

УДК 539.3: 629.4: 629.45.023.14

Сенько В.И., д-р техн. наук; Макеев С.В., канд. техн. наук; Чепурной А.Д., д-р техн. наук; Литвиненко А.В., д-р техн. наук; Шейченко Р.И.; Граборов Р.В.; Ткачук Н.А. д-р техн. наук; Чубань М.А.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСШИРЕННЫХ ПРОЧНОСТНЫХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ДЛИННОБАЗНЫХ ПЛАТФОРМ

Введение. В настоящее время контейнерные перевозки грузов являются основной составляющей транспортных потоков как морским путем, так и по автомобильным и железнодорожным магистралям. Контейнерные перевозки практически незаменимы для фирм, доставляющих продукцию большими партиями, поскольку позволяют оптимизировать логистику, а также прогнозировать затраты на транспортные услуги.

Одним из звеньев цепи таких интермодальных перевозок является транспортировка контейнеров железнодорожным транспортом с использованием специализированных и универсальных вагонов-платформ. При этом, в условиях постоянно растущих объемов грузоперевозок, экономически целесообразно использовать платформы, рассчитанные на перевозку одновременно двух 40-футовых или четырех 20-футовых контейнеров, в отличие от широко применяемых на сети железных дорог 40-футовых вагонов-платформ, позволяющих перевозить только один 40-футовый контейнер или два 20-футовых. Это дает возможность при равном количестве перевозимых контейнеров двумя составами, состоящими из 40-футовых и 80-футовых вагонов-платформ, использовать в последнем вдвое меньшее количество вагонов, что, соответственно, уменьшает затраты перевозчиков на обслуживание вагонов, выполнение деповских и капитальных ремонтов, а также обеспечивает снижение тарифных расходов. При проектировании длиннобазных вагонов-платформ особое внимание требуется уделять не только решению вопросов статической прочности конструкции, но и обеспечению ее усталостной прочности, поскольку условия динамического нагружения 80-футовых вагонов-платформ существенно более "жесткие", чем для стандартных 40-футовых вагонов-платформ.

В настоящей статье рассмотрены результаты ходовых прочностных и динамических испытаний вагона-платформы модели 13-9975 [1, 2], проект которой разработан Научно-инженерным центром (НИЦ) Управляющей Компании "РэйлТрансХолдинг" (УК "РТХ") (г. Мариуполь) [<http://railtrnsholding.com>]. Опытный образец изделия изготовлен в ОАО "Новозыбковский машиностроительный завод" (г. Новозыбков, РФ) [<http://www.nvzm.ru>], входящем в структуру УК "РТХ" [<http://railtrnsholding.com>]. Общий вид и характеристики вагона-платформы мод.13-9975 приведены на рис. 1 и в табл. 1.

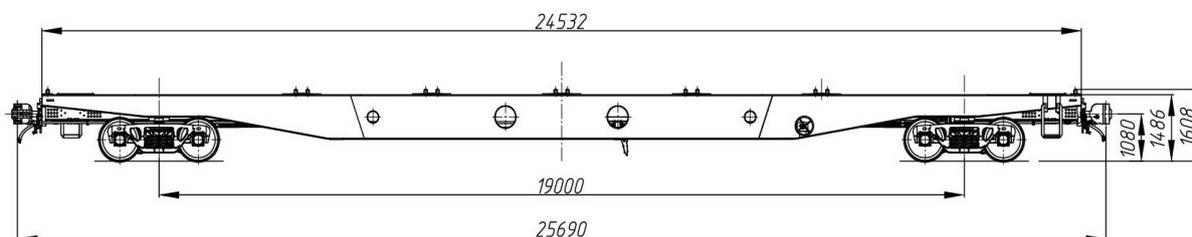


Рис. 1. Основные габаритные размеры вагон-платформы мод.13-9975

Ходовые динамические и прочностные испытания для подтверждения правильности выбранных конструктивных решений и технологии изготовления вагона-платформы проводились с учетом территориальной близости к заводу-изготовителю на специализированном аттестованном участке пути Белорусской железной дороги испытательным центром (ИЦ) "СЕКО" (ИЦ ЖТ "СЕКО") – первого в Республике Беларусь ИЦ железнодорожного транс-

© В.И. Сенько, 2015

порта, созданного по поручению Совета Министров Республики Беларусь и входящего в состав структурных подразделений ведущего технического университета республики – Белорусском государственном университете транспорта (УО "БелГУТ", г. Гомель). ИЦ ЖТ "СЕКО" [<http://www.belsut.gomel.by>] имеет аккредитацию российского Регистра сертификации на федеральном железнодорожном транспорте и внесен в Единый реестр органов по сертификации и испытательных лабораторий Таможенного союза.

Таблица 1

Технические характеристики вагона-платформы мод. 13-99975

Грузоподъемность, т	70
Масса тары вагона максимальная, т	24
Скорость конструкционная, км/ч	120
Габарит	1-Г
Нагрузка: статическая осевая, кН (тс)	230,5(23,5)
погонная, кН/м (тс/м)	35,89 (3,66)
База вагона, мм	19000
Длина, мм:	
по осям сцепления автосцепок	25690
по концевым балкам рамы	24530
Ширина максимальная, мм	3062
Количество осей, шт.	4
Модель тележки, ГОСТ 9246	тип 2
Высота от УГР, мм:	
максимальная/ до уровня пола	1608/1486
Количество упоров, шт.	20

Постановка задачи. Необходимо отметить, что конечной целью комплекса сертификационных испытаний, проводимых на конечных стадиях создания новых перспективных образцов грузового подвижного состава, является подтверждение соответствия их ходовых, прочностных и динамических характеристик требованиям действующим нормам [3-5]. Соответственно, организация и проведение этих испытаний осуществляется в сертификационных ИЦ. В то же время, кроме выполнения своей базовой задачи, понимаемой в узком смысле как прочностные испытания, эти центры могут выполнять свои функции в объемах, понимаемых в более широких пределах.

Действительно, проводимые комплексы ходовых, прочностных и динамических испытаний регламентированы выше-

упомянутыми методиками и документами [3-5]. В то же время они задают, так сказать, только нижнюю границу объема испытаний, минимальный объем информации и необходимый набор результирующих выводов. При этом не существует ограничений "сверху" на объем проводимых исследований. Таким образом, параллельно с минимально необходимым объемом испытаний и результатов, предписываемым существующими методиками, можно получить дополнительный объем информации. Это – первое направление развития традиционных подходов. Оно заключается в получении максимально возможного объема исследовательской информации при единичных испытаниях того или иного образца изделия. Другое, не менее важное направление, – анализ, систематизация и обобщение большого объема исследовательской информации, накопленной при проведении испытаний серии изделий. Естественно, что и первое, и второе из отмеченных направлений исследований требует согласования методологии проводимых работ уже на первых этапах подготовки к их проведению. Более того, стремление к получению как можно большего объема информации должно быть заложено в практику функционирования испытательных центров. В частности, деятельность ИЦ ЖТ "СЕКО" подчинена как раз такой системе критериев. Очевидно, что внедрение предложенных подходов к исследованиям образцов подвижного состава железных дорог (ПСЖД) не может быть в достаточной мере эффективным без привлечения такого же подхода со стороны заказчиков, проектантов и производителей тех или иных изделий. С этой точки зрения подходы, заявленные фирмой "РэйлГрансХолдинг", научно-инженерным центром УК "РТХ", ОАО "Новозыбковский машиностроительный завод" и реализованные в их деятельности, нашли полное соответствие всей стратегии исследований, понимаемой как целостный комплекс взаимосогласованных действий для обеспечения технических характеристик образцов ПСЖД.

