

УДК 629.4.02/46

DOI: 10.30987/article_5c8b5ceb111c58.12769482

М.А. Булычев, Д.Я. Антипин

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ ВЕРХНИХ ОБВЯЗОК БОКОВЫХ СТЕН ПОЛУВАГОНОВ

Рассмотрены нормативные расчетные схемы полувагона при расчете на разгрузку в вагоноопрокидывателе. Предложены уточнённые расчетные схемы, учитывающие разгрузку смерзшегося груза при повороте вагона на 90° и смещение упоров вагоноопрокидывателя. Показано, что предлагаемые

расчетные схемы позволяют выявить увеличение напряжений в верхней обвязке по сравнению с нормативными расчетными схемами.

Ключевые слова: грузовой вагон, полувагон, расчетная схема вагона, расчет на прочность, метод конечных элементов.

М.А. Bulychyov, D.Ya. Antipin

IMPROVEMENT OF STRENGTH CALCULATION PROCEDURE OF CAR SIDE UPPER FRAMING IN GONDOLA CARS

Standard rated schemes for a gondola car are considered at the calculation of loading in a car dumper. There are offered refined rated schemes taking into account frozen load unloading at car turning of 90° and a buffer stop displacement of the car dumper. It is shown that the supposed rated schemes allow revealing

the stress increase in an upper framing as compared with standard rated schemes.

Key words: freight car, gondola car, car computation scheme, strength computation, finite element method.

Введение

Актуальной задачей железнодорожного транспорта является автоматизация разгрузки грузовых вагонов, позволяющая сократить время и уменьшить трудоемкость разгрузочных работ. С этой целью используются вагоноопрокидыватели.

Для разгрузки в вагоноопрокидывателе используются грузовые вагоны открытого типа (полувагоны). В процессе разгрузки полувагон опирается верхними обвязками боковых стен на упоры вагоноопрокидывателя. Повреждаемость верхних обвязок является высокой [1]. На рис. 1 показан один из типовых дефектов верхней обвязки полувагона.

Для полувагонов важно на этапе проектирования обеспечить прочность верхней обвязки боковой стены с учетом экстремальных условий разгрузки. К таким условиям относится разгрузка сыпучего груза при отрицательной температуре окружающей среды (смерзшийся груз).

В связи с отмеченным при проектировании следует использовать расчетные схемы, учитывающие указанные условия разгрузки.

Расчетные схемы кузова полувагона при разгрузке на вагоноопрокидывателе установлены «Нормами...» [2].

В работе [1] рассмотрены условия взаимодействия кузова полувагона с ро-



Рис. 1. Деформация верхней обвязки боковой стены полувагона

торным вагоноопрокидывателем и предложены кинематические и силовые граничные условия, учитывающие характер взаимодействия груза, полувагона и вагоноопрокидывателя между собой при трех режимах нагружения: поворот вагона на 45° , поворот вагона на 65° с учетом нагруз-

ки от ударов об упоры вибраторов и поворот на 170° .

В настоящей работе ограничимся рассмотрением и уточнением расчетных схем, рекомендуемых «Нормами...». Расчеты проводились методом конечных элементов в программном комплексе Femap with NX Nastran.

«Нормами...» предусмотрены два режима нагружения боковых стен при разгрузке в вагоноопрокидывателе:

1. Боковые стены полувагонов для условий разгрузки на вагоноопрокидывателях проверяются по I расчетному режиму на одновременное действие вертикальной и горизонтальной нагрузок, равномерно распределенных по ширине обвязки на длине 0,8 м средней части пролета обвязки между соседними стойками.

Расчетная вертикальная сила на один пролет принимается равной

$$q_v = \frac{Q_{бр}}{n},$$

где $Q_{бр}$ – сила тяжести вагона брутто; n – количество упоров вагоноопрокидывателя (на одну стену – 4 шт.).

Горизонтальная поперечная сила принимается равной

$$q_z = 0,25q_v.$$

Данный режим нагружения учитывает действие на кузов срезавшегося груза при повороте вагона в вагоноопрокидывателе на 170° .

