

УДК 629.014.6

**С. Д. Коршунов, А. Н. Скачков, С. Л. Самошкин, Д. И. Гончаров, А. С. Жуков****МЕТОДИКА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
КУЗОВОВ СОВРЕМЕННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Дата поступления: 28.09.2015

Решение о публикации: 02.11.2015

**Цель:** Разработать методику расчетно-экспериментальных исследований кузовов современных вагонов из новых коррозионно-стойких сталей. **Методы:** Для расчетной оценки прочности кузова использовался метод конечных элементов, на основе которого с использованием интегрированной системы анализа конструкций SCAD разработана параметрическая конечно-элементная модель. Для экспериментального определения напряженно-деформированного состояния металлоконструкции кузова использовалась тензометрия. Оценка прочности кузова вагона проведена для всех видов нагрузок, имитирующих эксплуатационные режимы «Норм для расчета и проектирования...». **Результаты:** По разработанной методике были исследованы кузова двухэтажных пассажирских вагонов моделей 61-4465, 61-4472, 61-4473 и 61-4492. Анализ результатов расчетов и испытаний выявил наиболее нагруженные зоны металлоконструкции кузова. Это позволило разработать и реализовать эффективные меры, направленные на совершенствование конструкции кузовов с точки зрения прочности для всей серии двухэтажных пассажирских вагонов. **Практическая значимость:** Предложенная методика расчетно-экспериментальной оценки прочности кузовов вагонов при воздействии нормативных нагрузок позволяет объективно оценивать прочность кузовов современного подвижного состава по требованиям технического регламента Таможенного союза.

Методика, двухэтажный вагон, расчетная схема МКЭ, оценка прочности, статические и динамические испытания.

\***Sergey D. Korshunov**, Cand. Sci. (Eng.), laboratory head, TIV-5@yandex.ru; **Aleksandr N. Skachkov**, Cand. Sci. (Eng.), director; **Sergey L. Samoshkin**, D. Eng., head of research and development support directorate; **Dmitriy I. Goncharov**, Cand. Sci. (Eng.), laboratory head, **Aleksandr S. Zhukov**, engineer, post-graduate student (Tver Carriage-Building Institute JSC) METHOD FOR CALCULATION AND EXPERIMENTAL STUDIES OF MODERN ROLLING STOCK BODIES

**Objective:** To develop a method for calculation and experimental studies of bodies of modern carriages manufactured from new corrosion-resistant steels. **Methods:** Finite elements method was used for calculational evaluation of carriage body strength, from which a parameter-orientated finite-element model using SCAD integrated construction analysis system was developed. Strain-gauge measurement was used for experimental evaluation of stress-strain state of carriage body's metal structure. Evaluation of carriage body strength was conducted for all types of loads imitating operational regimes listed in "Norms for Calculation and Design...". **Results:** Bodies of double-deck passenger carriages, models 61-4465, 61-4472, 61-4473 and 61-4492 were studied in accordance with the method developed. Analysis of calculations' and tests' results allowed to determine the most loaded zones of carriage body metal structures from the strength point of view. This allowed to develop and realise efficient measures aimed at perfecting carriage body designs from the point of view of strength for the entire range of double-deck passenger carriages. **Practical importance:** The proposed method for calculation and experimental

evaluation of carriage body strength under the influence of standard load allows to objectively evaluate the strength of modern rolling stock carriage bodies in accordance with requirements of Customs Union technical guidelines.

Method, double-deck carriage, finite elements method calculation scheme, strength evaluation, static and dynamic tests.

Применение новых коррозионно-стойких материалов, снижение металлоемкости и оптимизация конструкции пассажирских вагонов требуют совершенствования методов оценки несущей способности кузовов вагонов. Тверской институт вагоностроения (ЗАО НО «ТИВ») создал методику расчетно-экспериментальных исследований кузовов вагонов пассажирского парка. Применение методики рассмотрено на примере кузова двухэтажного пассажирского вагона, прошедшего полный комплекс динамико-прочностных испытаний и теоретических исследований прочности в ЗАО НО «ТИВ» [1, 2]. Базовую модель купейного двухэтажного вагона модели 61-4465 построило ОАО «Тверской вагоностроительный завод», на ее основании созданы штабной вагон модели 61-4472, вагон-ресторан модели 61-4473 и вагон с местами для сидения модели 61-4492. Все перечисленные модели вагонов имеют однотипную несущую конструкцию кузова, что позволило применить к ним общую расчетно-экспериментальную методику и комплекс расчетных моделей. Основные несущие элементы металлоконструкции современных кузовов подвижного состава, выпускаемого ОАО «ТВЗ», выполнены из коррозионно-инертной стали и имеют назначенный срок службы не менее 40 лет.

