

А.Д. ЧЕПУРНОЙ, д-р техн. наук, проф., директор по научно-техническому развитию "УК "РТХ", Москва;
А.В. ЛИТВИНЕНКО, к.т.н., ген. директор НИЦ "УК "РТХ", Мариуполь;
Р.И. ШЕЙЧЕНКО, нач. сектора Представительства "УК "РТХ", Мариуполь;
Р.В. ГРАБОРОВ, нач. группы технич. расчетов Представительства "УК "РТХ";
М.А. ЧУБАНЬ, асп. каф. ТММ и САПР НТУ "ХПИ"

ХОДОВЫЕ ПРОЧНОСТНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ВАГОНА-ПЛАТФОРМЫ

В статье описаны методика и результаты ходовых прочностных, динамических и ресурсных испытаний вагона-платформы модели 13-9975, проведенных с целью экспериментальной проверки соответствия динамических напряжений в основных несущих элементах вагона при его движении, а также показателей качества хода требованиям нормативно-технической документации. Описана разработанная схема загрузки длиннобазного вагона-платформы, учитывающая особенности его конструкции, восприятия и передачи нагрузок при эксплуатации. Приведены и оценены показатели ходовых качеств вагона при движении с различными режимами загрузки и различными скоростями на характерных участках железнодорожного пути. Сделан вывод об удовлетворении критериев динамичности, безопасности и прочности, предъявляемых к конструкциям данного типа.

Ключевые слова: вагон-платформа, эксперимент, испытания, тензорезистор, оценка динамичности, оценка прочности, напряженное состояние, динамические параметры

Введение. Для создания надежной, долговечной и в то же время рациональной конструкции вагона наряду с расчетными исследованиями [1, 2] и исследованиями с использованием аналитических методов моделирования [3, 4] предусматриваются также и экспериментальные исследования [5, 6]. Причем проведение натурных испытаний является базовым методом для оценки конструкции.

Целью данной статьи является описание ходовых прочностных и динамических испытаний вагона-платформы для крупнотоннажных контейнеров модели 13-9975, построенный на ОАО "Новозыбковский машиностроительный завод". Задача испытаний – определить величину и характер напряжений в основных несущих элементах вагона при его движении на различных участках пути (многократное их воздействие вызывает явления, связанные с усталостью металла, что приводит к зарождению и накоплению повреждений, появлению трещин) и показатели качества хода вагона.

Общие положения. Испытания проводились для проверки соответствия вагона параметрам, значения которых регламентированы [7] в соответствии с "Методикой проведения динамико-прочностных испытаний грузового вагона" и методикой АЛВЯ.ИЦ 004 ПМ "Методика сертификационных испытаний. Определение коэффициента устойчивости колеса от схода с рельсов и коэффициента устойчивости вагона от опрокидывания", а также [8]. Технические характеристики опытного образца вагона приведены в таблице 1, общий вид рамы показан на рисунке 1.

© А.Д. Чепурной, А.В. Литвиненко, Р.И. Шейченко,
 Р.В. Граборов, М.А. Чубань, 2015



Рисунок 1 – Общий вид рамы вагона-платформы модели 13-9975

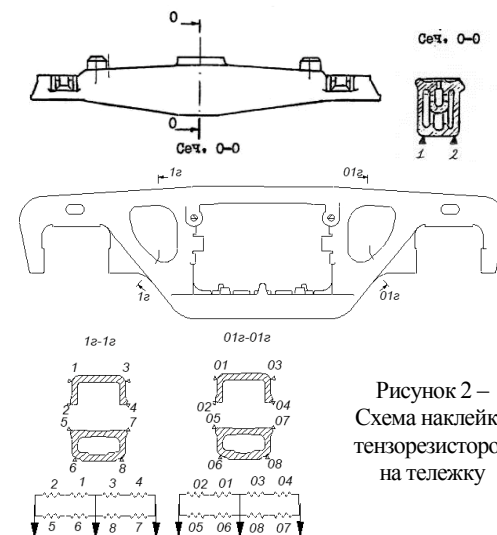


Рисунок 2 –
 Схема наклейки
 тензорезисторов
 на тележку

Таблица 1 – Краткие технические характеристики вагона-платформы

Грузоподъемность, т	70
Масса тары вагона, т	23,7±0,3
Скорость конструкционная, км/ч	120
Габарит	1-Г
База вагона, мм	19000
Длина по осям сцепления автосцепок, мм:	25690
Высота от уровня верха головок рельсов максимальная, мм	1608
Количество осей, шт.	4
Типы транспортируемых контейнеров (контейнеры ГОСТ Р51876 серии ИСО)	1AAA, 1AA, 1A, 1AX, 1BB, 1BBB, 1B, 1BX, 1CC, 1C, 1CX, 1EEE, 1EE

Для загрузки вагона-платформы до полной грузоподъемности использовались два контейнера-сухогруза типоразмера 1СС (груженые песком) массами по 5400 кг и два контейнера-цистерны типа 22Т6, модели Т-11-25Н-02 (груженые водой) массами по 29400 кг.

Для проведения ходовых испытаний тензорезисторами оборудовались две тележки, которые были подкатаны под вагон так, чтобы оборудованные стороны боковых рам тележек находились со стороны автосцепок. На шкворневой балке рамы вагона над оборудованной тележкой были установлены датчики вертикальных и горизонтальных ускорений.

Тарировка боковых сил и коэффициентов вертикальной динамики проводилась перед проведением испытаний в г. Гомеле на территории полигона ИЦ ЖТ "СЕКО" БелГУТ. Схемы расстановки тензорезисторов на боковых рамах тележек приведены на рисунке 2. Схема рас-

клейки тензорезисторов на раме вагона-платформы представлена на рисунке 3. Опытный поезд был сформирован из двух локомотивов, вагона-лаборатории и опытного образца в порожнем, а затем в грузе состояниях. Схема формирования опытного поезда приведена на рисунке 4.

