

УДК 629.4.015

А. В. ПУТЯГО, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ ВАГОНА-ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ЛЕСНЫХ ГРУЗОВ

Рассмотрены особенности расчета на прочность вагона-платформы для перевозки лесных грузов на примере реализации проекта по перепрофилированию невостребованных вагонов для перевозки нефтебитума в вагоны-платформы для перевозки леса, а также при разработке новых конструкций вагонов рассматриваемого типа. Описаны конструктивные особенности указанных выше грузовых вагонов. Установлено, что наиболее опасными с позиции обеспечения прочности металлоконструкции вагона является режим ударного нагружения и III расчетный режим. Работоспособность разработанных моделей для расчета прочности кузова вагона-лесовоза подтверждена проведенными испытаниями. Результаты расчетов использованы при реализации проекта переоборудования вагонов для перевозки нефтебитума в вагонном депо Орша Белорусской железной дороги, а также при разработке конструкторской документации новых моделей вагонов на ПО «Белорусский автомобильный завод».

Решение задач по повышению грузооборота на железнодорожном транспорте требует обеспечения безопасной, безотказной работы его подвижного состава и достаточной обеспеченности специализированными вагонами располагаемого рабочего вагонного парка железных дорог. Для пополнения рабочего парка подвижного состава на Белорусской железной дороге на период до 2015 года предусмотрены значительные поставки новых вагонов [1]. В условиях недостаточности средств для закупки новых специализированных вагонов для перевозки специфических для Республики Беларусь грузов, а также с целью обеспечения грузовых перевозок надлежащим подвижным составом представляются вполне приемлемыми принимаемые технические решения по переоборудованию имеющихся в наличии неиспользуемых специализированных вагонов грузового парка для обеспечения перевозки более востребованных в сложившихся условиях грузов. Это позволяет обеспечить перевозки по республике, странам дальнего и ближнего зарубежья дополнительным подвижным составом, высвобожденным от ненужных внутренних перевозок, частично сократить потребности в затратах на приобретение новых специализированных вагонов, уменьшить необходимый объём новых закупок.

В этом аспекте рассмотрен вопрос о переконструировании невостребованных четырёхосных платформ для перевозки нефтебитума модели 17-494 постройки Днепродзержинского вагоностроительного завода, изготовленных по техническим условиям ТУ 24.05.426-84. Перепрофилирование бункерного вагона для перевозки нефтебитума в специализированную платформу включает операции по замене его конструктивных узлов. Сначала демонтируют ёмкости для нефтебитума, т. е. бункеры с торцовыми и промежуточными опорными частя-

ми их установки и крепления. Затем жёстко закрепляют с помощью электросварки заранее заготовленные сварные, обшитые металлическим листом, армированные торцовые стенки в вертикальных плоскостях концевых балок рамы вагона, а между ними приваривают равномерно вдоль этой рамы вагона на расстояниях, необходимых для размещения лесоматериалов заданной длины, промежуточные оппозитно расположенные на боковых балках указанной рамы, и жёстко скреплённые между собой попарно в поперечном направлении вертикальные стойки в виде комплекта рам бокового ограждения кузова создаваемого вагона-платформы для перевозки лесных грузов. По концам вагона крайние из упомянутых промежуточных рам бокового ограждения жёстко скрепляют со сдвоенными крайними стойками соответствующей торцовой стены с помощью дополнительных продольных боковых балок, равномерно расположенных по высоте торцовой стены. Указанные крайние торцовые стойки закрепляют электросваркой на внешних боковых поверхностях концевых балок рамы вагона и её боковых продольных балок. Каждая упомянутая стойка изготовлена в виде двух балок замкнутого прямоугольного коробчатого профиля, при этом они размещены под прямым углом друг к другу с продольным их взаимным прилеганием по образующей, проходящей по вершинам углов коробчатых профилей каждой. С наружной стороны этих коробчатых балок жёстко закрепляют горизонтально расположенные усиливающие элементы, равномерно размещая их по высоте торцовой стены. Каждую раму бокового ограждения жёстко закрепляют с помощью поперечных и продольных крепяющих элементов на боковых балках рамы вагона, при этом последнюю укрепляют в каждой концевой части путём установки двух продольных усиливающих боковых балок из коробчатых профилей.