Для уточнения данного расчетного режима следует проанализировать изменение нагрузки на боковую стену от срезавшегося груза при изменении угла поворота вагона в вагоноопрокидывателе.

2. Боковая стена рассчитывается по II специальному режиму на изгиб из своей плоскости как рама, шарнирно опертая верхним поясом и жестко закрепленная в нижнем поясе, на силы, возникающие от смещения одной опоры относительно другой на величину 50 мм.

В «Нормах...» не указано, что помимо смещения одного пояса относительно другого возможны варианты смещения упорных участков верхней обвязки (участ-

ков, взаимодействующих с упорами вагоноопрокидывателя).

Тогда для 4-осного полувагона дополнительно следует рассмотреть:

1) смещение на 50 мм упорного участка верхней обвязки возле шкворневой стойки;

2) смещение на 50 мм упорного участка верхней обвязки возле середины кузова.

Проведем расчеты на прочность верхней обвязки по I и II расчетным режимам по расчетным схемам «Норм...» и схемам с предложенными уточнениями.

Расчет напряжений в верхней обвязке по I режиму

Для полувагона с тарой 23000 кг и грузоподъемностью 71000 кг вертикальная сила от одного упора

$$q_v = \frac{Q_{бр}}{n} = \frac{94000 \cdot 9,81}{4} = 230535 \text{ Н.}$$

Горизонтальная поперечная сила от одного упора

$$q_z = 0,25q_v = 0,25 \cdot 230535 = 57633,75 \text{ Н.}$$

Расчеты проводились на пластинчатой модели 1/4 части кузова. Схема приложения нагрузки приведена на рис. 2.

От нагрузки, вызванной реакциями опор вагоноопрокидывателя по I режиму «Норм...», напряжения в верхней обвязке не превышают 133 МПа.

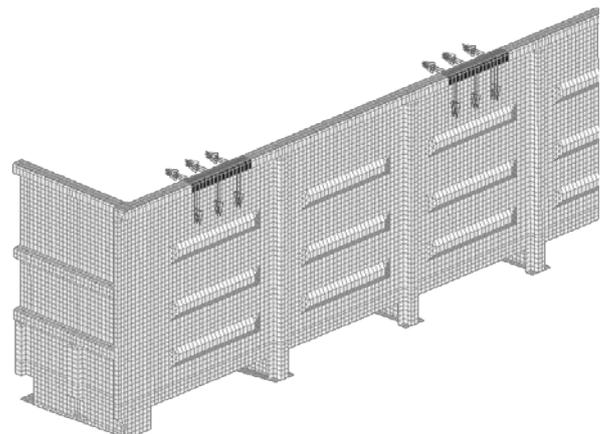


Рис. 2. Приложение вертикальной и горизонтальной сил при расчете полувагона на разгрузку в вагоноопрокидывателе по I режиму

Рассмотрим расчетную схему, отличную от схемы I режима «Норм...», для чего проанализируем изменение нагрузки на

боковую стену от сдерзшегося груза при изменении угла поворота вагона в вагоноопрокидывателе. Максимальный угол поворота вагоноопрокидывателя - 170°.

При разгрузке сдерзшегося груза будем исходить из того, что на боковую стену в ее плоскости действует не активное давление сыпучего груза, а сила, равная боковой проекции силы тяжести груза и силы тяжести брутто обрессоренных частей вагона на ось, параллельную плоскости пола. Такая сила вызывает суммарную силу реакции $N_{\text{б.с.}}$ в горизонтальных упорах вагоноопрокидывателя.

При определении силы $N_{\text{б.с.}}$ подразумевается, что неподрессоренные части массой $T_{\text{н.ч.}}$ (элементы тележек кроме наддрессорных балок) воздействуют на рельсы и вызывают не реакции горизонтальных упоров вагоноопрокидывателя, а реакцию рельса N_p (рис. 3).

В запас прочности силой трения груза о пол можно пренебречь.

