОСТИ**

Выполнен анализ изменений при определении нагрузок, действующих на кузова грузовых вагонов в соответствии с новой нормативной документацией. Разработана конечно-элементная модель кузова полувагона повышенной грузоподъемности. Проведена серия прочностных расчетов на сочетания нагрузок, возникающих при различных режимах эксплуатации полувагонов. Выявлено несоответствие конструкции торцевой стены требованиям к прочности при ударных взаимодействиях. На основании анализа напряженно-деформированного состояния разработан вариант рационального конструктивного исполнения торцевой стены.

**Ключевые слова:** несущая способность, напряжения, деформации, торцевая стена, нагрузки, удар.

В настоящее время при оценке несущей способности вновь спроектированных вагонов, а также при модернизации вагонов эксплуатационного парка руководствуются критериями, изложенными в ГОСТ 33211–2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» [1]. Он введен в действие взамен «Норм для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» в редакции 1996 года [2].

Сочетания действующих на кузова грузовых вагонов нагрузок и их величины для I и III расчетных режимов [2] применялись при оценке несущей способности кузовов вновь проектируемых [3] и модернизируемых [4] вагонов, а также при оценке остаточного ресурса [5].

Сравнивая введенный ГОСТ с «Нормами...» в части определения величин, действующих на кузова грузовых вагонов нагрузок, можно констатировать, что величины продольных нагрузок остались без изменений. При определении вертикальных нагрузок изменения коснулись определения коэффициента вертикальной динамики. В частности, при определении среднего вероятностного значения коэффициента динамической добавки  $\overline{K}_d$ , учитывается наибольший статический прогиб несущей конструкции вагона под действием силы тяжести груза.

Одним из наиболее неблагоприятных режимов нагруженности кузовов вагонов является удар. При этом инерционная нагрузка, действующая на торцевые стены вагонов для перевозки сыпучих грузов в «Нормах...» определялась с использованием формулы

$$N_{\text{н.сып}} = 0,35N \frac{m}{m_{\text{ваг}}}, \quad (1)$$

где  $N$  – продольная сила, приложенная к вагону,  $N = 3,5$  МН;  $m$  – грузоподъемность вагона, т;  $m_{\text{ваг}}$  – максимальная расчетная масса вагона, т.

Также было предусмотрено применение формулы для определения силы инерции массы груза, равной 0,35 грузоподъемности вагона

$$N_{\text{и}} = ma_x, \quad (2)$$

где  $m$  – масса груза с учетом коэффициента, равного 0,35;  $a_x$  – нормированная величина продольного ускорения,  $a_x = 3,5g$ .

Данные формулы применялись для всех типов вагонов, в которых перевозятся сыпучие грузы, без каких-либо разграничений и различий. В стандарте [1] предусмотрено использование только формулы (1).

Полувагоны с глухим кузовом относятся к специализированному типу вагонов [6]. Они предназначены для перевозки грузов, не требующих укрытия от атмосферных осадков как насыпных, так и перевозимых навалом, штабельных и штучных. При перевозке сыпучих грузов такие полувагоны, как правило, используются на замкнутых маршрутах с разгрузкой на вагоноопрокидывателях.

Конструкция полувагона спроектирована в габарите 1-ВМ и имеет следующие параметры: объем кузова  $95 \text{ м}^3$ , грузоподъемность 77 т и масса тары 23 т.

Кузов вагона цельнометаллический, состоит из рамы, двух боковых, двух торцевых стен, а также металлического настила пола. Основные элементы каркаса выполнены из стандартных прокатных профилей. Рама образована хребтовой, двумя шкворневыми, двумя концевыми, десятью промежуточными поперечными и двумя дополнительными продольными балками. Хребтовая балка состоит из двух Z-образных профилей № 31. Концевые балки сварные коробчатого сечения, образуются вертикальными листами толщиной 6 мм, соединенными между собой ребрами жесткости, и покрыты сверху уголком  $390 \times 185 \times 10$  мм. Снизу предусмотрена установка листа толщиной 7 мм.

Шкворневые балки сварные, коробчатого сечения. Каждая состоит из двух вертикальных листов толщиной 8 мм, верхнего (10 мм) и нижнего (12 мм) листов. Основные поперечные балки выполнены в виде сварного двутавра с толщиной 10 мм, горизонтальных полок, и вертикального листа толщиной 7 мм. Для поддержания пола поставлены вспомогательные поперечные балки из гнутого швеллера  $100 \times 60 \times 5$  мм. Вспомогательные продольные балки выполнены из гнутого швеллера  $60 \times 40 \times 5$  мм. В консольной части с каждой стороны вагона имеется четыре продольных балки и две поперечных из гнутого швеллера  $100 \times 60 \times 5$  мм и  $60 \times 40 \times 5$  мм соответственно.