Таким образом, предлагаемый способ перепрофилирования бункерного вагона с заменой его конструктивных узлов позволяет осуществить модернизацию железнодорожных специализированных нефтебитумных вагонов для их использования по новому назначению, в частности для перевозки лесных грузов (лесоматериалов), а также сократить затраты на переоборудование и обеспечить повышение безопасности перевозок. Общий вид переоборудованного бункерного вагона для нефтебитума в платформу для перевозки лесных грузов показан на рисунке 1.

Порядок операций по переоборудованию следующий. С рамы 1 базового вагона демонтируют бункеры для нефтебитума с торцовыми и промежуточными опорными частями для их установки и крепления (на чертеже условно не показаны). Затем закрепляют с помощью электросварки обшитые металлическим листом армированные торцо-

вые стенки 2 по концевым балкам 3 рамы 1 вагона, а между ними приваривают вдоль по боковым балкам рамы 1 с опорой на хребтовую балку последней комплект рам бокового ограждения 4, 5. Крайние рамы 4 жёстко скрепляют со сдвоенными крайними стойками 6 торцовых стен 2 с помощью дополнительных продольных балок 7. Торцовые стойки 6 закрепляют электросваркой на внешних боковых поверхностях концевых балок 3 рамы вагона и её боковых продольных балок, при этом каждую торцовую стойку выполняют в виде двух балок с продольным их взаимным прилеганием, а с наружной стороны эти коробчатые балки соединяют горизонтальными усиливающими элементами 8. Каждую раму бокового ограждения жёстко закрепляют с помощью элементов крепления 9, при этом раму 1 укрепляют боковыми усиливающими балками 10.

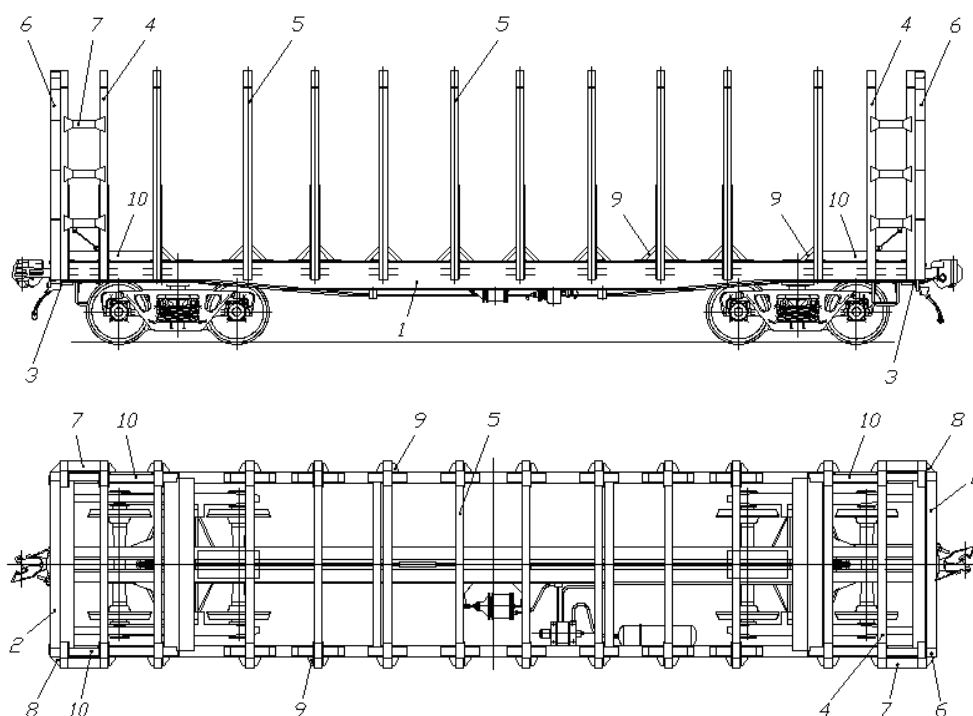


Рисунок 1 – Вагон-лесовоз, переоборудованный из бункерного вагона для перевозки нефтебитума

При разработке вариантов эскизного проектирования проводилось сравнение получаемых прочностных характеристик по несущим элементам с показателями базовой конструкции, принимались технические решения, требующие наименьших материальных и трудовых затрат.

