

ИСПЫТАНИЯ ВАГОНА-ПЛАТФОРМЫ УНИВЕРСАЛЬНОЙ

**В. И. СЕНЬКО¹, С. В. МАКЕЕВ², А. Д. ЧЕПУРНОЙ³, Р. И. ШЕЙЧЕНКО⁴, А. В. ЛИТВИНЕНКО⁴,
Р. В. ГРАБОРОВ⁴, Н. А. ТКАЧУК⁵, М. А. ЧУБАНЬ^{5*}**

¹ Белорусский Государственный Университет Транспорта, г. Гомель, РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ

² Испытательный центр железнодорожного транспорта «СЕКО», г. Гомель, РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ

³ ООО «Управляющая Компания РэйлТрансХолдинг», г. Москва, РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

⁴ ООО Научно-инженерный центр УК «РэйлТрансХолдинг», г. Мариуполь, УКРАИНА

⁵ Кафедра «Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, УКРАИНА

*email: s803@tmm-sapr.org

АННОТАЦИЯ В статье описаны три вида испытаний (испытание на статическую прочность, на прочность при соударении, расчетно-экспериментальная оценка сопротивления усталости конструкции), включенных в объем предварительных испытаний опытного образца вагона-платформы универсального. По результатам испытаний сделано заключение, что напряжения в несущих элементах конструкции вагона при квазистатических нагрузках и при соударениях, а также показатели сопротивления усталости конструкции вагона соответствуют требованиям конструкторской документации, технического задания и нормативных документов.

Ключевые слова: вагон-платформа универсальная, испытания, статическая прочность, прочность при соударении, сопротивление усталости конструкции.

TESTING OF THE UNIVERSAL PLATFORM CAR

**V. SEN'KO¹, S. MAKEYEV², A. CHERPURNY³, R. SHEYCHENKO⁴, A. LITVINENKO⁴,
R. GRABOROV⁴, M. TKACHUK⁵, M. CHUBAN^{5*}**

¹ Belarusian State University of Transport, Gomel, BELARUS

² Testing Center of Railway Transport "SEKO", Gomel, BELARUS

³ LLC "Management Company ReylTransHolding", Moscow, RUSSIAN FEDERATION

⁴ JSC "Science Engineering Center UK" RailTransHolding", Mariupol, UKRAINE

⁵ Department "The theory and computer aided design of mechanisms and machines", National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkiv, UKRAINE

*email: s803@tmm-sapr.org

ABSTRACT The article contains the analysis of the experience and the results of the test center of rail car-building products. It describes methodology and analysis of results of the tests (static strength, strength at the collision, calculated and experimental evaluation of the fatigue resistance of the structure of the rail car), included in the scope of preliminary tests of the prototype of the universal platform car, model 13-9990-01. The main objective of the static strength testing was to evaluate the strength, the bearing capacity of the structure of the car. Test for strength in the collision was carried out for experimental test of design strength and stability of the rail car at the specified test modes of the collision. Registration of strain in structural elements of the rail car was performed using strain gauges. Obtained allocations of stress on the elements of the rail car are presented and evaluated. During the third type of preliminary tests the verification of compliance with norms of the reserve fatigue resistance of the structure was carried out. According to the results of tests the conclusion about conformity of rail car to requirements of the car design documentation, technical specifications and regulations was made. It was concluded that the maximum stress in the structural elements of the rail car under the quasi-static load and in the collisions, as well as indicators of fatigue resistance of the structure of the rail car are within permitted. Obtained results serve for future comparison with the data of numerical analysis by the finite element method.

Keywords: universal platform car, testing, static strength, the strength in the collision, the fatigue resistance of the structure

Введение

Железнодорожная промышленность отвечает за массовую транспортировку огромного количества грузов.

Потребности железнодорожной отрасли существенно изменились за последние годы. В современной технической литературе уделяется много внимания вопросам увеличения скоростей и нагрузок, обеспечения безопасности перевозок, а

также исследованиям дееспособности элементов конструкции вагонов [1 – 3]. Еще одной группой литературных источников, которые, очевидно, не менее актуальны, являются работы, содержащие информацию об исследованиях и разработках специалистов в области вагоностроения. В этих работах отображены описание новых типов вагонов и результаты их строительства, разработка новых и

сравнение существующих методов испытаний широкого спектра вагонов и их компонентов [4 – 6].

Такой же информативный характер носит и данная статья. Она содержит анализ опыта и результаты испытательного центра продукции вагоностроения.

Постановка задачи

С целью установления соответствия опытных образцов вагонов требованиям технического задания (ТЗ), конструкторской документации (КД) и нормативным документам проводят их предварительные испытания.

Так, в 2015 году испытательный центр продукции вагоностроения Общества с ограниченной ответственностью «Инженерный центр подвижного состава» (ООО «ИЦПС») провел такие испытания для вагона-платформы модели 13-9990-01 [7, 8] (рис. 1), изготовленного ОАО «Новозыбковский машиностроительный завод» по КД [9] и ТЗ [10]. Программа и методика проведения предварительных испытаний была разработана в соответствии с требованиями технического регламента "ТР ТС 001/2011. Технический регламент ТС. О безопасности железнодорожного подвижного состава" и нормативных документов [11-15].



Рис. 1 – Общий вид испытываемого вагона

Основные технические характеристики вагона в соответствии с КД представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные технические характеристики вагона

Технические характеристики	Значение
Грузоподъемность (максимальная), т	72
Масса тары, т	21,5±0,5
Максимальная расчетная статическая нагрузка от колесной пары на рельсы, кН (тс)	230,5 (23,5)
Типы транспортируемых контейнеров серии ИСО	1AA, 1A, AX, ICC, IC, ICX
Конструкционная скорость, км/ч	120
Габарит по ГОСТ9238	0-ВМ

В объем предварительных испытаний были включены следующие виды:

- испытания на статическую прочность;
- испытания на прочность при соударении;

- расчетно-экспериментальная оценка сопротивления усталости конструкции вагона;
- ходовые динамические испытания;
- стационарные тормозные испытания;
- ходовые тормозные испытания;
- функциональные испытания.

Целью данной работы является проведение исследований и анализ результатов первых трех видов экспериментальных испытаний вагона-платформы.

Испытания на статическую прочность

Целью испытаний на статическую прочность являлась оценка показателей прочности, несущей способности конструкции вагона. Основными задачами при этом были исследование и оценка напряженного состояния конструкции вагона при квазистатическом нагружении: действии вертикальной нагрузки (вес груза, тара вагона), распорной, продольных сжимающих и растягивающих нагрузок, ремонтных нагрузок.

В частности, испытания на прочность вагона при действии вертикальной, распорной и ремонтных нагрузок проводились на территории ОАО «Новозыбковский машиностроительный завод» с 08.08.2015 г. по 14.08.2015 г.; испытания на прочность при действии горизонтальных продольных растягивающей и сжимающей статических нагрузок – на специальном стенде для растяжения-сжатия вагонов, обеспечивающем продольную сжимающую нагрузку не менее 2,5 МН и продольную растягивающую нагрузку не менее 2,0 МН, на территории УО «БелГУТ» с 17.08.2015 г. по 18.08.2015 г.

Перечень использованного при испытаниях испытательного оборудования и средств измерений приведен в табл. 2, 3 соответственно.