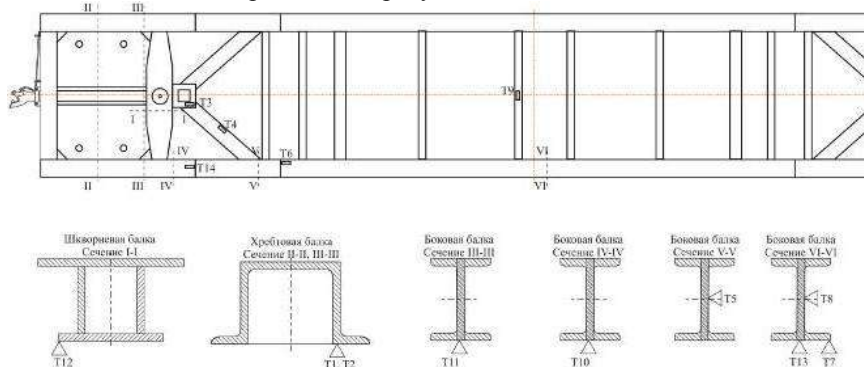


Рисунок 3 – Схема наклейки тензорезисторов на раму вагона-платформы

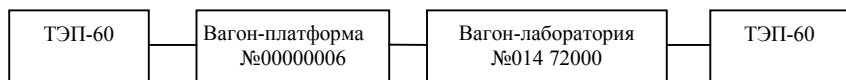


Рисунок 4 – Схема формирования опытного поезда

Ходовые динамические и ходовые прочностные испытания проводились в период с 02.06.14г. по 14.06.14г. на аттестованных участках пути Крулевщизна – Лынтупы, Крулевщизна – Парафьянов Воропаевской дистанции пути Белорусской железной дороги. Режимы движения поезда при испытаниях: на прямом участке пути – 40, 60, 80, 100, 120 км/ч; на кривой R330 со скоростями 5, 10, 20, 40, 60, 75 км/ч; на кривой R615 со скоростями 40, 60, 80, 100, 105 км/ч; на стрелочном переводе марки 1/11 со скоростями 10, 20, 30, 40 км/ч.

Регистрация измеряемых процессов согласно методикам производилась на прямых и кривых участках пути во всем проектном диапазоне допустимых эксплуатационных скоростей вплоть до конструкционной скорости. На каждом режиме движения регистрация процессов при ходовых динамических испытаниях осуществлялась при заезде в обе стороны.

Методика проведения испытания. Для выбора схемы нагружения вагона-платформы были построены эпюры изгибающих моментов, действующих на раму при ее равномерном нагружении 40-кафутовыми и 20-тифутовыми контейнерами (рисунки 5, 6). Следует отметить, что общепринятые схемы нагружения длиннобазных платформ недостаточно полно учитывают особенности поведения их в процессе эксплуатации.

Для проверки работоспособности выбранной конструктивной схемы платформы с точки зрения восприятия и передачи продольных нагрузок в эксплуатации

необходимо уделить пристальное внимание элементам конструкции, в которых имеются значительные изменения жесткостей, изменения угла действия силы и значительный объем сварных соединений.

В связи с этим была разработана схема нагружения длиннобазного вагона-платформы, учитывающая особенности его конструкции, восприятия и передачи нагрузок при эксплуатации (рисунок 7), а также опыт работ [7, 8], но лишенная недостатков традиционных схем нагружений, обеспечивающая проведение форсированных испытаний и не превышающая грузоподъемности вагона.

Разработанная схема имеет ряд преимуществ перед стандартными схемами с равномерной загрузкой контейнерами:

- максимальный изгибающий момент в средней части боковых балок рамы вагона-платформы и возможных вариантов загрузки (20-ти и 40-кафутовыми контейнерами): 1871 кН·м против 1156 кН·м и 1148 кН·м соответственно;
- зона стыковки раскоса с боковой балкой нагружена большим изгибающим моментом (753÷1003 кН·м) по сравнению со схемой загрузки 2×40' (2÷136 кН·м) и со схемой загрузки 4×20' (447÷640 кН·м);
- зоны переходного сечения боковой балки нагружены изгибающим моментом (198÷261 кН·м и

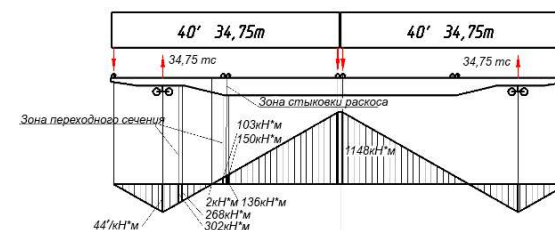


Рисунок 5 – Эпюра изгибающих моментов $M_{изг40}$ при загрузке рамы платформы двумя 40-кафутовыми контейнерами

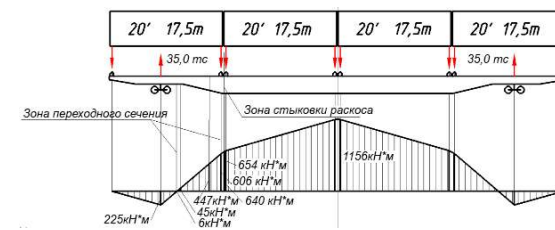


Рисунок 6 – Эпюра изгибающих моментов $M_{изг20}$ при загрузке рамы платформы четырьмя 20-тифутовыми контейнерами

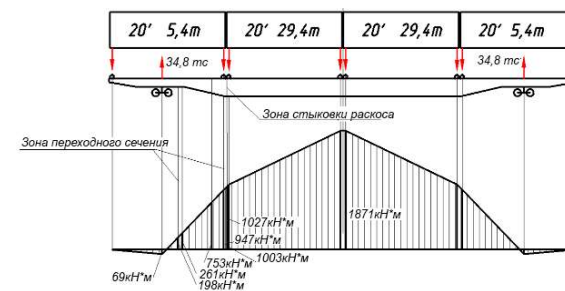


Рисунок 7 – Эпюра изгибающих моментов $M_{изг20расч}$ при загрузке рамы платформы четырьмя 20-тифутовыми контейнерами по схеме 5,4+2×29,4+5,4

947÷1027 кН·м) не менее чем при схеме 2×40` (302÷268 кН·м и 103÷150 кН·м), а также 4×20` (6÷45 кН·м и 606÷645 кН·м);

– схема не превышает грузоподъемности вагона-платформы.

Меньший изгибающий момент в шкворневом узле и консольной части и, как следствие, меньший уровень напряжений представляет меньший интерес при проведении ходовых испытаний, поскольку указанные элементы имеют типовую конструкцию, достаточную жесткость и отсутствие зон значительных концентраций напряжений и изменений углов действия силы. Кроме того, напряженно-деформированное состояние консоли было оценено во время проведения статических испытаний. Разработанная схема реализуется следующим образом (рисунок 7): в среднюю часть вагона-платформы установлены два 20-тифутовых контейнера-цистерны с водой массой 29,4 т, а на консолях – два 20-тифутовых контейнера с песком массой 5,4 т. В ходе испытаний были использованы средства измерений, занесенные в таблицу 2.

Таблица 2 – Средства измерений

Наименование определяемой характеристики (параметра)	Наименование, марка и номер (заводской или инвентарный) средства измерения
Величина напряжений в объекте испытаний	Усилитель измерительный MGCplus RU с тензорезисторами
Температура окружающей среды	Термометр метеорологический стеклянный тип ТМ-6, (-30°C - +50°C)
Массовые показатели вагона	Весы вагонные тензометрические ПУЛЬСАР ВТБ-2ДБ

Регистрация и обработка данных испытаний. Регистрация и обработка напряженного состояния и динамических параметров производилась на измерительном комплексе MGCplus. При обработке результатов испытаний для груженого и порожнего вагонов была произведена идентификация и систематизация зарегистрированных параметров в зависимости от характера пути и режимов движения опытного поезда, оценена их достоверность.

