

А. Д. ЧЕПУРНОЙ, д-р техн. наук, проф., директор по научно-технич. развитию «УК «РТХ», Москва, Россия;

А. В. ЛИТВИНЕНКО, канд. техн. наук, директор ООО «НИЦ УК «РТХ», Мариуполь;

А. Н. БАРАНОВ, начальник лаборатории УКБВ, Нижний Тагил, Россия;

Р. И. ШЕЙЧЕНКО, начальник сектора Представительства «УК «РТХ», Мариуполь;

М. А. БОНДАРЕНКО, преподаватель-стажер НТУ «ХПИ»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРУЗОВОГО ВАГОНА

В статье описаны методика и результаты прочностных статических испытаний крытого вагона модели 11-9962. Для проверки работоспособности, прочности, жесткости и устойчивости вновь спроектированного вагона он подвергался нормативным нагрузкам, которые имитируют реальные эксплуатационные. Регистрация напряжений в элементах конструкции вагона осуществляется при помощи тензорезисторов. Получены картины распределений напряжений по элементам вагона. Сделан вывод об удовлетворении критериев прочности, предъявляемых к конструкциям данного типа.

Ключевые слова: грузовой вагон, напряженно-деформированное состояние, эксперимент, испытания, тензорезистор, оценка прочности, расчетные режимы, допускаемые напряжения, нагрузка, элемент вагона.

Введение. Грузовые вагоны должны удовлетворять целому ряду требований для обеспечения безопасности перевозок грузов по железным дорогам [1]. Для решения этой задачи применяются различные методы, среди которых – как традиционные схемы для ручных расчетов, которые базируются на методе сил [2-5], так и современные численные методы для расчета с использованием ЭВМ (например, метод конечных элементов [6-11]). Эти методы и модели призваны обеспечить обоснованный выбор проектных параметров вагонов, которые в совокупности должны удовлетворить соответствующим нормативным документам по прочности и жесткости [12]. В то же время (и это требование самих нормативных документов) обязательным и наиболее достоверным с точки зрения полноты, точности и соответствия реальности этапом являются экспериментальные испытания.

Целью данной работы является разработка методики, проведение исследований и анализ результатов экспериментальных испытаний грузового вагона на действие статических нагрузок.

Методика исследований.

Объект испытаний. Испытаниям подвергался опытный образец крытого вагона модели 11-9962, изготовленный ООО «Новозыбковский машиностроительный завод».

Данный вагон предназначен для перевозки штучных, тарно-штучных, пакетированных и насыпных грузов, требующих защиты от атмосферных воздействий по магистральным железным дорогам колеи 1520 мм без ограничений в составе грузовых поездов. Общий вид опытного образца крытого вагона модели 11-9962 приведен на рисунке 1.



Рис. 1 – Общий вид крытого вагона модели 11-9962

Основные параметры и характеристики крытого вагона модели 11-9962 указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры крытого вагона модели 11-9962

№ п.п.	Наименование параметра	Значение параметра
1	Масса тары, т	26,5±0,3
2	Грузоподъемность, т	67,2
3	База вагона, мм	12625+10
4	Длина вагона по осям сцепления автосцепок, мм	18325 ⁺⁶⁰ -45
5	Расчетная статическая нагрузка от колесной пары на рельсы, кН (тс)	230,5 (23,5)
6	Высота от уровня верха головок рельсов, мм	4660
7	Высота от уровня головок рельсов до оси автосцепки, мм	1040-1080
8	Модель подкатываемой тележки	18-100, тип 2 или аналогичная типа 2 по ГОСТ 9246
9	Конструкционная скорость, км/ч	120

Вагон состоит из:

- кузова с двумя боковыми дверями;
- двух двухосных тележек модели 18-100 тип 2 по ГОСТ 9246 с осевой статической нагрузкой от колесной пары на рельсы 230,46 кН (23,5 тс);
- двух автосцепных устройств по ГОСТ Р 54749 с автосцепкой С/А-3, поглощающим аппаратом не ниже класса Т1 по ОСТ 32.175;
- пневматического автоматического тормоза с отдельным торможением тележек, оборудованного воздухораспределителем воздушным, двумя тормозными цилиндрами, двумя регуляторами тормозной рычажной

передачи, двумя концевыми кранами, разобцительным краном, соединительными рукавами, воздухопроводом с арматурой соединительной для безрезьбовых труб пневматических систем железнодорожного подвижного;

- ручного стояночного тормоза.

Кузов вагона представляет собой сварную цельнометаллическую конструкцию с несущей обшивкой, состоящую из рамы, двух боковых стен, двух торцевых стен, крыши и откатных дверей.

Рама вагона представляет собой сварную балочную конструкцию, включающую в себя хребтовую, шкворневые, лобовые, боковые, продольные и промежуточные балки.

Боковая стена состоит из обвязки, двух угловых стоек, десяти вертикальных стоек и металлической обшивки с продольными гофрами.

Торцевая стена вагона состоит из верхней обвязки, двух вертикальных поясов жесткости и обшивки с горизонтальными гофрами.

Крыша вагона – цельнометаллическая, сварной конструкции, подкрепленная арочными швеллерами и неразъемно соединена с кузовом. На продольной оси крыши расположены загрузочные люки. В случае оборудования загрузочными люками, на крышу устанавливают помосты.

Цель испытаний. Статические (прочностные) испытания проводились с целью определения напряженного состояния элементов опытного образца вагона от действия эксплуатационных нагрузок по I, III, ремонтным расчетным режимам и оценки их прочности в соответствии с [12].

Содержание испытаний. Содержание испытаний соответствует программе предварительных испытаний. Опытный образец вагона при испытаниях подвергался воздействию следующих видов нагрузок:

- вертикальная нагрузка;
- горизонтальные продольные растягивающие нагрузки;
- горизонтальные продольные сжимающие нагрузки;
- распорная, приложенная поочередно к каждой опоре одноименных стоек боковых стен кузова;
- ремонтные нагрузки, возникающие при подъеме груженого и порожнего кузова вагона домкратами;
- вертикальная статическая, приложенная к листу обшивки крыши и распределенной на определенной площадке;
- горизонтальные поперечные нагрузки, имитирующие взаимодействие вагонов в кривой;
- имитация действия боковых сил.

Испытания вагона вертикальной нагрузкой. При испытании вертикальной, равномерно распределенной по площади пола кузова вагона, нагрузкой нагружение производилось мерными грузами. Каждый мерный

груз (массой ≈ 3 т) имеет маркировку действительной массы в тоннах с точностью до 0,1 т.

Полученные величины напряжений, возникающие в элементах кузова от испытательной нагрузки, пересчитывали на напряжения от вертикальной нагрузки брутто 83,874т.

Коэффициент пересчета при этом равняется:

$$K = \frac{P_{расч.}}{P_{исп.}} = \frac{(26,5 - 9,736) + 67,2}{67} = 1,253, \quad (1)$$

где $P_{расч.}$ – брутто вагона, состоящее из массы тары (за вычетом массы тележек) и массы перевозимого груза при заполнении кузова вагона до полной грузоподъемности, т;

$P_{исп.}$ – масса мерных грузов, загружаемых при испытаниях в кузов вагона, т.

Испытания вагона продольными горизонтальными сжимающими и растягивающими нагрузками. Испытания продольными горизонтальными (растяжение и сжатие) нагрузками проводились в специальном стенде, представляющем собой замкнутую рамку, охватывающую раму вагона на уровне осей автосцепок. Испытаниям подвергался порожний вагон.

Продольная нагрузка прикладывалась к задним упорам при действии сжимающих нагрузок и к передним упорам при действии растягивающих нагрузок через специальные металлические балки, установленные вместо автосцепок и поглощающих аппаратов, ступенями:

- 1,0 МН; 1,5 МН; 2,0 МН (101,97; 152,96; 203,94 тс) – при растяжении;

- 1,0 МН; 1,5 МН; 2,0 МН; 2,5 МН (101,97; 152,96; 203,94; 254,93тс) при сжатии.

