

УДК 629.4.023.14

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КУЗОВА ВАГОНА-ХОППЕРА ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ЦЕМЕНТА

**В. И. СЕНЬКО, А. В. ПИГУНОВ, П. М. АФАНАСЬКОВ**

*Учреждение образования «Белорусский государственный  
университет транспорта», г. Гомель*

**С. В. ШЕСТАКОВ**

*ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга  
«БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», г. Жодино, Республика Беларусь*

**Ключевые слова:** вагон-хоппер, напряженно-деформированное состояние, усиление конструкции, оценка прочности.

### **Введение**

Промышленность, производство и строительство не могут обходиться без таких важных услуг, как железнодорожные грузоперевозки. Для осуществления данных работ существует большое количество всевозможных типов вагонов, которые имеют специальное предназначение для того или иного вида грузов.

Вагоны-хопперы предназначены для перевозки массовых сыпучих грузов и по способу разгрузки относятся к саморазгружающимся вагонам. Основной особенностью конструкции таких вагонов является кузов, выполненный в нижней части по форме бункера и имеющий вертикальные или скругленные боковые и наклонные торцевые стены, по которым груз сползает к разгрузочным люкам. В зависимости от устройства бункеров и расположения разгрузочных люков хопперы могут обеспечивать выгрузку в пространство между рельсами или на обе стороны от рельсовой колеи [4].

Угол наклона торцевых стен может варьироваться от сорока до шестидесяти градусов и зависит от характеристик перевозимого насыпного груза. За счет такого наклонного расположения стенок и достигается столь удобная выгрузка, поскольку угол наклона торцевых стен превышает угол естественного откоса перевозимого груза, что обеспечивает самопроизвольное ссыпание груза.

Вагоны-хопперы из-за удобства погрузки-выгрузки и обеспечения сохранности перевозимого груза получили широкое распространение как на территории Беларуси, так и за рубежом [2], [9]. В Республике Беларусь преобладают вагоны для перевозки цемента, зерна и минеральных удобрений.

Одним из наиболее нагруженных элементов конструкции вагона-хоппера при определенных режимах эксплуатации является торцевая стена.

Цель работы: создание конечно-элементной модели кузова вагона-хоппера для перевозки цемента модели 19-9862 для проведения уточненного расчета конструкции на прочность; детальный и поэлементный анализ напряжений, возникающих в зоне сочленения верхнего поперечного уголка усиления торцевой стены с вертикальной стойкой торцевой стены, который поможет выявить локальные зоны с повышенным уровнем напряжений, что необходимо для предотвращения возникновения дефектов данного узла в ходе эксплуатации вагонов; выработать ряд конструктивных решений по усилению зоны с повышенным уровнем напряжений как на вагонах, находящихся в эксплуатации, так и на новых вагонах.

### Проблемы в эксплуатации

По результатам эксплуатации вагона-хоппера для перевозки цемента модели 19-9862 выявились повреждения металлоконструкции кузова в виде разрушения сварного шва в зоне соединения верхнего поперечного уголка усиления торцевой стены и вертикальной стойки торцевой стены (рис. 1). Такого рода повреждения являются не типичными для вагонов данного типа.

Для вагонов-хопперов с вертикальной боковой стеной характерно налипание груза на внутренние поверхности кузова, что не позволяет без внешнего силового воздействия осуществить полную выгрузку цемента. Это приводит к деформации обшивки боковых стен. Также характерными неисправностями являются: деформация листов крыши, трещины в узлах соединения боковой стены и бункера, трещины обшивки торцевой стены в зоне приварки к коньку. Это подтверждается данными технических обследований вагонов-хопперов, выработавших нормативный срок службы, проведенных сотрудниками отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Технические и технологические оценки ресурса единиц подвижного состава» БелГУТа. Выявленные повреждения являются следствием следующих факторов: конструктивных недостатков, использования конструктивных решений, о которых нет достоверных данных из эксплуатации, несовершенной технологии сборки, а также и нарушения правил эксплуатации при проведении погрузочно-разгрузочных работ.



Рис. 1. Неисправность узла соединения стойки с верхним продольным уголком усиления торцевой стены

### Описание конструкции кузова вагона-хоппера для перевозки цемента модели 19-9862

Кузов вагона-хоппера модели 19-9862 представляет собой цельнонесущую конструкцию, состоящую из рамы, четырех бункеров, двух боковых, двух торцевых стен и крыши. Особенностью конструкции являются скругленные боковые стенки, что позволяет исключить налипание груза на них.