### **Методика расчетно-экспериментальных исследований**

Схема методики расчетно-экспериментальных исследований и оценки прочности кузовов ЗАО НО «ТИВ» приведена на рис. 1. На первом этапе выполняют расчетную оценку прочности кузова и определяют наиболее

нагруженные узлы и элементы кузова. На втором проводят экспериментальную оценку прочности кузова с учетом результатов расчетов первого этапа. На заключительном (третьем) этапе анализируют результаты и оценивают сходимость результатов расчетных и экспериментальных исследований.

Методика впервые опробована при создании автотрис, ряда моделей кузовов одно- и двухэтажных пассажирских вагонов [3, 4], а также при испытании кузовов пассажирских вагонов, прошедших капитальный ремонт. Одним из наиболее сложных вопросов при создании серии двухэтажных вагонов является разработка кузова с понижением уровня пола в средней части и доведение его прочностных характеристик до требований нормативных документов [2]. Кузов вагона представляет собой несущую цельнометаллическую сварную оболочку с вырезами для окон, дверей и люков, подкрепленную продольными и поперечными элементами жесткости (стрингерами, шпангоутами). Несущие элементы рамы изготовлены из низколегированной стали 09Г2С по ГОСТ 19281 (модуль упругости  $E = 210\,000$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ), наружная обшивка и каркас кузова – из нержавеющей стали EN10088-2-X6CrNiTi18-10+2В (модуль упругости  $E = 200\,000$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ) (табл. 1).

### **Конечноэлементная модель кузова**

Для оценки напряженно-деформируемого состояния несущих элементов кузова вагона разработана параметрическая конечно-элементная модель и проведены прочностные расчеты для вариантов металлоконструкции. Для расчетной оценки несущей способности