Таблица 2 – Испытательное оборудование

Наименование вида испытаний и (или) определяемой характеристики (параметра) ТСЖТ	Наименование, марка и номер (заводской или инвентарный) испытательного оборудования
Обеспечение прочности вагонных конструкций при квазистатических нагружениях	Стенд ЧР-3922-00 Зав. № б/н

Наклейка тензорезисторов в исследуемых точках вагона была произведена в соответствии со схемами, представленными на рис 2, 3.

В ходе проведения испытаний регистрировались значения напряжений в контрольных точках в нагруженном и ненагруженном состояниях вагона.

Таблица 3 – Средства измерений

Наименование вида испытаний или определяемой характеристики ТСЖТ	Наименование, марка и номер (заводской или инвентарный) средства измерений
Обеспечение прочности вагонных конструкций при квазистатических нагрузениях	Усилитель измерительный MGCplus_RU Зав. №801063961
	Линейка измерительная металлическая диапазон измерений (0-500) мм Зав. №01
	Тензорезисторы ТКФО1-10-120(12) сер. №061
	Устройства тензометрические весоизмерительные электронные модификация ТВЭУ-5Г Зав. №14-38941
Определение массы	Весы вагонные ВС-100В Зав. №10944
Условия работы испытат. оборудования и средств измерений. Атмосферное давление и температура окружающего воздуха	Барометр-анероид БАММ-1 Зав. №338
	Термометр технический жидкостный ТТЖ-М Зав. №00350

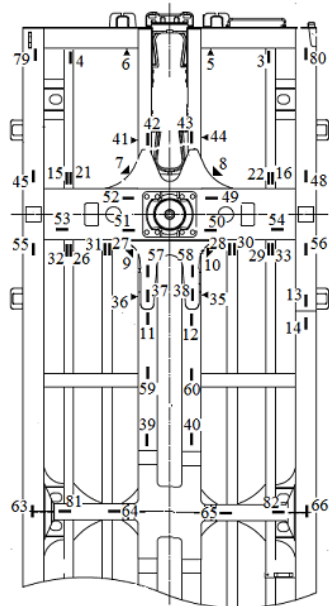


Рис. 2 – Схема расположения тензорезисторов на раме вагона

Создание вертикальной нагрузки на вагон при испытаниях осуществлялось двумя гружеными 20-ти футовыми имитаторами контейнеров массой 72 т. Таким образом, вес брутто вагона составил 93,5 т.



Рис. 3 – Схема расположения тензорезисторов на вагоне при испытании бокового борта

После испытаний на вертикальную нагрузку были выполнены нагрузки вагона ремонтными нагрузками:

- вертикальная нагрузка от веса брутто при подъеме груженого вагона за концы шкворневой балки с одного конца вагона за предусмотренные для подъема места (имитация полной подъемки кузова);
- вертикальная нагрузка от веса брутто при подъеме груженого вагона за шкворневую балку с одной стороны с одного конца вагона за предусмотренное для подъема место (имитация смены элементов рессорного комплекта или коробки бокового скользунa тележки);
- вертикальная нагрузка от веса тары при подъеме порожнего вагона за предусмотренные для подъема места шкворневых балок, расположенные по диагонали.

Испытания на ремонтные нагрузки выполнялись с использованием стационарных домкратов.

Для испытаний на продольные растягивающие и сжимающие нагрузки вагон устанавливался в стенд растяжения-сжатия и производилось нагружение продольными статическими нагрузками:

- продольная статическая нагрузка, приложенная через элемент автосцепного устройства – 1,0 МН и 2,0 МН (растяжение);
- продольная статическая нагрузка, приложенная через элементы автосцепного устройства – 1,0 МН и 2,5 МН (сжатие).

Для испытаний боковых бортов в вагон было установлено распорное устройство. Нагрузка прикладывалась к противоположащим тензометрируемым секциям бортов на уровне верхней обвязки, как показано на рис. 4.

Величины распорных нагрузок на секции бортов, которые были определены согласно [15], для I режима составили 12,74 кН, для III режима – 19,72 кН.

За время испытаний выполнено 3 цикла нагружения-разгружения вагона.

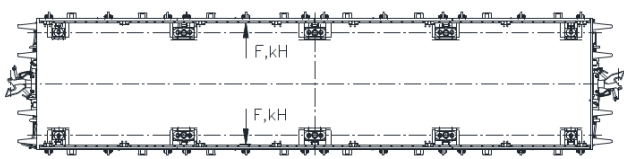


Рис. 4 – Схема приложения распорной нагрузки к боковым бортам вагона

Полученные результаты были обработаны согласно [15] с использованием специального программного обеспечения, входящего в состав измерительного усилителя MGCplus.

Измеряемые деформации в местах установки датчиков пересчитывались в напряжения.

Результаты статических прочностных испытаний вагона от действия вертикальной нагрузки, боковой силы, нагрузки от разности высот автосцепок, боковых сил взаимодействия между вагонами в кривых, продольных растягивающих и сжимающих нагрузок при I и III расчётных режимах представлены на рис. 5–8. На рисунках: 1 – продольная балка; 2 – консольная балка; 3 – шкворневая балка; 4 – хребтовая балка; 5 – боковая балка; 6 – промежуточная балка.

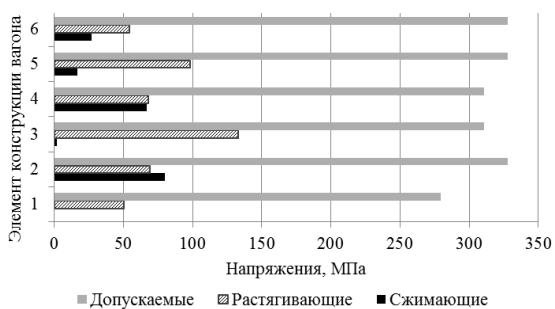


Рис. 5 – Максимальные напряжения в элементах вагона по I режиму с учетом сжимающей нагрузки

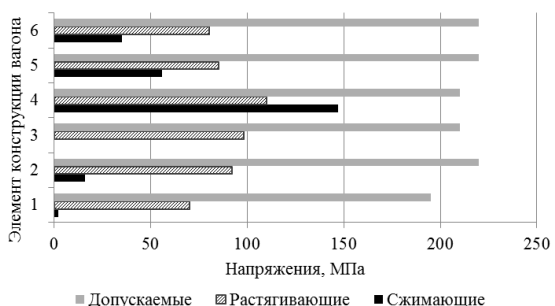


Рис. 6 – Максимальные напряжения в элементах вагона по III режиму с учетом сжимающей нагрузки

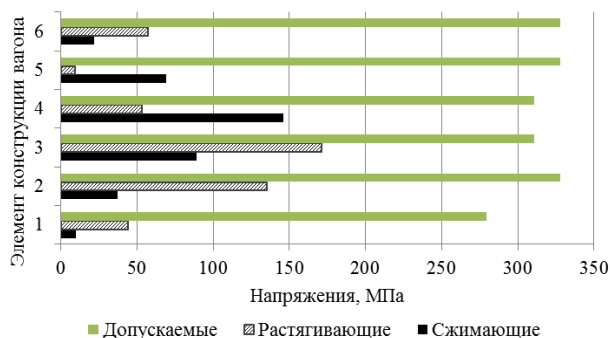


Рис. 7 – Величины максимальных суммарных напряжений в элементах вагона по I режиму с учетом растягивающей нагрузки