Целью данной статьи является методологическое обоснование стратегии взаимосогласования при осуществлении, с одной стороны, регламентированно необходимых испыта-

ний, а, с другой, – желательных дополнительных исследований объектов ПСЖД.

Анализ состояния проводимых исследований. В странах СНГ существует целая сеть сертифицированных центров, уполномоченных проводить испытания и исследования объектов ПСЖД [www.sovetgt.org/ed/upload-files/doc/Reestr20150206]. При этом и на этапе сертификации самих этих центров, и на этапе проведения ими своей основной деятельности они руководствуются рядом нормативных документов [3-5]. Это является положительным моментом, т.к. способствует обеспечению получения в достаточной степени объективных данных при возможности повторяемости в случае проведения тех же действий другими центрами.

Отдельные аспекты традиционной методологии исследований описаны, использованы и развиты в ряде работ [6-13]. Они опираются в основном на базовые принципы расчетов и измерений, заложенные в нормативных документах [3-5]. Однако в таком традиционном подходе существуют несколько моментов, требующих своего развития. Во-первых, это способы нагружения испытываемого объекта. Они регламентируемы, так сказать, "интегрально": по общей весовой нагрузке, по скоростным характеристикам, по максимальным эксплуатационным напряжениям в элементах конструкции и т.д. В связи с этим и испытания, как правило, производятся в условиях, предписываемых требованиями, но на минимальном регламентируемом уровне. Во-вторых, это требования к прочностным характеристикам: они определяются, как правило, по максимальным эксплуатационным напряжениям в элементах конструкции. В то же время достаточно часто игнорируется общая картина напряженно-деформированного состояния (НДС) во всей исследуемой конструкции. В-третьих, это вид конечного результата. Он традиционно отвечает на вопрос, соблюдены или нет предъявляемые требования при заданных условиях испытаний, однако не нацелен на определение чувствительности контролируемых характеристик к варьированию проектных, технологических или эксплуатационных характеристик.

Таким образом, традиционная методика не позволяет раскрыть все потенциальные возможности проводимых сертификационных испытаний, и требуется развитие устоявшихся подходов ко всему комплексу исследований, осуществляемых на этапах освоения и постановки на производство новых образцов подвижного состава железных дорог.

Предлагаемый подход к проведению испытаний объектов подвижного состава железных дорог. На основе анализа устоявшейся практики взаимодействия ИЦ ЖТ "СЕКО", группы предприятий фирмы "РэйлТрансХолдинг", научно-инженерного центра УК "РТХ", ОАО "Новозыбковский машиностроительный завод", научно-исследовательского центра компьютерного моделирования машиностроительных конструкций "Тензор" НТУ "ХПИ" предлагается новый подход к проведению испытаний, исследований и совершенствования конструкций перспективных объектов ПСЖД. Он состоит из нескольких частей.

Математическая формализация поставленной задачи базируется на распространении методологии обобщенного параметрического моделирования [14] на исследуемый объект, являющийся не только испытываемым конкретным изделием. Под объектом в широком смысле понимается набор (множество) обобщенных параметров p_i , описывающих и конструкцию, и условия нагружения, и особенности технологии изготовления, структуру и свойства расчетных и численных моделей исследуемых изделий, а также другие варьируемые величины, структуры и распределения, которые в совокупности однозначно идентифицируют все типы моделей исследуемых объектов. Такой подход при фиксированных обобщенных параметрах является реализацией традиционного подхода, в частности, к проведению испытаний объектов ПСЖД. Однако принципиальным его преимуществом является как раз возможность варьирования одного, нескольких или всех обобщенных параметров. Благодаря этому новому качеству обеспечивается потенциальная возможность организации многовариантных расширенных исследований, а с опорой на них, – обоснование тех наборов параметров, на которых достигается удовлетворение всем предъявляемым нормативным требованиям, а так-

же дополнительным. Именно это составляет основу конкурентного преимущества для разработчика новых перспективных изделий, поскольку при наличии установленных ограничений на контролируемые их характеристики возникает возможность удовлетворения и другим критериям: экономичность, технологичность, унификация, трудоемкость и т.п.

Необходимо заметить, что предлагаемый подход, помимо всего прочего, обладает методологической гибкостью, т.к. обеспечивает пополнение множества варьируемых обобщенных параметров (или его уменьшение) из соображений значимости, важности или чувствительности объекта на их варьирование. В результате получаем инструмент решения не только задач анализа, но и синтеза рациональных технических решений. При этом, что особенно важно, задачи синтеза с использованием обобщенного параметрического моделирования естественным образом расширяются на оперирование с нечеткими множествами свойств, характеристик и параметров. Этим самым, в свою очередь, обеспечивается получение решения, устойчивого к флуктуациям, варьированию или изменению: свойств материалов, величины нагрузок, скоростных режимов, проектных и технологических параметров и т.п. А уже это гарантированно обеспечивает выполнение требований не только опытными образцами испытываемых изделий, но и всеми серийными изделиями, отличающимися каждый друг от друга и от "эталонного" изделия, а также эксплуатируемых в разнообразных условиях.

Таким образом, имеем дело со следующей постановкой:

– процессы и состояния, реализованные в исследуемом объекте, описываются в операторном виде:

$$L(p, u, f, t) = 0; \quad (1)$$

здесь L – оператор соответствующей задачи, $p = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ – массив обобщенных параметров, u – переменные, характеризующие состояние исследуемого объекта (например, распределение перемещений или напряжений), f – массив внешних нагрузок, а t – время;

– контролируемые характеристики $h_k(u) \leq [h]_k, k = 1, 2, \dots, N_n; \quad (2)$

здесь $\{h_1, h_2, \dots, h_{N_k}\} = H$ – массив характеристик, например, эквивалентные напряжения, а $\{[h]_1, [h]_2, \dots, [h]_{N_k}\} = [H]$ – массив допускаемых характеристик (устанавливаются соответствующими нормами);

– дополнительные критерии $I_j(p, H(u) \rightarrow \min(\max), j = 1, 2, \dots, N_j, \quad (3)$

где I_j – некоторые величины (масса, стоимость, трудоемкость и т.п.).

Задача (1)–(2) является стандартной задачей испытаний. Задача (1)–(3) поставлена в расширенной формулировке. Первая ограничивается анализом, а вторая распространяется на оптимизацию. При этом важно отметить, что формулировка последней уместна на всех этапах – от предварительных испытаний до исследований в специализированных центрах (в данном случае – ИЦ ЖТ "СЕКО"). Объектом синтеза по соотношениям (3) могут быть, как отмечалось выше, не только характеристики изделия, но и вид, и распределение прикладываемой нагрузки. В частности, для длиннобазных платформ, которые имеют ряд отличительных свойств по сравнению с традиционными платформами, этот фактор является достаточно существенным.

Далее в работе постановка, решение и анализ результатов решения задачи (1)–(3) трансформируется с точки зрения не только обеспечения прочностных характеристик платформы, но и обоснование такого вида ее нагружения, который является более опасным, а значит, и положительные результаты испытаний являются более ценными, т.к. дают (для случая других видов нагружения) результат, работающий в запас.

Пример проведения исследований. Иллюстрация работы предложенного подхода производится, как отмечалось выше, на примере ходовых прочностных и динамических испытаний вагона-платформы для крупнотоннажных контейнеров модели 13-9975, построен-

ный на ОАО "Новозыбковский машиностроительный завод". Задача испытаний – исследовать 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.