Рама вагона состоит из хребтовой балки, двух шкворневых, двух поперечных, двух продольных боковых и двух концевых балок. Хребтовая балка изготовлена из двух зетобразных профилей № 31. Для усиления хребтовой балки и обеспечения полного высыпания груза часть балки, находящаяся внутри кузова, имеет установленный сверху конек. Шкворневые балки коробчатого сечения переменной высоты по длине. Верхний горизонтальный лист выполнен из металла толщиной 12 мм, нижний толщиной 10 мм и вертикальные по 8 мм. Внутри для усиления устанавливаются диафрагмы толщиной 8 мм. Боковые продольные балки изготовлены из прокатного уголка  $160 \times 100 \times 10$  мм и связаны с хребтовой балкой шкворневыми балками и поперечинами из гнутого уголка, изготовленного из листа толщиной 8 мм. Концевая балка выполнена из гнутого уголка толщиной 5 мм.

Между хребтовой, поперечными и продольными балками установлены две пары бункеров. Бункер состоит из двух трапециевидных и двух треугольных листов толщиной 5 мм, связанных между собой при помощи гнутых уголков, изготовленных из листов

толщиной 5 мм. Внутренние поперечные стенки бункеров соединены с поперечными балками рамы. Наружные поперечные стенки связаны с торцовыми стенами кузова и являются их продолжением. Внешние боковые стенки бункеров приварены к боковым стенам кузова, а внутренние соединены с хребтовой балкой. В нижней части бункеров предусмотрено четыре разгрузочных люка, обеспечивающих ссыпание груза внутрь колеи.

Боковая стена состоит из металлической обшивки толщиной 4 мм, подкрепленной каркасом из трех стоек и верхней обвязки, выполненной из гнутого уголка толщиной 4 мм. Стойки представляют собой металлические ребра из листов толщиной 7 мм, повторяющие форму изгиба обшивки.

Обшивка торцевых стен кузова изготовлена из гладкого листа стали марки 09Г2С толщиной 5 мм и подкреплена каркасом. Каркас включает в себя верхнюю обвязку и три поперечных усиливающих пояса, изготовленных из гнутых уголков. Толщина металла среднего уголка составляет 5 мм, а верхнего и нижнего – 8 мм. Дополнительно обшивка наклонной торцевой стены на участках между верхней обвязкой и усиливающими уголками подкреплена гнутыми швеллерами с поперечным сечением  $80 \times 40 \times 5$  мм.

Для придания торцевой стене достаточной прочности она усилена четырьмя стойками и двумя подкосами, которые связывают поперечные уголки торцевой стены с шкворневой балкой. Стойки и подкосы изготовлены из прямоугольного профиля  $140 \times 110 \times 7$  мм.

Крыша кузова выполнена из гладкого стального листа толщиной 3 мм. Для обеспечения необходимой прочности обшивка изнутри подкреплена дугами, которые представляют собой металлические ребра толщиной 3 мм. По торцам для обеспечения герметичности кузова устанавливаются фрамуги. На крыше для загрузки цемента предусмотрено 4 круглых загрузочных люка. Люки расположены с учетом возможности равномерной загрузки кузова и удобства в случае необходимости спуска внутрь вагона.

Основные технико-экономические характеристики вагона-хоппера для перевозки цемента модели 19-9862: грузоподъемность – 72,5 т; масса тары – 21 т; объем кузова –  $63 \text{ м}^3$ ; база – 7800 мм; габарит – 1-ВМ.

### Конструктивные изменения

По результатам выполненных уточненных расчетов, были определены элементы конструкции вагона-хоппера, нуждающиеся в доработке. Для разгрузки и перераспределения напряжений в поврежденном узле конструкторами ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» совместно с УО «БелГУТ» выработаны необходимые конструктивные изменения (рис. 2), основанные на анализе напряженно-деформированного состояния.