Нагрузка контролировалась по манометру, расположенному на домкрате.

Согласно [12] оценочными нагрузками при испытаниях вагона продольными нагрузками являются:

- для I режима при сжатии: 2,5 МН (254,93 тс); при растяжении: 2,0 МН (203,94 тс);

- для III режима – 1,0 МН (101,97 тс) при сжатии и растяжении.

Испытания распорной нагрузкой, приложенной поочередно к каждой паре одноименных стоек боковых стен кузова. Распорное действие сыпучего груза на боковые стены кузова вагона имитировалось специальными гидравлическими распорками.

Распорная нагрузка прикладывалась к стойкам на высоте 1/3 высоты стойки от уровня пола.

Величины распорных нагрузок на шкворневые и промежуточные стойки, определенные согласно расчета 9962.01.000PP2, составили:

для I режима: - угловая стойка 5,177 кН (0,53 тс); - 1 стойка 4,932 кН (0,5 тс); - 2-5 стойки 4,687 кН (0,48 тс); - 6 стойка (дверная стойка) 11,436 кН (1,17 тс);

для III режима: - угловая стойка 0,09765 кН (0,01 тс); - 1 стойка 0,093 кН (0,0095 тс); - 2-5 стойки 0,0884 кН (0,009 тс); - 6 стойка (дверная стойка) 0,21499 кН (0,022 тс).

Регистрация величин распорных нагрузок при испытаниях производилась с помощью предварительно проградуированных манометров, установленных на распорках. Измерение развала боковых стен кузова от распорных нагрузок проводилось рулеткой ГОСТ 7502. Величина развала боковых стен подсчитывалась как разность размеров между одноименными стойками боковых стен до и после приложения нагрузки.

Измерения величины развала боковых стен проводили в местах приложения нагрузки. По результатам проведенных измерений определялась среднеарифметическая величина. На рисунке 2 приведены величины развала боковых стен кузова у крытого вагона от распорной нагрузки, приложенной поочередно к стойкам.

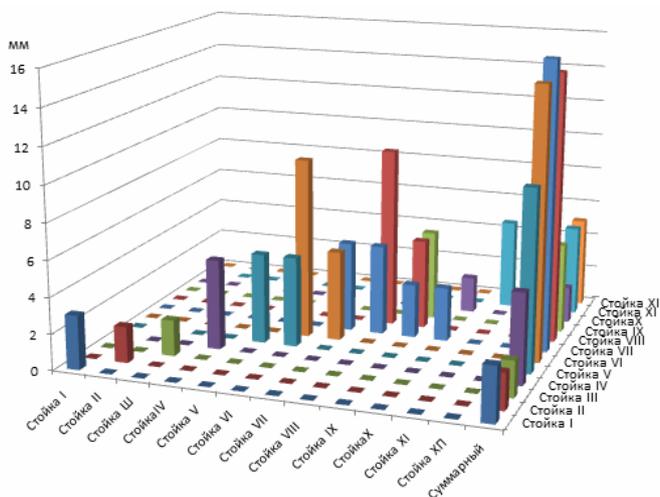


Рис. 2 – Величины развала боковых стен кузова от распорной нагрузки

Испытания вагона нагрузками, возникающими при ремонтных режимах. Нагрузки, действующие на вагон при ремонте, воспроизводились подъемом кузова вагона домкратами по следующим схемам:

- груженого до грузоподъемности вагона под оба конца шкворневой балки до отрыва пятника рамы кузова вагона от подпятника тележки;
- груженого до грузоподъемности вагона поочередно под один конец шкворневой балки до получения зазора 70 мм между скользящими рамы кузова вагона и тележки со стороны домкрата (два положения);
- порожнего кузова вагона под концы шкворневых балок по диагонали до получения зазора 70 мм между скользящими рамы кузова вагона и тележки со стороны домкрата (два положения);
- порожнего кузова вагона под розетку концевой балки до отрыва пятника рамы кузова вагона от подпятника тележки.

Испытания вагона вертикальной статической нагрузкой, приложенной к листу обшивки крыши вагона и распределенной на площадке. Для проверки прочности элементов жесткости крыши вагона прикладывались две силы по 1,0 кН каждая, распределенных на площадке 0,25x0,25 м и приложенных на расстоянии 0,5 м друг от друга. Контроль прочности проверялся визуально. Повреждений, остаточных деформаций, потери устойчивости элементов и узлов крыши не выявлено.

Схема приложения сил приведена на рисунке 3.

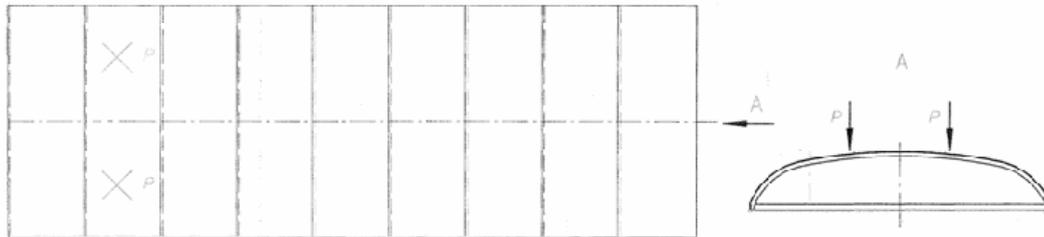


Рис. 3 – Схема приложения нагрузок при испытании элементов жесткости крыши на прочность

Испытания вагона горизонтальными нагрузками, имитирующими взаимодействие вагонов в кривой. Испытания вагона горизонтальными нагрузками, имитирующими взаимодействие вагонов в кривой, проводились в специальном стенде, представляющем собой горизонтальную замкнутую рамку, охватывающую раму кузова на уровне осей автосцепок с четырех сторон. Испытаниям подвергался порожний вагон. Нагрузка прикладывалась к торцам шкворневой балки рамы кузова. Схема приложения горизонтальных нагрузок, имитирующих взаимодействие вагонов в кривой, приведена на рисунке 4.

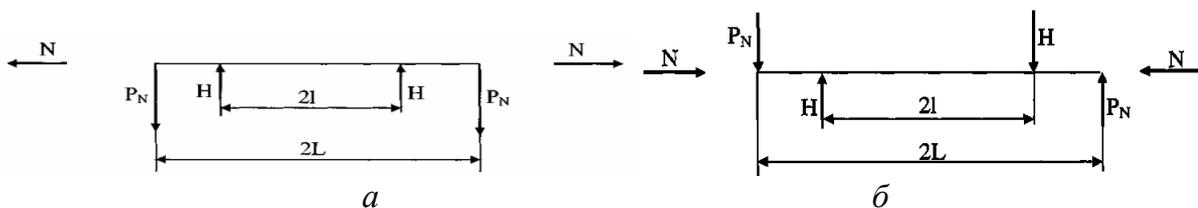


Рис. 4 – Схема приложения горизонтальных нагрузок, имитирующих взаимодействие вагонов в кривой: *a* – при действии растягивающих продольных сил; *б* – при действии сжимающих продольных сил; N – продольная сила; P_N – горизонтальная поперечная составляющая продольной силы N в связи кузова вагона и автосцепки; H – горизонтальная поперечная сила, действующая на пятник; $2l$ – база вагона; $2L$ – расстояние между упорными плитами автосцепок

Для имитации действия горизонтальных поперечных нагрузок рама кузова нагружалась гидравлическим домкратом испытательной нагрузкой

50,0 кН (5,1 тс) и 100 кН (10,2 тс). Величины напряжений от расчетных нагрузок при растяжении и сжатии соответственно, определялись пересчетом напряжений, замеренных при приложении испытательной нагрузки. Испытательная нагрузка воспроизводилась и контролировалась при помощи пресс-выжимки модели ППА-35,2.