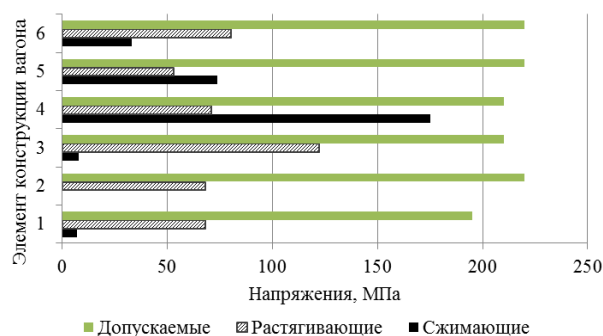


Рис. 8 – Величины максимальных суммарных напряжений в элементах вагона по III режиму с учетом растягивающей нагрузки

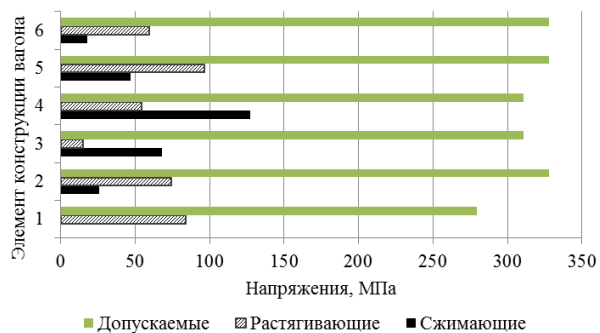


Рис. 9 – Величины максимальных суммарных напряжений в элементах вагона от подъема груженого вагона с одной стороны шкворневой балки с одного конца вагона

Величины максимальных напряжений в элементах конструкции боковых бортов при распорных нагрузках занесены в табл. 4.

Из приведенных результатов испытаний видно, что максимальные напряжения в конструкции вагона при квазистатических нагружениях не превышают допускаемые.

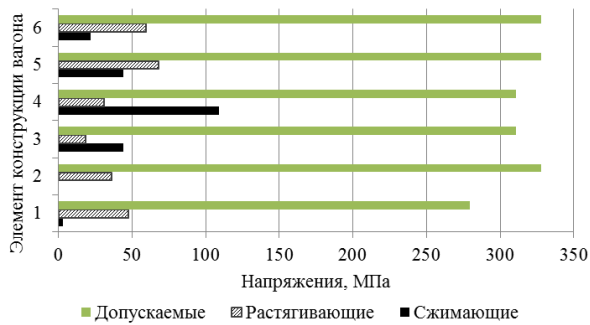


Рис. 10 – Величины максимальных суммарных напряжений в элементах вагона от подъема груженого вагона по концам шкворневой балки с одного конца вагона

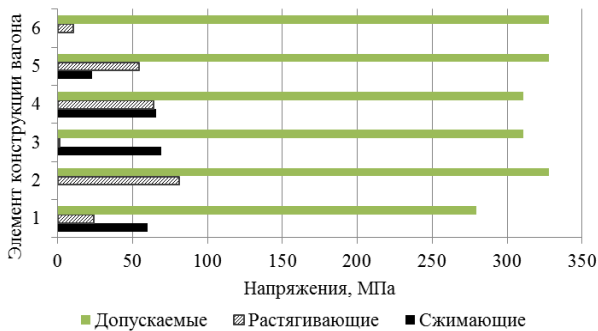


Рис. 11 – Величины максимальных суммарных напряжений в элементах вагона от подъема порожнего вагона за концы шкворневых балок по диагонали вагона

Таблица 4 – Максимальные напряжения в элементах боковых бортов вагона от распора

Напряжение от распора боковых бортов, МПа		Допускаемое напряжение, МПа	
I режим	III режим	I режим	III режим
113,4	175,2	279,3	195

Заключение. Таким образом, на основании проведенного анализа результатов испытаний вагона-платформы универсальной, модель 13-9990-01 на статическую прочность при квазистатических нагружениях можно сделать следующие выводы:

- 1) напряжения в несущих элементах конструкции вагона при квазистатических нагружениях соответствуют требованиям [15], КД и ТЗ;
- 2) после проведения статических испытаний при визуальном осмотре повреждений элементов конструкции вагона не обнаружено.

Испытания на прочность при соударении

Данный вид испытаний проводился с целью экспериментальной проверки прочности и устойчивости конструкции вагона при заданных испытательных режимах соударения на соответствие требованиям [15], КД и ТЗ. Основными задачами испытаний были исследование и оценка напряженного состояния конструкции вагона при действии нормативных ударных нагрузок согласно [15].

Испытания на прочность при соударении проводились на территории ОАО «Новозыбковский машиностроительный завод» испытательным центром продукции вагоностроения ООО «ИЦПС» с 08.08.15 по 14.08.15.

Испытательное оборудование и средства измерения, применяемые при проведении испытаний, приведены в табл. 5, 6.

Таблица 5 – Испытательное оборудование

Наименование вида испытаний и (или) определяемой характеристики (параметра) ТСЖТ	Наименование, марка и номер (заводской или инвентарный) испытательного оборудования
Обеспечение прочности вагонных конструкций при соударениях	Полувагон модели 12-132 массой брутто 94 т Зав. №1322002 Тензометрическая автосцепка СА-3 Инв. №24

Таблица 6 – Средства измерений

Наименование вида испытаний или определяемой характеристики ТСЖТ	Наименование, марка и номер (заводской или инвентарный) средства измерений
Обеспечение прочности вагонных конструкций при соударениях	Усилитель измерительный MGCplus_RU Зав. Зав. №801063961
	Микропроцессорная многоканальная тензо-метрическая система ММТС-64.01 Зав. №4
	Тензорезисторы ТКФО1-10-120(12) сер. №061
	Секундомер механический СОПр Зав. №5609
Определение массы	Весы вагонные ВС-100В Зав. №10944
Условия работы испытат. оборудования и средств измерений.	Барометр-анероид БАММ-1 Зав. №338
	Термометр технический жидкостный ТТЖ-М Зав. №00350

Испытания на соударение проводились на прямом участке железнодорожного пути с применением локомотива согласно схемам, приведенным на рис. 12–14.

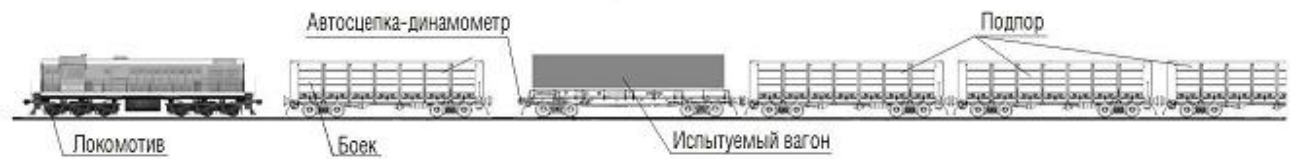


Рис. 12 – Схема расположения вагонов при испытаниях на соударение (вагон в подпоре)



Рис. 13 – Схема расположения вагонов при испытаниях на соударение (свободностоящий вагон)

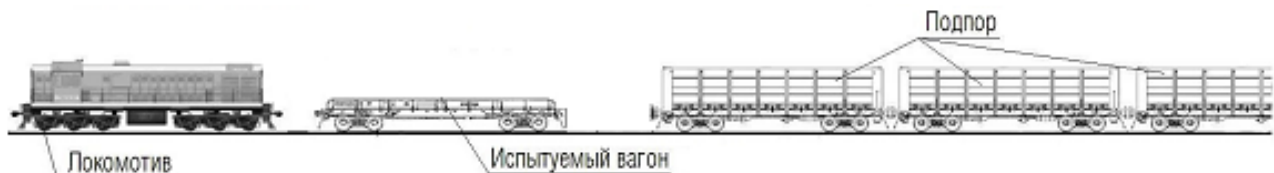


Рис. 14 – Схема расположения вагонов при испытаниях на соударение (соударения порожним вагоном в подпор, выполняются без тензометрирования)

Величины сил соударения вагонов определялись по показаниям тензометрической автосцепки.