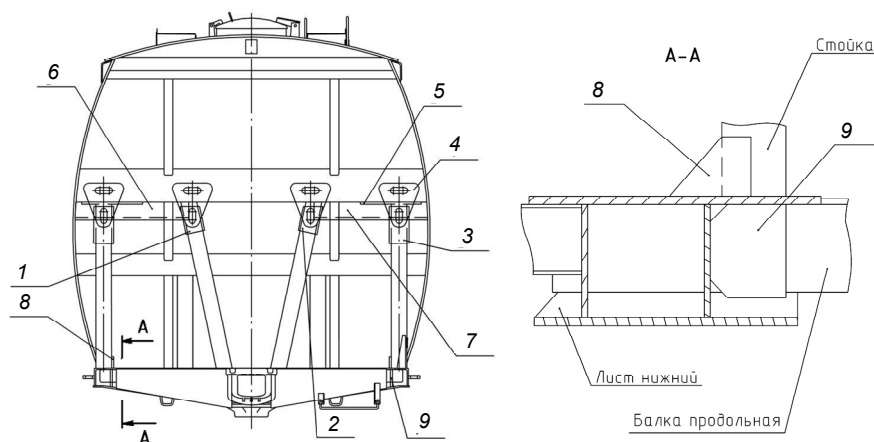


Рис. 2. Расположение усиливающих элементов:

- 1, 2 – швеллер; 3 – накладка; 4 – накладка; 5 – пластина; 6, 7 – усилитель;  
8 – пластина; 9 – усилитель

Конструктивные изменения предполагают дополнительную установку следующих элементов: гнутых швеллеров 1 и 2, накладок трапецевидной формы 4 с вырезами для обеспечения более прочного сварного соединения, горизонтальных подкладок 5 под вертикальные стойки, вертикального ребра 9 между верхним и нижним листами шкворневой балки и заглушки на швеллер вертикальной стойки 3, уголка 6 и 7 с размерами  $180 \times 50 \times 8$  (сталь 09Г2С, класс прочности 345), который приваривается снизу к поперечной балке торцевой стены и попарно связывает вертикальные и наклонные стойки, а также косынки 8 (сталь 09Г2С, класс прочности 345, толщина 8 мм) для снижения уровня напряжений в месте соединения вертикальной стойки с верхним листом шкворневой балки (рис. 2). При анализе разработанного варианта совершенствования конструкции кузова были приняты следующие два критерия: снижение напряжений в элементах конструкции до требуемого уровня и уменьшение концентрации напряжений в отдельных элементах и узлах конструкции. При этом основным ограничением являлось сохранение предельного значения массы кузова.

### Оценка прочности

Оценка несущей способности – один из этапов разработки новых конструкций вагонов, позволяющий на стадии проектирования разработать рациональную металлоконструкцию, удовлетворяющую современным требованиям прочности, с заданной массой тары и грузоподъемностью. Для принятия обоснованных решений о варианте восстановления и продления жизненного цикла вагона необходимо разработать расчетную пространственную конечно-элементную модель [11].

Оценка прочности узла соединения стоек с поперечной балкой торцевой стены с учетом усиливающих элементов производилось в общей системе несущего кузова. Комплекс прочностных расчетов выполнялся в соответствии с требованиями нормативной документации [5], [10].

Для выполнения расчетов на прочность несущей металлоконструкции вагона была разработана конечно-элементная модель на основе использования конструкторской документации в программном пакете DSMFem. При составлении расчетной модели использовались два типа конечных элементов: плоские пластинчатые 3- и 4-угольные (рис. 3).

Разработанная модель предназначена для оценки несущей способности кузова вагона-хоппера и построена для кузова в целом с учетом возможности приложения любого сочетания и вида эксплуатационных нагрузок. Она с достаточной точностью аппроксимирует металлоконструкцию кузова вагона-хоппера модели 19-9862. Параметры расчетной модели следующие: количество узлов – 57193, количество конечных элементов – 58377. Кинематические граничные условия включают в себя ограничение степеней свободы в местах крепления упоров автосцепного устройства и пятников.