Испытания проводились для проверки соответствия вагона параметрам, значения которых регламентированы [4] 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 [5]. Технические характеристики опытного образца вагона приведены в табл. 1, общий вид рамы – на рис. 2.

Для загрузки вагона-платформы до полной грузоподъемности использовались два контейнера-сухогруза типа-размера 1СС (груженные песком) массами по 5400 кг и два контейнера-цистерны типа 22Т6, модели Т-11-25Н-02 (груженные 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. Схема расклейки тензорезисторов на раме вагона-платформы представлена на рис. 3. Схемы расстановки тензорезисторов на боковых рамах тележек приведены на рис. 4. Опытный поезд был сформирован из двух локомотивов, вагона-лаборатории и опытного образца в порожнем, а затем в груженом состояниях. Схема формирования опытного поезда приведена на рис. 5. Ходовые динамические и ходовые прочностные испытания проводились в период с 02.06.14 г. по 14.06.14 г. 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.



Рис. 2. Общий вид рамы вагона-платформы модели 13-9975

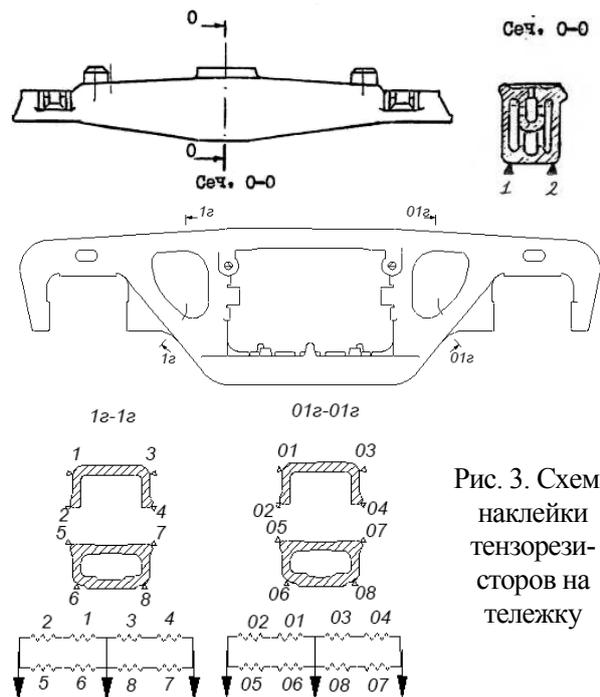


Рис. 3. Схема наклейки тензорезисторов на тележку



Рис. 4. Схема формирования опытного поезда

Регистрация измеряемых процессов согласно методикам производилась на прямых и кривых участках пути во всем проектном диапазоне допускаемых эксплуатационных скоростей

вплоть до конструкционной скорости. На каждом режиме движения регистрация процессов при ходовых динамических испытаниях осуществлялась при заезде в обе стороны.

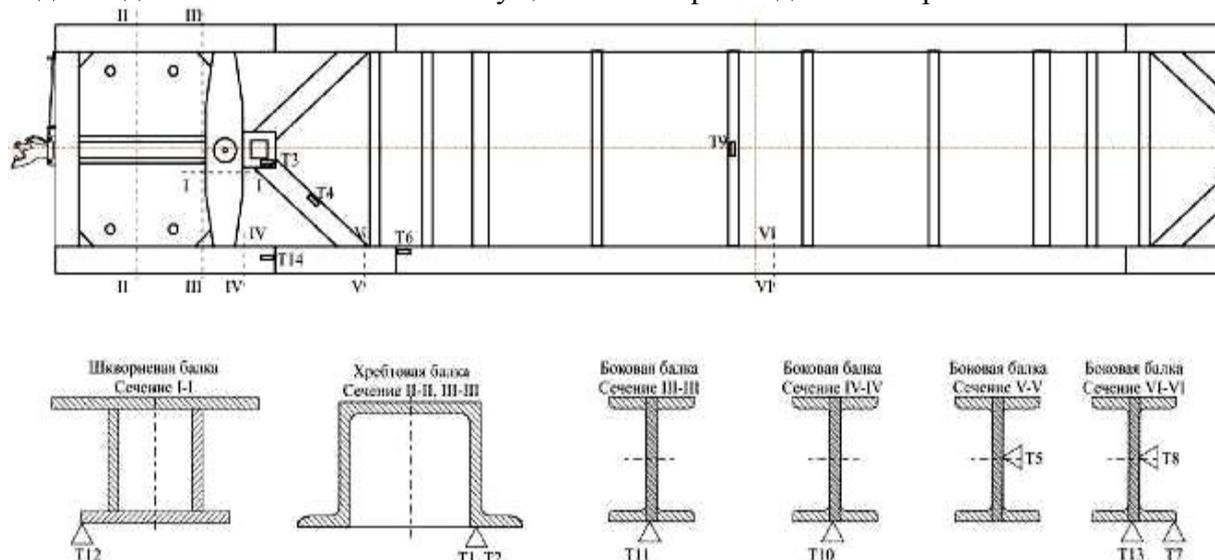


Рис. 5. Схема наклейки тензорезисторов на раму вагона-платформы

Обоснование схемы нагружения. Для обоснования выбора схемы нагружения вагона-платформы (в данном случае рассматриваемой как обобщенный варьируемый параметр) были построены эпюры изгибающих моментов, действующих на раму при ее равномерном нагружении 40-кафутовыми и 20-тифутовыми контейнерами (рис. 6, 7). Следует отметить, что общепринятые схемы загрузки 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

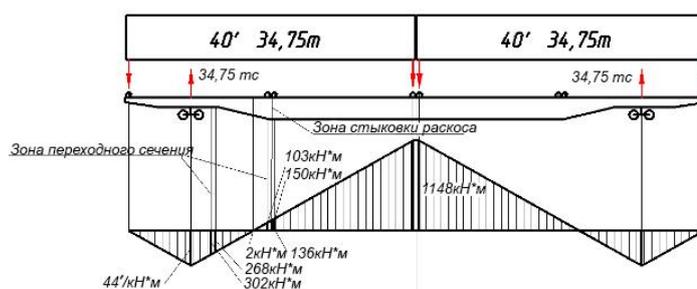


Рис. 6. Эпюра изгибающих моментов $M_{изг40}$ при загрузке рамы платформы двумя 40-кафутовыми контейнерами

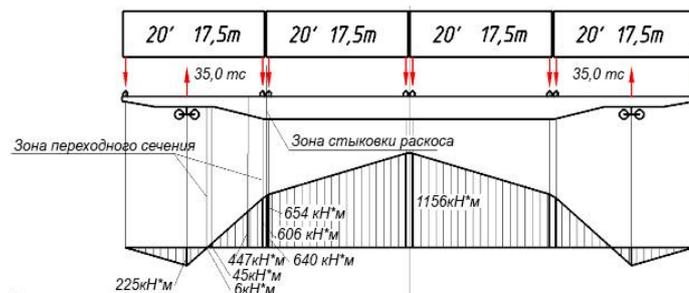


Рис. 7. Эпюра изгибающих моментов $M_{изг20}$ при загрузке рамы платформы четырьмя 20-тифутовыми контейнерами

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 загрузки длиннобазного вагона-платформы, учитывающая особенности его конструкции, восприятия и передачи нагрузок при эксплуатации (см. рис. 5), а также опыт работ [4, 5], 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 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, НДС консоли было оценено во время проведения статических испытаний. Разработанная схема реализуется следующим образом (рис. 8): 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 табл. 2.