Скорость соударений вычислялась по времени прохождения вагоном-бойком и порожним испытуемым вагоном контрольной базы.

До начала проведения испытаний была произведена наклейка тензорезисторов в исследуемых точках вагона в соответствии со схемой, представленной на рис. 2.

Испытуемый вагон был загружен двумя грузными 20-ти футовыми имитаторами контейнеров массой 72 т. Таким образом, вес брутто вагона составил 93,5 т.

Испытания на прочность при соударении проводились путем соударения вагона-бойка в испытуемый вагон, стоящий в подпоре (рис. 12), свободностоящий (рис. 13), и порожним испытуемым вагоном в подпор (рис. 14).

Подпор был сформирован из 4 грузных вагонов различных моделей общей массой 320 т.

В процессе испытаний фиксировались: сила соударения вагонов, скорость набегания вагона-бойка или испытуемого вагона, а также динамические напряжения в исследуемых точках конструкции вагона.

При испытаниях на соударение после каждого удара производился визуальный осмотр вагона с целью обнаружения повреждений конструкции, включая элементы крепления тормозного оборудования, бортов вагона, а также устройств крепления груза в вагоне.

Соударения проводились со скоростями от 8,05 км/ч до скорости, обеспечивающей силу удара 3,3 МН.

Анализ результатов испытаний. В процессе проведения испытаний было произведено 33 соударения вагонов. Режимы соударений представлены в табл. 7 и 8.

Таблица 7 – Режимы соударений (грузный вагон)

№ режима	Диапазон сил ударов, МН	Количество соударений	Промежуточный осмотр
Вагон, стоящий в подпоре			
1	от 1,0 до 1,5	3	Видимых повреждений не обнаружено
2	от 1,0 до 2,0	7	
3	от 2,0 до 2,5	7	
4	от 2,5 до 3,0	7	
5	от 3,0 до 3,5	3	
Свободностоящий вагон			
6	от 3,0 до 3,5	3	Видимых повреждений не обнаружено

Таблица 8 – Режимы соударений (порожний вагон)

№ режима	Диапазон сил ударов, МН	Количество соударений	Промежуточный осмотр
Вагоном в подпор			
7	до 15,0	3	Видимых повреждений не обнаружено

Зависимость силы соударения от скорости набегания вагона-бойка представлена на рис. 15.

На рис. 16 приведен пример осциллограммы динамических напряжений, соответствующих силе соударения 3,5 МН, для одной из наиболее нагруженных исследуемых точек конструкции вагона.

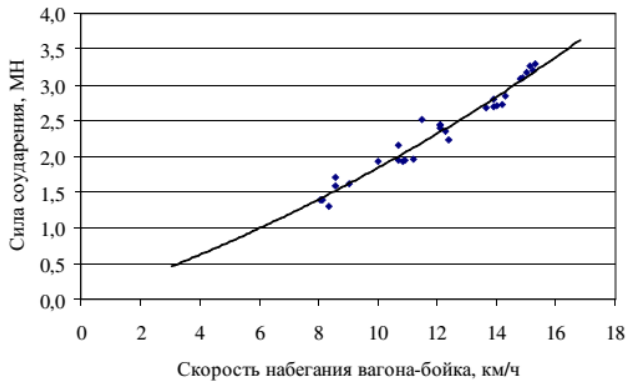


Рис. 15 – Зависимость силы соударения от скорости набегания вагона-бойка

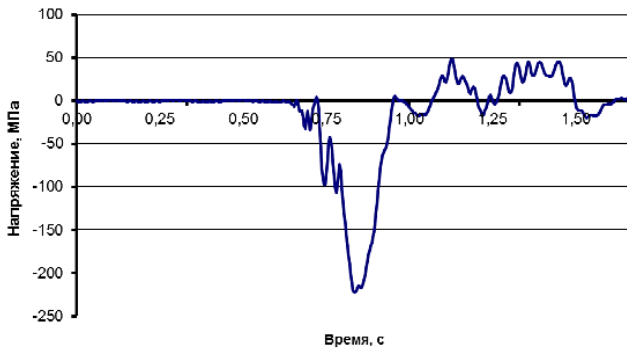


Рис. 16 – Осциллограмма динамических напряжений

Максимальные суммарные напряжения в конструкции вагона при соударении и действии вертикальной статической нагрузки (напряжение от веса груза и тары вагона) представлены на рис. 17. Они не превышают допускаемые.

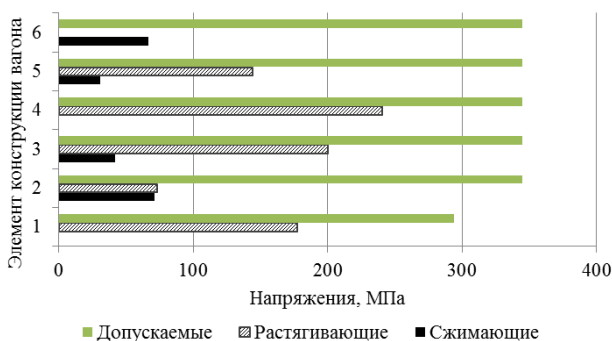


Рис. 17 – Величины максимальных напряжений в элементах вагона при соударении и действии вертикальной статической нагрузки

Заключение. На основании проведенного анализа результатов испытаний на прочность при

соударении вагона-платформы универсальной можно сделать следующие выводы:

- 1) напряжения в несущих элементах конструкции вагона при соударениях соответствуют требованиям [15], КД и ТЗ;
- 2) после проведения соударений при визуальном осмотре повреждений металлоконструкции вагона (трещины сварных швов или основного металла, нарушение геометрии несущих элементов), элементов крепления тормозного оборудования, бортов вагона и устройств для крепления груза в вагоне не обнаружено.

Расчетно-экспериментальная оценка сопротивления усталости конструкции

Целью расчетно-экспериментальной оценки сопротивления усталости конструкции вагона являлась проверка соответствия запаса сопротивления усталости конструкции требованиям [15], ТЗ и КД.

Основными задачами были исследование и оценка напряженного состояния конструкции при действии динамических нагрузок с последующей оценкой запаса сопротивления усталости.

Испытания проводились на ОАО «Новозыбковский машиностроительный завод» испытательным центром ООО «ИЦПС» в период с 08.08.15 по 14.08.15 в светлое время суток на прямом участке железнодорожного пути.

В ходе испытаний использовались средства измерений, занесенные в табл. 9.