Следует отметить, что это одно из направлений пополнения парка вагонов-платформ для перевозки лесных грузов. В Республике Беларусь также нашли применение разработки, связанные с перепрофилированием вагонов-платформ, например, по проектам, разработанным ОАО «Научно-внедренческий центр «Вагоны» (Россия).

Для оценки соответствия разработанной (модернизированной) конструкции в части прочностных характеристик требованиям «Норм...» [2]

разработана конечно-элементная модель металлоконструкции кузова (рисунок 2), которая создавалась в соответствии с конструкторской документацией 494.00.00.000СБ отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Технические и технологические оценки ресурса единиц подвижного состава» с использованием программного комплекса DSMFEM, разработанного на кафедре «Динамика и прочность машин» Брянского государственного технического университета. Для построения модели использовались два типа конечных элементов: плоские пластинчатые 3- и 4-угольные. Параметры расчетной модели: количество узлов – 88425, количество конечных элементов – 74350. Модуль упругости материала принимался равным $2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона 0,3.

К наиболее опасному режиму относится ударное нагружение конструкции. Рассмотрим схему нагружения кузова при указанном режиме.

1 *Продольная нагрузка.* Согласно «Нормам...» $N = -3,5$ МН прикладывается к заднему упору автосцепного устройства.

Продольная сила инерции кузова учитывается автоматически путем наложения на элементы металлоконструкции вагона нормированного продольного ускорения $3,5g$.

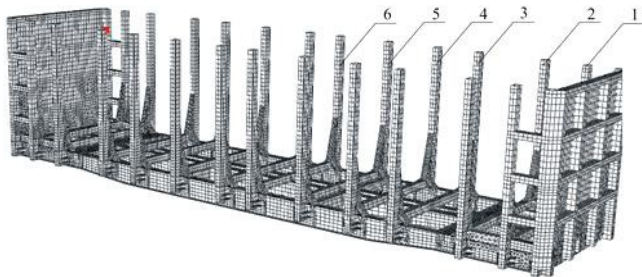


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель кузова вагона-платформы модели 17-494-01

Торцовая стена кузова рассчитывается на равномерно распределенное динамическое давление груза, возникающее при соударении вагонов от действия силы инерции массы груза, равной $0,35$ грузоподъемности вагона при нормативном продольном ускорении. Силу инерции определяем по формуле

$$N_{и} = ma_x,$$

где m – масса груза, $m = 0,35 \cdot 60 = 21$ т; a_x – нормированная величина продольного ускорения (замедления), $a_x = 3,5g$;

$$N_{и} = 21 \cdot 10^3 \cdot 3,5 \cdot 9,81 = 721 \text{ кН.}$$

При выполнении расчета на удар «Нормами...» не регламентировано распределение оставшейся продольной нагрузки по элементам кузова. Принято решение оставшиеся 65 % силы инерции груза, составляющей $1,34$ МН, распределить по лесным рамам (основание и стойка). Таким образом, на одну лесную раму действует $0,112$ МН. Распределение полученной нагрузки на основание и стойки лесной рамы с учетом отношения соответствующих площадей позволило определить нагрузки, действующие на основание и пару стоек лесной рамы: $f_{осн} = 33,6$ кН; $f_{ст} = 78,4$ кН. Кроме того, распределение нагрузки на стойки выполнено по линейной зависимости от ее высоты, причем нулевое значение принято на верхней границе загрузки вагона.

2 *Вертикальная нагрузка.* К вертикальной нагрузке относится сила тяжести брутто вагона, которая учитывается автоматически через известное гравитационное поле и плотность материала при учете массы металлоконструкции кузова вагона, а также путем равномерного распределения по основаниям лесных рам массы перевозимого груза, соответствующей грузоподъемности вагона (60 т).