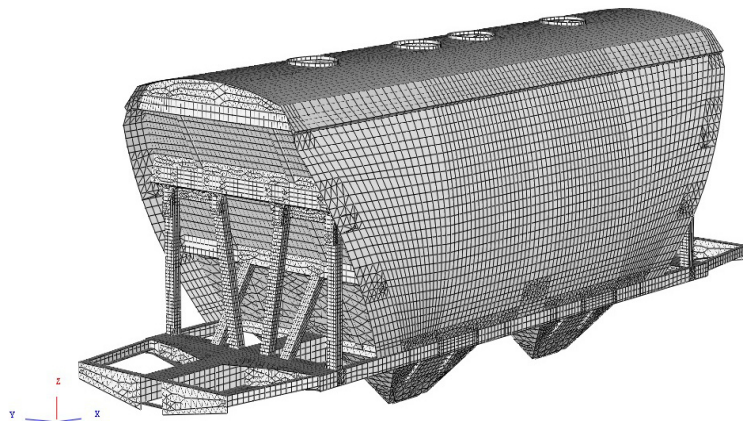


Рис. 3. Конечно-элементная модель кузова вагона-хоппера с усиливающими элементами

Нормативной документацией [5], [10] для оценки прочности конструкции кузова вагона предусмотрены два расчетных режима – I и III. Первый расчетный режим предусматривает приложение к конструкции продольной сжимающей (растягивающей) силы  $T = -2$  МН ( $T = 2,5$  МН) в местах расположения задних (передних) упоров автосцепного устройства. Учитывается нагрузка от собственной массы рамы и массы перевозимого груза. В месте 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 величина продольной силы уменьшена и составляет  $T = \pm 1$  МН, а полезная нагрузка и собственный вес увеличиваются на величину вертикальной динамической составляющей.

После проведения расчета были получены значения напряжений для всех конечных элементов усовершенствованной металлоконструкции кузова вагона-хоппера для перевозки цемента.

В табл. 1 представлены данные, отображающие величину максимальных напряжений металлоконструкции кузова вагона, при сочетании нагрузок, соответствующих I расчетному режиму, по конструктивным группам.

Таблица 1

**Значения максимальных напряжений по конструктивным группам металлоконструкции кузова (I режим)**

Наименование конструктивной группы	Расчетные эквивалентные напряжения при растяжении, МПа	Расчетные эквивалентные напряжения при сжатии, МПа	Допускаемые напряжения, МПа
Хребтовая балка	172,58	204,75	292,50
Шкворневая балка	149,18	172,58	292,50
Концевая балка	67,82	89,39	308,25
Боковая стена	183,54	170,43	327,75
Обшивка торцевой стены	206,48	209,76	327,75
Стойка вертикальная торцевой стены	151,34	162,55	280,25
Стойка наклонная торцевой стены	92,48	154,14	280,25
Усиливающие швеллеры	95,05	81,94	327,75
Подкладка	83,23	83,23	308,25
Накладки	137,66	124,55	327,75
Усиливающий уголок	209,76	213,04	327,75
Ребра жесткости	193,37	167,15	327,75

Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что наибольшие напряжения возникают в элементах хребтовой балки при сжатии. Они составляют 70 % от допускаемого значения (рис. 4). В элементах торцевой стены наиболее напряженным является усиливающий уголок, напряжения в нем достигают 213,0 МПа. В шкворневой балке наибольшие напряжения составляют 172,6 МПа при сжатии, а при растяжении – 148,2 МПа. Максимальные напряжения в боковой балке возникают при растяжении и составляют 56 % от допускаемых. Уровень напряжений в стойках торцевой стены не превышает 58 %. В элементах усиления уровень напряжений колеблется в пределах 81,9–216,0 МПа.

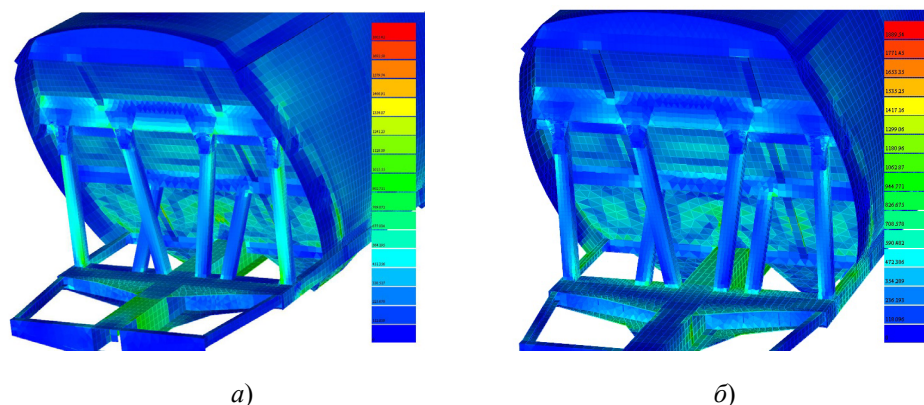


Рис. 4. Распределение напряжений в кузове вагона при I режиме нагружения:  
*a* – растяжение; *б* – сжатие

В табл. 2 представлены данные, отображающие величину максимальных напряжений металлоконструкции кузова вагона-хоппера при сочетании нагрузок, соответствующих III расчетному режиму.