Таблица 9 – Средства измерений

Наименование определяемой характеристики ТСЖТ	Наименование, марка и номер (заводской или инвентарный) средства измерений
Обеспечение прочности вагонных конструкций при соударениях	Усилитель измерительный MGCplus_RU Зав. №801063961
	Тензорезисторы ТКФО 1-10-120(12) сер. №061
	Рулетка измерительная металлическая типа P10УЗК Зав. №03
Определение массы	Весы вагонные ВС-100В Зав. №10944
Условия работы испытат. оборудования и средств измерений.	Барометр-анероид БАММ-1 Зав. №338
	Термометр технический жидкостный ТТЖ-М Зав. №00350

Наклейка тензорезисторов в исследуемых точках конструкции вагона была произведена в соответствии со схемой, представленной на рис. 2.

Для определения коэффициента вертикальной динамики на надрессорной балке тележки, расположенной с тензометрируемой стороны вагона,

произведена наклейка и соединение тензорезисторов по схеме, представленной на рис. 18.

При испытаниях вагон был загружен двумя грузеными 20-ти футовыми имитаторами контейнеров массой 72 т. Вес брутто вагона составил 93,5 т.

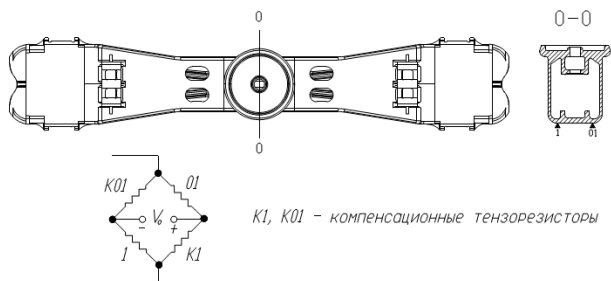


Рис. 18 – Схема наклейки и соединения тензорезисторов на надрессорной балке тележки

Тарировка измерительных схем надрессорной балки тележки была выполнена путем поднятия рамы вагона за штатные места с помощью электрических домкратов.

Сброс с клиньев производился путем наката вагона на клинья, установленные под каждое колесо. Эскиз клина приведен на рис. 19.

В процессе испытаний фиксировались динамические напряжения в исследуемых точках конструкции вагона и коэффициент вертикальной динамики.

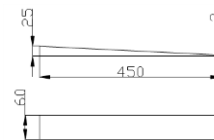


Рис. 19 – Эскиз клина

При проведении сброса с клиньев производился визуальный осмотр вагона с целью обнаружения повреждений конструкции.

В процессе проведения испытаний произведено 8 сбросов вагона с клиньев.

В результате испытаний по сбрасыванию вагона с клиньев при коэффициенте вертикальной динамики 0,35 были получены динамические напряжения в исследуемых точках конструкции вагона и частота процесса изменения динамических напряжений, которые вместе с динамическими напряжениями, полученными в ходе испытаний на соударение, и стали исходными данными для расчета, рис. 20, 21.

Расчет выполнялся для назначенного срока службы 32 года. Все элементы конструкции вагона изготовлены из стали марки 09Г2С ГОСТ19281.

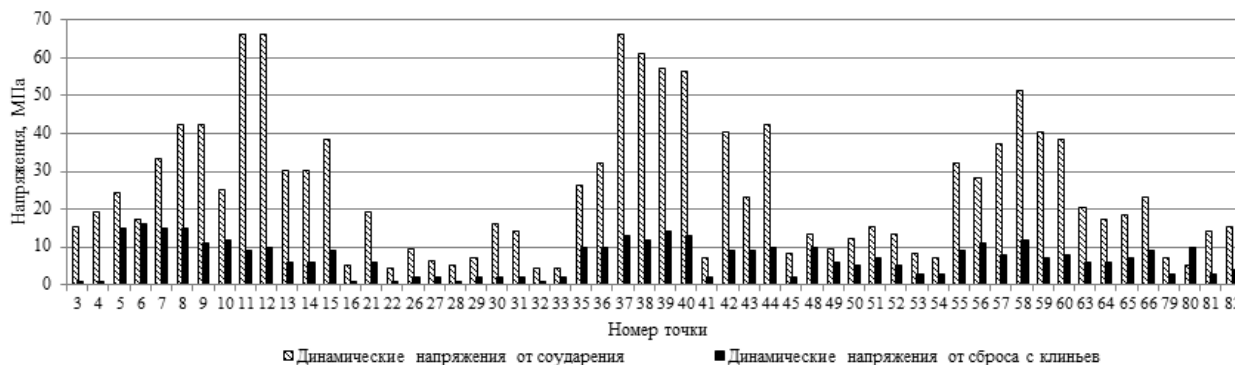


Рис. 20 – Динамические напряжения в исследуемых точках конструкции вагона

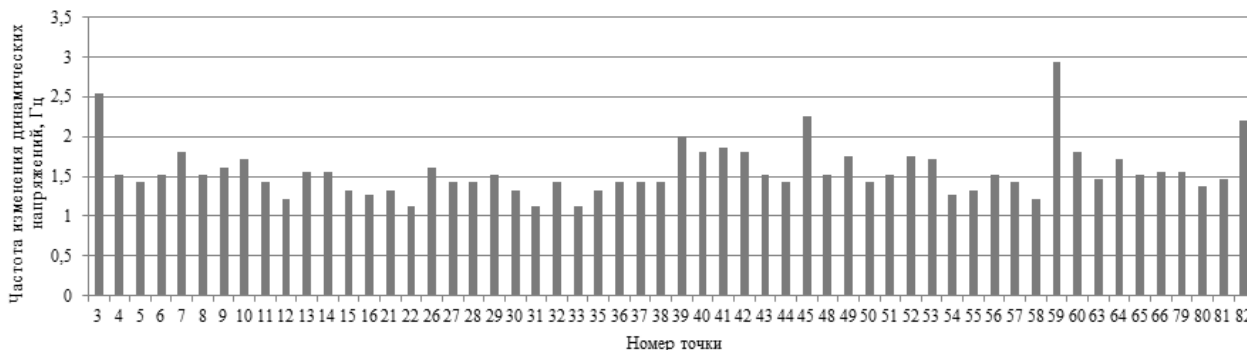


Рис. 21 – Величины частот изменения динамических напряжений в исследуемых точках

Методика расчета. Методика расчета включает в себя:

- расчет величины эквивалентной амплитуды напряжений, приведенной к базовому циклу нагружений;
- расчет предела выносливости материала конструкции;
- определение коэффициента запаса сопротивления усталости.

Расчет величины эквивалентной амплитуды напряжений

$$\sigma_{a,э} = \sqrt[3]{1/N_0 \cdot (D_{\text{верт.дин}} + D_{\text{продол.дин}})}, \quad (1)$$

где $D_{\text{верт.дин}}$ – повреждающее воздействие от вертикальной динамики;

$D_{\text{продол.дин}}$ – повреждающее воздействие от продольных нагрузок.