3 *Самоуравновешенные нагрузки.* К самоуравновешенным нагрузкам относятся силы распора скатывающихся грузов. По I режиму проводится расчет боковых стоек кузова на давление распора при перевозке труб, бревен и других скатывающихся грузов, которое определяется выражением

$$p_a = (1 + K_{дв}) \gamma g y \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right),$$

где $K_{дв}$ – коэффициент вертикальной динамики, принимается для I режима $K_{дв} = 0,1$; γ – плотность груза, определяется как частное от деления грузоподъемности вагона на объем кузова, $\gamma = 60/100 = 0,6$ т/м³; g – ускорение свободного падения; y – расстояние от поверхности груза до точки, в которой определяется давление ($y_{\max} = 2,78$ м); φ – угол естественного откоса груза, образуемый поверхностью свободно насыпанного груза с горизонтальной плоскостью, в нашем случае $\varphi = 0$.

Таким образом, максимальное давление на основание условной боковой стены

$$p_a = (1 + 0,1) \cdot 600 \cdot 9,8 \cdot 2,78 \cdot \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} \right) \cdot 10^{-3} = 17,98 \text{ кПа.}$$

Определим максимальное давление, действующее на основание каждой стойки (нумерация принята согласно приведенной на рисунке 2) по формуле

$$p_i^{\max} = \frac{p_a (l_i + l_{i+1})}{2b},$$

где l_i, l_{i+1} – длины пролетов между соседними стойками; b – ширина стойки, $b = 12$ см.

Следовательно, получаем:

$$p_1^{\max} = \frac{p_a (l_1 + l_2)}{2b} = \frac{17,98 \cdot (2 \cdot 68 + 83,5)}{2 \cdot 12} = 164 \text{ кПа;}$$

$$p_2^{\max} = \frac{p_a (l_2 + l_3)}{2b} = \frac{17,98 \cdot (83,5 + 142,1)}{2 \cdot 12} = 169 \text{ кПа;}$$

$$p_3^{\max} = \frac{p_a (l_3 + l_4)}{2b} = \frac{17,98 \cdot (142,1 + 93,5)}{2 \cdot 12} = 176 \text{ кПа;}$$

$$p_4^{\max} = \frac{p_a (l_4 + l_5)}{2b} = \frac{17,98 \cdot (93,5 + 119,4)}{2 \cdot 12} = 159 \text{ кПа;}$$

$$p_5^{\max} = \frac{p_a (l_5 + l_6)}{2b} = \frac{17,98 \cdot (119,4 + 118)}{2 \cdot 12} = 178 \text{ кПа;}$$

$$p_6^{\max} = \frac{p_a (l_6 + l_7)}{2b} = \frac{17,98 \cdot (118 + 118)}{2 \cdot 12} = 177 \text{ кПа.}$$

При расчете к стойкам прикладывалось давление, изменяющееся от нуля в верхней части стойки до максимального значения у ее основания. Градиенты изменения давления для каждой стойки

$$dp_i = \frac{p_i^{\max}}{y_{\max}};$$

$$dp_1 = -\frac{164}{2,78} = -59,0 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}; \quad dp_2 = -\frac{169}{2,78} = -60,8 \frac{\text{кПа}}{\text{м}};$$

$$dp_3 = -\frac{176}{2,78} = -63,3 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}; dp_4 = -\frac{159}{2,78} = -57,2 \frac{\text{кПа}}{\text{м}};$$

$$dp_5 = -\frac{178}{2,78} = -64,0 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}; dp_6 = -\frac{177}{2,78} = -63,7 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}.$$

Кинематические граничные условия включают в себя ограничение степеней свободы в местах крепления упоров автосцепного устройства и пятников.

После проведения расчета были получены значения напряжений для всех конечных элементов металлоконструкции кузова платформы. На рисунке 3 показано распределение эквивалентных напряжений в кузове спроектированного вагона при ударном нагружении.