Коэффициент пересчета при этом равен:

- для растяжения:

$$K_{\text{раст.}} = \frac{H}{P_{\text{испыт.}}} = \frac{73,0}{50} = 1,46, \quad (2)$$

где H – горизонтальная сила, действующая на пятник, кН;

$P_{\text{испыт.}}$ – испытательная нагрузка, кН.

- для сжатия:

$$K_{\text{сжат.}} = \frac{H}{P_{\text{испыт.}}} = \frac{279,3}{100} = 2,79. \quad (3)$$

Величины расчетных горизонтальных нагрузок, имитирующих взаимодействие вагонов в кривой, рассчитывались согласно [12] и составляют при растяжении $P_H = H = 0,073\text{МН}(7,44\text{тс})$, $N = 2,0\text{МН}(203,94\text{тс})$, а при сжатии – $P_M = 0,216\text{МН}(22,03\text{тс})$, $N = 0,27930\text{МН}(28,48\text{тс})$ $N = 2,5\text{МН}(254,93\text{тс})$.

Имитация действия боковых сил. Действие боковых сил при статических испытаниях учитывалось только для боковых стенок кузова и шкворневых балок путем увеличения напряжений от силы тяжести брутто на 10% – для шкворневых балок и стоек, на 7,5% – для остальных элементов в соответствии с [12]. При каждом виде статических испытаний опытного образца вагона полный цикл «нагрузка-разгрузка» проводился до получения стабильных результатов, но не менее трех раз. Регистрация показаний приборов производилась после каждой загрузки и разгрузки полувагона.

Применяемая аппаратура. Напряжения в элементах кузова и рамы вагона при всех видах испытаний замерялись с помощью тензорезисторов типа КФ5П1-20-200В базой 20 мм сопротивлением 200 Ом. Схема их расстановки на элементах вагона представлена на рисунках 5 (на торцевой стене), 6 (на стене боковой), 7 (на раме).

Средства измерения и контроля, применяемые при проведении испытаний, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Перечень средств измерений и испытательного оборудования, применяемых при проведении испытаний крытого вагона модели 11-9962

Наименование испытательного оборудования и средств измерений, обозначение, заводской номер
Рулетка Р2УЗК ГОСТ 7502-89, предел измерений 5000 мм,
Приспособление для распора стоек полувагона и контроля усилий распора
Мерные грузы
Манометр типа МТИ, класс точности 0,6, предел измерения 0-400 кгс/см ²
Гидравлический домкрат с максимальным усилием 4,0 МН (400 тс)
Усилитель измерительный МГСplus

Регистрация показаний тензорезисторов и обработка результатов статических (прочностных) испытаний осуществлялась с помощью измерительных усилителей МГСplus и ПЭВМ.

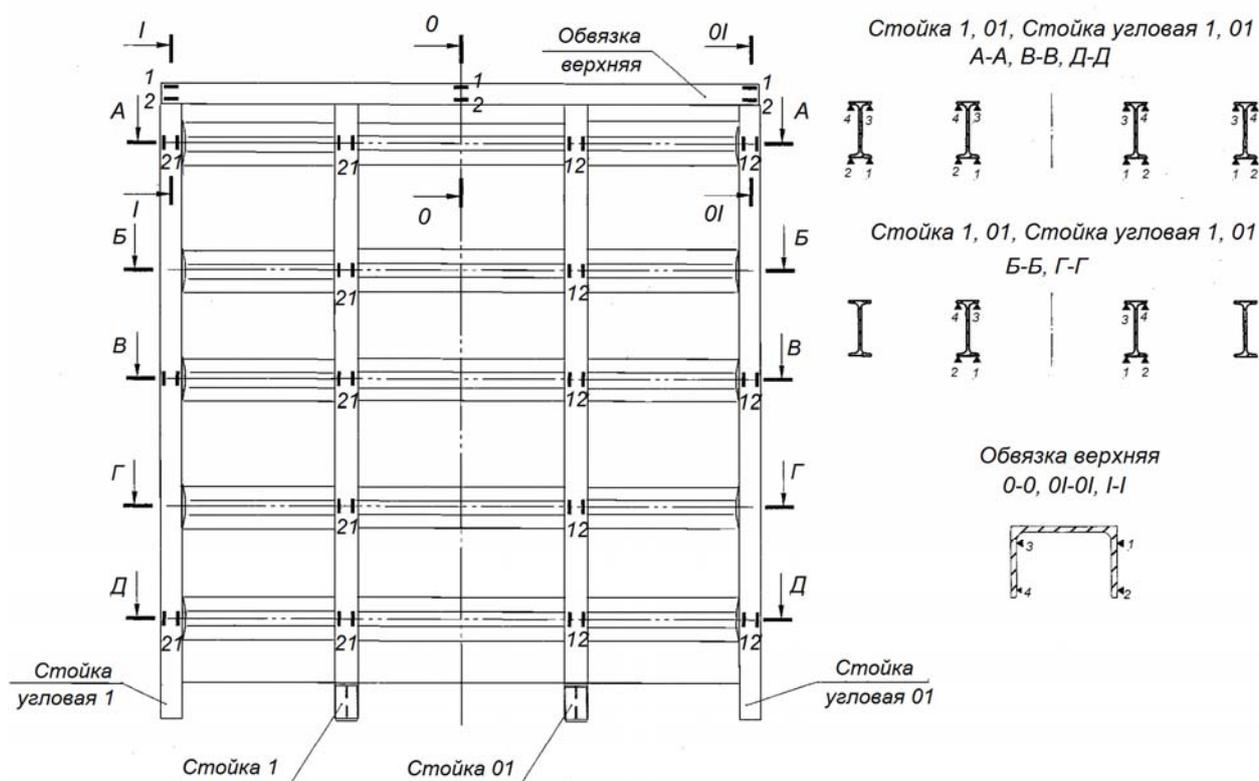


Рис. 5 – Схема расстановки тензорезисторов на торцевой стене вагона

Методы оценки прочности конструкции вагона. Согласно [12], оценка прочности конструкции опытного образца вагона при прочностных статических испытаниях производилась путем сравнения величин суммарных напряжений от сочетания расчетных эксплуатационных нагрузок по I, III и ремонтным расчетным режимам с величинами допускаемых напряжений:

I режим – трогание с места, осаживание или экстренное торможение при малых скоростях движения, соударение вагонов при маневровых работах;

III режим – движение поезда с наибольшей допускаемой скоростью;
ремонтный режим – подъемка груженого и порожнего вагона домкратами, установленными в соответствующих точках.