Расчет повреждающего воздействия от вертикальной динамики $D_{\text{верт.дин}}$

$$D_{\text{верт.дин}} = N_{c,э} \sum_{j=1}^3 K_j \sum_{i=1}^{K_{vj}} P_{vji} \sum_{n=1}^{K_{cji}} \sigma_{ajin}^m P_{cjin}, \quad (2)$$

где m – показатель степени в уравнении кривой усталости в амплитудах ($m=4$);

$N_{c,э}$ – нормативное количество циклов динамических напряжений от вертикальной динамики рамы при движении вагона;

N_0 – базовое число циклов динамических напряжений;

j – счетчик характерных режимов движения;

K_j – доля протяженности характерных участков пути: прямых ($j=1$), кривых ($j=2$) и стрелочных переводов ($j=3$) в общей длине железнодорожных линий. Принимались: $K_1=0,75$; $K_2=0,23$; $K_3=0,02$;

K_{vj} – принятое число диапазонов амплитуд для j -го характерного участка

i – счетчик диапазонов скоростей;

P_{vji} – доля времени, приходящаяся на эксплуатацию в i -ом диапазоне скоростей (п. 3.2.5 норм [15]);

K_{cji} – принятое число диапазонов амплитуд, для j -го характерного участка пути в i -ом диапазоне скоростей;

n – счетчик диапазонов амплитуд напряжений;

σ_{ajin} – средняя амплитуда напряжений в n -ом диапазоне (для j -ого характерного участка пути в i -ом диапазоне скоростей), МПа;

P_{cjin} – частота появления амплитуд с уровнем σ_{ajin} .

Функция распределения частот повторения коэффициентов вертикальной динамики принимается

равной нормативной функции распределения скоростей движения вагона согласно п. 3.2.5 [15].

Нормативное количество циклов динамических напряжений от вертикальной динамики кузова (рамы) при движении вагона за расчетный срок службы согласно [15] определялось по формуле

$$N_{c,э} = f \cdot T_p \cdot (1 - k_{II}), \quad (3)$$

где f – эффективная частота процесса изменения динамических напряжений в контрольной точке, Гц;

T_p – суммарное время действия динамических напряжений при движении за расчетный срок службы вагона, с;

k_{II} – коэффициент порожнего пробега согласно [14];

$$T_p = B \cdot T_k, \quad (4)$$

где B – коэффициент перевода календарного расчетного срока службы в годах во время непрерывного движения в секундах.

$$B = 365 \cdot \frac{10^3 \cdot \bar{L}_c}{\bar{V}}, \quad (5)$$

где \bar{L}_c – среднесуточный пробег груженого вагона, км/сутки;

\bar{V} – средняя техническая скорость движения, м/с;

T_k – назначенный срок службы вагона, лет.

Среднесуточный пробег груженого вагона \bar{L}_c в соответствии [16] составляет 300 км/сутки.

В соответствии с [15] средняя техническая скорость движения вагона составляет 22,4 м/с.

Величины амплитуд динамических напряжений для средних вероятных значений коэффициентов динамики при скоростях \bar{V}_k вычислялись по формуле

$$\sigma_{a,i} = \frac{\sigma_{эксн} \cdot k_{di}}{k_d}, \quad (6)$$

где $\sigma_{a,i}$ – амплитуда динамического напряжения для i -ого диапазона скоростей, МПа;

$\sigma_{эксн}$ – амплитуда экспериментально полученного несимметричного цикла, МПа;

k_{di} – среднее вероятное значение коэффициента вертикальной динамики для i -ого диапазона скоростей;

k_d – коэффициент вертикальной динамики.

Расчет повреждающего воздействия от продольных нагрузок

$$D_{\text{продол.дин}} = N_{c,э} \sum_{o=1}^{K_{yo}} ((\sigma_{a,i})^m P_{yo}), \quad (7)$$

Обобщенные распределения ударных продольных сил для проверки циклической долговечности несущих конструкций вагона представлены в табл. 10.

Нормативное количество циклов динамических напряжений от продольных сил, действующих на вагон через автосцепку, согласно [14] составляет $N_{c, yd} = 20200 \cdot T_k$.

Величины амплитуд динамических напряжений для средних значений диапазонов усилий вычислялись по формуле

$$\sigma_{a,i} = \frac{\sigma_{эксп} \cdot F_i}{3,5}, \quad (8)$$

где $\sigma_{a,i}$ – амплитуда динамического напряжения для i -ого диапазона, МПа;

$\sigma_{эксп}$ – амплитуда экспериментально полученного несимметричного цикла от соударений при силе соударения 3,5 МН, МПа;

F_i – среднее значение продольного усилия для i -ого диапазона, МН.

Таблица 10 – Обобщенные распределения ударных продольных сил

Диапазон усилий, МН	Частота повторения усилий в диапазон P_{yd}	Среднее значение диапазона F_i , МН
0,1 - 0,4	0,1258	0,25
0,4 - 0,8	0,2852	0,60
0,8 - 1,2	0,2802	1,00
1,2 - 1,6	0,1832	1,40
1,6 - 2,0	0,0772	1,80
2,0 - 2,4	0,0359	2,20
2,4 - 2,8	0,0208	2,60
2,8 - 3,2	0,0023	3,00
3,2 - 3,6	0,0003	3,40
3,6 - 3,8	0,0001	3,70

Таким образом, для контрольных точек вагона были определены величины амплитуд динамического напряжения условного симметричного цикла, приведенные к базовому числу циклов N_0 , эквивалентные по повреждающему воздействию реальному режиму эксплуатационных напряжений за расчетный срок службы, рис. 22.

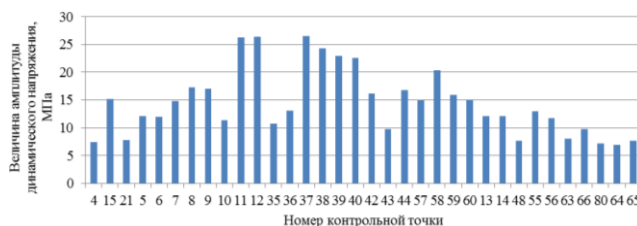


Рис. 22 – Величины амплитуд динамического напряжения для некоторых контрольных точек

Расчет предела выносливости материала конструкции. Расчетное значение $\sigma_{a,N}$, МПа определялось по формуле

$$\sigma_{a,N} = \bar{\sigma}_{a,N} \cdot (1 - z_p \cdot v_{\sigma_{a,N}}), \quad (9)$$

где $\sigma_{a,N}$ – предел выносливости (по амплитуде) для контрольной зоны при симметричном цикле и установившемся режиме нагружения при базовом числе циклов $N_0 = 10^7$, МПа;

$\bar{\sigma}_{a,N}$ – медианное значение предела выносливости контрольной зоны, МПа;

z_p – квантиль распределения $\sigma_{a,N}$, соответствующий односторонней вероятности 95%, $z_p = 1,645$;

$v_{\sigma_{a,N}}$ – коэффициент вариации предела выносливости материала, $v_{\sigma_{a,N}} = 0,07$ (согласно [15]).

Значение $\bar{\sigma}_{a,N}$ определялось по формуле

$$\bar{\sigma}_{a,N} = \frac{\bar{\sigma}_{-1}}{k_{\sigma}}, \quad (10)$$

где $\bar{\sigma}_{-1}$ – среднее (медианное) значение предела выносливости гладкого стандартного образца при симметричном цикле изгиба на базе $N_0 = 10^7$ МПа, для несущих элементов конструкции вагона составляет:

- хребтовая, шкворневая, боковая, промежуточная, консольная балки – 220 МПа;
- продольные балки – 195 МПа.

$(\bar{k}_{\sigma})_k$ – среднее значение общего коэффициента снижения предела выносливости в выбранной контрольной зоне по отношению к пределу выносливости гладкого стандартного образца (определялось по [15]).

Предел выносливости материала $\sigma_{a,N}$ для продольной балки составил 38,34 МПа, для консольной, шкворневой, хребтовой, боковой и промежуточной балок – 43,26 МПа.