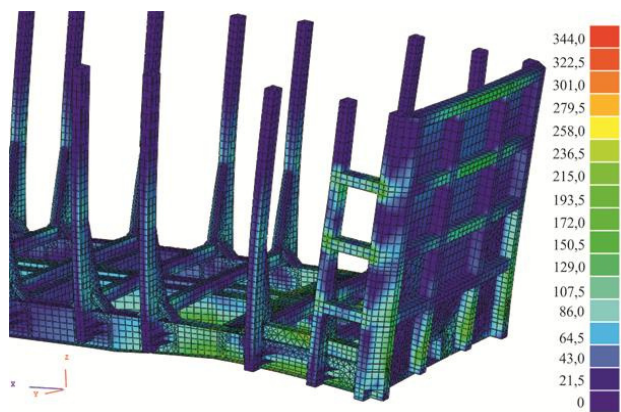


Рисунок 3 – Распределение эквивалентных напряжений (МПа) при ударном нагружении

Установлено, что максимальные эквивалентные напряжения в хребтовой балке возникают в зоне, находящейся за узлом сочленения со шкворневой балкой в нижней части (293,6 МПа). Шкворневая балка максимально нагружена в области соединения с дополнительной продольной балкой в консольной части вагона (289,2 МПа). Наиболее нагруженная область у концевой балки – зона сочленения с хребтовой балкой в верхней части (283,8 МПа). В боковой балке высокие напряжения (278,5 МПа) зафиксированы в нижней полке в области сочленения со шкворневой балкой. Максимальные эквивалентные напряжения в лесной раме возникают в области соединения стойки с основанием при первой лесной раме и достигают 340 МПа. В подкрепляющих швеллерах лесных рам в зоне соединения с боковой балкой напряжения составляют 344,5 МПа при пределе текучести материала 345 МПа, а максимальные эквивалентные напряжения в стойках торцевого щита зафиксированы в месте соединения с консольной балкой (327,8 МПа).

В целом, результаты расчета показали, что несущая способность при ударном нагружении кузова вагона находится в предельном состоянии.

На основании выполненных проектных работ в вагонном депо станции Орша Белорусской железной дороги построен опытный образец вагона-

платформы для перевозки лесных грузов модели 17-494-01.

Учитывая неизбежную погрешность расчетных методов оценки напряжений и деформаций, результаты расчетов верифицированы при проведении сертификационных испытаний построенного вагона с привлечением специалистов испытательного центра ОАО «НВЦ „Вагоны“» (г. Санкт-Петербург, Россия). При проверке прочности кузова вагона на действие ударных нагрузок испытываемый вагон накатывался на вагоны подпоры. Выполненные испытания показали, что динамические напряжения в конструкции лесных стоек и торцевой стены опытного образца переоборудованного вагона не превышают допустимых величин. Таким образом, по результатам проведенного комплекса испытаний сделан вывод, что опытный образец четырехосной платформы для перевозки лесных грузов, переоборудованный из вагона для нефтебитума модели 17-494, по проекту АЛВЯ 494.00.00.000 в соответствии с требованиями ТУ ВУ 100003499.001-2008 в вагонном депо Орша Белорусской железной дороги, удовлетворяет условиям прочности.

Техническая документация на изготовление платформ-лесовозов согласована на заседании Комиссии Совета по железнодорожному транспорту полномочных специалистов вагонного хозяйства железнодорожных администраций. По результатам выполненного проекта в вагонном депо Орша Белорусской железной дороги переоборудовано 157 вагонов, успешно эксплуатируемых в настоящее время.

Описанные особенности разработанного несъемного оборудования для перевозки лесоматериалов на вагоне и его расчета на прочность легли в основу при создании новых конструкций вагонов-платформ для перевозки леса совместно с бюро подвижного состава ПО «Белорусский автомобильный завод». В то же время при постановке задачи увеличения погрузочного объема вагона (до зонального габарита погрузки) на стадии проектных работ возникло ряд трудностей, связанных с особенностями конструкции рассматриваемого типа подвижного состава. Так, в силу незамкнутости верхнего контура кузова вагона и увеличения изгибающего момента консольной части относительно поперечной оси, проходящей через шкворневую балку, что связано с повышением точки приложения результирующей нагрузки на торцевую стену, конструкция, предлагаемая в ее первоначальном виде, не соответствовала требованиям прочности при ударном нагружении. Аналогичная ситуация возникла при рассмотрении нагружения стоек лесных рам по III режиму в соответствии с [2]. Наиболее нагруженные конструктивные зоны в этом случае приведены на рисунке 4.