Боковая стена состоит из каркаса и обшивки. Каркас стены включает в себя верхнюю и нижнюю обвязки, а также стойки. Нижняя обвязка из прокатного уголка 160×100×10 мм. Верхняя обвязка сварная, коробчатого сечения. Стойки выполнены из прокатного Ω-образного профиля. Обшивка боковой стены гофрированная из листов толщиной 4 мм.

Торцевая стена приваривается к боковым стенам и концевой балке рамы. Она состоит из металлического каркаса и гладкого листа обшивки толщиной 5 мм. Каркас включает верхнюю обвязку из двух швеллеров № 12, боковые стойки из того же швеллера, горизонтальные усиливающие пояса из Ω-образного профиля, полустойки из гнутого швеллера 150×100×8 мм. Соединения верхних обвязок торцевой и боковой стены усилены накладками.

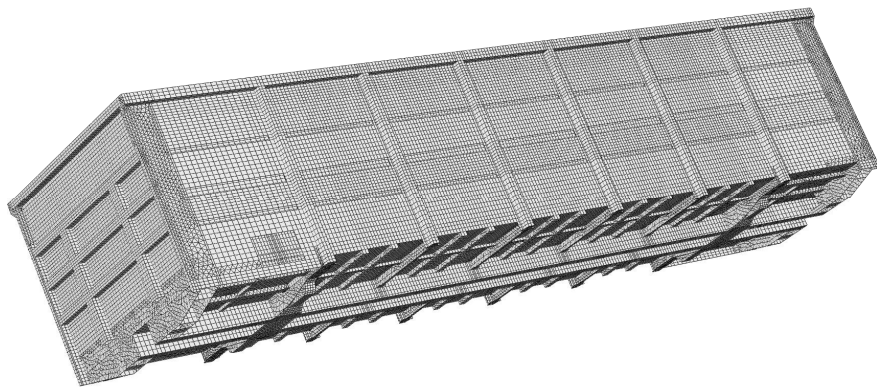


Рисунок 1 – Расчетная модель полувагона

Оценка прочности конструкции производилась при помощи методом конечных элементов с применением программного пакета DSMFem. Расчетная модель разрабатывалась стандартными приемами метода конечных элементов. При моделировании использовались два типа конечных элементов – плоские пластинчатые 3- и 4-узловые.

Кинематические граничные условия ограничивают степени свободы в местах крепления упоров автосцепного устройства и пятников.

Расчеты выполнялись с учетом сочетания нагрузок, предусмотренных стандартом [1]. Полученные результаты во всех случаях удовлетворяли современным требованиям по критерию прочности, за исключением расчета на ударные нагрузки (режим 1 а).

При этом учитывались: продольная сила 3,5 МН, сила инерции сыпучего груза, приходящаяся на торцевую стену ( $N_n = 943,25$  кН) определяемая по формуле (1), сила тяжести груза, вертикальная составляющая силы инерции и силы, вызванные распором сыпучего груза. Отметим, что при использова-

нии формулы (2) величина инерционной нагрузки меньше и составит  $N_{и} = 925,32$  кН.

После проведения расчета на удар были получены значения напряжений для всех конечных элементов металлоконструкции кузова полувагона. Максимальные эквивалентные напряжения в хребтовой балке составляют 150 МПа, шкворневой балке – 147 МПа, нижней обвязке – 156 МПа, поперечных балках рамы – 142 МПа, стойках боковых стен – 150 МПа, листах настила пола – 88 МПа, концевой балке – 436 МПа, обшивке торцевой стены – 653 МПа, балках торцевой стены – 483 МПа.

Если детально проанализировать уровень напряжений, возникающих в элементах торцевой стены, то можно выделить зоны, в которых напряжения, превышающие допустимые, равны пределу текучести материала (рисунок 2).