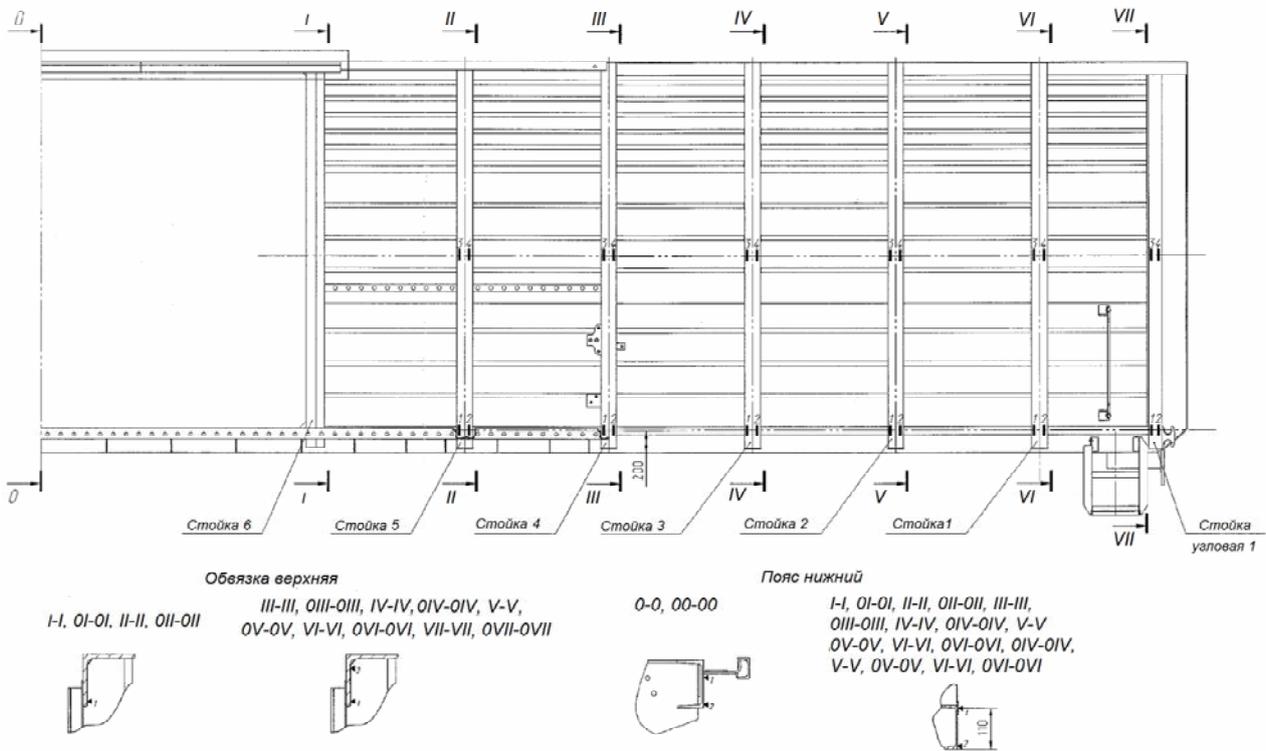


Рис. 6 – Схема расстановки тензорезисторов на стене боковой вагона

При оценке прочности элементов вагона по I расчетному режиму принимались следующие условия суммирования напряжений:

$$\sigma_{\text{верт.бр.}} + \sigma_{\text{прод.}} + \sigma_{\text{non.cocm.}} + \sigma_{\text{распораI}} \leq [\sigma]_I, \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{верт.бр.}}$ – напряжения от силы тяжести брутто без учета массы тележек 83,874 т, МПа;

$\sigma_{\text{прод.}}$ – напряжения от горизонтальных продольных нагрузок (при сжатии – 2,5 МН (254,9 тс); при растяжении – 2,0 МН (203,94 тс)), МПа;

$\sigma_{\text{non.cocm.}}$ – напряжения от поперечной горизонтальной нагрузки, имитирующей взаимодействие вагонов в кривой (при сжатии – 0,27930 МН (28,48 тс); при растяжении – 0,073 МН (7,44 тс));

$\sigma_{\text{распораI}}$ – напряжения от нагрузки, имитирующей давление распора груза по I расчетному режиму (учитывается для всех элементов кузова, кроме хребтовой балки), МПа;

$[\sigma]_I$ – допускаемые напряжения по I расчетному режиму.

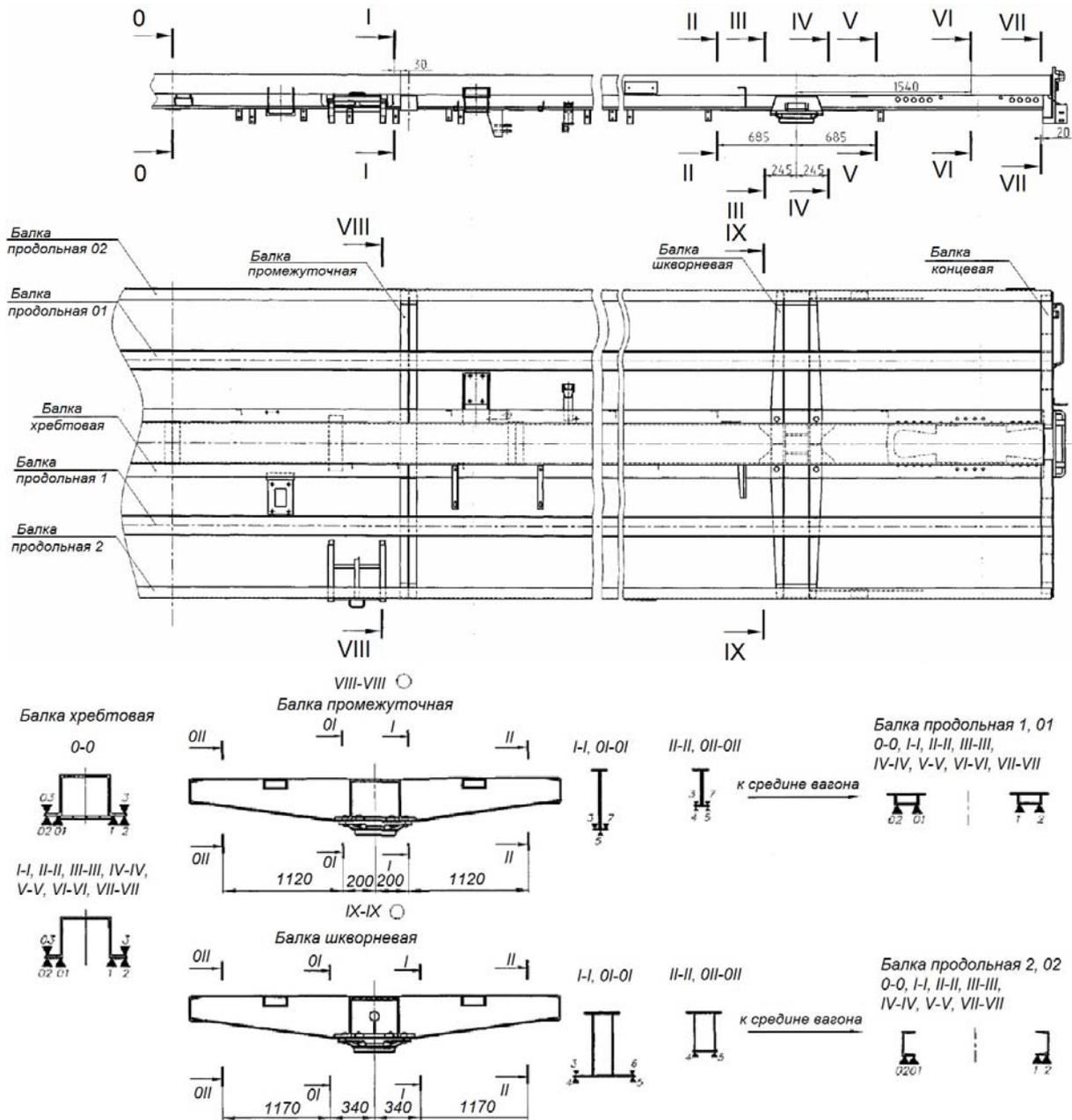


Рис. 7 – Схема расстановки тензорезисторов на раме вагона

При оценке прочности элементов вагона по III расчетному режиму принимались следующие условия суммирования напряжений:

$$\sigma_{\text{верт.бр.}} + \sigma_{\text{прод.}} + \sigma_{(\text{верт.дин.нагр.})\text{бр.}} + \sigma_{\text{распораIII}} \leq [\sigma]_{III}, \quad (5)$$

где $\sigma_{(\text{верт.дин.нагр.})\text{бр.}}$ – напряжения от вертикальной динамической нагрузки, равные

$$\sigma_{\text{верт.бр.}} \times K_{\text{дв}}, \quad (6)$$

где $K_{\text{дв}} = 0,418$ – коэффициент вертикальной динамики для шкворневых балок и шкворневых стоек вагона, согласно расчёта;

$K_{\text{дв}} = 0,348$ – для остальных элементов вагона, согласно расчёта.

