

*Д.В. Морозов, И.Ю. Ермоленко*

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ НДС КУЗОВА ПОЛУВАГОНА НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СВЕРХНОРМАТИВНЫХ НАГРУЗОК**

**Аннотация.** При эксплуатации железнодорожного подвижного состава основным вопросом рассматривается безопасность перевозки грузов и пассажиров. Под эксплуатацией грузового вагона понимается не только процесс перевозки грузов, но и различные способы его загрузки и разгрузки. В данной статье рассматривается расчет и моделирование напряженно-деформированного состояния (далее НДС) полувагона при эксплуатации в движении и при одном из применяемых способов разгрузки полувагонов (при использовании вагоноопрокидывателя). По результатам анализа НДС кузова полувагона разработаны рекомендации по оптимизации силовой схемы кузова.

**Ключевые слова:** полувагон, напряженно-деформированное состояние, продольные нагрузки, вагоноопрокидыватель, оптимизация силовой схемы кузова.

*D.V. Morozov, I.Yu. Ermolenko*

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

## **MODELING OF THE VAT OF A GONDOLA CAR BODY FOR STRENGTH UNDER THE INFLUENCE OF EXCESSIVE LOADS**

**Abstract.** When operating railway rolling stock, the main issue is considered the safety of transportation of goods and passengers. The operation of a freight car refers not only to the process of transporting goods, but also to various methods of loading and unloading it. This article discusses the calculation and modeling of the stress-strain state (hereinafter SSS) of a gondola car during operation in motion and with one of the methods used to unload gondola cars (when using a wagon loader). Based on the results of the stress-strain state analysis of the gondola car body, recommendations have been developed for the optimization of the body's power scheme.

**Keywords:** Gondola car, stress-strain state, longitudinal loads, car dumper, optimization of the power scheme of the body.

### **Введение**

Грузовой универсальный полувагон является основной единицей нетягового подвижного состава предназначенный для перевозки массовых неагрессивных грузов, не требующих защиты от атмосферных осадков: насыпных (непылевидных), навалочных, штабельных и штучных с креплением их в соответствии с требованиями правил погрузки.

Во время движение на полувагон, как и любой другой тип вагона, действуют различные нагрузки: статические, динамические, инерционные и т.п.

При различных видах способов разгрузки вагонов, на элементы его конструкции так же влияют определенные силы, которые необходимо учитывать при расчете конструкции вагона.

Эти силы (нагрузки) могут способствовать, в частности, изменению геометрии кузова вагона, что может привести к нарушению его габаритов.

### **Постановка задачи исследования**

Расчёт напряженно-деформированного состояния (далее НДС) кузова полувагона выполняется в соответствии с «Нормами для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» [1] и ГОСТ 33211-2014 [2].

В соответствии с [1-2] устанавливаются 2 основных и 1 дополнительный специальный расчётных режима.

По I расчётному режиму рассматривается относительно редкое сочетание экстремальных нагрузок. Основное требование при расчёте на прочность по этому режиму – не допустить появления остаточных деформаций (повреждений) в узле или детали.

В эксплуатации, I режиму расчёта для грузовых вагонов соответствуют осаживание и трогание тяжеловесного состава с места, соударения вагонов при маневрах, в том числе при роспуске с горок, экстренное торможение в поездах при малых скоростях движения.

По III расчётному режиму рассматривается относительно частое возможное сочетание умеренных по величине нагрузок, характерных для нормальной работы вагона в движущемся поезде. Основное требование при расчёте по этому режиму – не допустить установленного разрушения узла детали.

В условиях эксплуатации, III режиму расчёта соответствуют случаи движения вагона в составе поезда по прямым и кривым участкам пути и стрелочным переводам с допускаемой скоростью, вплоть до конструкционной, при периодических служебных регулировочных торможениях, периодических умеренных рывках и толчках, штатной работе механизмов и узлов вагона.

За объект расчёта кузова принимается универсальный четырёхосный полувагон с разгрузочными люками и глухими торцевыми стенами модели 12-132-03. Общий вид полувагона представлен на рисунке 1.