Таким образом, 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 [3] определяют по формуле

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

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, приходящихся на колесную пару, т; $2b$ – расстояние между серединами шеек оси колесной пары (для типовых колесных пар –

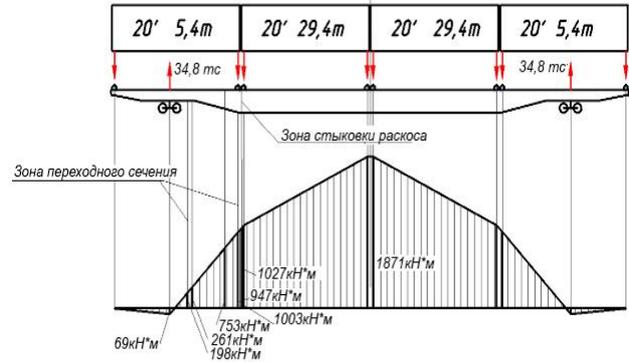


Рис. 8. Эпюра изгибающих моментов $M_{изг20расч}$ при загрузке рамы платформы четырьмя 20-тифутовыми контейнерами по схеме 5,4+2×29,4+5,4

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

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^H, K_d^{HH} – коэффициент вертикальной динамики соответственно на набегающем и ненабегающем колесе $K_d^H = K_d^L$ или $K_d^H, K_d^{HH} = K_d^L$ или K_d^H (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 $K_{yo} = (K_\delta^H - K_\delta^P + 2) / (K_\delta^H + K_\delta^P)$, где K_δ^H, K_δ^P – максимальные значения коэффициентов вертикальной 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. Примеры полученных осциллограмм исследуемых процессов приведены на рис. 9, 10. Графики силовых характеристик, полученных при определении статических прогибов рессорного подвешивания и коэффициентов трения рессорных комплектов, приведены на рис. 11.

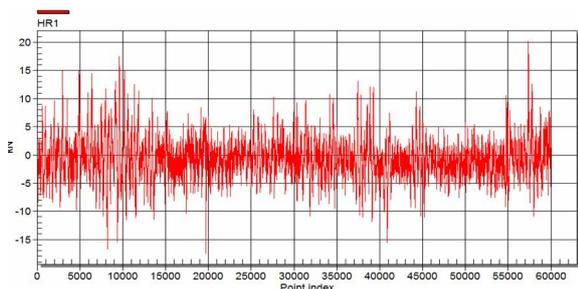


Рис. 9. Осциллограмма процесса HR1 при движении порожнего вагона по прямому участку пути со скоростью 60 км/ч

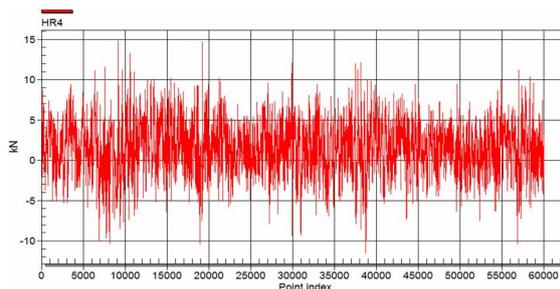


Рис. 10. Осциллограмма процесса HR4 при движении порожнего вагона по прямому участку пути со скоростью 60 км/ч

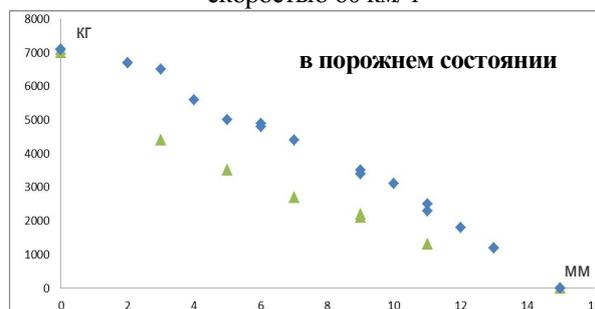
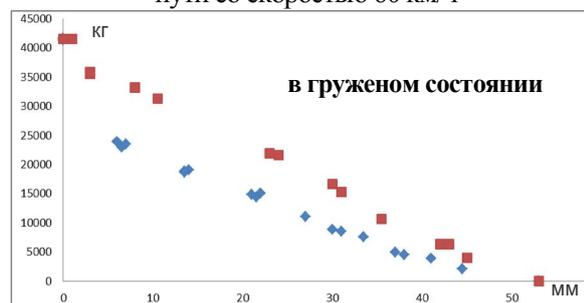


Рис. 11. Графики силовых характеристик при определении статического прогиба и коэффициента трения рессорного подвешивания

Оценка результатов испытаний. Для оценки результатов ходовых динамических испытаний максимальные значения динамических и прочностных показателей вагона-платформы модели 13-9975 в порожнем и грузном состоянии сведены в таблицы и обработаны (рис. 12–15). После обработки результатов проведенных ходовых испытаний были получены максимальные значения нормируемых показателей и сравнены с допускаемыми согласно [3-5].

В порожнем состоянии: $K_{дв\ кузова} = 0,47$ (в прямой при скорости 120 км/ч), что не

превышает допустимый [$K_{дв\ кузова}$]=0,47; $K_{дв\ необ}$ = 0,89 (в прямой при скорости 120 км/ч), что меньше $K_{дв\ необ}$]=0,9; $g_{кузова\ верт.}$ = 0,56 (в прямой при скорости 120 км/ч) < [$g_{кузова\ верт.}$] = 0,75; $g_{кузова\ horiz.}$ = 0,29 (в прямой при скорости 120 км/ч) < [$g_{кузова\ horiz.}$] = 0,55.

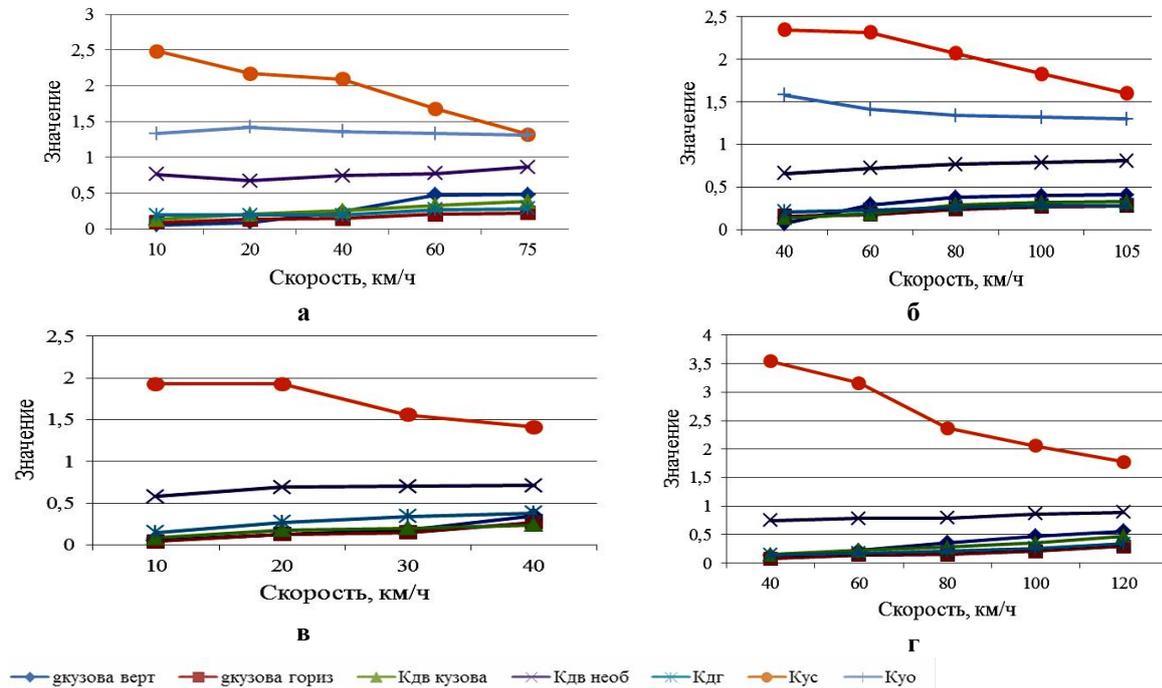


Рис. 12. Результаты испытаний вагона-платформы модели 13-9975 в порожнем режиме (динамические показатели) на участках пути:

а – кривая R330; б – кривая R615; в – стрелка 1/11; г – прямая

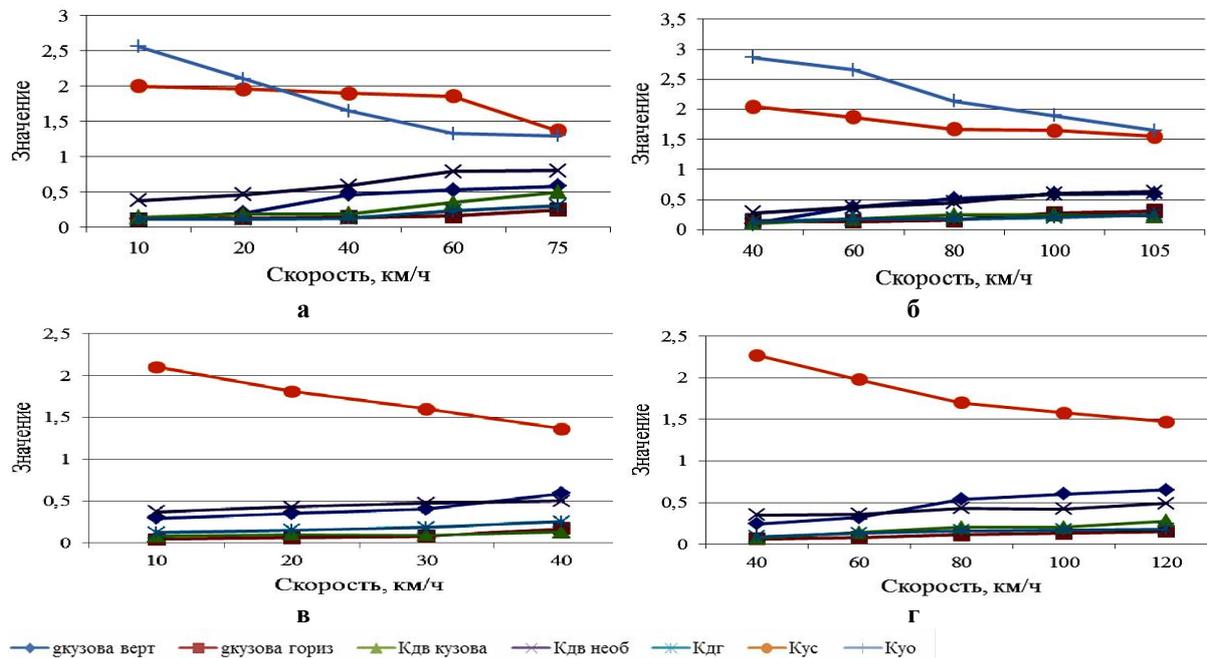


Рис. 13. Результаты испытаний вагона-платформы модели 13-9975 в груженом режиме (динамические показатели) на участках пути:

а – кривая R330; б – кривая R615; в – стрелка 1/11; г – прямая

В груженом состоянии: $K_{дв\ кузова}$ = 0,50 (в кривой R330 при скорости 75 км/ч), не превышает [$K_{дв\ кузова}$] = 0,50; $K_{дв\ необ}$ = 0,80 (в кривой R330 при скорости 75 км/ч) < [$K_{дв\ необ}$] = 0,85; $g_{кузова\ верт.}$ = 0,65 (в прямой при скорости 120 км/ч), что не превышает [$g_{кузова\ верт.}$] = 0,65; в кри-

вой R615 при скорости 105 км/ч $g_{\text{кузова гориз.}} = 0,31$, меньше $[g_{\text{кузова гориз.}}] = 0,45$.

Значение коэффициентов горизонтальной динамики ($K_{\text{де}}$) определялось по формуле: $K_{\text{де}} = HR / P_0$. 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 [5]), в груженом – при движении в кривой R330 при скорости 75 км/ч ($K_{\text{де}} = 0,30 < [K_{\text{де}}] = 0,38$ согласно [5]).

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 действующей 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 $[K_{\text{yc}}] = 1,3$, [5]), 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 [5]).

Коэффициент запаса устойчивости от бокового опрокидывания в кривых (K_{yo}) определялся для следующих случаев (табл. 3):

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.