Коэффициент устойчивости колеса от схода с рельсов в прямых и кривых участках пути согласно [6] определяют по формуле

$$K_{yc} = \frac{tg\beta - \mu}{1 + \mu tg\beta} \cdot \frac{Q_{axi} \left[\frac{2(b-a_2)}{l} - K_d^n \frac{(2b-a_2)}{l} + K_d^{nn} \frac{a_2}{l} \right] + q \frac{b-a_2}{l} + \frac{r}{l} H_p}{\mu Q_{axi} \left[\frac{2(b-a_1)}{l} + K_d^n \frac{a_1}{l} - K_d^{nn} \frac{(2b-a_2)}{l} \right] + \mu q \frac{b-a_1}{l} + \left(1 - \frac{r}{l}\right) \mu H_p}$$

Здесь β – угол наклона образующей гребня колеса к горизонтальной оси; μ – коэффициент трения поверхности колес по рельсам, принимается равным 0,25; Q_{axi} – вертикальная статическая нагрузка на шейку оси колесной пары при данном режиме загрузки вагона, т; q – сила тяжести массы неподрессоренных частей, прихо-

дящихся на колесную пару, т; $2b$ – расстояние между серединами шеек оси колесной пары (для типовых колесных пар – 2,036 м); a_1, a_2 – расстояния от точек контакта колес с рельсами до середины соответствующих (набегающей и ненабегающей) шеек оси колесной пары (для типовых колесных пар и типового верхнего строения пути принимаются соответственно 0,250 и 0,210 м); l – расстояние между точками контакта колес колесной пары с рельсами (для типовых колесных пар принимается 1,58 м); r – радиус круга катания колеса (для колес по ГОСТ 9036 принимается 0,45 м); K_d^n, K_d^{nn} – коэффициент вертикальной динамики соответственно на набегающем и ненабегающем колесе $K_d^n = K_d^l$ или $K_d^n, K_d^{nn} = K_d^l$ или K_d^n (определяется исходя из результатов испытаний), значения принимаются положительными в случае обезгрузки колес; H_p – горизонтальная боковая рамная сила, Н.

Определение коэффициента устойчивости вагона от опрокидывания при движении по кривым участкам пути определяется по формуле

$$K_{yo} = \frac{K_\delta^n - K_\delta^p + 2}{K_\delta^n + K_\delta^p}, \text{ где } K_\delta^n, K_\delta^p \text{ – максимальные значения коэффициентов вер-}$$

тикальной динамики (перегрузки и разгрузки) нагруженной и обезгруженной боковой рамы тележки вагона соответственно.

Максимальные значения коэффициентов вертикальной динамики и рамных сил определялись с доверительной вероятностью 0,999, а минимальные значения коэффициентов запаса устойчивости от опрокидывания – с доверительной вероятностью не более 0,001. Все полученные показатели были систематизированы в зависимости от скорости и условий движения вагона. Осциллограммы исследуемых процессов приведены на рисунках 8-19.

Графики силовых характеристик, полученных при определении статических прогибов рессорного подвешивания и коэффициентов трения рессорных комплектов, приведены на рисунке 20.

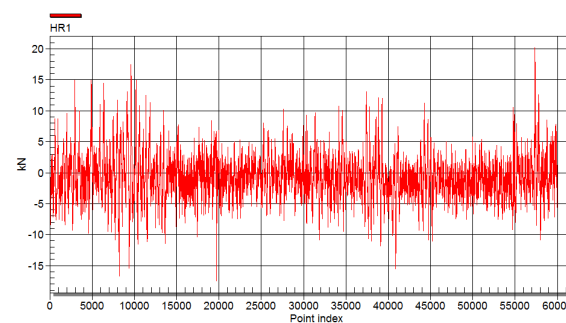


Рисунок 8 – Осциллограмма процесса HR1 при движении порожнего вагона по прямому участку пути со скоростью 60 км/ч

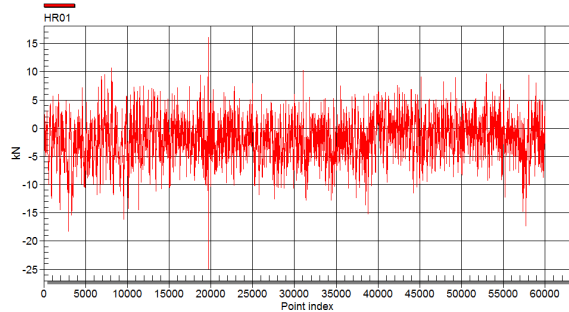


Рисунок 9 –
Осциллограмма
процесса HR01 при
движении
порожнего вагона по
прямому участку
пути со скоростью
60 км/ч

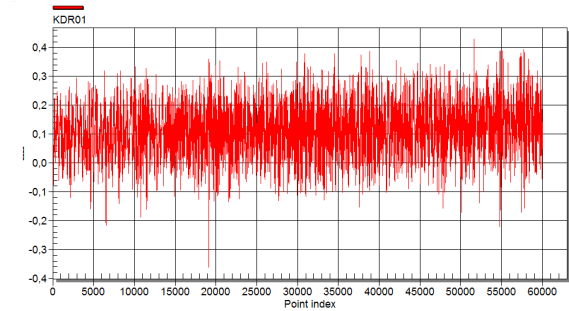


Рисунок 10 –
Осциллограмма
процесса KDR01 при
движении
порожнего вагона по
прямому участку
пути со скоростью
60 км/ч

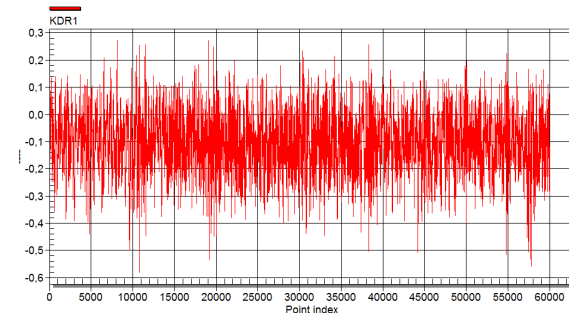


Рисунок 11 –
Осциллограмма
процесса KDR1 при
движении
порожнего вагона по
прямому участку
пути со скоростью
60 км/ч