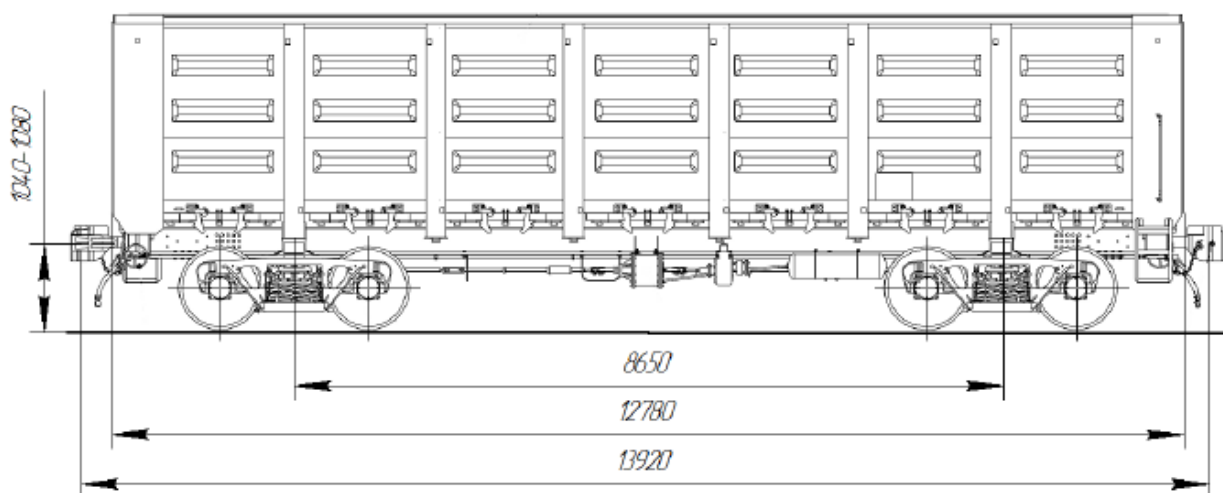


Рис. 1. Общий вид четырёхосного полувагона модели 12-132-03

### Моделирование НДС кузова полувагона

К основным расчётным продольным силам относятся сжимающие и растягивающие (квазистатические и динамические) силы взаимодействия между вагонами и между вагоном и локомотивом, действующие при движении поезда и маневровых работах, а также возникающие при динамическом действии этих сил силы инерции, воспринимаемые в узлах и деталях вагонов.

Таблица 1

Величины продольных нагрузок при расчёте на прочность грузовых вагонов

| Наименование вагонов           | Величина продольной нагрузки, МН |                |                       |                |
|--------------------------------|----------------------------------|----------------|-----------------------|----------------|
|                                | I расчетный режим                |                | III расчетный режим   |                |
|                                | Квазистатическая сила            | Удар, рывок    | Квазистатическая сила | Удар, рывок    |
| Грузовые вагоны основных типов | - 3,0<br>+ 2,5                   | - 3,5<br>+ 2,5 | - 1,0<br>+ 1,0        | - 1,0<br>+ 1,0 |

Примечание: а) Знак «+» для усилий растяжения, рывка, знак «-» для усилий сжатия, удара; б) Время действия импульсных усилий (удара и рывка) принимается равным 0,3 с.

Кузова вагонов рассчитываются в первую очередь на наиболее невыгодное возможное сочетание одновременно действующих основных и дополнительных сил в соответствии с установленными расчётными режимами.

Величины и сочетание основных нагрузок для расчёта на прочность кузовов грузовых вагонов приведены в таблице 2.