Тогда сила $N_{\text{б.с.}}$ определяется по формуле

$$N_{\text{б.с.}} = (P + T_{\text{к}} + 2T_{\text{н.б.}})g \sin \alpha,$$

где P – грузоподъемность вагона; $T_{\text{к}}$ – тара кузова с учетом автосцепок и тормозного оборудования; $T_{\text{н.б.}}$ – масса наддрессорной балки; α – угол поворота вагона в ва-

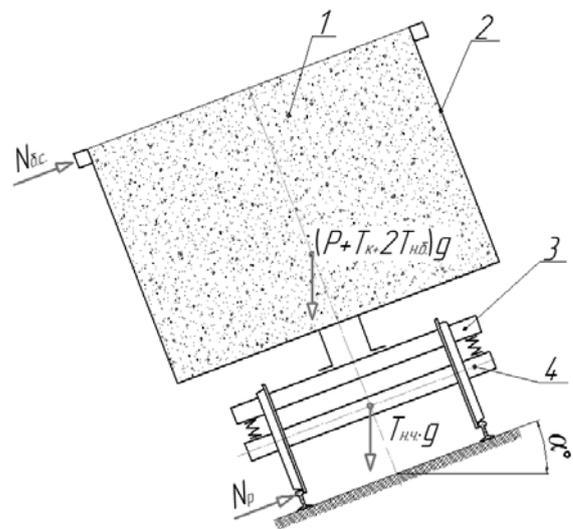


Рис. 3. Расчетная схема вагона со сдерзшимся грузом при повороте в вагоноопрокидывателе на угол до 90°: 1 – груз; 2 – кузов; 3 – наддрессорная балка; 4 – неподрессоренные части

гоноопрокидывателе относительно горизонта.

Реакция вертикальных упоров вагоноопрокидывателя $N_{\text{в.о.}}$ появляется после поворота вагона на угол 90° и определяется с учетом всей силы тяжести вагона брутто, так как тележка опирается только на один рельс, а также на пятник рамы вагона - за счет смещения центра тяжести относительно точек опоры.

Здесь следует рассмотреть 2 варианта определения нагрузки $N_{\text{в.о.}}$ (рис. 4).

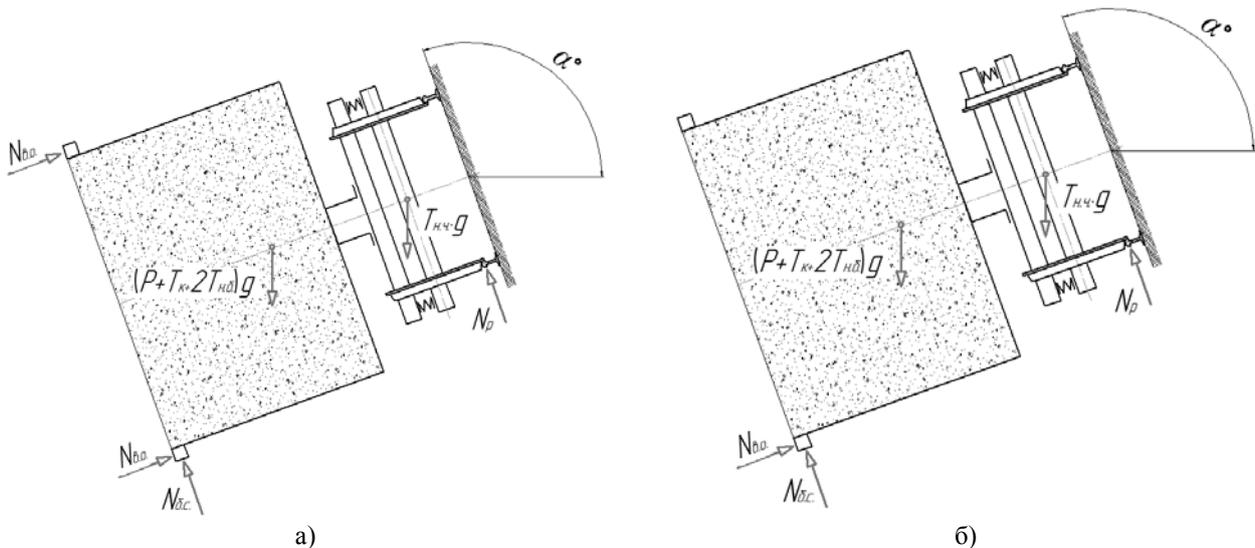


Рис. 4. Расчетная схема вагона со сдерзшимся грузом при повороте в вагоноопрокидывателе на угол >90°: а – прилегание верхних обвязок обеих боковых стен к вертикальным упорам; б – прилегание верхней обвязки одной боковой стены к вертикальным упорам