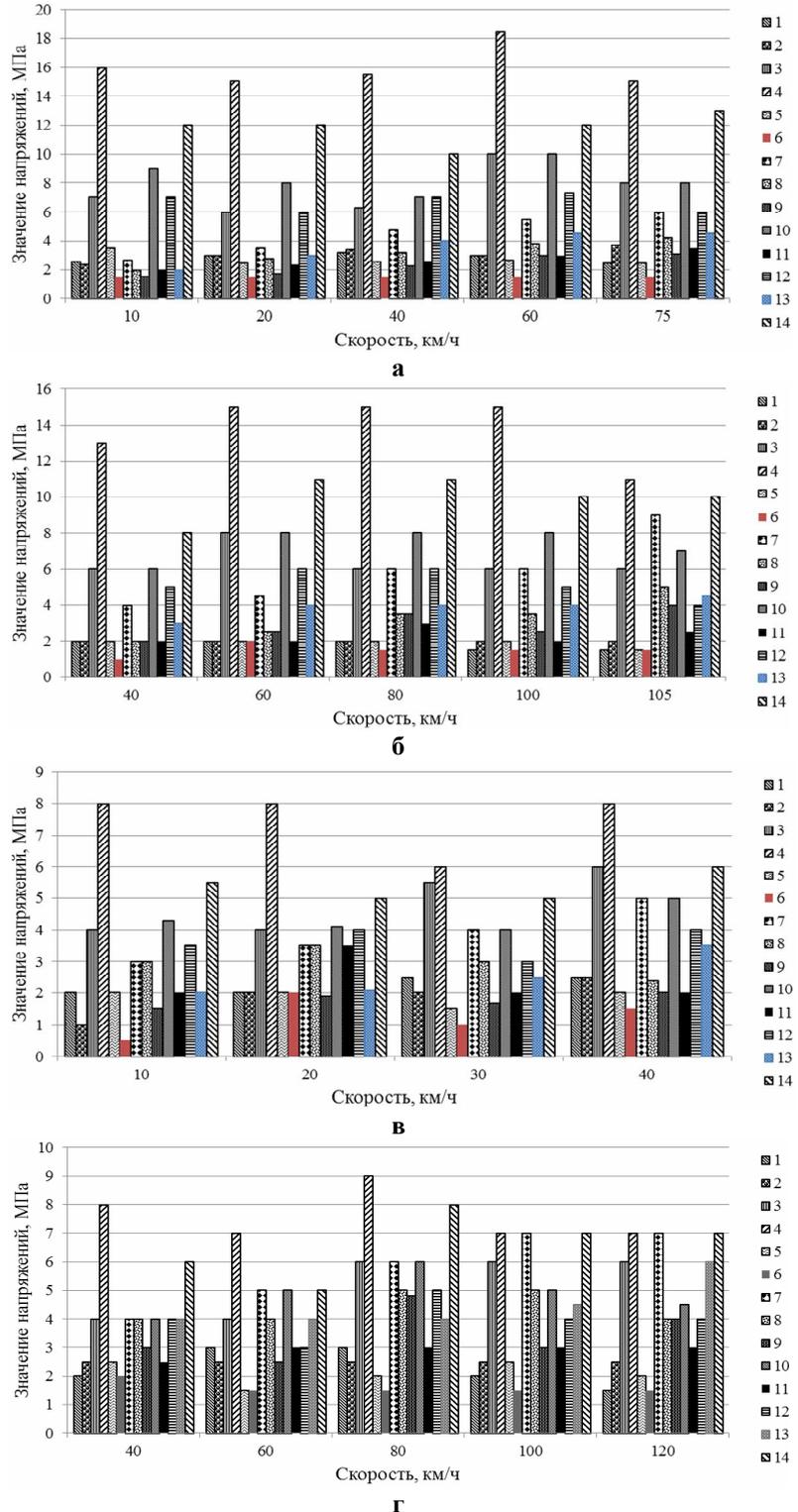


Рис. 14. Значения напряжений в исследуемых точках вагона-платформы модели 13-9975 в порожнем режиме (прочностные показатели) на разных участках пути: а – кривая R330; б – кривая R615; в – стрелка 1/11; г – прямая; 1-14 – номера датчиков

Результаты по максимальным динамическим напряжениям при ходовых прочностных испытаниях приведены в табл. 4. Из табл. 4 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 (34,75 т – 34,75 т) представлены на рис. 16.

Результаты расчета амплитуды напряжений условного симметричного цикла для двух наиболее неблагоприятных схем загрузки (20-тифутовыми контейнерами (5,4 т–29,4 т–29,4 т–5,4 т) и 40-кафутовыми контейнерами (34,75 т–34,75 т)) приведены в табл. 5, 6. Приведенную амплитуду динамического напряжения, эквивалентную по повреждающему действию распределению амплитуд напряжений за расчетный срок службы кон-

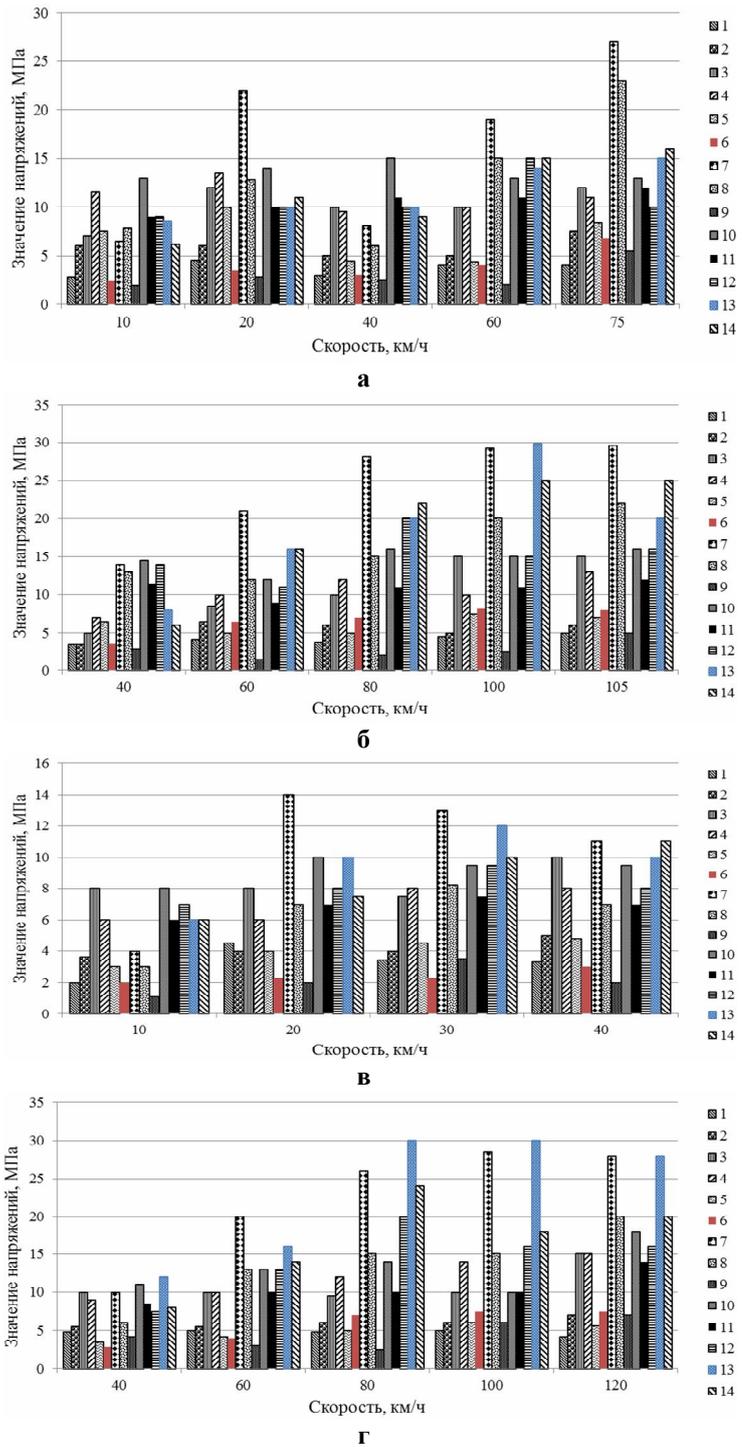


Рис. 15. Значения напряжений в исследуемых точках вагона-платформы модели 13-9975 в груженом режиме (прочностные показатели) на разных участках пути: а – кривая R330; б – кривая R615; в – стрелка 1/11; г – прямая; 1-14 – номера датчиков

$$\sigma_{a, \varepsilon} = m \sqrt{\frac{T_p f_\varepsilon}{N_c} \sum_{j=1}^n K_{yчj} \sum_{vi}^{K_{vi}} P_{vi} \sum_{ci}^{K_{ci}} \sigma_{vi}^m \cdot P_{\sigma i}} \quad \text{Здесь } m -$$

показатель наклона левой ветви кривой усталости (для сварных вагонных конструкций из углеродистых и низколегированных сталей $m = 4$); $T_p = 365 \cdot 10^3 (L_c / V) T_k$ – суммарное