Таблица 2

| <b>Величины продольных нагрузок при расчёте на прочность грузовых вагонов</b> |   |                     |
|---|---|---------------------|
| Наименование основных расчётных нагрузок                                      | I расчетный режим   | III расчетный режим |
| <b>Вертикальные нагрузки</b>  |   |                     |
| Сила тяжести брутто   | учитывается   | учитывается         |
| Вертикальная динамическая нагрузка  | не учитывается  | учитывается         |
| Вертикальная добавка от продольной силы инерции кузова                        | учитывается при $N=3,5 \text{ МН}$                            | не учитывается      |
| <b>Боковые нагрузки</b>   |   |                     |
| Центробежная сила   | учитывается   | учитывается         |
| Поперечная составляющая продольной квазистатической силы                      | учитывается при $N= - 3,0 \text{ МН}$ и $N= + 2,5 \text{ МН}$ | не учитывается      |
| <b>Самоуравновешенные нагрузки</b>  |   |                     |
| Силы распора  | учитывается   | учитывается         |

Моделируем НДС кузова от действия продольных нагрузок. Расчёт будем производить от действия наибольших нагрузок по соответствующим расчётным режимам. Наибольшими продольными нагрузками для I режима является удар  $= 3,5 \text{ МН}$ , приходящийся на автосцепку. Для III режима величины продольных нагрузок принимаются равными, поэтому расчёт произведём для рывка  $= 1 \text{ МН}$ .

Напряжённо-деформированное состояние кузова, для обоих случаев изображено на рисунках 2 и 3.