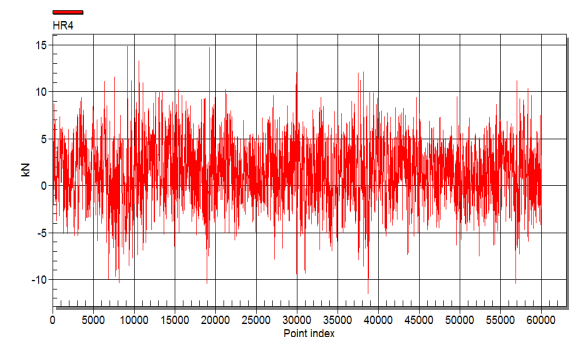


Рисунок 12 –
Осциллограмма
процесса HR4 при
движении
порожнего вагона по
прямому
участку пути со
скоростью 60 км/ч

Рисунок 13 –
Осциллограмма
процесса HR04 при
движении
порожнего вагона по
прямому
участку пути со
скоростью 60 км/ч

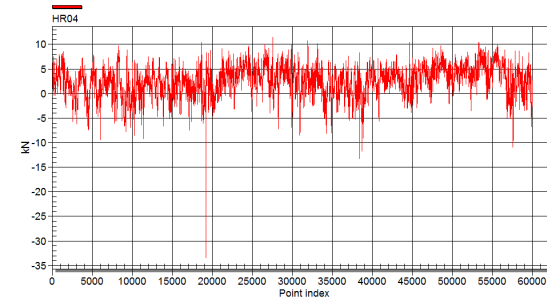


Рисунок 14 –
Осциллограмма
процесса KDR4 при
движении порожнего
вагона по прямому
участку
пути со скоростью
60 км/ч

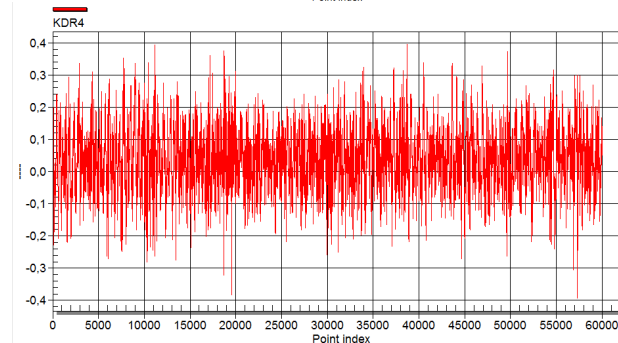


Рисунок 15 –
Осциллограмма
процесса KDR04 при
движении порожнего
вагона по прямому
участку пути со
скоростью 60 км/ч

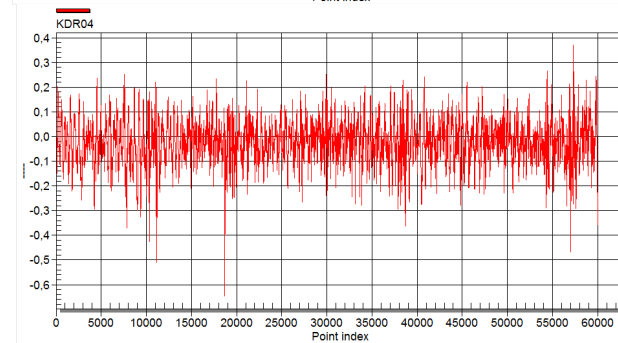


Рисунок 16 –
Осциллограмма
процесса KDB1 при
движении
порожнего вагона по
прямому участку
пути со скоростью
60 км/ч

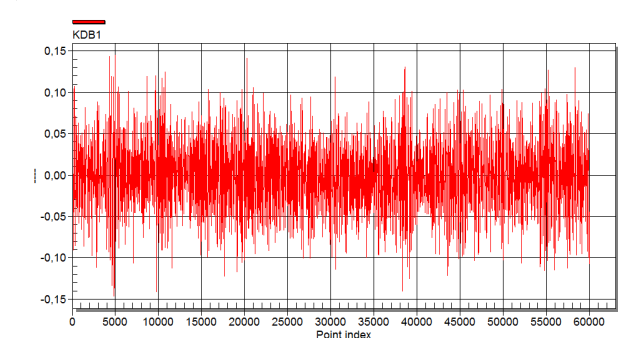


Рисунок 17 –
Осциллограмма
процесса KDB2
при движении
порожнего вагона по
прямому участку
пути со скоростью 60
км/ч

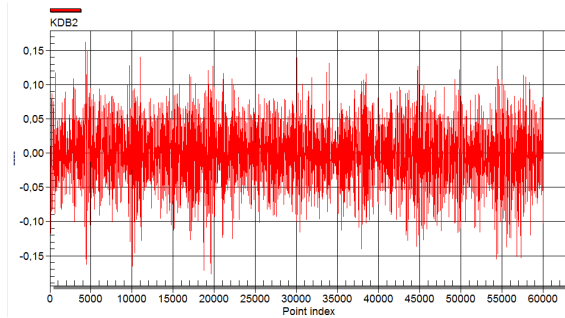


Рисунок 18 –
Осциллограмма
вертикальных
ускорений при
движении порожнего
вагона по прямому
участку пути со
скоростью 60 км/ч

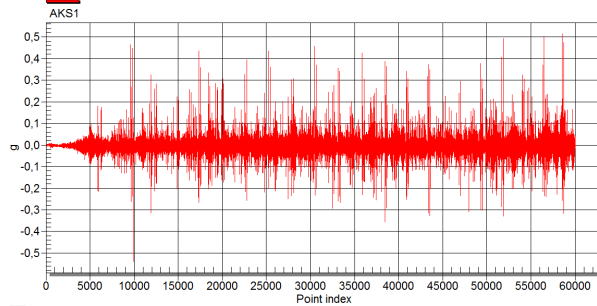
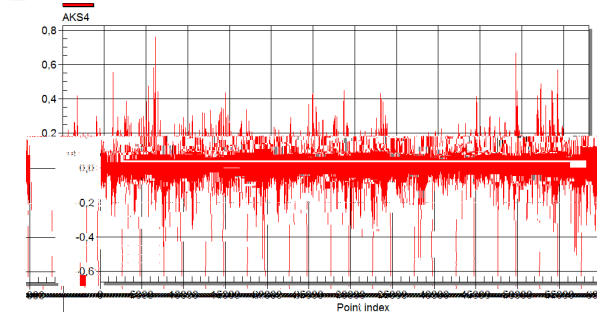


Рисунок 19 –
Осциллограмма
горизонтальных
ускорений при
движении порожнего
вагона по прямому
участку пути со
скоростью 60 км/ч



Оценка результатов испытаний. Для оценки результатов ходовых динамических испытаний максимальные значения динамических и прочностных показателей вагона-платформы модели 13-9975 в порожнем и груженом состоянии сведены в таблицы 3-6. После обработки результатов проведенных ходовых испытаний, были получены максимальные значения нормируемых показателей и сравнены с допускаемыми согласно [8].