В первом варианте, при прилегании верхних обвязок обеих боковых стен к вертикальным упорам вагоноопрокидывателя (рис. 4а):

$$N_{в.о.} = \frac{1}{2} Q_{\text{об}} \cos \alpha .$$

Во втором варианте, при прилегании верхней обвязки одной боковой стены к вертикальным упорам вагоноопрокидывателя (рис. 4б):

$$N_{в.о.} = Q_{\text{об}} \cos \alpha .$$

Графики сил $N_{\text{б.с.}}$ и $N_{\text{в.о.}}$ представлены на рис. 5 (для кузова с грузоподъемностью

$P = 71000$ кг, тарой $T_{\kappa} = 13400$ кг и массой наддресорных балок $T_{\text{н.б.}} = 500$ кг) для двух вариантов сил $N_{\text{в.о.}}$.

Также на рис. 5 представлен график изменения результирующей нагрузки на боковую стену $N_{\text{рез.}}$:

$$N_{\text{рез.}} = \sqrt{N_{\text{в.о.}}^2 + N_{\text{б.с.}}^2} .$$

График силы $N_{\text{рез.}}$ показывает изменение нагруженности боковой стены в зависимости от угла поворота в вагоноопрокидывателе.

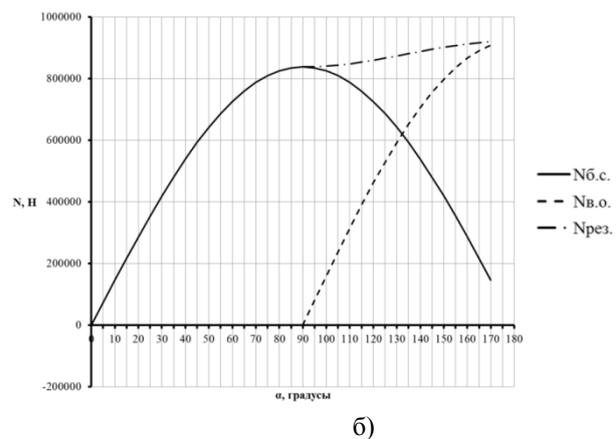
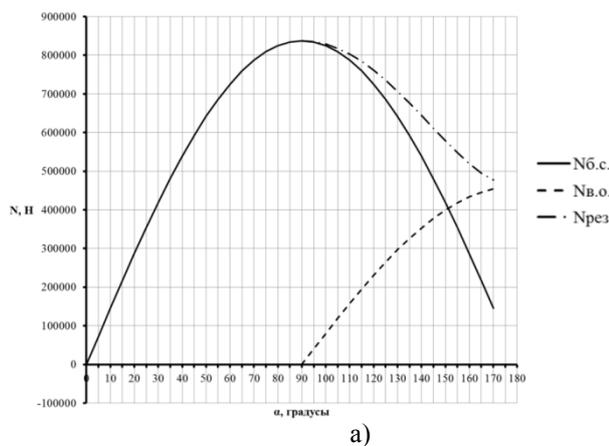


Рис. 5. Графики изменения сил, действующих на опорную боковую стену при разгрузке в вагоноопрокидывателе: а – с прилеганием верхних обвязок обеих боковых стен к вертикальным упорам; б – с прилеганием верхней обвязки одной боковой стены к вертикальным упорам

Анализируя графики, можно сделать следующие выводы:

1. Максимальная нормальная сила $N_{\text{б.с.}}^{\text{max}}$, действующая на поверхность боковой стены кузова полувагона при вращении в вагоноопрокидывателе со смиршимся грузом, возникает при угле поворота вагона 90° ($\sin 90^\circ = 1$):

$$N_{\text{б.с.}}^{\text{max}} = (P + T_{\kappa} + 2T_{\text{н.б.}})g .$$

$$N_{\text{б.с.}}^{(170^\circ)} = (P + T_{\kappa} + 2T_{\text{н.б.}})g \sin \alpha = (71000 + 13400 + 2 \cdot 500)9,81 \sin(170^\circ) = 145478 \text{ Н};$$

$$N_{\text{в.о.}}^{(170^\circ)} = Q_{\text{об}} \cos \alpha = 94000 \cdot 9,81 \cos(170^\circ) = 908131 \text{ Н}.$$

Таким образом, расчетные силы I режима при разгрузке в вагоноопрокидывателе, приведенные в «Нормах...» ($q_z = 0,25q_g$), обоснованы для расчета кузова, опертго на вертикальные и горизонтальные упоры одной боковой стены при повороте на 170° .

2. При опоре одной боковой стены на вертикальные упоры горизонтальная поперечная сила с учетом опирания необрессоренных частей на рельс при повороте вагона на 170°

$$q_z = \frac{N_{\text{б.с.}}^{(170^\circ)}}{N_{\text{в.о.}}^{(170^\circ)}} = \frac{145478}{908131} = 0,16q_g ,$$

где

3. Резкое увеличение нагруженности боковой стены происходит при повороте кузова от 0 до 90° , далее:

– при опирании верхней обвязки одной боковой стены на вертикальные упоры нагрузка на боковую стену возрастает и увеличивается на 9% при повороте на максимальный угол 170° ;

– при опирании верхних обвязок обеих боковых стен на вертикальные упоры нагрузка на опорную боковую стену снижается после поворота вагона на 90° .

4. Так как при обоих вариантах опирания вагона на вертикальные упоры нормальная сила $N_{б.с.}^{\max}$ возникает при угле поворота вагона 90° , целесообразно определить напряжения в боковой стене при повороте вагона со смирзшимся грузом на 90° от силы реакции горизонтальных опор $N_{б.с.}^{\max}$.

$$q_{б.с.} = \frac{(P + T_{\kappa} + 2T_{н.б.})g}{n} = \frac{(71000 + 13400 + 2 \cdot 500)9,81}{4} = 209443,5.$$

Так как сила $q_{б.с.}$ действует на одну боковую стену, для расчета на прочность по МКЭ следует использовать модель 1/2 части кузова.

Схема приложения силы $q_{б.с.}$ к верхней обвязке показана на рис. 6.

Максимальные напряжения в верхней обвязке от силы $q_{б.с.}$ составляют 333 МПа.

Определим напряжения в боковой стене от действия силы $N_{б.с.}^{\max}$.

Расчетная горизонтальная сила на один пролет принимается равной

$$q_{б.с.} = \frac{N_{б.с.}^{\max}}{n} = \frac{(P + T_{\kappa} + 2T_{н.б.})g}{n},$$

где n – количество упоров вагоноопрокидывателя (согласно расчетной схеме «Норм...», на одну стену – 4 шт.).

Для принятых исходных данных

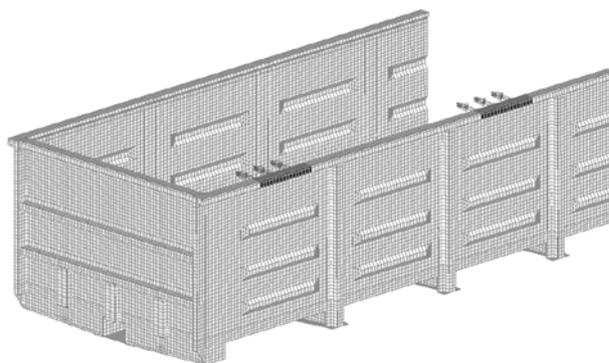


Рис. 6. Приложение горизонтальной силы $q_{б.с.}$ при расчете полувагона на разгрузку в вагоноопрокидывателе при повороте на 90°

Расчет напряжений в верхней обвязке по II режиму

Расчеты проводились на пластинчатой модели 1/2 части боковой стены, закрепленной в соответствии с рекомендациями «Норм...».