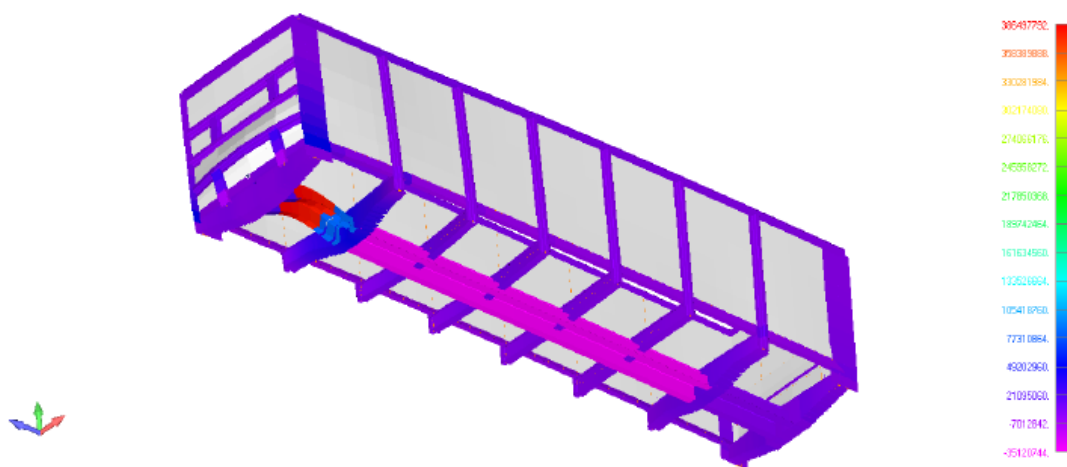


Рис. 2. НДС кузова полувагона под нагрузкой удара  $N=3,5 \text{ МН}$

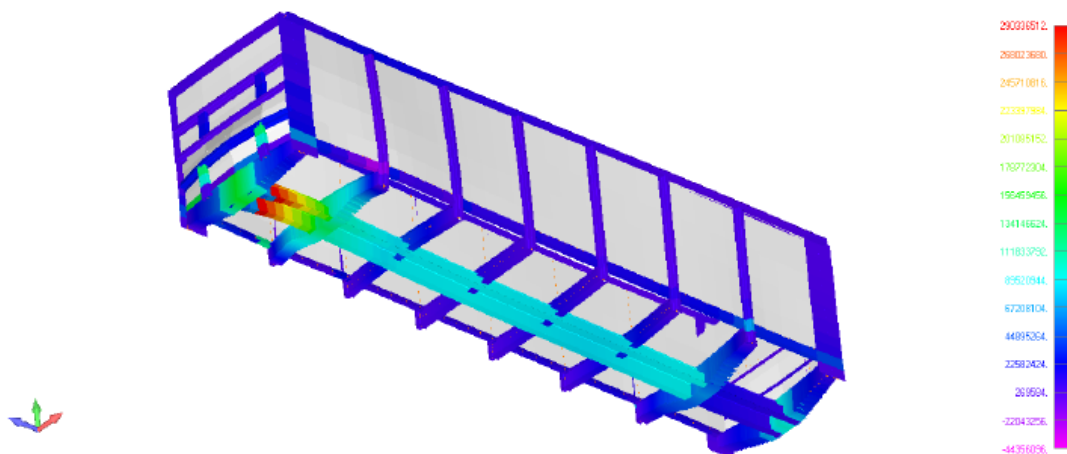


Рис. 3. НДС кузова полувагона под нагрузкой рывка  $N=1 \text{ МН}$

Произведём расчёт статической и вертикальной динамической нагрузок от веса груза действующих на кузов. Схема нагружения кузова вагона от статической и вертикальной динамической силы представлена на рисунке 4.

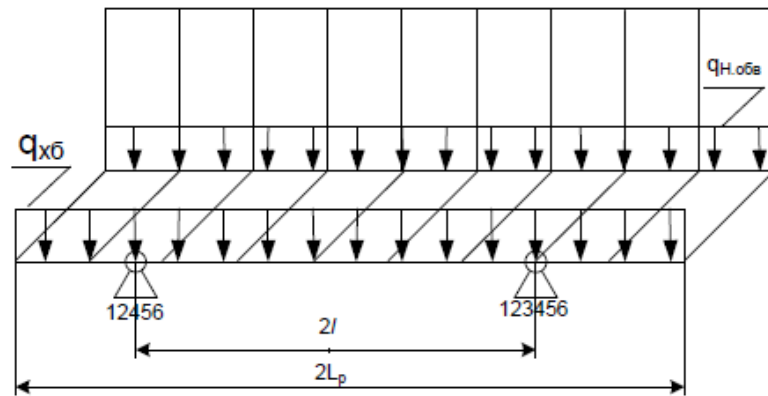


Рис. 4. Схема нагружения кузова вагона статической и вертикальной динамической силой от перевозимого груза