В порожнем состоянии: $K_{\text{де кривога}} = 0,47$ (в прямой при скорости 120 км/ч), что не превышает допускаемый $[K_{\text{де кривога}}] = 0,47$; $K_{\text{де неог}} = 0,89$ (в прямой при скорости 120 км/ч), что меньше $[K_{\text{де неог}}] = 0,9$; $g_{\text{кузова верт.}} = 0,56$ (в прямой при скорости 120 км/ч) $< [g_{\text{кузова верт.}}] = 0,75$; $g_{\text{кузова гориз.}} = 0,29$ (в прямой при скорости 120 км/ч) $< [g_{\text{кузова гориз.}}] = 0,55$.

В груженом состоянии: $K_{\text{де кривога}} = 0,50$ (в кривой R330 при скорости 75 км/ч), не превышает $[K_{\text{де кривога}}] = 0,50$; $K_{\text{де неог}} = 0,80$ (в кривой R330 при скорости 75 км/ч) $< [K_{\text{де неог}}] = 0,85$; $g_{\text{кузова верт.}} = 0,65$ (в прямой при скорости 120 км/ч), что не превышает $[g_{\text{кузова верт.}}] = 0,65$; $g_{\text{кузова гориз.}} = 0,31$ (в кривой R615 при скорости 105 км/ч), меньше $[g_{\text{кузова гориз.}}] = 0,45$.

Значение коэффициентов горизонтальной динамики ($K_{\text{де}}$) определялось по формуле:

$$K_{\text{де}} = \frac{HR}{P_0}$$

Здесь HR – боковая рамная сила, действующая на колесную пару; P_0 – статическая осевая нагрузка ($P_0 = 6$ тс для порожнего вагона, $P_0 = 23,4$ тс – для груженого вагона).

Максимальные значения $K_{\text{де}}$ в порожнем состоянии были получены при движении вагона по стрелочному переводу 1/11 на скорости 40 км/ч ($K_{\text{де}} = 0,38 < [K_{\text{де}}] = 0,40$, согласно [8]), в груженом – при движении в кривой R330 при скорости 75 км/ч ($K_{\text{де}} = 0,30 < [K_{\text{де}}] = 0,38$ согласно [8]).

Коэффициенты

устойчивости колеса от схода с рельсов (K_{yc}) в прямых и кривых участках пути вычислялись путем обработки полученных данных при испытаниях на всех режимах движения согласно методике.

Максимальные значения K_{yc} были получены в порожнем состоянии при движении вагона в кривой R330 со скоростью 75 км/ч ($p = 0,001-1,32$; при допускаемых $[K_{\text{yc}}] = 1,3$, [8]), в груженом состоянии – при движении по стрелочному переводу на скорости 40 км/ч ($p = 0,001-1,36$; при допускаемых $[K_{\text{yc}}] = 1,3$, согласно [8]).

Коэффициент запаса устойчивости от бокового опрокидывания в кривых (K_{yb}) определялся для следующих случаев (таблица 7): наружу кривой $R = 615$ м при движении с максимальной скоростью 105 км/ч; внутрь кривой $R = 330$ м при движении со скоростью 10 км/ч.

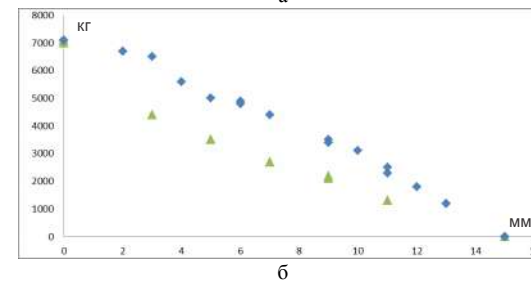
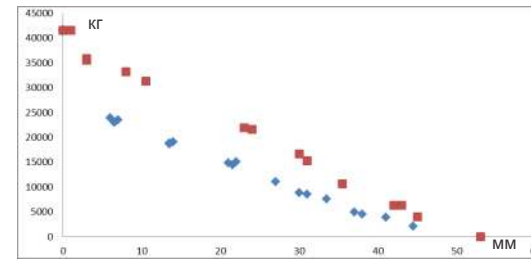


Рисунок 20 – Графики силовых характеристик при определении статического прогиба и коэффициента трения рессорного подвешивания в:
а – груженом состоянии; б – порожнем состоянии

Таблица 3 – Результаты испытаний вагона-платформы модели 13-9975 в порожнем режиме (динамические показатели)

Участок движения	Скорость, км/ч	Возврат верт	Возврат гориз	K _{об криво}	K _{об леоб}	K _{де}	K _{ус}	K _ю
	20	0,09	0,13	0,20	0,67	0,19	2,17	1,42
	40	0,24	0,14	0,25	0,74	0,19	2,09	1,36
	60	0,47	0,20	0,33	0,77	0,27	1,68	1,33
	75	0,48	0,22	0,38	0,86	0,28	1,32	1,31
Кривая R615	40	0,07	0,16	0,14	0,66	0,21	2,35	1,58
	60	0,29	0,18	0,19	0,72	0,23	2,32	1,41
	80	0,38	0,24	0,29	0,77	0,26	2,07	1,34
	100	0,40	0,27	0,32	0,79	0,28	1,83	1,32
	105	0,41	0,28	0,33	0,81	0,28	1,60	1,30
Стрелка 1/11	10	0,05	0,04	0,08	0,58	0,15	1,93	-
	20	0,13	0,13	0,18	0,69	0,27	1,93	-
	30	0,18	0,15	0,20	0,70	0,34	1,56	-
	40	0,35	0,27	0,24	0,71	0,38	1,41	-
Прямая	40	0,13	0,08	0,15	0,75	0,14	3,54	-
	60	0,22	0,14	0,22	0,78	0,17	3,16	-
	80	0,36	0,15	0,28	0,79	0,21	2,37	-
	100	0,47	0,21	0,35	0,86	0,26	2,06	-
	120	0,56	0,29	0,47	0,89	0,34	1,78	-

Таблица 4 – Значения напряжений в исследуемых точках вагона-платформы модели 13-9975 в порожнем режиме (прочностные показатели)

Скорость, км/ч	Номер датчика													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Величина напряжений, МПа													
Участок движения – прямая														
40	2	2,5	4	8	2,5	2	4	4	3	4	2,5	4	4	6
60	3	2,5	4	7	1,5	1,5	5	4	2,5	5	3	3	4	5
80	3	2,5	6	9	2	1,5	6	5	4,8	6	3	5	4	8
100	2	2,5	6	7	2,5	1,5	7	5	3	5	3	4	4,5	7
120	1,5	2,5	6	7	2	1,5	7	4	4	4,5	3	4	6	7
Участок движения – кривая R615														
40	2	2	6	13	2	1	4	2	2	6	2	5	3	8
60	2	2	8	15	2	2	4,5	2,5	2,5	8	2	6	4	11
80	2	2	6	15	2	1,5	6	3,5	3,5	8	3	6	4	11