Определение коэффициента запаса сопротивления усталости. Коэффициент запаса сопротивления усталости определялся согласно [15] по формуле

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,э}} \geq [n], \quad (11)$$

где $[n]$ – минимально допустимый коэффициент запаса сопротивления усталости, $[n] = 1,5$.

Во всех исследованных контрольных точках конструкции вагона коэффициент запаса сопротивления усталости превышает установленный нормами [15], рис. 23.

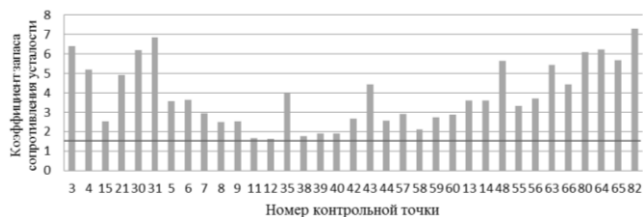


Рис. 23 – Значения коэффициентов запаса сопротивления усталости

Заключение. Таким образом, на основании расчетно-экспериментальной оценки сопротивления усталости вагона-платформы универсальной, можно сделать вывод о том, что показатели сопротивления усталости конструкции вагона соответствуют требованиям [15], КД и ТЗ.

Выводы

Таким образом, результаты всех трех рассмотренных в статье видов испытаний опытного образца вагона-платформы универсальной подтвердили его соответствие требованиям нормативных документов.

Полученные результаты служат для последующего сравнения с данными численных исследований методом конечных элементов.

Список литературы

- 1 **Carolan, M.** Crippling Test of a Budd M-1 Passenger Railcar: Test and Analysis Results / **M. Carolan, B. Perlman, D. Tyrell, J. Gordon** // *Proceedings of the 2014 Joint Rail Conference*, JRC2014-3824, April 2014. – 11 p. – doi:10.1115/JRC2014-3824.
- 2 **Baykasoglu, C.** Numerical static and dynamic stress analysis on railway passenger and freight car models / **C. Baykasoglu** // *International Iron & Steel Symposium*, Karabük, Türkiye, 02-04 April 2012. – P. 579-586.
- 3 **Liana P., Stringfellow R., Mayville R.** Finite Element Analysis and Full-Scale Testing of Locomotive Crashworthy Components / **P. Liana, R. Stringfellow, R. Mayville** // *American Society of Mechanical Engineers*, Paper No. JRC2013-2546, April 2013. – 51 p. – doi:10.1115/JRC2013-2546.
- 4 **Bitiutskiy, A. A.** Freight railcars testing methods and diagnostics improvement: a collection of scientific articles / ed. by **A.A. Bitiutskiy** / *Railcar-building Engineering Center*. – St. Petersburg: Publishing house “OM-Press”, 2007. – Edition 2. – 120 p.
- 5 **Tyrell, D., Severson K., Perlman A.B., Brickle B., VanIngen-Dunn C.** Rail Passenger Equipment Crashworthiness Testing Requirements and Implementation / **D. Tyrell, K. Severson, A. B. Perlman, B. Brickle, C. VanIngen-Dunn** // *Rail Transportation, American Society of Mechanical Engineers*. – RTD. – 2000. – Vol. 19. – 10 p.
- 6 **Liana, P.** Structural Crashworthiness Standards Comparison: Grade Crossing Collision Scenarios / **P. Liana** // *ASME 2009 Rail Transportation Division Fall*

Conference, Paper No. RTDF2009-18030, October 2009. – 10 p. – doi:10.1115/RTDF2009-18030.

- 7 **Пат. на корисну модель UA 97543 U МПК: B61D 3/00, B61F 1/08.** Багатоцільовий залізничний вагон-платформа / **С. О. Шпак, А. Д. Чепурний, О. В. Литвиненко** [та інш.]; заявитель и патентообладатель ООО УК "РэйлТрансХолдинг", заявл. 01.09.2014; опубл. 25.03.2015. Бюл. № 6.
- 8 **Пат. на полезную модель RU 149429 U1 Российская Федерация МПК B61D3/08, B61F1/08.** Многоцелевой железнодорожный вагон-платформа / **С. А. Шпак, А. Д. Чепурной, А. В. Литвиненко** [и др.]; заявитель и патентообладатель ООО УК "РэйлТрансХолдинг", заявл. 25.06.2014; опубл. 10.01.2015.
- 9 **9990.00.000-01** Вагон-платформа универсальная. Модель 13-9990-01. *Комплект конструкторской документации*: НИЦ «УК «РТХ», 2014 г.
- 10 Техническое задание на разработку и постановку на производство вагонов-платформ универсальных 13-9990, 13-9990-01, 13-9990-02: ООО «УК «РТХ», 2015 г.
- 11 Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство: ГОСТ Р15.201-2000. Введ. 2001-01-01. – М.: ГОССТАНДАРТ РОССИИ. – 2001 г. – 12 с.
- 12 Единая система конструкторской документации: ГОСТ 2.106-96. Введ. 1997-07-01. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – 1997. – 32 с.
- 13 Система разработки и постановки продукции на производство. Порядок заказа, разработки, постановки на производство, проведение испытаний и утилизации железнодорожной техники: ОСТ 32.181-2001. Введ. 2001-01-01 – МПС России. – 2001. – 63 с.
- 14 Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества: РД 24.050.37.95. – М.: ГосНИИВ. – 1995 г. – 102 с.
- 15 Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ВНИИЖТ-ГосНИИВ. – 1996. – 319 с.
- 16 **9990.12.000-01 PP** Вагон-платформа модели 13-9990-01. Рама. Расчет на прочность: НИЦ «УК «РТХ». – 2015 г.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Carolan M., Perlman B., Tyrell D., Gordon J.** Crippling Test of a Budd M-1 Passenger Railcar: Test and Analysis Results. *Proceedings of the 2014 Joint Rail Conference*, JRC2014-3824, April 2014, 11 p., doi:10.1115/JRC2014-3824
- 2 **Baykasoglu C.** Numerical static and dynamic stress analysis on railway passenger and freight car models. *International Iron & Steel Symposium*, 02-04 April 2012, Karabük, Türkiye, 579-586.
- 3 **Liana P., Stringfellow R., Mayville R.,** Finite Element Analysis and Full-Scale Testing of Locomotive Crashworthy Components. *American Society of Mechanical Engineers*, Paper No. JRC2013-2546, April 2013, 51 p., doi:10.1115/JRC2013-2546.