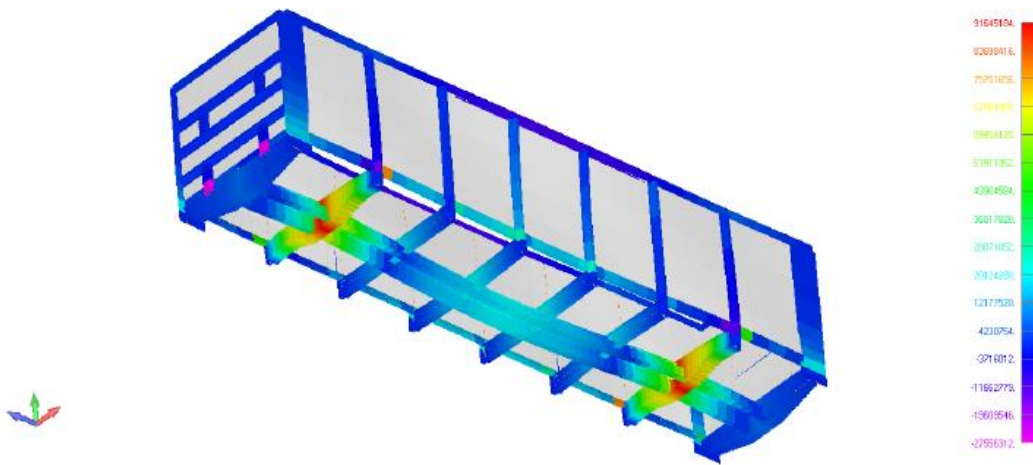


Рис. 5. НДС кузова полувагона под действием статической нагрузки

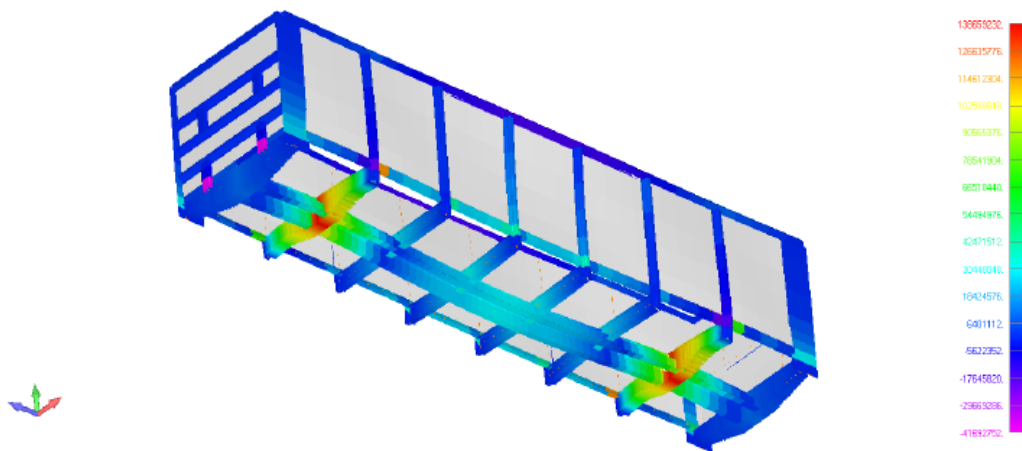


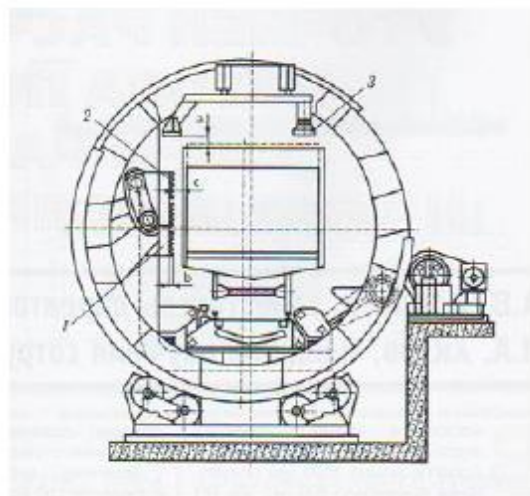
Рис.6. НДС кузова полувагона под действием динамической нагрузки

### **Расчёт на прочность кузова полувагона по сверхнормативным расчётным режимам (разгрузка на вагонопрокидывателе)**

Следует отметить, что для разгрузки полувагонов наиболее эффективным является использование вагонопрокидывателей. Данный процесс занимает всего несколько минут, а производительность вагонопрокидывателя может достигать 50 тыс. тонн в час. При таком способе разгрузки кузов полувагона испытывает значительные нагрузки, действие которых необходимо учитывать при проектировании [3-7].

В целях решения этой задачи были проведен анализ НДС кузова полувагона при его разгрузке на вагонопрокидывателе. Расчёт на прочность по сверхнормативным режимам будем производить с использованием объёмной модели 0,25 части кузова.

Для разгрузки полувагонов наиболее часто применяются роторные вагонопрокидыватели. Данный вид вагонопрокидывателя позволяет поворачивать полувагон относительно продольной оси на угол до 170 градусов. Общий вид и схема вагонопрокидывателя представлен на рисунке 7.



**Рис. 7. Общий вид и схема вагонопрокидывателя**

Величина нагрузок, действующих на кузов полувагона при разгрузке, зависит от угла поворота ротора вагонопрокидывателя. Поэтому выделим несколько расчетных случаев (углы поворота на  $65^\circ$  и  $170^\circ$ ).

Основные этапы поворота полувагона на вагонопрокидывателе приведены на рисунке 8.



**Рис. 8. Основные этапы поворота на вагонопрокидывателе**

Для осуществления анализа были разработаны собственные схемы кинематических и силовых граничных условий. Данные схемы приведены на рисунке 9.