Окончание таблицы 4

Скорость, км/ч	Номер датчика													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Величина напряжений, МПа													
Участок движения – кривая R615														
100	1,5	2	6	15	2	1,5	6	3,5	2,5	8	2	5	4	10
105	1,5	2	6	11	1,5	1,5	9	5	4	7	2,5	4	4,5	10
Участок движения – кривая R330														
10	2,6	2,4	7	16	3,5	1,5	2,7	2	1,5	9	2	7	2	12
20	3	3	6	15	2,5	1,5	3,5	2,8	1,7	8	2,4	6	3	12
40	3,2	3,4	6,3	15,5	2,6	1,5	4,7	3,2	2,3	7	2,6	7	4	10
60	3	3	10	18,4	2,7	1,5	5,5	3,8	3	10	3	7,3	4,5	12
75	2,5	3,7	8	15	2,5	1,5	6	4,2	3,1	8	3,5	6	4,5	13
Участок движения – стрелка 1/11														
10	2	1	4	8	2	0,5	3	3	1,5	4,3	2	3,5	2	5,5
20	2	2	4	8	2	2	3,5	3,5	1,9	4,1	3,5	4	2,1	5
30	2,5	2	5,5	6	1,5	1	4	3	1,7	4	2	3	2,5	5
40	2,5	2,5	6	8	2	1,5	5	2,4	2	5	2	4	3,5	6
10	2	1	4	8	2	0,5	3	3	1,5	4,3	2	3,5	2	5,5

Таблица 5 – Результаты испытаний вагона-платформы модели 13-9975 в груженом режиме (динамические показатели)

Участок движения	Скорость, км/ч	Возврат верт	Возврат гориз	K _{об криво}	K _{об леоб}	K _{де}	K _{ус}	K _ю
	20	0,20	0,13	0,18	0,46	0,12	1,96	2,10
	40	0,46	0,14	0,19	0,59	0,13	1,90	1,65
	60	0,53	0,16	0,35	0,79	0,23	1,86	1,33
	75	0,58	0,25	0,50	0,80	0,30	1,37	1,30
Кривая R615	40	0,10	0,15	0,11	0,28	0,13	2,05	2,86
	60	0,37	0,14	0,18	0,37	0,17	1,87	2,66
	80	0,51	0,16	0,24	0,45	0,18	1,67	2,14
	100	0,59	0,27	0,25	0,6	0,21	1,65	1,90
	105	0,60	0,31	0,23	0,63	0,25	1,55	1,65
Стрелка 1/11	10	0,29	0,04	0,08	0,37	0,12	2,10	-
	20	0,35	0,06	0,10	0,43	0,15	1,81	-
	30	0,40	0,08	0,09	0,47	0,18	1,60	-
	40	0,59	0,17	0,13	0,50	0,25	1,36	-

Окончание таблицы 5

Участок движения	Скорость, км/ч	$\sigma_{\text{буловый верт}}$	$\sigma_{\text{буловый гориз}}$	$K_{\text{об кузов}}$	$K_{\text{об телеб}}$	$K_{\text{об}}$	$K_{\text{ус}}$	$K_{\text{уо}}$
Прямая	40	0,24	0,06	0,07	0,35	0,09	2,27	-
	60	0,32	0,08	0,14	0,36	0,13	1,98	-
	80	0,54	0,11	0,20	0,43	0,16	1,70	-
	100	0,6	0,13	0,20	0,42	0,17	1,58	-
	120	0,65	0,15	0,28	0,49	0,18	1,47	-

Таблица 6 – Значения напряжений в исследуемых точках вагона-платформы модели 13-9975 в груженом режиме (прочностные показатели)

Скорость, км/ч	Номер датчика													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Величина напряжений, МПа													
	Участок движения – прямая													
40	4,8	5,5	10	9	3,5	2,8	10	6	4,2	11	8,5	7,5	12	8
60	5	5,5	10	10	4,2	4	20	13	3	13	10	13	16	14
80	4,8	6	9,5	12	5	7	26	15	2,5	14	10	20	30	24
100	5	6	10	14	6	7,5	28,5	15	6	10	10	16	30	18
120	4,2	7	15	15	5,6	7,5	28	20	7	18	14	16	28	20
	Участок движения – кривая R615													
40	3,5	3,5	5	7	6,5	3,5	14	13	2,8	14,5	11,5	14	8	6
60	4,2	6,5	8,5	10	5	6,5	21	12	1,4	12	9	11	16	16
80	3,8	6	10	12	5	7	28,1	15	2	16	11	20	20	22
100	4,5	5	15	10	7,5	8,2	29,2	20	2,5	15	11	15	29,8	25
105	5	6	15	13	7	8	29,6	22	5	16	12	16	20	25
	Участок движения – кривая R330													
10	2,8	6	7	11,5	7,5	2,4	6,5	7,8	1,9	13	9,0	9	8,5	6,2
20	4,6	6	12	13,5	10	3,5	22	12,8	2,8	14	10	10	10	11
40	3	5	10	9,5	4,5	3	8	6	2,5	15	11	10	10	9
60	4	5	10	10	4,4	4	19	15	2	13	11	15	14	15
75	4	7,5	12	11	8,4	6,8	27	23	5,5	13	12	10	15	16
	Участок движения – стрелка 1/11													
10	2	3,6	8	6	3	2	4	3	1,1	8	6	7	6	6
20	4,5	4	8	6	4	2,3	14	7	2	10	7	8	10	7,5
30	3,4	4	7,5	8	4,5	2,3	13	8,2	3,5	9,5	7,5	9,5	12	10
40	3,3	5	10	8	4,8	3	11	7	2	9,5	7	8	10	11
40	4,8	5,5	10	9	3,5	2,8	10	6	4,2	11	8,5	7,5	12	8

Таблица 7 – Коэффициент запаса устойчивости от опрокидывания

Показатель	Наружу кривой (R=615 м) v=105км/ч		Внутри кривой (R=330 м) v=10км/ч	
	Режим			
	порожний	груженный	порожний	груженный
$K_{\text{уо}}$	1,30 ([$K_{\text{уо}}$]=1,3, [8])	1,65 ([$K_{\text{уо}}$]=1,3, [8])	1,33 ([$K_{\text{уо}}$]=1,2, [8])	2,56 ([$K_{\text{уо}}$]=1,2, [8])