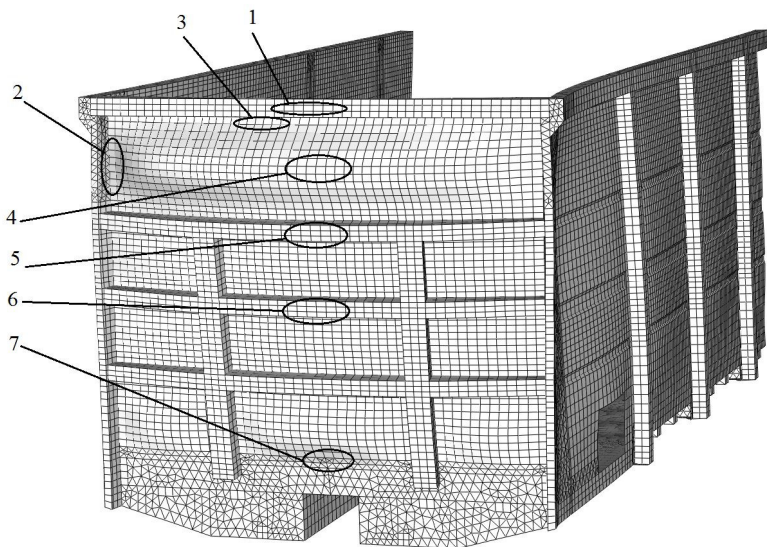


Рисунок 2 – Деформированное состояние и выделенные зоны с превышением допустимых эквивалентных напряжений

Так как элементы торцевой стены не отвечают требованиям прочности, были внесены конструктивные изменения, которые способны усилить ее конструкцию. Расчетные модели с внесенными конструктивными изменениями представлены на рисунке 3. Первый вариант конструктивного исполнения (см. рисунок 3, *а*) торцевой стены отличается наличием в середине верхней части стены дополнительной полустойки из гнутого швеллера 250×100×8 мм. Второй вариант (рисунок 3, *б*) в отличие от первоначального включает две полустойки в верхней части из гнутых швеллеров с сечением 150×100×8 мм.

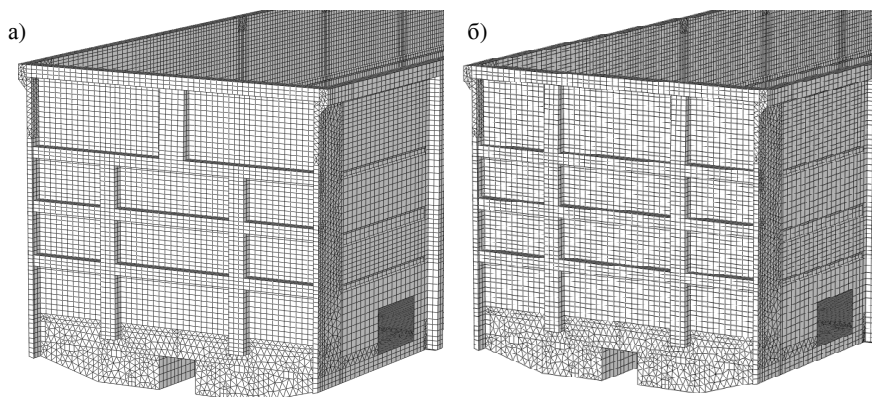


Рисунок 3 – Расчетные модели полувагона с различными исполнениями торцевой стены:  
а – первый, б – второй вариант

Проведенные прочностные расчеты позволили получить значения максимальных напряжений в элементах торцевой стены полувагона. Их значения в зонах, указанных на рисунке 2, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения максимальных напряжений по конструктивным группам металлоконструкции кузова полувагона

Номер зоны	Допускаемые напряжения, МПа	Расчетные эквивалентные напряжения, МПа		
		Базовый вариант	Вариант исполнения торцевой стены	
			1	2
1	345	321	411	432
2		345	326	317
3		650	562	551
4		430	394	396
5		480	399	372
6		386	331	328
7		338	338	338

Из таблицы 1 видно, что оба варианта исполнения торцевых стен не отвечают требованиям прочности. В меньшей степени это касается второго варианта, который был принят за основу для дальнейшей выработки рационального усиления конструкции стены.

Опускание вертикальных стоек ниже уровня пола и установка на их торцах заглушек позволили снизить уровень напряжений в нижней секции обшивки торцевой стены и в месте стыковки стоек с концевой балкой.

Также исследовалось влияние расположения вертикальных стоек для снижения напряженного состояния торцевой стены. Проводились расчеты при сдвиге их ближе к центру на 60, 120 и 180 мм. Эти изменения оказали

положительное влияние на прочность обшивки в средней части торцевой стены, однако при приближении стоек к центру торцевой стены наблюдалось повышение уровня напряжений в угловых стойках. Причем величина снижения напряжений в центральной части обшивки была меньше, чем рост напряжений в угловых стойках. От указанных изменений пришлось отказаться.