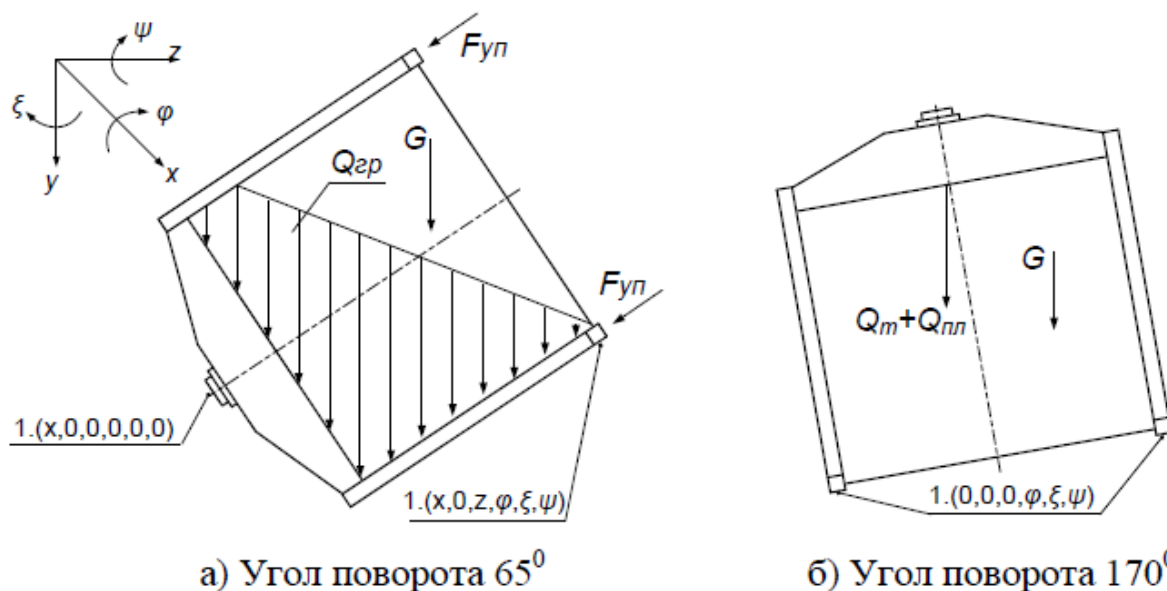


Рис. 9. Собственные схемы кинематических и силовых граничных условий

НДС 1/4 кузова полувагона для первого расчётного случая (угол поворота ротора =  $65^{\circ}$ ) изображено на рисунке 10.

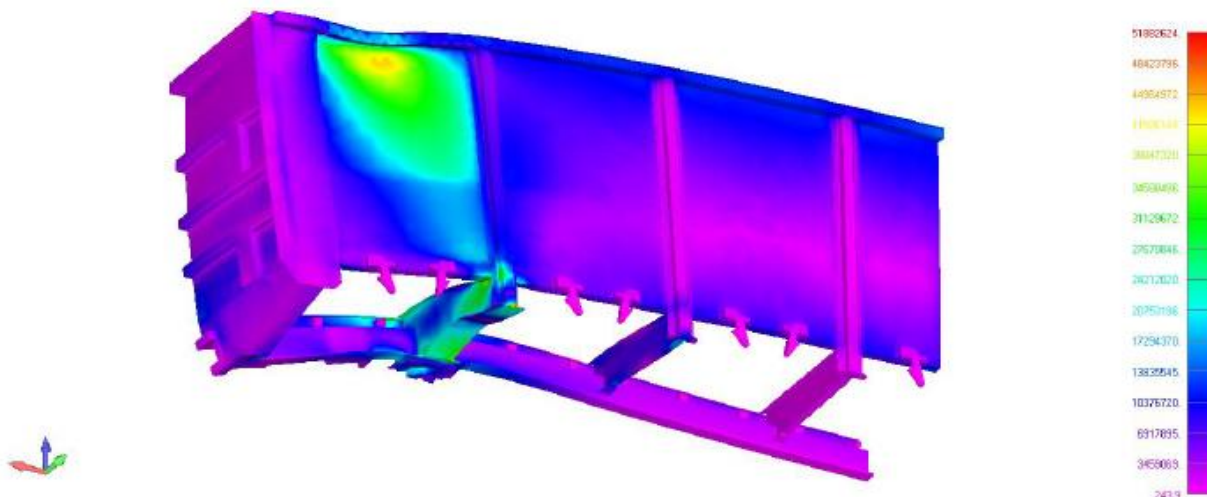


Рис. 10. НДС кузова полувагона для первого расчётного случая (угол поворота ротора =  $65^{\circ}$ )

НДС 1/4 кузова полувагона для второго расчётного случая (угол поворота ротора =  $170^{\circ}$ ) изображено на рисунке 11.