$\sigma_{\text{распораIII}}$ – напряжения от нагрузки, имитирующей давление распора груза по III расчетному режиму (учитывается для всех элементов кузова, кроме хребтовой балки), МПа;

$[\sigma]_{III}$ – допускаемые напряжения по III расчетному режиму.

При оценке прочности элементов вагон при подъемке груженого вагона (ремонтные режимы) в соответствии с [12] принимались следующие условия суммирования напряжений:

$$\sigma_{\text{верт.бр.}} + \sigma_{\text{груз.под.}} \leq [\sigma]_I, \quad (7)$$

где $\sigma_{\text{груз.под.}}$ – напряжения в элементах вагона при подъемке кузова в груженом состоянии, МПа;

$[\sigma]_I$ – допускаемые напряжения по I расчетному режиму.

Результаты статических испытаний. Результаты статических испытаний крытого вагона модели 11-9962 приведены:

на рисунке 8 – величины максимальных суммарных напряжений по I режиму с учетом вертикальной силы брутто 83,87 тс, силы сжатия 2,5 МН (254,93 тс), поперечной силы (28,48 тс) и силы распора;

на рисунке 9 – величины максимальных суммарных напряжений по I режиму с учетом вертикальной нагрузки брутто 83,87 тс, силы растяжения 2 МН (203,94 тс), поперечной силы 7,44 тс и силы распора;

на рисунке 10 – величины максимальных суммарных напряжений по III режиму с учетом суммарной вертикальной нагрузки, сжимающей 1 МН (102,0 тс), боковой нагрузки и силы распора;

на рисунке 11 – величины максимальных суммарных напряжений по III режиму с учетом суммарной вертикальной нагрузки, продольной растягивающей нагрузки 1,0 МН (102,0 тс), боковой нагрузки и силы распора;

на рисунке 12 – величины максимальных напряжений от подъемки порожнего вагона под розетку концевой балки;

на рисунке 13 – величины максимальных напряжений от подъемки порожнего вагона по диагонали (диагональ 1) под концы шкворневых балок;

на рисунке 14 – величины максимальных напряжений от подъемки порожнего вагона по диагонали (диагональ 2) под концы шкворневых балок;

на рисунке 15 – величины напряжений от подъёмки груженого вагона под оба конца шкворневой балки;

на рисунке 16 – величины максимальных напряжений от подъёмки груженого вагона под один конец шкворневой балки (положение I);

на рисунке 17 – величины максимальных напряжений от подъёмки груженого вагона под один конец шкворневой балки (положение II).

На рисунках элементы рамы: 1.1 – балка хребтовая; 1.3 – балка шкворневая; 1.4 – балка промежуточная; 1.5 – балка продольная 01; 1.6 – балка продольная 1; 1.7 – балка продольная 02; 1.8 – балка продольная 2; элементы стены торцевой: 2.1 – обвязка верхняя; 2.2 – стойка угловая 01; 2.3 – стойка угловая 1; 2.4 – стойка 01; 2.5 – стойка 1; элементы стены боковой: 3.1 – стойка угловая 01; 3.2 – стойка угловая 1; 3.3 – стойка 01; 3.4 – стойка 1; 3.5 – стойка 02; 3.6 – стойка 2; 3.7 – стойка 03; 3.8 – стойка 3; 3.9 – стойка 04; 3.9.1 – стойка 4; 3.9.2 – стойка 05; 3.9.3 – стойка 5; 3.9.4 – пояс нижний; 3.9.5 – обвязка верхняя.

Данные испытаний служат основой для вывода о прочности вагона от эксплуатационных нагрузок.

Анализ полученных результатов. *Оценка прочности вагона по I расчетному режиму.*

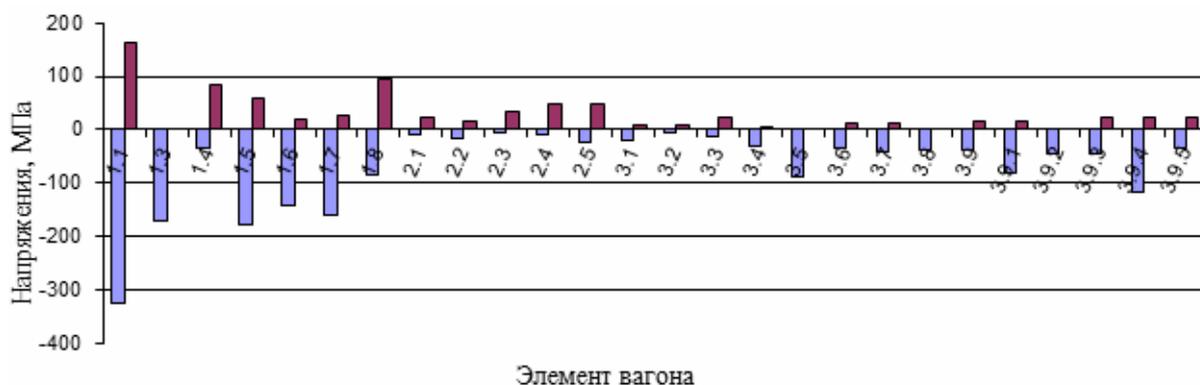


Рис. 8 – Величины максимальных суммарных напряжений в элементах вагона по I режиму с учетом сжимающей нагрузки

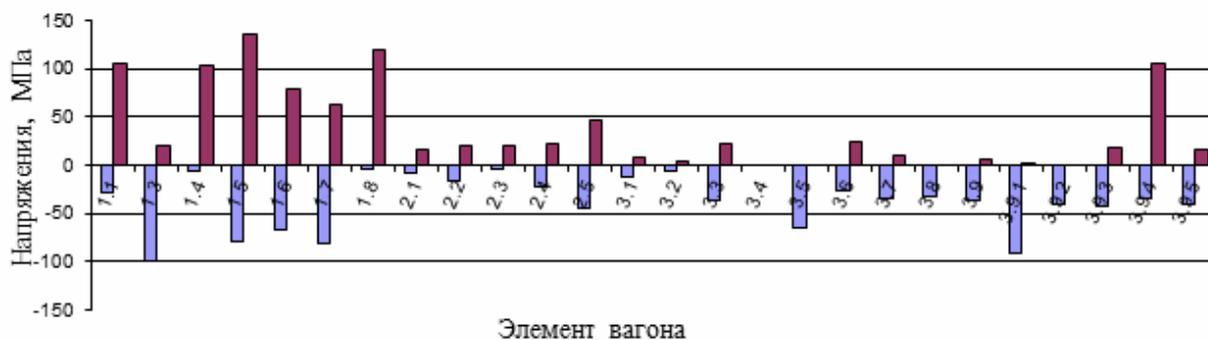


Рис. 9 – Величины максимальных суммарных напряжений в элементах вагона по I режиму с учетом растягивающей нагрузки

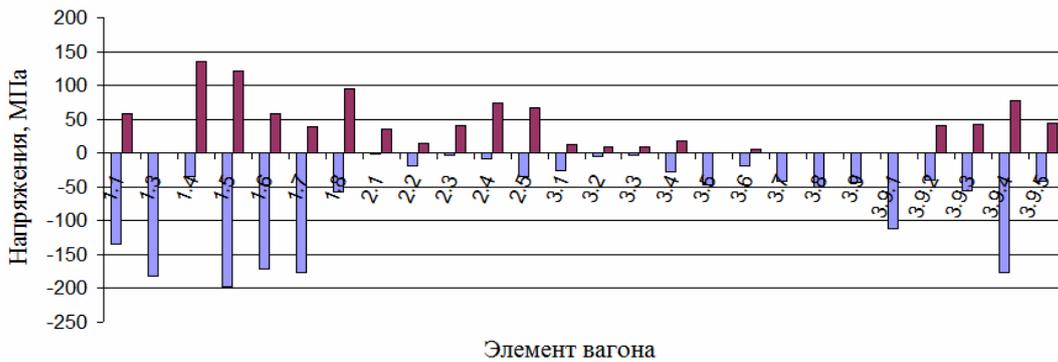


Рис. 10 – Величины максимальных суммарных напряжений в элементах вагона по III режиму с учетом сжимающей нагрузки