Рассматривались три варианта смещения обвязок:

1) смещение верхней обвязки на 50 мм по всей длине относительно нижней (схема «Норм...»);

2) смещение упорного участка возле шкворневой стойки на 50 мм;

3) смещение упорного участка возле середины кузова на 50 мм.

Схемы приложения нагрузок приведены на рис. 7.

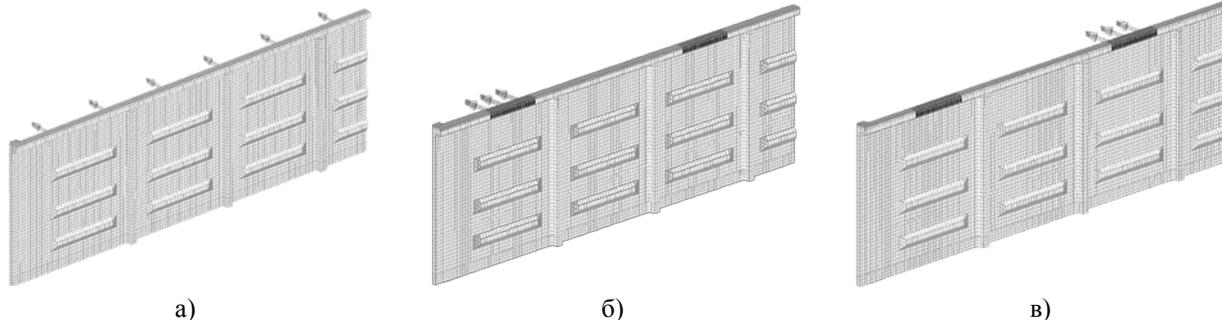


Рис. 7. Приложение нагрузки по II режиму:

а – от смещения верхней обвязки по всей длине относительно нижней обвязки на 50 мм;

б – от смещения упора вагоноопрокидывателя возле шкворневой стойки на 50 мм;

в – от смещения упора вагоноопрокидывателя возле середины боковой стены на 50 мм

От нагрузки, вызванной смещением упоров, возникают напряжения на уровне

570 МПа, что выше предела текучести материала.

Анализ результатов расчетов

В таблице сопоставлены напряжения в верхней обвязке боковой стены, полу-

ченные по I и II режимам по расчетным схемам «Норм...» и уточненным схемам.

Таблица

Результаты расчетов напряжений в верхней обвязке при разгрузке в вагоноопрокидывателе по расчетным схемам «Норм...» и уточненным схемам

Несущий элемент	Напряжения, МПа				
	По I режиму		По II режиму		
	Схема «Норм...»	Уточненная схема	Схема «Норм...»	Уточненная схема, смещение упорного участка возле	
шкворневой стойки				середины стены	
Верхняя обвязка в середине пролета № 1 (первый упор вагоноопрокидывателя)	127	327	44	572	70
Верхняя обвязка в середине пролета № 3 (второй упор вагоноопрокидывателя)	133	333	31	95	547
Узел соединения верхней обвязки со шкворневой стойкой	96	130	850	962	347
Узел соединения верхней обвязки с промежуточной стойкой № 1	30	65	843	345	977
Узел соединения верхней обвязки с промежуточной стойкой № 2	26	30	844	80	1060

По результатам расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Учет при I режиме силы $q_{\delta.c.}$, действующей на боковую стену при повороте вагона в вагоноопрокидывателе на 90° , позволяет выявить увеличение напряжений в верхней обвязке по сравнению с расчетной схемой «Норм...». Напряжения в верхней обвязке от силы $q_{\delta.c.}$ в 2,5 раза выше напряжений от нагрузки, учитываемой по «Нормам...».