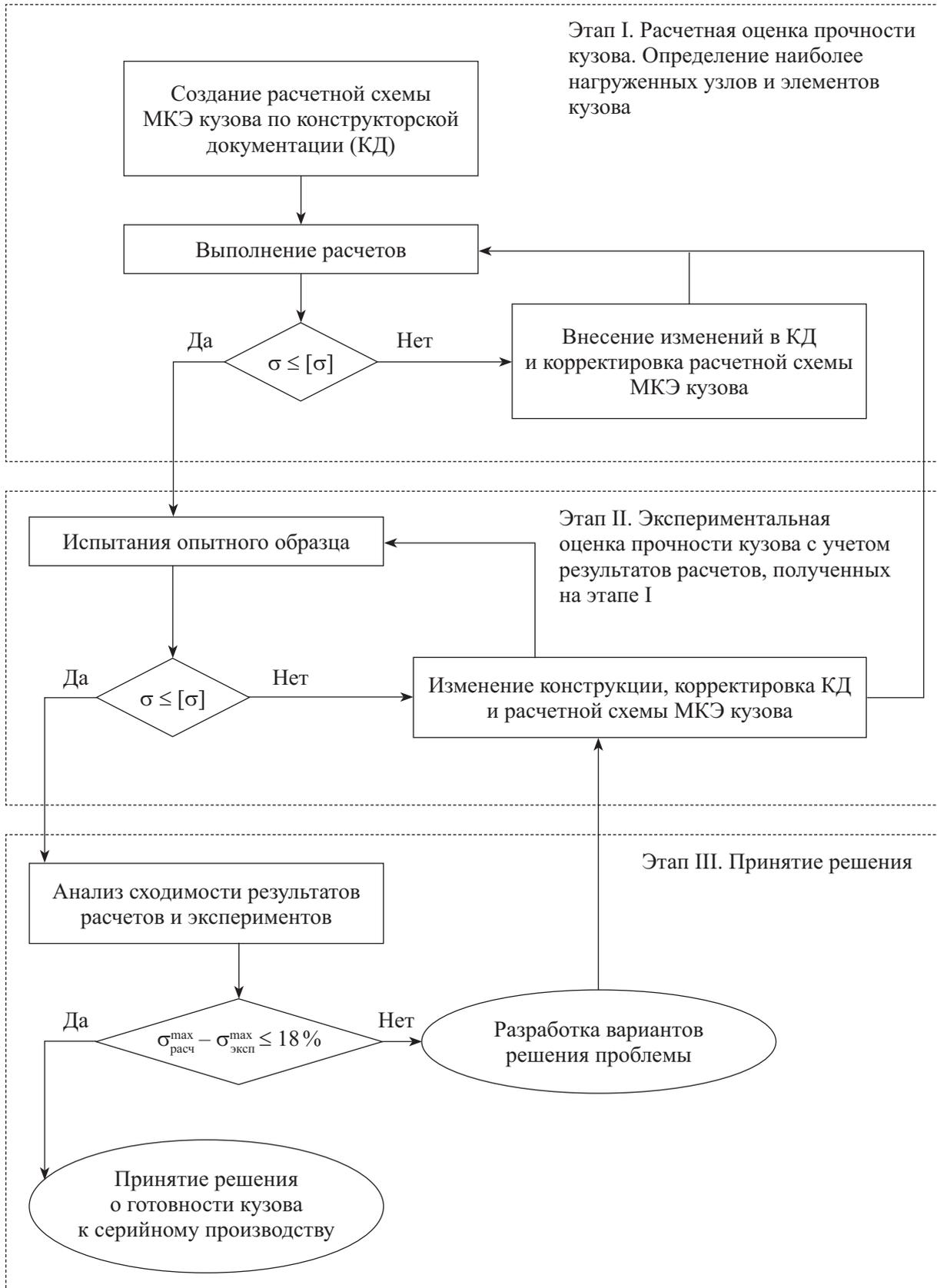


Рис. 1. Схема методики расчетно-экспериментальных исследований

ТАБЛИЦА 1. Прочностные характеристики и допустимые напряжения стали, МПа

Элемент конструкции	Материал	Класс прочности	Допустимые напряжения для I режима	Допустимые напряжения для III режима
Хребтовая балка в консольных частях рамы, шкворневые балки	Прокат из стали 345Д09Г2С по ГОСТ 19281	345	345	190
Остальные балки рамы и главные стойки торцевой стены	Прокат из стали 345Д09Г2С по ГОСТ 19281	345	345	200
Наружная обшивка и каркас кузова	Сталь нержавеющей 1,4541 EN10088-2-X6CrNiTi18-10+2B	260	260	172

кузовов вагонов моделей 61-4465, 61-4472, 61-4473 и 61-4492 в данной работе использовалась интегрированная система анализа конструкций SCAD [7]. Эта система представляет собой набор программ для прочностных расчетов и проектирования строительных и машиностроительных конструкций достаточ-

но сложной структуры. Расчетная схема МКЭ представлена на рис. 2.

Элементы каркаса моделировали стержневыми элементами в виде стержней Тимошенко со степенью аппроксимации, равной четырем. При создании расчетных схем было учтено эксцентричное соединение элементов