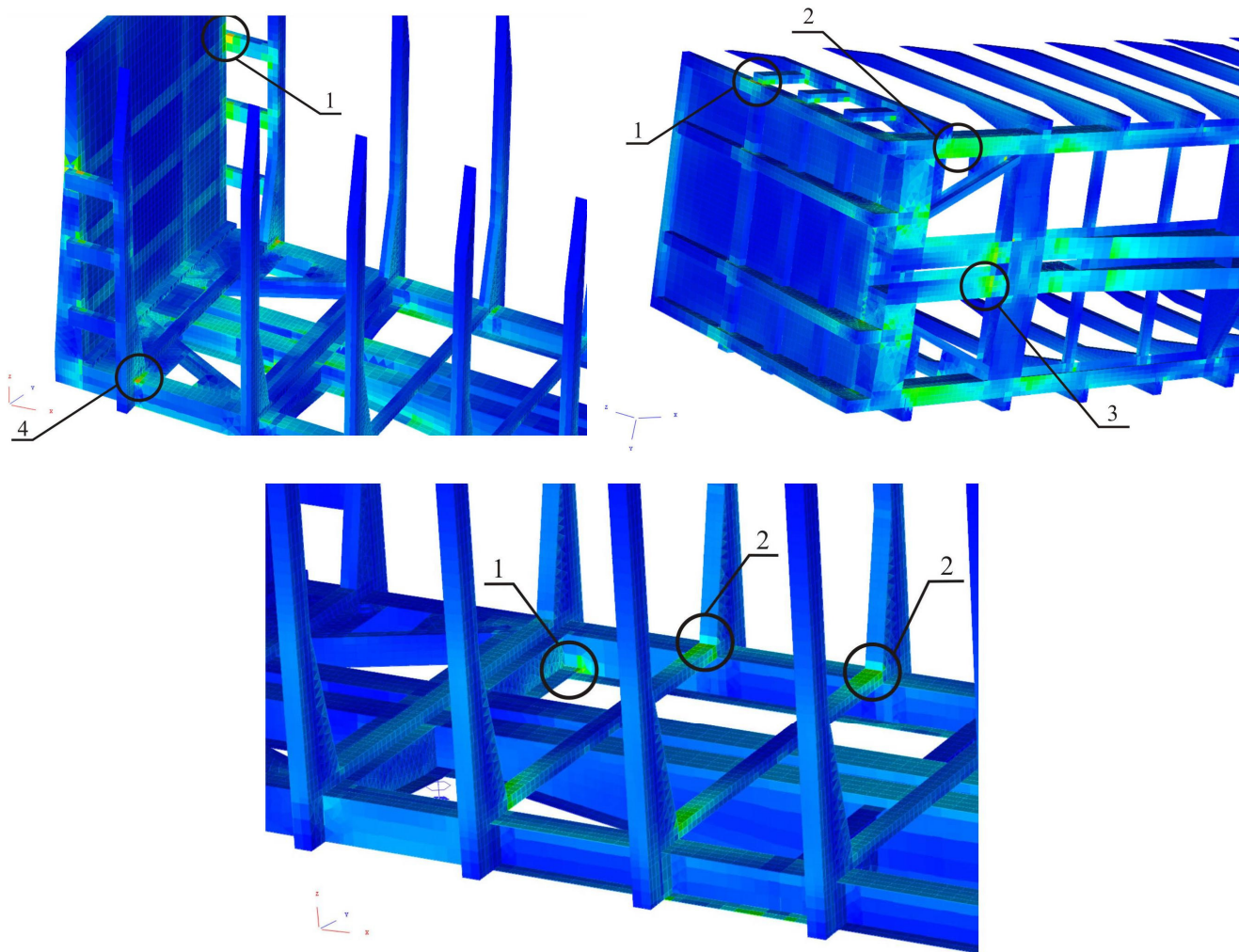


Рисунок 4 – Наиболее нагруженные конструктивные зоны

Возникшие трудности преодолены путем реализации пяти этапов конструктивного изменения с выполнением необходимых оценочных прочностных расчетов. Рассмотрим основные этапы корректировки конструкции кузова, результаты расчета на прочность которых приведены в таблице 1.

В рамках первого этапа корректировки удален раскос в консольной части рамы и добавлена в рассматриваемой области продольная балка, связывающая лобовой брус и шкворневую балку, а также увязанная с основанием лесной рамы, примыкающей к торцевой стене. Указанная продольная балка выполнена из профиля, аналогичного профилям, из которого изготовлены стойки лесных рам. Дополнительно выполнен перенос лесной рамы, примыкающей к торцевой стене к середине вагона на 230 мм.