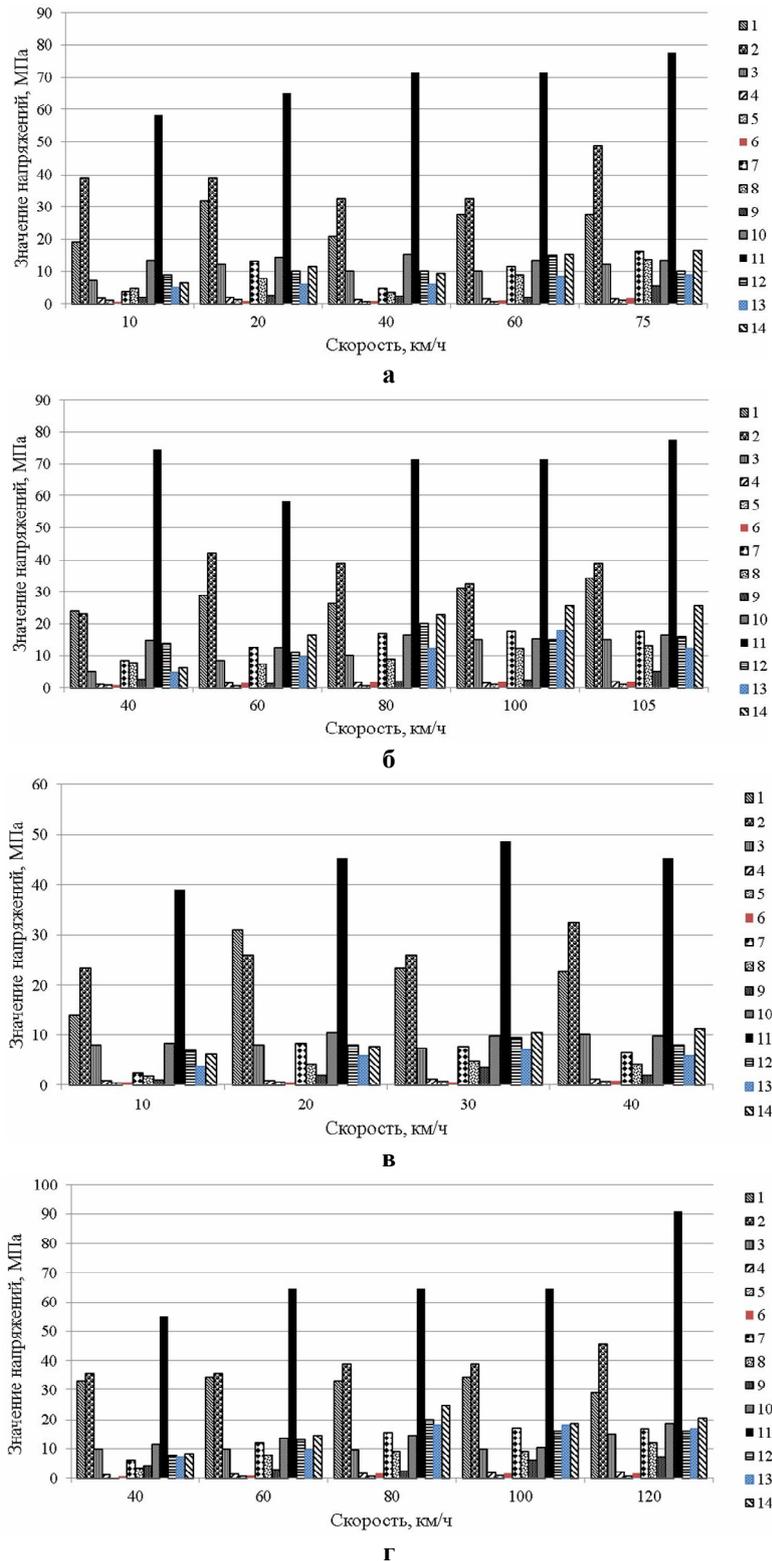


Рис. 16. Значения напряжений в исследуемых точках вагона-платформы модели 13-9975 в груженом режиме по схеме загрузки $2 \times 40'$ (34,75т–34,75т) на разных участках пути: а – кривая R330; б – кривая R615; в – стрелка 1/11; г – прямая; 1-14 – номера датчиков

время действия динамических нагрузок за расчетный срок службы, с ($L = 126$ 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; $K_{yчj}$ – средняя доля протяженности характерных участков пути в общей длине железных дорог ($K_{yч1} = 0,75$ для прямых участков, $K_{yч2} = 0,23$ для кривых участков, $K_{yч3} = 0,02$ 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 [4]; K_{vi} – принятое число диапазонов скоростей; σ_{vi} – уровень амплитуды динамических напряжений; $P_{\sigma i}$ – вероятность появления амплитуд с уровнем σ_{vi} в i -том диапазоне скоростей движения вагона; $K_{\sigma i}$ – 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 работоспособ-

ности 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. 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°.

Таблица 3

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_{yo}	1,30 ($[K_{\text{yo}}]=1,3, [3]$)	1,65 ($[K_{\text{yo}}]=1,3, [3]$)	1,33 ($[K_{\text{yo}}]=1,2, [3]$)	2,56 ($[K_{\text{yo}}]=1,2, [3]$)

Таблица 4

Максимальные напряжения в элементах рамы вагона-платформы (МПа)

Элемент	Точка	Максимальные динамические напряжения		Статические напряжения от веса груза	Нормативное значение
		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 5

Амплитуды напряжений условного симметричного цикла $\sigma_{a,3}$ (МПа) для двух неблагоприятных режимов загрузки

Элемент	Точка	$\sigma_{a,320}$	$\sigma_{a,340}$
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

Статический прогиб рессорного подвешивания под тарой составил 15 мм, под максимально допустимой нагрузкой брутто – 53 мм.

Заключение. В работе предложен новый подход к испытаниям, исследованиям и совершенствованию объектов ПСЖД. Отличительными особенностями данного подхода является акцент на совмещении регламентированных испытаний и дополнительных исследований элементов данных конструкций. При этом представляется возможным не только решение задачи соответствия изделия предъявляемым требованиям, но и обоснование технических решений,

Таблиця 6
Амплитуды напряжений условного симметричного цикла $\sigma_{a,z}$ (МПа) для двух неблагоприятных режимов загрузки по основным элементам

Элемент	Точка	$\sigma_{a,20}$	$\sigma_{a,40}$
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

удовлетворяющих дополнительным критериям, а также обосновать характерные режимы нагружения с точки зрения обеспечения прочности изделий при разнообразных вариантах приложения нагрузки. В частности, на примере вагона-платформы модели 13-9975 продемонстрировано использование предложенного подхода при ходовых и прочностных испытаниях. На первом этапе расчетным путем обосновывается наиболее неблагоприятный режим нагружения вагона-платформы, а в дальнейшем подтверждается обоснованность принятых технических решений, обеспечивающих приемлемый уровень напряжений в несущих элементах корпуса.

Предложенный подход в дальнейшем планируется распространить на весь цикл разработки

исследований и испытаний объектов ПСЖД.

Литература: 1. Патент на полезную модель RU 142263 U1 Российская Федерация МПК B61D3/08 B61D3/20. Вагон-платформа длиннобазный. / Шпак С.А., Чепурной А.Д., Литвиненко А.В. [и др.]; заявитель и патентообладатель ООО УК "РэйлТрансХолдинг", ООО "НИЦ УК "РэйлТрансХолдинг"; заявл. 08.11.2013; опубл. 27.06.2014. 2. Патент на корисну модель UA 88676 U МПК: B61D 3/20, B61D 3/08. Вагон-платформа довгобазний. / Шевченко О.К., Литвиненко А.В., Чепурний А.Д. [та інші.]; заявитель и патентообладатель ШОО УК "РэйлТрансХолдинг", ООО "НИЦ УК "РэйлТрансХолдинг"; заявл. 29.10.2013; опубл. 25.03.2014. Бюл. № 6. 3. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества: РД 24.050.37-95.-М.:ГосНИИВ, 1995. – 102 с. 4. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ВНИИЖТ-ГосНИИВ, 1996. – 319 с. 5. НБ ЖТ ЦВ 01-98 "Вагоны грузовые железнодорожные. Нормы безопасности". – М.:ВНИИЖТ-ГосНИИВ, 1998. – 14 с. 6. Черкашин Ю.М. Разработка методики оценки ресурса несущих конструкций кузовов вагонов, прошедших капитально-восстановительный ремонт / Черкашин Ю.М., Кориунов С.Д., Антипин Д.Я. // Вестник ВНИИЖТ. -2011. – № 1. – С. 19-22. 7. Эволюционное моделирование в проектировании несущих систем вагонов / Сертик И.Н., Сударев В.Г., Тютюнников А.И. [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. –2008. – № 5. – С. 21–25. 8. Сударев В.Г. Разработка и испытания на сопротивление усталости вагона-платформы для контейнеров модели 13-3115-01 / В.Г. Сударев, К.В. Кякк, Д.И. Загорский. // Тяжелое машиностроение. – 2010. – №1. – С. 31–34. 9. Расчет вагонов на прочность. / Вершинский С.В. и др. Под ред. Л. А. Шадура. - М.: Машиностроение, 1971. – 432 с. 10. Орлов Е. А. Моделирование воздействия эксплуатационных нагрузок на рамы тепловозов: методы, модели, специализированная САПР // Вісник НТУ „ХПІ”. –2006. – №.24. – С.103-112. 11. Плоткин В.С. К вопросу совершенствования методик оценки прочности литых деталей тележек грузовых вагонов при их проектировании и испытаниях для цели подтверждения соответствия /В.С. Плоткин, А.М. Краснобаев, О. А. Краснобаев // Вестник ВНИИЖТ. - 2014. – № 6. – С. 33–37. 12. К оценке напряжений в литых деталях тележек грузовых вагонов / В.С. Плоткин, А.М. Краснобаев, Т.Е. Конькова [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. –2014. – № 4. – С. 20–24. 13. Портнов А.В. Моделирование взаимодействия бесстыкового пути с пролетными строениями методом конечных элементов // Вестник ВНИИЖТ. –2013. – № 2. – С. 40-43. 14. Конечные-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Чепурной А.Д. [и др.] // Механика и машиностроение. – 2006. – № 1. – С.57-79.