Таблица 2

**Значения максимальных напряжений по конструктивным группам  
 металлоконструкции кузова (III режим)**

Наименование конструктивной группы	Расчетные эквивалентные напряжения при растяжении, МПа	Расчетные эквивалентные напряжения при сжатии, МПа	Допускаемые напряжения, МПа
Хребтовая балка	142,35	148,20	195,00
Шкворневая балка	128,70	146,25	195,00
Концевая балка	22,55	51,25	205,00
Боковая стена	184,80	184,80	220,00
Обшивка торцевой стены	211,20	213,40	220,00
Стойка вертикальная торцевой стены	193,05	193,05	195,00
Стойка наклонная торцевой стены	117,00	152,10	195,00
Усиливающие швеллеры	114,40	107,80	220,00
Подкладка	106,60	104,55	205,00
Накладки	176,00	167,20	220,00
Усиливающий уголок	184,80	187,00	220,00
Ребра жесткости	217,80	215,60	220,00

Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что наибольшие напряжения наблюдаются в ребрах жесткости (рис. 5) 217,8 МПа при растяжении и 215,6 МПа при сжатии. В вертикальных стойках торцевой стены максимальные напряжения возникают в зонах соединения с усиливающим уголком и шкворневой балкой, уровень напряжений не превышает 193,05 МПа. Также напряженным участком стойки является зона соединения стойки с усиливающим уголком и зона установки усиливающей накладки. В усиливающих элементах торцевой стены максимальные напряжения возникают в усиливающем уголке и трапецевидной накладке. Уровень напряжений находится в пределах от 167,2 до 187,0 МПа.



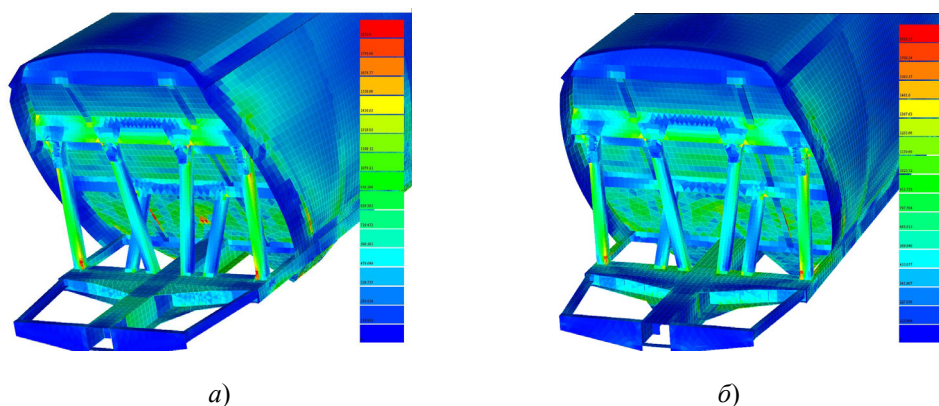


Рис. 5. Распределение напряжений в кузове вагона при III режиме нагружения: а – растяжение; б – сжатие

Наибольший уровень напряжений при действии нагрузок, возникающих при соударении, наблюдается в элементах боковой балки рамы. Их уровень не превышает 321,75 МПа. Также высокий уровень напряжений наблюдается в узле сочленения боковой балки с вертикальной стойкой торцевой стены (рис. 6). В обшивке торцевой стены уровень напряжений достигает 96 % от допускаемых. В элементах шкворневой балки – 331,2 МПа.