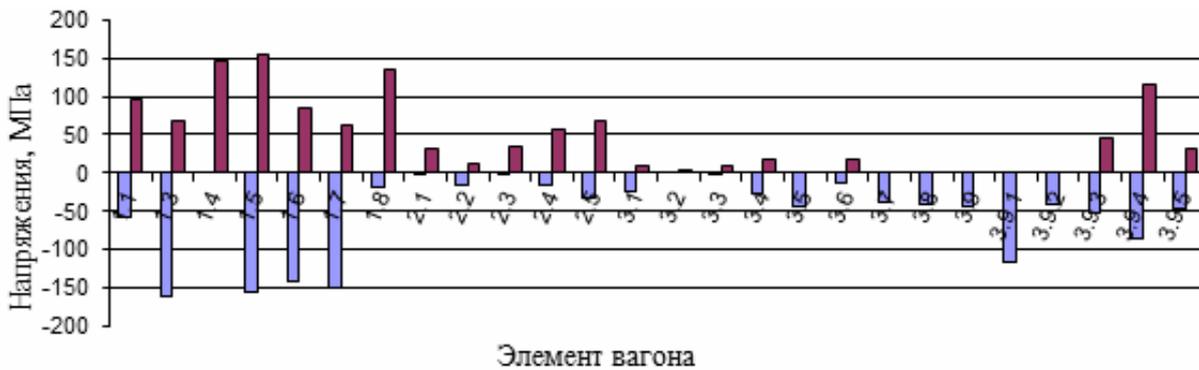


Рис. 11 – Величины максимальных суммарных напряжений в элементах вагона по III режиму с учетом растягивающей нагрузки

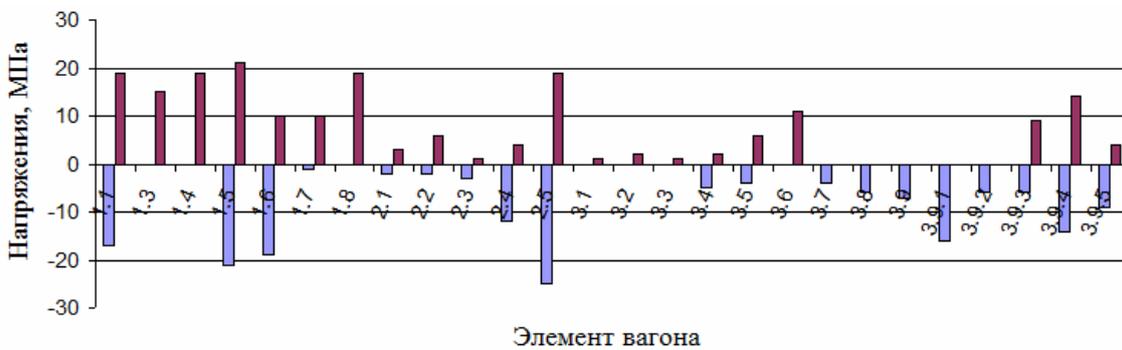


Рис. 12 – Величины максимальных суммарных напряжений от подъёмки порожнего вагона по розетку концевой балки

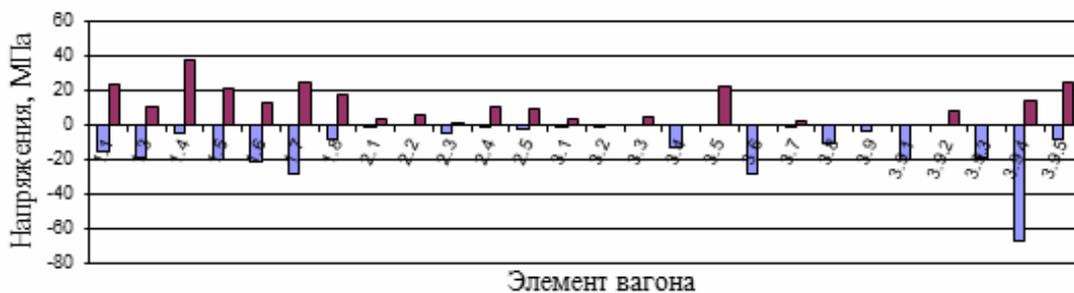


Рис. 13 – Величины максимальных суммарных напряжений от подъёмки порожнего вагона под концы шкворневых балок по диагонали 1

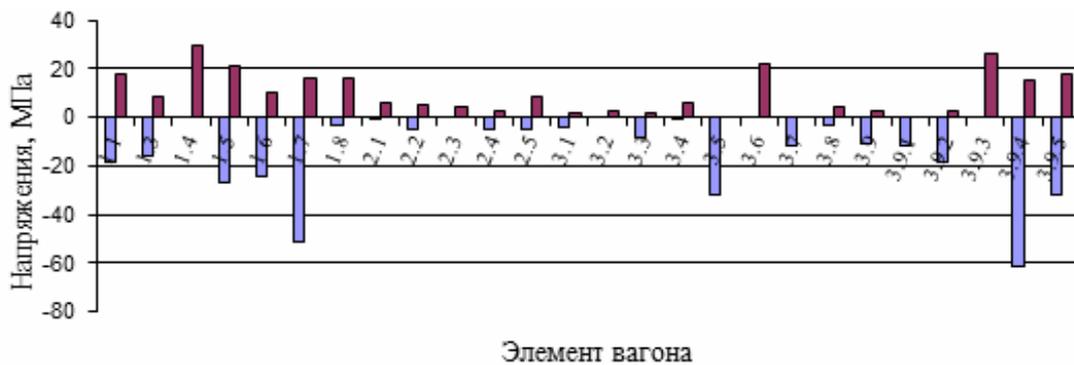


Рис. 14 – Величины максимальных суммарных напряжений от подъёмки порожнего вагона под концы шкворневых балок по диагонали 2

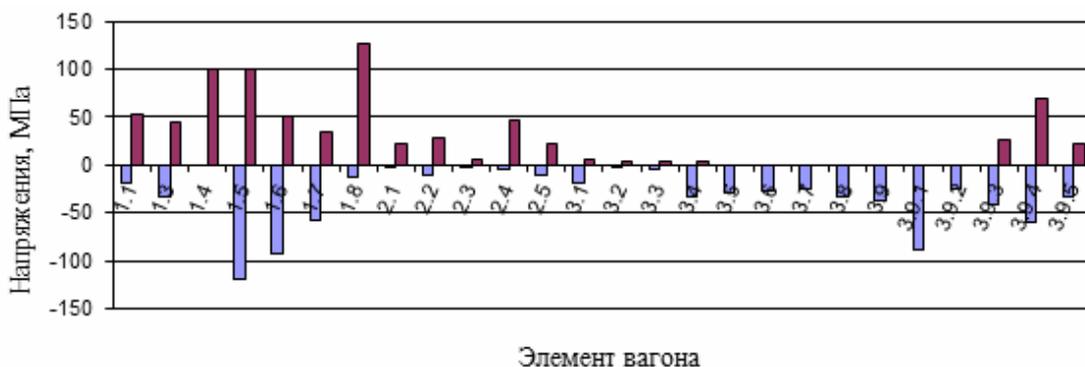


Рис. 15 – Величины максимальных суммарных напряжений от подъёмки порожнего вагона под оба конца шкворневой балки