В базовой конструкции поперечные пояса выполнены из цельного  $\Omega$ -образного профиля, а вертикальные стойки набраны из четырех отдельных элементов, расположенных между поперечными балками. Вариант конструктивного исполнения, при котором вертикальные стойки выполнены из цельного сплошного по всей высоте стены швеллера, а поперечные пояса состоят из трех частей, расположенных между угловыми и средними стойками, а также смещение вверх на 80 мм верхнего усиливающего пояса позволило снизить уровень максимальных напряжений. Описанные конструктивные изменения дали положительный результат, однако верхняя обвязка торцевой стены и находящий под ней усиливающий пояс (зоны 1 и 5 на рисунке 2) не удовлетворяли условию прочности. Для их усиления в указанных зонах были установлены накладки из стали толщиной от 3 до 5 мм. Для верхней обвязки ее толщина составила 4 мм (зона 1), а для усиливающего пояса – 3 мм (зона 5). Выполнена серия расчетов для различного сочетания толщин накладок. Окончательная конструкция имеет накладку толщиной 4 мм в зоне 1 и толщиной 3 мм в зоне 5.

Распределение напряжений в элементах торцевой стены приведено на рисунке 4.

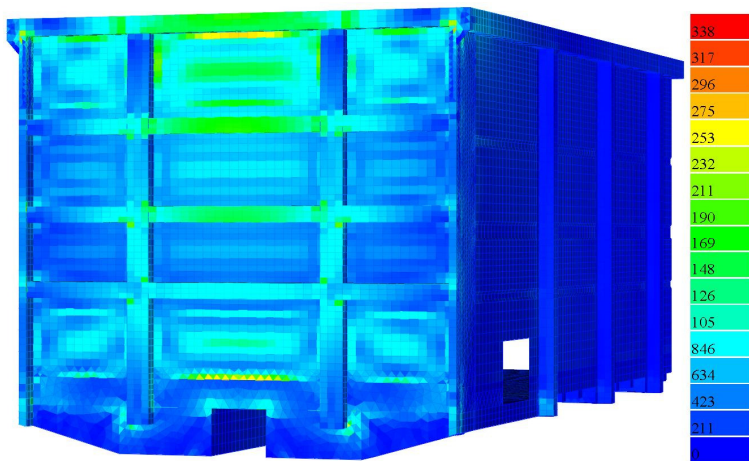


Рисунок 4 – Распределение эквивалентных напряжений в кузове полувагона с учетом принятых конструктивных изменений, МПа

Максимальные эквивалентные напряжения по зонам, выделенным на рисунке 2, составили: 1 – 337, 2 – 230, 3 – 338, 4 – 337, 5 – 335, 6 – 308, 7 – 335 МПа.

Полученные в ходе работы результаты показали, что предложенные конструктивные изменения, внесенные в базовый вариант конструкции торцевой стены полувагона, позволили усилить ее и привести в соответствие с современными требованиями к прочности, регламентированные ГОСТ 33211–2014 [1].

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1 ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам : межгос. стандарт. – Введ. 2016–17–01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 31 с.

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

3 Конструктивные решения по снижению металлоемкости конструкции универсального крытого вагона с увеличенным объемом кузова / А. В. Пигунов [и др.] // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. – 2013. – Вып. 7. – С. 103–109.

4 **Пигунов, А. В.** Усиление конструкции кузова вагона-хоппера для перевозки цемента / А. В. Пигунов, П. М. Афанасьев, С. В. Шестаков // Механика. Исследования и инновации. – 2016. – Вып. 9. – С. 92–99.

5 **Путьято, А. В.** Расчетно-экспериментальная методика оценки остаточного ресурса металлоконструкции вагона дизель-электростанции после длительной эксплуатации / А. В. Путьято, Е. Н. Коновалов // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. – 2014. – Вып. 8. – С. 173–178.

6 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, V. V. PIGUNOV, P. M. BUILENKOV*  
*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

#### **GONDOLA CAR BODY WITH HIGHER LOAD-CARRYING CAPACITY: CONSTRUCTION SOLUTIONS UNDER MODERN STRENGTH REQUIREMENTS**

Change analysis for defining loads acting on the freight car bodies was carried out in accordance with the new regulatory specifications. Finite element model of a gondola car body with higher load-carrying capacity was developed. The set of stress-strain calculations for combinations of loads appeared under various gondola operating regimes was performed. The end wall construction strength requirements inadequacy was revealed for impact interaction. On the basis of the stress-strain condition analysis the rational constructive version of the construction was developed.

Получено 10.11.2017