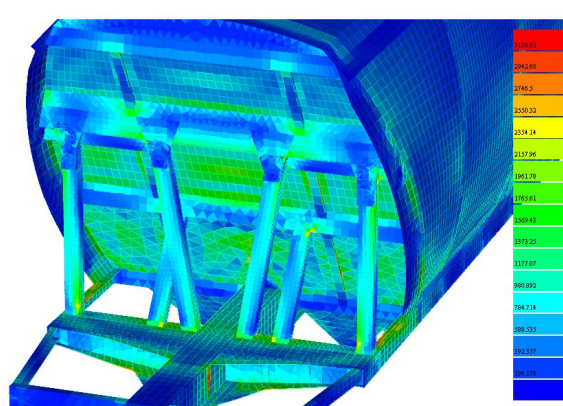


Рис. 6. Распределение напряжений в кузове при соударении

Сравнивая полученные расчетные значения напряжений с данными расчета конструкции без усиления, можно сделать вывод о том, что усиливающие элементы позволили перераспределить напряжения в элементах торцевой стены и стойках, подкрепляющих торцевую стену. Снизился уровень напряжений в верхнем поперечном уголке усилителя торцевой стены на 8 %. Также удалось разгрузить верхнюю часть стоек, подкрепляющих торцевую стену. Напряжения с верхней части стоек были перераспределены в их нижнюю часть, где они возросли на 5 %. Вслед за этим уровень напряжений возрос и в элементах верхнего листа шкворневой балки на 12 % и в элементах боковой балки на 7 %. Для усиления этих элементов устанавливаются косынки 8 и усилители 9, как изображено на рис. 2. Следует отметить, что уровень напряжений по всей металлоконструкции вагона-хоппера модели 19-9862 не превышает допускаемых значений.

После проведения работ по совершенствованию конструкции кузова вагона и проведения комплекса расчетов вагоны поступили в эксплуатацию. На сегодняшний день они эксплуатируются около двух лет, рекламаций и замечаний от эксплуатирующих организаций нет.

### Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Разработана расчетная конечно-элементная модель металлоконструкции кузова вагона-хоппера для перевозки цемента, позволяющая оценить несущую способность с учетом видов и сочетаний эксплуатационных нагрузок, установленных современными нормативными документами.
2. Разработан вариант усиления для снижения уровня напряжений в узлах соединения крайней вертикальной и средней наклонной стоек с поперечным уголком усиления наклонной торцевой стены вагона-хоппера модели 19-9862.
3. Выполнены исследования по оценке напряженно-деформированного состояния конструкции вагона-хоппера модели 19-9862 с учетом разработанного варианта усиления. Установлено, что усовершенствованная конструкция соответствует актуальным нормативным требованиям.

### Литература

1. Palcak F. How is possible to optimize dynamic properties of rail car / F. Palcak, B. Smirnov, M. Vanco: Proceedings 16th INTERNATIONAL CONFERENCE "CURRENT PROBLEMS IN RAIL VEHICLES". – Zilina, 2003. – Vol. 2. – P. 175–181.
2. The Complete Book of North American Railroading. Voyageur Press / EuDaly K., Schafer M., Boyd Jim, Jessup S., McBride A., Glischinski S., 2009. – 352 p.
3. Атрошенко, В. А. Особенности силовых воздействий сыпучих грузов на торцевые стены крытых грузовых вагонов и анализ напряженного состояния торцевых стен : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. А. Атрошенко. – Брянск : БИТМ, 1984. – 16 с.
4. Битюцкий, А. А. Создание вагона-хоппера нового поколения для перевозки зерна У/ПГУПС / А. А. Битюцкий, Р. А. Савушкин, А. Н. Сапожников // 61 науч.-техн. конф. : тез. докл. – СПб., 2001.
5. Вагоны : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Л. А. Шадур [и др.] ; под ред. Л. А. Шадур. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1980. – 439 с.
6. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – М. : СТАНДАРТИНФОРМ, 2014.
7. Железнодорожный транспорт : энциклопедия / гл. ред. Н. С. Конарев. – М. : Большая Рос. энцикл., 1994. – С. 491.
8. Конструктивные решения по снижению металлоемкости конструкции универсального крытого вагона с увеличенным объемом кузова // Механика : науч. исслед. и учеб.-метод. разработки / А. В. Пигунов [и др.] ; под ред. А. О. Шимановского. – 2013. – № 7. – С. 103–109.
9. Пастухов, И. Ф. Конструкция вагонов : учеб. пособие / И. Ф. Пастухов, В. В. Пигунов, Р. О. Кошкалда. – М. : Желдориздат, 2000. – 497 с.
10. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
11. Кобищанов, В. В. Расчет кузовов вагонов на прочность : учеб. пособие / В. В. Кобищанов. – Брянск : БИТМ, 1987. – 80 с.

Получено 16.12.2016 г.