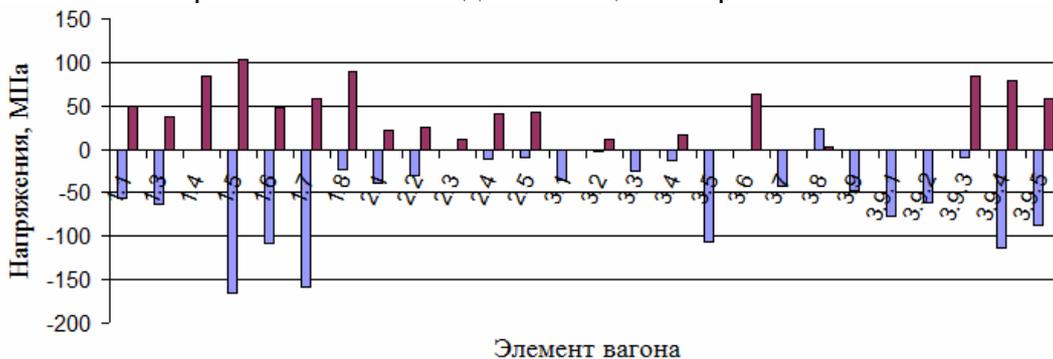


Рис. 16 – Величины максимальных суммарных напряжений от подъёмки порожнего вагона под один конец шкворневой балки (положение I)

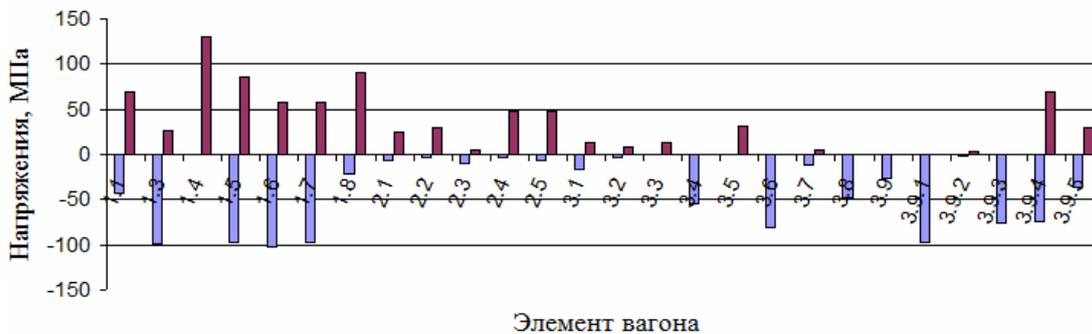


Рис. 17 – Величины максимальных суммарных напряжений от подъёмки порожнего вагона под один конец шкворневой балки (положение II)

Максимальные величины напряжений по I режиму с учетом продольной сжимающей нагрузки 2,5 МН (рис. 8) зарегистрированы в:

хребтовой балке –	325 МПа, сеч. IV-IV, т. 02;
шкворневой балке –	173 МПа, сеч. I-I, т. 3;
промежуточной балке –	57 МПа, сеч. 0I-0I, т. 3;
продольной балке –	01177 МПа, сеч. I-I, т. 02;
стене торцевой:	
- стойке 01 –	116 МПа, сеч. Д-Д, т. 3;
стене боковой:	
- стойке 02 –	89 МПа, т. 1;
поясе нижнем (стена боковая) –	119 МПа, сеч. 0I-0I, т. 1;

Максимальные величины напряжений по I режиму с учетом продольной растягивающей нагрузки 2,0 МН, таблица 2, зарегистрированы в:

хребтовой балке –	106 МПа, сеч. VI-VI, т. 01;
шкворневой балке –	99 МПа, сеч. I-I, т. 5
промежуточной балке –	104 МПа, сеч. 0I-0I, т. 3;
продольной балке 2 –	120 МПа, сеч. 0-0, т. 2;
стене торцевой:	
- стойке 1 –	46 МПа, сеч. Б-Б, т. 3;
стене боковой:	
поясе нижнем (стена боковая) –	105 МПа, сеч. 0-0, т. 2.

Согласно [12] допускаемые напряжения при статических прочностных испытаниях по I расчетному режиму равны:

$$[\sigma]_I = 0,90 \times \sigma_T \text{ – для хребтовой и шкворневой балок;}$$

$$[\sigma]_I = 0,95 \times \sigma_T \text{ – для остальных элементов,}$$

где σ_T – предел текучести материала конструкции, МПа: $\sigma_T = 345 \text{ МПа}$ – для хребтовой балки (сталь марки 09Г2С), $\sigma_T = 325 \text{ МПа}$ – для шкворневой балки (сталь марки 09Г2С), $\sigma_T = 345 \text{ МПа}$ – для передней балки рамы, нижних, средних и верхних листов обшивки боковых стен, листов обшивки торцевой стены (сталь марки 09Г2С), $\sigma_T = 325 \text{ МПа}$ – для верхней обвязки, элементов кузова толщиной менее 10 мм (сталь марки 09Г2С-14), $\sigma_T = 325 \text{ МПа}$ – для боковых, продольных балок и рамы из швеллера (сталь марки 09Г2С), $\sigma_T = 295 \text{ МПа}$ – для стойки боковой стены (сталь марки 09Г2С).

Приведенные значения напряжений для элементов вагона ниже допускаемых. В остальных элементах вагона величины напряжений ниже приведенных.

Прочность элементов вагона по I расчетному режиму удовлетворяет требованиям [12].

Оценка прочности вагона по III расчетному режиму. Максимальные величины напряжений по III режиму с учетом продольной сжимающей нагрузки 1,0 МН (рис. 10) зарегистрированы в:

хребтовой балке –	135 МПа, сеч. IV-IV, т. 2;
шкворневой балке –	182 МПа, сеч. I-I, т. 3;
промежуточной балке –	135 МПа, сеч. 0II-0II, т. 7;
продольной балке 01 –	197 МПа, сеч. I-I, т. 02;
стене торцевой:	
стойка 1 –	67 МПа, сеч. Б-Б, т. 1,
стене боковой:	
стойке –	112 МПа, т. 2;
поясе нижнем (стена боковая) –	117 МПа, сеч. I-I, т. 2.

Максимальные величины напряжений по III режиму с учетом продольных растягивающих усилий 1,0 МН, таблица 4, зарегистрированы в:

хребтовой балке –	97 МПа, сеч. 0-0, т. 3;
шкворневой балке –	161 МПа, сеч. 0I-0I, т. 6;
промежуточной балке –	145 МПа, сеч. 0I-0I, т. 3;
продольной балке 01 –	157 МПа, сеч. I-I, т. 02;
стене торцевой:	
стойке 1 –	67 МПа, сеч. Б-Б, т. 1;
стене боковой:	
стойке 4 –	117 МПа, т. 2;
поясе нижнем (стена боковая) –	116 МПа, сеч. 0-0, т. 2.

Согласно [12] допускаемые напряжения при статических прочностных испытаниях по III расчетному режиму равны:

$[\sigma]_{III} = 210 \text{ МПа}$ – для хребтовой балки, $[\sigma]_{III} = 195 \text{ МПа}$ – для шкворневой балки, $[\sigma]_{III} = 220 \text{ МПа}$ – для концевой балки, листы обшивы боковых и торцевых стен, (сталь марки 09Г2С), $[\sigma]_{III} = 205 \text{ МПа}$ – для верхней обвязки и других элементов кузова толщиной менее 10 мм (сталь марки 09Г2С-14), $[\sigma]_{III} = 205 \text{ МПа}$ – для боковых и продольных балок рамы из швеллера (сталь марки 09Г2С), $[\sigma]_{III} = 195 \text{ МПа}$ – для стоек боковой стены, обшивы крыши толщиной 1,5 мм (сталь марки 09Г2С), $[\sigma]_{III} = 205 \text{ МПа}$ – для дуг крыши (сталь марки 09Г2Д).