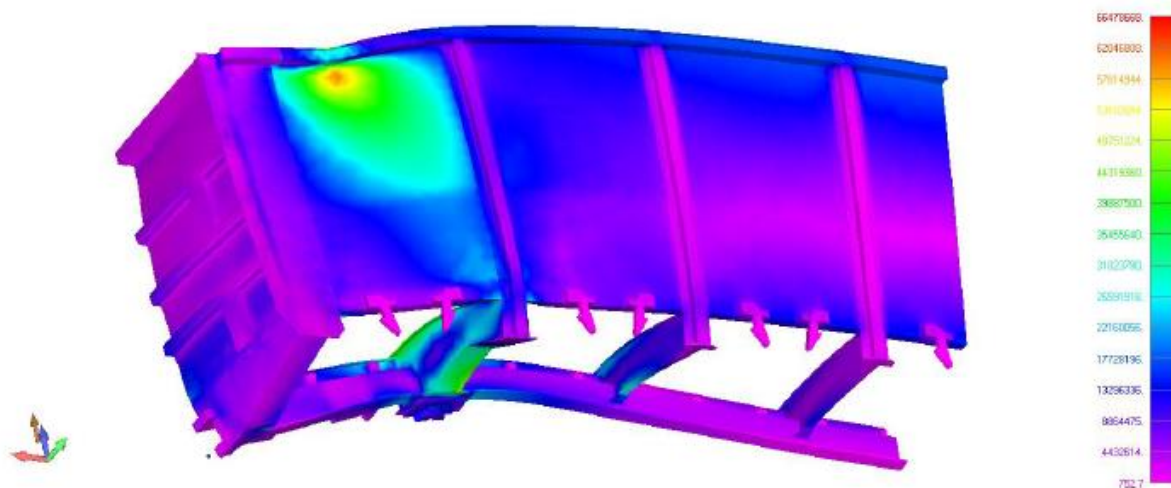


Рис. 11. НДС кузова полувагона для второго расчётного случая (угол поворота ротора =  $170^{\circ}$ )

### **Рекомендации по оптимизации силовой схемы кузова полувагона**

Результаты анализа НДС кузова полувагона по различным расчётным режимам показали, что кузов имеет неблагоприятные всплески напряжений в ответственных узлах соединения. Таким образом были разработаны следующие рекомендации по оптимизации силовой схемы кузова:

а) выполнять обвязку торцевой стены, продленную за листы угловых стоек и присоединенной поверхностью, направленной внутрь кузова, к торцевой грани верхнего элемента обвязки боковой стены, позволяет осуществить прямое соединение обвязок боковой и торцевой стен с перехлестом несущих элементов конструкции, а также развернуть основные сварные швы, соединяющие торцевые и боковые стены в разных плоскостях.

б) осуществлять приварку к нижней поверхности обвязки боковой стены накладку переменного сечения. Данную накладку приваривать к листу угловой стойки и к обвязке торцевой стены, что позволяет соединить вместе три основных несущих элемента кузова (обвязка торцевой стены, обвязка боковой стены и угловая стойка) и достичь плавности восприятия нагрузок в узле заделки элементов и плавности распределения возникающих напряжений между несущими элементами. Для соединения обвязок разных высот, накладка, которая приваривается к нижней поверхности обвязки боковой стены, имеет горизонтальный участок и участок под углом, при этом накладка приваривается к обвязке торцевой стены качественным сварным швом (в лодочку), а переменная ширина накладки улучшает плавность перераспределения возникающих напряжений.

в) так же более рационально использовать профиль обвязки торцевой стены по ширине больше, а по высоте меньше профиля обвязки боковой стены, так как на обвязку торцевой стены действует инерционная нагрузка в горизонтальном направлении, которая на много больше распорной нагрузки, действующей на обвязки боковой стены.