Таблица 8 – Максимальные напряжения в элементах рамы вагона-платформы

Элемент	Точка	Максимальные динамические напряжения, МПа		Статические напряжения от веса груза, МПа	Нормативное значение, МПа
		Порожний	Груженный		
Хребтовая балка	1	3,2	5,0	4,6	210
Хребтовая балка	2	3,7	7,5	-10,2	210
Сочленение хребтовой и раскоса	3	10,0	15,0	27,5	210
Раскос	4	18,4	15,0	-20	210
Сочленение боковой балки и раскоса	5	3,5	10,0	58	210
Боковая балка	6	2,0	8,2	62,9	190
Боковая балка	7	9,0	29,6	108,2	190
Боковая балка	8	5,0	23,0	-8,2	210
Поперечная вспомогательная балка	9	4,8	7,0	8,5	205
Боковая балка	10	10,0	18,0	19,1	190
Боковая балка	11	3,5	14,0	-8,5	190
Шкворневая балка	12	7,3	20,0	-18,6	210
Боковая балка	13	6,0	30,0	103,8	190
Боковая балка	14	13	20,0	-54	190

Таблица 9 – Значения напряжений в исследуемых точках вагона-платформы модели 13-9975 в груженом режиме по схеме загрузки 2×40' (34,75т–34,75т)

Скорость, км/ч	Номер датчика													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Величина напряжений, МПа													
	Участок движения – прямая													
40	33	35,7	10	1,3	0,5	0,7	6	3,6	4,2	11,3	55,2	7,5	7,2	8,3
60	34,4	35,7	10	1,5	0,6	1	12	7,8	3	13,4	64,9	13	9,6	14,4
80	33	39	9,5	1,8	0,7	1,7	15,6	9	2,5	14,4	64,9	20	18	24,7
100	34,4	39	10	2,1	0,9	1,8	17,1	9	6	10,3	64,9	16	18	18,5
120	28,9	45,5	15	2,2	0,8	1,8	16,8	12	7	18,5	90,9	16	16,8	20,6

Окончание таблицы 9

Скорость, км/ч	Номер датчика													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Величина напряжений, МПа													
Участок движения – Кривая R615														
40	24,1	22,8	5	1,1	0,9	0,9	8,4	7,8	2,8	14,9	74,7	14	4,8	6,2
60	28,9	42,2	8,5	1,5	0,7	1,6	12,6	7,2	1,4	12,4	58,4	11	9,6	16,5
80	26,2	39	10	1,8	0,7	1,7	16,8	9	2	16,5	71,4	20	12	22,6
100	31	32,5	15	1,5	1,1	2	17,5	12	2,5	15,4	71,4	15	17,8	25,7
105	34,4	39	15	1,9	1	2	17,7	13,2	5	16,5	77,9	16	12	25,7
Участок движения – Кривая R330														
10	19,3	39	7	1,7	1,1	0,6	3,9	4,7	1,9	13,4	58,4	9	5,1	6,4
20	31,7	39	12	2	1,4	0,9	13,2	7,7	2,8	14,4	64,9	10	6	11,3
40	20,7	32,5	10	1,4	0,7	0,8	4,8	3,6	2,5	15,4	71,4	10	6	9,3
60	27,5	32,5	10	1,5	0,6	1	11,4	9	2	13,4	71,4	15	8,4	15,4
75	27,5	48,7	12	1,6	1,2	1,7	16,2	13,8	5,5	13,4	77,9	10	9	16,5
Участок движения – Стрелка 1/11														
10	13,8	23,4	8	0,9	0,5	0,5	2,4	1,8	1,1	8,3	39	7	3,6	6,2
20	31	26	8	0,9	0,6	0,6	8,4	4,2	2	10,3	45,5	8	6	7,7
30	23,4	26	7,5	1,2	0,7	0,6	7,8	4,9	3,5	9,8	48,7	9,5	7,2	10,3
40	22,7	32,5	10	1,2	0,7	0,8	6,6	4,2	2	9,8	45,5	8	6	11,3
40	33	35,7	10	1,3	0,5	0,7	6	3,6	4,2	11,3	55,2	7,5	7,2	8,3

Таблица 10 – Амплитуды напряжений условного симметричного цикла $\sigma_{a,3}$ для двух неблагоприятных режимов загрузки

Элемент	Точка	$\sigma_{a,20}$, МПа	$\sigma_{a,40}$, МПа
Хребтовая балка	1	2,68	4,34
Хребтовая балка	2	3,46	5,52
Хребтовая балка. Сочленение с раскосом	3	6,80	6,80
Раскос	4	9,60	5,85
Боковая балка. Сочленение с раскосом	5	2,56	1,56
Боковая балка	6	4,88	3,45
Боковая балка	7	21,56	18,97
Боковая балка	8	7,33	6,45
Поперечная вспомогательная балка	9	5,21	5,21
Боковая балка	10	7,55	7,61
Боковая балка	11	6,31	10,07
Шкворневая балка	12	11,16	11,15
Боковая балка	13	23,55	20,72
Боковая балка	14	11,89	11,98

Результаты максимальных динамических напряжений при ходовых прочностных испытаниях приведены в таблице 8. Из таблицы 8 видно, что максимальные значения динамических напряжений в элементах рамы вагона-платформы в порожнем режиме не превышают 18,4 МПа, в груженом режиме – 30,0 МПа, а максимальные статические напряжения не превышают 108,2 МПа в порожнем режиме и 210,0 МПа – в груженом.

Анализ прочности конструкции различных схем погрузки длиннобазной платформы позволил выявить наиболее неблагоприятные с точки зрения изгибающих моментов и напряжений зоны. Применительно к рассматриваемой длиннобазной платформе наиболее опасными зонами являются средняя и консольная части в зоне переменного сечения боковых балок. Расчетные значения динамических напряжений в исследуемых точках вагона-платформы модели 13-9975 в груженом режиме для схемы загрузки двумя 40-кафутовыми контейнерами (34,75т–34,75т) представлены в таблице 9.

Результаты расчета амплитуды напряжений условного симметричного цикла для двух наиболее неблагоприятных схем загрузки (20-тифутовыми контейнерами (5,4т–29,4т–29,4т–5,4т) и 40-кафутовыми контейнерами (34,75т–34,75т)) приведены в таблицах 10, 11.