На втором этапе оставлены изменения, внесенные в конструкцию кузова на предыдущем шаге. Дополнительно введен четвертый горизонтальный пояс на торцевой стене с продольными балками, соединяющими торцевую стену со стойками лесной рамы, примыкающей к последней. Изменено расположение по высоте всех горизонтальных

поясов и связывающих продольных балок на торцевой стене. Также корректировке подвергнуты стойки торцевой стены и ее верхняя обвязка.

На третьем этапе установлена дополнительная продольная балка на верхней полке двутавра боковой балки в пролете между лесными рамами 6 и 5 (см. рисунок 2). Она выполнена из профиля, аналогичного профилям, из которого изготовлены стойки лесных рам.

При реализации четвертого этапа оставлены изменения, внесенные в конструкцию кузова на этапах 1 и 2. Дополнительная продольная балка на верхней полке двутавра боковой балки в пролете между лесными рамами 6 и 5 (установленная на этапе 3) повернута на 90° вокруг своей продольной оси и смещена к краю вагона. Изменена косынка, соединяющая в лесной раме 6 основание и стойку, расположенная со стороны дополнительной продольной балки.

На пятом этапе оставлены изменения, внесенные в конструкцию кузова на этапах 1, 2 и 4. Введена дополнительная поперечная балка, соединяющая боковую и хребтовую балки и расположенная между третьей и четвертой лесными рамами.

Таблица 1 – Результаты расчета на прочность при поэтапной корректировке кузова вагона

Конструктивная зона		Исходный вариант	Этап 1	Этап 2	Этап 3	Этап 4	Этап 5	Допускаемые напряжения, МПа
1	Удар	396	437	305,8	295,3	299,6	299,6	325
	III режим	Превышения расчетными напряжениями допускаемых нет						
2	Удар	324,6	283,6	283,6	264,7	261,5	261,6	295
	III режим	Превышения расчетными напряжениями допускаемых нет						
3	Удар	375	348	341	330,6	341	341	325
	III режим	Превышения расчетными напряжениями допускаемых нет						
4	Удар	414,7(б)* 370,1(ст)**	398,5(б) 370,1(ст)	385(б) 374,6(ст)	280(б) 527,8(ст)	288(б) 343,2(ст)	288(б) 343,2(ст)	295(б) 345(ст)
	III режим	Превышения расчетными напряжениями допускаемых нет						
5	Удар	Превышения расчетными напряжениями допускаемых нет						
	III режим	280,9	283	283	283	281,9	191,5	220
6	Удар	Превышения расчетными напряжениями допускаемых нет						
	III режим	248,7	244,6	242,4	239,6	238,3	168	205

* Напряжения в верхнем листе боковой балки.
 ** Напряжения в стойке лесной рамы или подкрепляющих элементах.

Предложенные конструктивные изменения, подкрепленные серией проведенных расчетов, нашли применение при проектировании вагона-платформы для перевозки лесных грузов модели 13-9832-01 с зональным габаритом погрузки на ПО «Белорусский автомобильный завод».

Список литературы

- 1 Сенько, В. И. Информационные модели в управлении вагонными парками / В. И. Сенько, Е. П. Гурский. – Гомель : БелГУТ, 2010. – 296 с.
- 2 Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / ГосНИИВ – ВНИИЖТ. – М., 1996. – 319 с.

Получено 28.04.2011

A. V. Putsiata. Calculation on durability of the flatcar for transportation of wood cargoes.

The article considers the features of calculating the strength of a flat car for the transportation of timber cargo on the example of a project for re-profiling unclaimed cars for the transportation of oil bitumen into flat cars for the transportation of timber, as well as in the development of new designs of cars of considered type. The design features of the above freight cars are described. It was found that the most dangerous from the point of view of ensuring the strength of the metal structure of the car is the shock loading mode and the III design mode. The efficiency of the developed models for calculating the strength of the timber car body has been confirmed by the tests. The calculation results were used in the implementation of the project for the re-equipment of cars for the transportation of oil bitumen in the car depot Orsha of the Belarusian Railways, as well as in the development of design documentation for new car models at the Belarusian Automobile Plant.