г) выполнять внешнюю боковая поверхность обвязки боковой стены конгруэнтно с внешней поверхностью стоек боковой стены, что позволяет разгружать полувагон в вагоноопрокидывателях без повреждений полувагона и вагоноопрокидывателей, так как кузов при разгрузке обеспечивает одновременное и равномерное прилегание наружных поверхностей стоек и верхних обвязок на привалочную плоскость вагоноопрокидывателя.

Данная конструкция позволяет повысить прочность узла соединения стен более чем в 1,5 раза (при условии однотипности схемы и величины расчетной нагрузки). По сравнению с конструкцией ближайшего аналога позволяет обеспечить узел соединения стен без использования специальных профилей на несущие элементы кузова, а с применением обычного листового, сортового, фасонного прокатов, сваренных между собой, что также позволяет уменьшить трудозатраты при ремонте кузова и снизить возникновение неисправностей в узле заделки обвязок в процессе эксплуатации.

Помимо этого, предлагаемая конструкция соединения боковых и торцевых стен позволяет упростить сборку и повысить точность размеров собранного кузова, так как в конструкции боковой стены обвязкой и листом угловой стойки образован прямоугольный выступ с горизонтальной и вертикальной плоскостями и при сборке кузова торцевая стена, посредством удлиненной обвязки, укладывается на горизонтальную плоскость, прижимается к вертикальной плоскости и зажимается между боковыми стенами, тем самым лишая торцевую стену шести степеней свободы без дополнительных приспособлений, а точность сборки кузова обеспечивается точностью изготовления деталей (верхних элементов обвязок боковых стен), которые имеют меньшие отклонения (допуски на размеры) от номинальных размеров, чем сборочные единицы (стены боковые).

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). - М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996, 317 с.
2. ГОСТ 33211-2014 Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам.

3. ГОСТ 22235-76 Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ

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

5. 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.

6. 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.

7. Булычев, М.А. Совершенствование методики расчета на прочность верхних обвязок боковых стен полувагонов / М.А. Булычев, Д.Я. Антипин // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2019. - № 3. - С. 58-64.

## REFERENCES

1. Standards for the calculation and design of railcars of the MPS gauge of 1520 mm (non-self-propelled). - M.: GosNIIV-VNIIZHT, 1996, 317 p.

2. GOST 33211-2014 Freight wagons. Requirements for strength and dynamic qualities.

3. GOST 22235-76 Freight wagons of mainline railways of 1520 mm gauge. General safety requirements for handling and shunting operations

4. Dodonov, A.V. A refined calculation of the strength of the gondola car body when unloading on a dump truck / A.V. Dodonov, I.A. Khilov // Wagons and wagon economy. - 2012. - № 3 (31). - Pp.41-45.

5. Bein, D.G. An abbreviated algorithm for structural and parametric optimization of the end walls of freight wagons / D.G. Bein, M.A. Bulychev // Bulletin of the Bryansk State Technical University. - 2014. - No. 1. - pp. 4-11.

6. Bulychev, M.A. Mathematical modeling and optimization of gondola car bodies with a load-bearing floor: monograph / M.A. Bulychev, D.G. Bein; edited by V.P. Lozbinev. Bryansk: BSTU, 2014. - 183 p

7. Bulychev, M.A. Improvement of the methodology for calculating the strength of the upper bindings of the side walls of gondola cars / M.A. Bulychev, D.Ya. Antipin // Bulletin of the Bryansk State Technical University. - 2019. - No. 3. - pp. 58-64.

## Информация об авторах

Морозов Дмитрий Валерьевич – старший преподаватель кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [moro-d@yandex.ru](mailto:moro-d@yandex.ru)

Ермоленко Игорь Юревич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [ermolenko\\_ig@list.ru](mailto:ermolenko_ig@list.ru)

## Information about the authors

*Dmitry Valerievich Morozov* – senior lecturer of the department «Cars and carriage facilities», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [moro-d@yandex.ru](mailto:moro-d@yandex.ru)

*Ermolenko Igor Yurevich* – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department «Cars and carriage facilities», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [ermolenko\\_ig@list.ru](mailto:ermolenko_ig@list.ru)