Приведенную амплитуду динамического напряжения, эквивалентную по повреждающему действию распределению амплитуд напряжений за расчетный срок службы конструкции, определяют по формуле:

$$\sigma_{a,3} = m \sqrt{\frac{T_p \cdot f_s}{N_c} \cdot \sum_{j=1}^n K_{yч_j} \cdot \sum_{vi}^{K_{vi}} P_{vi} \cdot \sum_{ai}^{K_{ai}} \sigma_{ai}^m \cdot P_{\sigma i}}$$

где m – показатель наклона левой ветви кривой усталости (для сварных вагонных конструкций из углеродистых и низколегированных сталей $m = 4$);

$T_p = 365 \cdot 10^3 \frac{L_c}{V} \cdot T_k$ – суммарное время действия динамических нагрузок за расчетный срок службы, с (где $L = 126$ км – проектный среднесуточный пробег груженого вагона; $V = 22,4$ м/с – проектная средняя техническая скорость движения вагона (для вагонов с конструкционной скоростью 120 км/ч); $T_k = 32$ года – проектный срок службы конструкции; $f_s = 2,16$ Гц – эффективная частота процесса изменения динамических нагрузок, определенная по результатам сбрасывания вагона с клиньев; $N_0 = 10^7$ циклов – базовое число циклов динамических напряжений; $K_{yч_j}$ – средняя доля протяженности характерных участков пути в общей длине железных дорог ($K_{yч_1} = 0,75$ для прямых участков, $K_{yч_2} = 0,23$ для кривых участков, $K_{yч_3} = 0,02$ для стрелочных переводов); P_{vi} – доля времени, приходящаяся на эксплуатацию в i -том диапазоне скоростей, величины P_{vi} для различных типов подвижного состава принимают согласно [7]; K_{vi} – принятое число диапазонов скоро-

стей; σ_{vi} – уровень амплитуды динамических напряжений; P_{ci} – вероятность появления амплитуд с уровнем σ_{vi} в i -том диапазоне скоростей движения вагона; K_{ci} – принятое число разрядов амплитуд напряжений.

Таким образом, максимальное значение амплитуды напряжений условного симметричного цикла $\sigma_{a,3}$ составляет – 23,55 МПа.

Экспериментальным методом была проведена трехкратная проверка работоспособности механизма поворота автосцепки и сцепляемости испытуемого вагона в кривых на скорости движения 5–8 км/ч, исходя из которой, был сделан вывод о том, что устройство работает нормально. Поворот автосцепки и механическое соединение автосцепок было выполнено в кривой R=330 м.

Таблица 11 – Амплитуды напряжений условного симметричного цикла $\sigma_{a,3}$ для двух неблагоприятных режимов загрузки по основным элементам

Элемент	Точка	$\sigma_{a,20}$, МПа	$\sigma_{a,40}$, МПа
Хребтовая балка	1	2,68	4,34
Раскос	4	9,60	5,85
Поперечная вспомогательная балка	9	5,21	5,21
Шкворневая балка	12	11,16	11,15
Боковая балка. Консольная часть	14	11,89	11,98
Боковая балка. Средняя часть	13	23,55	20,72

Коэффициент относительного трения соответствует ГОСТ 9246: в груженом состоянии 0,087, допускаемое [0,08–0,12]; в порожнем состоянии 0,11, допускаемое [0,10–0,16]. Максимальный угол поворота надрессорной балки относительно боковой рамы тележки вагона был получен при скорости движения 100 км/ч груженого состава в кривой R 615 и составил 0,920°. Статический прогиб рессорного подвешивания под тарой составил 15 мм, под максимально допустимой нагрузкой брутто 53 мм.

Выводы. Таким образом, были проведены экспериментальные исследования опытного образца вагона-платформы, которые являются одним из основных этапов отработки конструкции вагона и позволяют оценить его прочностные и динамические качества. На основании их результатов был сделан вывод о соответствии четырехосного вагона-платформы для крупнотоннажных контейнеров модели 13-9975 требованиям норм [7] и [8].

Список литературы: 1. Вершинский С. В. и др. Расчет вагонов на прочность. Изд 2-е. Под ред. Л. А. Шадура. – М.: Машиностроение, 1971. – 432 с. 2. Зайцев К. Л. Расчет статически неопределимых стержневых систем методом сил: Учебное пособие. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 1998. – 54 с. 3. Орлов Е. А. Моделирование воздействия эксплуатационных нагрузок на рамы тепловозов: методы, модели, специализированная САПР// Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. вип. „Машиноведение и САПР”. – 2006. – №24. – С.103-112. 4. 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. 5. В.Г. Сударев, К.В. Кляк, Д.И. Загорский. "Разработка и испытания на сопротивление усталости вагона-платформы для контейнеров модели 13-3115-01". Тяжелое машиностроение. 2010. №1 С. 31-34. 6. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы

испытаний на прочность и ходовые качества: РД 24.050.37-95.-М.:ГосНИИВ, 1995.-102 с. 7. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ВНИИЖТ-ГосНИИВ, 1996. – 319 с. 8. НБ ЖТ ЦВ 01-98 "Вагоны грузовые железнодорожные. Нормы безопасности". – М.:ВНИИЖТ-ГосНИИВ, 1998. – 14 с.

Bibliography (transliterated): 1. Vershinskij S. V. i dr. Raschet vagonov na prochnost'. Izd 2-e. Pod red. L. A. Shadura. – Moscow: Mashinostroenie, 1971. – 432 p. 2. Zajcev K. L. Raschet staticheski neopredelimiye sterzhnevyyh sistem metodom sil: Uchebnoe posobie. – Arhangel'sk: Izd-vo AGTU, 1998. – 54 p. 3. Orlov E. A. Modelirovanie vozdeystviya jekspluatacionnyh nagruzok na ramy teplovozov: metody, modeli, speciali-zirovannaja SAPR// Visnik NTU "KhPI". – 2006. – No. 24. - P. 103-112. 4. Tkachuk N.A., Gricenko G.D., Chepumoj A.D., Orlov E.A., Tkachuk N.N. Konechno-jelementnye modeli jelemen-tov slozhnyh mehanicheskikh sistem: tehnologija avtomatizirovannoj generacii i parametrizovannogo opisaniya // Mehanika ta mashinobuduvannja. – 2006. – No 1. – P.57-79. 5. Sudarev V.G., Kjjakk K.V., Zagor-skij D.I. Razrabotka i ispytaniya na soprotivlenie ustalosti vagona-platfomy dlja kontejnerov modeli 13 3115 01. Tjazheloe mashinostroenie. 2010. – No 1. – P. 31 34. 6. Vagony gruzovye i passazhirskie. Metody ispytanij na prochnost' i hodovye kachestva: RD 24.050.37-95.-M.:GosNIIV, 1995.-102 p. 7. Normy dlja rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznyh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnyh). – Moscow: VNIIZhT-GosNIIV, 1996. – 319 p. 8. NB ZhT CV 01-98 "Vagony gruzovye zheleznodorozhnye. Normy bezopasnosti". – Moscow:VNIIZhT-GosNIIV, 1998. – 14 p.

Поступила (received) 04.06.2015