2. Из результатов расчетов по II режиму видно, что напряжения от смещения упоров выше, чем напряжения от смещения всей верхней обвязки относительно нижней обвязки: для середин пролетов - в 3 раза, для узлов соединения стоек с верхней обвязкой - в 1,25 раза. Смещение разных упоров вызывает перераспределение напряжений в верхней обвязке боковой стены, поэтому следует учитывать два варианта смещения упоров.

Заключение

По результатам проведенного исследования можно сформулировать следующие рекомендации:

1. Дополнить «Нормы...» в части требований к расчету боковых стен при разгрузке на вагоноопрокидывателе по II режиму: для обеспечения прочности кузова вагона при экстремальных условиях разгрузки (смерзшийся груз) дополнительно рассчитывать кузов на силы реакций горизонтальных упоров при повороте вагона на 90°, равномерно распределенных по ширине обвязки на длине 0,8 м средней части пролета обвязки между соседними стойками.

Расчетная горизонтальная сила на один пролет принимается равной

$$q_{б.с.} = \frac{(P + T_k + 2T_{н.б.})g}{n}$$

2. Дополнить «Нормы...» в части требований к расчету боковых стен при разгрузке на вагоноопрокидывателе по II режиму: боковую стену рассчитывать по II специальному режиму на изгиб из своей плоскости как раму, шарнирно опертую верхним поясом и жестко закрепленную в нижнем поясе, на силы, возникающие от смещения:

а) верхней обвязки на 50 мм по всей длине относительно нижней;

б) упорного участка возле шкворневой стойки на 50 мм;

в) упорного участка возле середины кузова на 50 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Додонов, А.В. Уточненный расчет прочности кузова полувагона при разгрузке на вагоноопрокидывателе / А.В. Додонов, И.А. Хилов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2012. – № 3 (31). – С.41-45.

2. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 320 с.

1. Dodonov, A.V. Refined computation of gondola car body strength at unloading on car dumper / A.V. Dodonov, I.A. Khilov // *Cars and Car Economy*. – 2012. – No.3 (31). – pp. 41-45.

2. *Standards for Computation and Design of MC Cars with Gauge 1520mm (non-self-propelled)*. – М.: StateRIRT, 1996. – pp. 320.

3. Bein, D.G. Reduced algorithm of structural-parametric optimization of freight car end walls /

3. Бейн, Д.Г. Сокращенный алгоритм структурно-параметрической оптимизации торцевых стен грузовых вагонов / Д.Г. Бейн, М.А. Булычев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. - № 1. – С. 4-11.

4. Булычев, М.А. Математическое моделирование и оптимизация кузовов полувагонов с несущим полом: монография / М.А. Булычев, Д.Г. Бейн; под ред. В.П. Лозбинева. – Брянск: БГТУ, 2014. – 183 с.

D.G. Bein, M.A. Bulychyov // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2014. – No.1. – pp. 4-11.

4. Bulychyov, M.A. *Mathematical Modeling and Optimization of Gondola Car Bodies with Bearing Floor: monograph* / M.A. Bulychyov, D.G. Bein; under the editorship of V.P. Lozbinev. – Bryansk: BSTU, 2014. – pp. 183.

Статья поступила в редакцию 15.10.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ Лозбинева Ф.Ю.

Статья принята к публикации 12.02.19.

Сведения об авторах:

Булычев Михаил Анатольевич, к.т.н., доцент кафедры «ПСЖД» Брянского государственного технического университета, e-mail: mike1973@rambler.ru.

Bulychyov Mikhail Anatolievich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “PSR”, Bryansk State Technical University, e-mail: mike1973@rambler.ru.

Антипин Дмитрий Яковлевич, к.т.н., директор Учебно-научного института транспорта, доцент кафедры «ПСЖД» Брянского государственного технического университета, e-mail: adya24@rambler.ru.

Antipin Dmitry Yakovlevich, Can. Sc. Tech., Director of Educational-Scientific Institute of Communications, Assistant Prof. of the Dep. “PSR”, Bryansk State Technical University, e-mail: adya24@rambler.ru.