- 4 **Bitiutskiy, A. A.** Freight railcars testing methods and diagnostics improvement: a collection of scientific articles. *Railcar-building Engineering Center. – St. Petersburg: Publishing house "OM-Press", 2007, Edition 2, 120 p.*
- 5 **Tyrell, D., Severson, K., Perlman, A. B., Brickle, B., VanIngen-Dunn, C.** Rail Passenger Equipment Crashworthiness Testing Requirements and Implementation. *Rail Transportation, American Society of Mechanical Engineers, RTD, 2000, 19, 10 p.*
- 6 **Liana, P.** Structural Crashworthiness Standards Comparison: Grade Crossing Collision Scenarios. *ASME 2009 Rail Transportation Division Fall Conference, Paper No. RTDF2009-18030, October 2009, 10 p., doi:10.1115/RTDF2009-18030.*
- 7 **Pat. na korisnu model UA 97543 U MPK: B61D 3/00, B61F 1/08.** Bagatocilovij zaliznichnij vagon-platforma [Multi-platform railway car] / **S. O. Shpak, A. D. Chepurnoy, O. V. Litvinenko** [ta insh.]; zayavitel i patentoobladatel OOO UK "RailTransHolding", zayavl. 01.09.2014; opubl. 25.03.2015. Byul. № 6.
- 8 **Pat. na poleznuyu model RU 149429 U1 Rossijskaya Federaciya MPK B61D3/08, B61F1/08.** Mnogocelovoj zheleznodorozhnyj vagon-platforma [Multipurpose railway wagons] / **S. A. Shpak, A. D. Chepurnoj, A. V. Litvinenko** [i dr.]; zayavitel i patentoobladatel OOO UK "RailTransHolding", zayavl. 25.06.2014; opubl. 10.01.2015.
- 9 **9990.00.000-01** Vagon-platforma universalnaya [Wagon-platform universal]. Model 13-9990-01. *Komplekt konstruktorskoj dokumentacii [Complete design documentation]:* NIC «UK «RTH», 2014.
- 10 Tehnicheskoe zadanie na razrabotku i postanovku na proizvodstvo vagonov-platform universalnyx 13-9990, 13-9990-01, 13-9990-02 [The terms of reference for the development and implementation in production of flat cars universal 13-9990, 13-9990-01, 13-9990-02]: OOO «UK «RTH», 2015.
- 11 Sistema razrabotki i postanovki produkcii na proizvodstvo. produkciya proizvodstvenno-tehnicheskogo naznacheniya. poryadok razrabotki i postanovki produkcii na proizvodstvo [System development and launch of new products. Products for industrial purposes. The procedure for the development and launch of new products]: GOST R15.201-2000. Vved. 2001-01-01. – Moscow: GOSSTANDART ROSSII, 2001, 12 p.
- 12 Edinaya sistema konstruktorskoj dokumentacii: GOST 2.106-96 [12 Unified system for design documentation: GOST 2.106-96]. Vved. 1997-07-01. – Minsk: *Mezhgos. sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii [Minsk: the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification]*, 1997, 32 p.
- 13 Sistema razrabotki i postanovki produkcii na proizvodstvo. Poryadok zakaza, razrabotki, postanovki na proizvodstvo, provedenie ispytanij i utilizacii zheleznodorozhnoj texniki: OST 32.181-2001 [System development and launch of new products. Ordering, development, putting into production, testing and utilization of railway equipment: OST 32.181-2001]. Vved 2001-01-01, MPS Rossii, 2001, 63 p.
- 14 Vagony gruzovye i passazhirskie. Metody ispytanij na prochnost i hodovye kachestva: RD 24.050.37.95 [Freight and passenger. Test methods for durability and driving performance: RD 24.050.37.95], Moscow: GosNIIV, 1995, 102 p.
- 15 Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznyx dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnyh) [The rules for the calculation and design of wagons MPS 1520 mm gauge railways (non-self)], Moscow: VNIIZhT-GosNIIV, 1996, 319 p.
- 16 **9990.12.000-01 RR** Vagon-platforma modeli 13-9990-01. Rama. Raschet na prochnost [Wagon-platform model 13-9990-01. Frame. Strength analysis]: NIC «UK «RTH», 2015

Сведения об авторах (About authors)

Сенько Вениамин Иванович – доктор технических наук, проф., Ректор Учреждения образования "Белорусский Государственный Университет Транспорта", г. Гомель, Республика Беларусь.

Sen'ko Veniamin – Doctor of Technical Sciences, prof., Rector of the educational establishment "Belarusian State University of Transport", Gomel, Belarus

Макеев Сергей Валерьевич – кандидат технических наук, заместитель начальника испытательного центра железнодорожного транспорта «СЕКО», г. Гомель, Республика Беларусь.

Makeev Sergey – Ph.D., Deputy Head of the Test Center of Railway Transport "SECO", Gomel, Belarus.

Чепурной Анатолий Данилович – доктор технических наук, проф., директор по научно-техническому развитию «УК «РэйлТрансХолдинг», Москва;

Chepurnoy Anatoly – Doctor of Technical Sciences, prof., Director of Scientific and Technological Development "UK "RailTransHolding", Moscow.

Шейченко Роман Игоревич – главный конструктор проекта вагонов-цистерн ООО Научно-инженерный центр УК «РэйлТрансХолдинг», Мариуполь, Украина.

Sheychenko Roman – chief designer of the tank-car project at the JSC "Science Engineering Center UK" RailTransHolding", Mariupol, Ukraine.

Литвиненко Александр Витальевич – доктор технических наук, директор ООО Научно-инженерный центр УК «РэйлТрансХолдинг», Мариуполь, Украина.

Litvinenko Oleksandr – Doctor of Technical Sciences (Ph. D.), Director at the JSC "Science Engineering Center UK" RailTransHolding", Mariupol, Ukraine.

Граборов Роман Викторович – начальник группы технических расчетов ООО Научно-инженерный центр УК «РэйлТрансХолдинг», Мариуполь, Украина.

Graborov Roman – chief of technical calculations group of the JSC "Science Engineering Center UK" RailTransHolding", Mariupol, Ukraine.

Ткачук Николай Анатольевич – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедры «Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин» тел.: (057) 707-69-01; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Tkachuk Mykola Mykolayovych – doctor of technical sciences, professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head at the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Чубань Марина Александровна – аспирант каф. Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина; e-mail: s803@tmm-sapr.org.

Chuban Maryna – postgraduate student at the Department "The theory and computer aided design of mechanisms and machines", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: s803@tmm-sapr.org.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Сенько, В. И. Испытания вагона-платформы универсальной / **В. И. Сенько, С. В. Макеев, А. Д. Чепурной, Р. И. Шейченко, А. В. Литвиненко, Р. В. Граборов, Н. А. Ткачук, М. А. Чубань** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 12 (1184). – С. 71-83. – doi:10.20998/2413-4295.2016.12.10.

Please cite this article as:

Sen'ko, V., Makeev, S., Chepurnoy, A., Sheychenko, R., Litvinenko, O., Graborov, R., Tkachuk, M., Chuban, M. Testing of the universal platform car. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **12** (1184), 71-83, doi:10.20998/2413-4295.2016.12.10.

Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Сенько, В. І. Випробування вагона-платформи універсальної / **В. І. Сенько, С. В. Макеев, А. Д. Чепурний, Г. І. Шейченко, О. В. Литвиненко, Р. В. Граборов, М. А. Ткачук, М. О. Чубань** // *Вісник НТУ «ХПИ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 12 (1184). – С. 71-83. – doi:10.20998/2413-4295.2016.12.10.

АНОТАЦІЯ У статті описані три види випробувань (випробування на статичну міцність, на міцність при зіткненні, розрахунково-експериментальна оцінка опору втомі конструкції), включених в обсяг попередніх випробувань дослідного зразка вагона-платформи універсальної. За результатами випробувань встановлено, що напруження в несучих елементах конструкції вагона при квазістатичних навантаженнях і при співдарах, а також показники опору втомі конструкції вагона відповідають вимогам конструкторської документації, технічного завдання та нормативних документів.

Ключові слова: вагон-платформа універсальна, випробування, статична міцність, міцність при зіткненні, опір втомі конструкції.

Поступила (received) 01.02.2016