Приведенные значения напряжений для элементов вагона ниже допускаемых. В остальных элементах вагона величины напряжений ниже приведенных.

Прочность элементов вагона по III расчетному режиму удовлетворяет требованиям [12].

Оценка прочности элементов вагона от ремонтных нагрузок. При подъёмке порожнего вагона под розетку концевой балки напряжения не превышают:

- 25 МПа – стойка 1, стена боковая (рис. 12).

При подъёмке порожнего вагона под концы шкворневых балок (диагональ I) напряжения не превысили:

- 68 МПа – пояс нижний, стена боковая (рис. 13).

При подъёмке порожнего вагона под концы шкворневых балок (диагональ II) напряжения не превышают:

- 51 МПа – балка продольная 02 (рис. 14).

При подъёмке груженого кузова вагона под оба конца шкворневой балки напряжения не превысили:

- 127 МПа – балка продольная 2 (рис. 15).

При подъёмке груженого вагона под один конец шкворневой балки (положение I) напряжения не превысили:

- 166 МПа – балка продольная 01 (рис. 16).

При подъёмке груженого вагона под один конец шкворневой балки (положение II) напряжения не превысили:

- 130 МПа – балка промежуточная (рис. 17).

$[\sigma]_I = 0,90 \times \sigma_T$ – для хребтовой и шкворневой балок;

$[\sigma]_I = 0,95 \times \sigma_T$ – для остальных элементов,

где σ_T – предел текучести материала конструкции, МПа: $\sigma_T = 345 \text{ МПа}$ – для хребтовой балки (сталь марки 09Г2С), $\sigma_T = 325 \text{ МПа}$ – для шкворневой балки (сталь марки 09Г2С), $\sigma_T = 345 \text{ МПа}$ – для передней балки рамы, нижних, средних и верхних листов обшивки боковых стен, листов обшивки торцевой стены (сталь марки 09Г2С), $\sigma_T = 325 \text{ МПа}$ – для верхней обвязки, элементов кузова толщиной менее 10 мм (сталь марки 09Г2С-14), $\sigma_T = 325 \text{ МПа}$ – для боковых, продольных балок и рамы из швеллера (сталь марки 09Г2С), $\sigma_T = 295 \text{ МПа}$ – для стойки боковой стены (сталь марки 09Г2С).

Выводы. На основании проведенных статических (прочностных) испытаний опытного образца крытого вагономодели 11-9962, изготовленного ООО «Новозыбковский машиностроительный завод» и спроектированного подразделениями УК РТХ, можно сделать следующие выводы:

1) величины суммарных напряжений в элементах опытного образца вагона при действии статических нагрузок по I-му, III-му расчетным и ремонтным режимам не превысили величин допускаемых напряжений;

2) после проведения испытаний, при визуальном осмотре, повреждений, трещин и остаточных деформаций элементов опытного вагона не обнаружено.

Таким образом, подтверждено соответствие конструкции вагона действующим нормам.

В дальнейшем будет проведено сравнение данных экспериментальных испытаний, с одной стороны, и численных расчетов – с другой.

Список литературы: 1. Вагоны грузовые крытые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия ГОСТ 10935-97 – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и спецификации – 12 с. – (Межгосударственный стандарт). 2. М. О. Бондаренко. Анализ конструкций залізничних вагонів і методів їх розрахунку на міцність // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування. – 2014.– №14(1057). – С. 16-22. 3. Вершинский С. В. и др. Расчет вагонов на прочность. Изд 2-е. Под ред. Л. А. Шадура. – М.: Машиностроение, 1971. – 432 с. 4. Вагоны: Учебник для вузов ж.-д. трансп. / Л. А. Шадура, И. И. Челноков, Л.Н. Никольский, Е. Н. Никольский, В. Н. Котуранов, П. Г. Проскурнев, Г.А. Казанский, А.Л. Спиваковский, В. Ф. Девятков; Под ред. Л. А. Шадура. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1980. – 439 с. 5. Зайцев К. Л. Расчет статически неопределимых стержневых систем методом сил: Учебное пособие. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 1998. – 54 с. 6. Zienkiewicz O. C. The Finite Element Method. Vol. 1: Basic Formulation and Linear Problems / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor. – London: Mc Graw-Hill, 1989. – 648 p. 7. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода skinченних елементів. М.: Мир, 1977. – 351 с. 8. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Мир, 1987. – 542 с. 9. Овечников Н. Н. и др. Расчет несущего кузова тепловоза как стержневой системы с использованием ЭЦВМ // Тр. ВНИТИ.– Вып.129. –1968. – С.3-39. 10. Орлов Е. А. Моделирование воздействия эксплуатационных нагрузок на рамы тепловозов: методы, модели, специализированная САПР// Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. вип. „Машиноведение и САПР”. – 2006. – No.24. – С.103-112. 11. Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Чепурной А.Д., Орлов Е.А., Ткачук Н.Н. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания // Механіка та машинобудування. – 2006. – №1. – С.57-79. 12. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог колеи 1520 мм (несамоходных), М., ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996 г.

Bibliography (transliterated): 1. Vagony gruzovye krytye magistral'nyh zheleznyh dorog kolei 1520 mm. Obshhie tehniczeskie uslovija GOST 10935-97 – Minsk: Mezghosudarstvennyj sovet po standartizacii, metrologii i specifikacii. 2. М. О. Bondarenko. Analiz konstrukcij zaliznichnih vagoniv i metodiv ih rozrahunku na micnist'. Visnik NTU «HPI». Serija: Transportne mashinobuduvannja. – 2014.– №14(1057). 3. Verzhinskij S. V. i dr. Raschet vagonov na prochnost'. Izd 2-e. Pod red. L. A. Shadura. – М.: Mashinostroenie, 1971. 4. Vagony: Uchebnik dlja vuzov zh.-d. transp. L. A. Shadur, I. I. Chelnokov, L.N. Nikol'skij, E. N. Nikol'skij, V. N. Koturanov, P. G. Proskurnev, G.A. Kazanskij, A.L. Spivakovskij, V. F. Devjatkov; Pod red. L. A. Shadura. – 3-e izd., pererab. i dop. – Moscow: Transport, 1980. 5. Zajcev K. L. Raschet staticheski neopredelimyh stержnevyyh sistem metodom sil: Uchebnoe posobie. – Arhangel'sk: Izd-vo AGTU, 1998. – 54 s. 6. Zienkiewicz O. S. The Finite Element Method. Vol. 1: Basic Formulation and Linear Problems. O. S. Zienkiewicz, R. L. Taylor. – London: Mc Graw-Hill, 1989. – 648 r. 7. Streng G., Fiks Dzh. Teorija metodu skinchennih elementiv. М.: Mir, 1977. 8. Vasidzu K. Variacionnye metody v teorii uprugosti i plastichnosti. – М.: Mir, 1987. 9. Ovechnikov N. N. i dr. Raschet nesushhego kuzova teplovoza kak stержnevoj sistemy s ispol'zovaniem JeCVM. Tr. VNITI.– Vyp. 129. –1968. 10. Orlov E. A. Modelirovanie vozdeystvija jekspluatacionnyh nagruzok na ramy teplovozov: metody, modeli, specializirovannaja SAPR. Visnik NTU „HPI”. Tem. vip. „Mashinovedenie i SAPR”. – 2006. – No.24. 11. Tkachuk N. A., Gricenko G. D., Chepurnoj A. D., Orlov E. A., Tkachuk N. N. Konechno-jelementnye modeli jelementov slozhnyh mehanicheskikh sistem: tehnologija avtomatizirovannoj generacii i parametrizovannogo opisanija // Mehanika ta mashinobuduvannja. – 2006. – №1. 12. Normy dlja rascheta i proektirovanija vagonov zheleznyh dorog kolei 1520 mm (nesamohodnyh), М., GosNIIV-VNIIZhT, 1996.

Поступила (received) 16.05.2014