Bibliography (transliterated): 1. Patent na poleznuju model' RU 142263 U1 Rossijskaja Federacija MPK B61D3/08 B61D3/20. Vagon-platforma dlinnobaznyj. / Shpak S.A., Chepurnoj A.D., Litvinenko A.V. [i dr.]; zajavitel' i patentoobladatel' ООО UK "RjejlTransHolding", ООО "NIC UK "RjejlTransHolding"; zajavl. 08.11.2013; opubl. 27.06.2014. 2. Patent na korisnu model' UA 88676 U MPK: B61D 3/20, B61D

3/08. *Vagon-platforma dovgobaznij.* / Shevchenko O.K., Litvinenko A.V., Chepurnij A.D. [ta insh.]; zajavitel' i patentoobladatel' ShhOO UK "RjejlTransHolding", ООО "НИС UKi "RjejlTransHolding"; zajavl. 29.10.2013; opubl. 25.03.2014. Bjul. № 6. 3. *Vagony gruzovye i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost' i hodovye kachestva.* RD 24.050.37-95.-M.:GosNIIV, 1995.-102 p. 4. *Normy dlja rascheta i proektirovanija vagonov zheleznyh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnyh).* – Moscow: VNIIZhT-GosNIIV, 1996. – 319 p. 5. NB ZhT CV 01-98 "Vagony gruzovye zheleznodorozhnye. Normy bezopasnosti". – 1998. – 14 p. 6. Cherkashin Ju.M. *Razrabotka metodiki ocenki resursa nesushhih konstrukcij kuzovov vagonov, proshedshih kapital'no-vosstanovitel'nyj remont* / Cherkashin Ju.M., Korshunov S.D., Antipin D.Ja. // Vestnik VNIIZhT. – 2011. – № 1. – P. 19–22. 7. *Jevoljucionnoe modelirovanie v proektirovanii nesushhih sistem vagonov* / Serpik I.N., Sudarev V.G., Tjutjunnikov A.I. [i dr.] // VESTNIK VNI-IZhT. – 2008. – № 5. – P. 21–25. 8. *Sudarev V.G. Razrabotka i ispytaniya na soprotivlenie ustalosti vagona-platforny dlja kontejnerov modeli 13 3115 01* / V.G. Sudarev, K.V. Kjakk, D.I. Zagorskij. // Tjazheloe mashinostroenie. – 2010. – №1. – P. 31–34. 9. *Raschet vagonov na proch-nost'.* / Vershinskij S.V. i dr. Pod red. L. A. Shadura. – Moscow: Mashinostroenie, 1971. – 432 p. 10. *Orlov E. A. Modelirovanie vozdejstvija jekspluatacionnyh nagruzok na ramy teplovozov: metody, modeli, specializirovannaja SAPR* // Visnik NTU, KhPI. – 2006. – №.24. – P.103–112. 11. *Plotkin V.S. K voprosu sovershenstvovanija metodik ocenki prochnosti lityh detalej telezhek gruzovyh vagonov pri ih proektirovanii i ispytaniyah dlja celi podtverzhdenija sootvetstvija* /V.S. Plotkin, A.M. Krasnobaev, O. A. Krasnobaev // Vestnik VNIIZhT. – 2014. – № 6. – P. 33 37. 12. *K ocenke napryazhenij v lityh detaljah telezhek gruzovyh vagonov* / V.S. Plotkin, A.M. Krasnobaev, T.E. Kon'kova [i dr.] // Vestnik VNIIZhT. –2014. – № 4. – P. 20–24. 13. *Portnov A.V. Modelirovanie vzaimodejstvija besstykovogo puti s proletnymi stroenijami metodom konechnyh jelementov* // Vestnik VNIIZhT. – 2013. – № 2. – P. 40-43. 14. *Konechno-jelementnye modeli jelementov slozhnyh mehanicheskikh sistem: tehnologija avtomatizirovannoj generacii i parametrizovannogo opisanija* / Tkachuk N.A., Gricenko G.D., Chepurnoj A.D. [i dr.] // *Mehanika ta mashinobudivannja.* –2006. – № 1. – P.57-79.

Сенько В.И., Макеев С.В., Чепурной А.Д., Литвиненко А.В., Шейченко Р.И., Граборов Р.В., Ткачук Н.А. Чубань М.А.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСШИРЕННЫХ ПРОЧНОСТНЫХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ДЛИННОБАЗНЫХ ПЛАТФОРМ

В статье предложен новый подход, соединяющий регламентированный объем испытаний и дополнительные исследования объектов подвижного состава железных дорог на примере длиннобазной платформы. Проиллюстрированы отдельные этапы исследований. Предложенная методология исследований применима для широкого множества объектов, в первую очередь – вагонов, вагонов-платформ, вагонов-цистерн.

Сенько В.И., Макеев С.В., Чепурный А.Д., Литвиненко О.В., Шейченко Р.И., Граборов Р.В., Ткачук М.А. Чубань М.О.

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ РОЗШИРЕНИХ МІЦНІСНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ ДОВГОБАЗНИХ ПЛАТФОРМ

У статті запропоновано новий підхід, що поєднує регламентований обсяг випробувань і додаткові дослідження об'єктів рухомого складу залізниць на прикладі довгобазної платформи. Проілюстровані окремі етапи досліджень. Запропонована методологія досліджень може застосовуватися для широкої множини об'єктів, в першу чергу – вагонів, вагонів-платформ, вагонів-цистерн.

Sen'ko V.I., Makeyev S.V., Chepurnoy A.D., Litvinenko A.V., Sheychenko R.I., Graborov R.V., Tkachuk M.A., Chuban M.A.

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF ENHANCED STRENGTH AND DYNAMIC RESEARCHES AT LONGBASE PLATFORMS TESTING

This paper proposes a new approach that connects the regulated amount of testing and additional research facilities of railway rolling stock on the example of long wheelbase platform. The separate stages of research are illustrated. The proposed research methodology is applicable to a wide set of objects such as wagons, wagon-platforms, wagon-tanks.