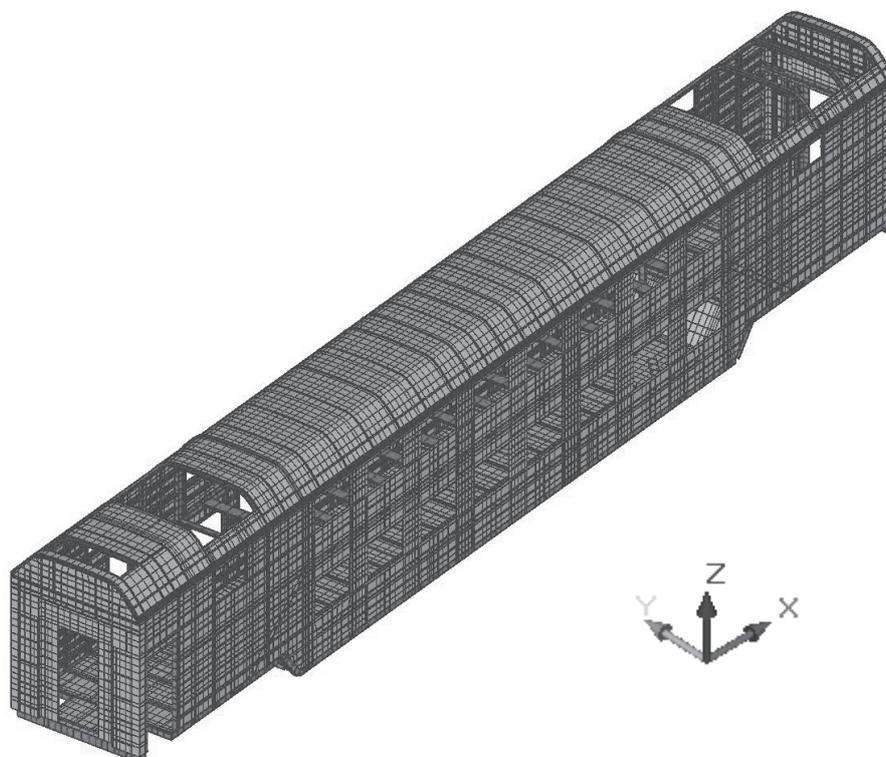


Рис. 2. Расчетная схема МКЭ кузова двухэтажного пассажирского вагона

каркаса с обшивкой. Обшивку моделировали треугольными и четырехугольными конечными элементами типа оболочки, для гладкой обшивки – изотропными, для гофрированной – ортотропными. Приведенные толщины ( $\delta_{пр}$ ), модули упругости и коэффициенты Пуассона ( $E_x, \nu_x, E_y, \nu_y$ ) для панелей обшивки кузова приведены в табл. 2.

Ограничение степеней свободы по оси Z обеспечивали четыре вертикальные линейные связи, расположенные в местах опор кузова на скользуны, по оси X – две линейные связи в месте приложения продольной нагрузки

(на одном конце рамы), по оси Y – две линейные связи по концам рамы кузова. Расчет кузова проводили по расчетным режимам [2], приведенным в табл. 3.

Все нагрузки, действующие на расчетную модель, условно разделены на две группы: сосредоточенные и распределенные по элементам или площадям.

В первую группу были включены нагрузки от кондиционеров, резервуаров для воды, ящиков высоковольтного оборудования, преобразователей напряжения, аккумуляторных боксов, входных дверей, фекального бака.

ТАБЛИЦА 2. Приведенные толщины ( $\delta_{пр}$ ), модули упругости и коэффициенты Пуассона ( $E_x, \nu_x, E_y, \nu_y$ ) для панелей обшивки кузова

Панель	$\delta$ , мм	$\delta_{пр}$ , мм	$E_x$ , МПа	$\nu_x$	$E_y$ , МПа	$\nu_y$
Пол гладкий	2,5	2,5	200 000	0,3	200 000	0,3
Пол гладкий в тамбуре	4,0	4,0	200 000	0,3	200 000	0,3
Пол гофрированный	1,5	1,7	200 000	0,3	3230	0,0005
Средняя часть крыши	1,5	1,6	200 000	0,3	6924	0,001
Скат	2,0	2,0	200 000	0,3	200 000	0,3
Торцевая стена	2,0	2,0	200 000	0,3	200 000	0,3
Гладкая обшивка боковой стены	1,5	1,5	200 000	0,3	200 000	0,3
Обшивка боковой стены, сваренная из гофрированного ( $\delta = 1$ мм) и гладкого ( $\delta = 1,5$ мм) листов	1,5 + 1,0	2,6	200 000	0,3	114 000	0,17

ТАБЛИЦА 3. Величина основных сил для расчетных режимов [2]

Расчетные параметры	Расчетные режимы	
	I	III
Продольная сила, МН	-2,5	$\pm 1,0$
Вертикальная статическая нагрузка (сила тяжести)	Брутто	Брутто
Скорость движения при определении вертикальной динамической нагрузки, м/с	Не учитывается	45
Боковая сила	По п. 2.3.4, 2.4.4 «Норм...» [2]	Учитывается путем увеличения силы тяжести брутто на 12,5%

Ко второй группе нагрузок относятся нагрузки от сцепки, междвагонных переходов, окон, люков, дверей, потолков, систем отопления и вентиляции, электрооборудования, веса пассажиров, ЗИП и сантехнического оборудования.

Все распределённые нагрузки приложены в следующих зонах: коридоры тормозного и нетормозного концов вагона, служебное помещение, бытовое помещение, купе с радиооборудованием, купе проводника, купе инвалида, салоны первого и второго этажей, нижняя кромка окон, туалеты первого этажа.

Продольные усилия с присоединенным моментом прикладывали к передним (растягивающим) или задним (сжимающим) упорам хребтовой балки.

Схема содержит более 37400 узлов и около 49000 элементов, в системе уравнений более 230000 неизвестных.

### Экспериментальная оценка прочности кузова

Выполнены комплексные прочностные испытания кузова вагона в соответствии с требованиями [1, 2, 5, 7]. При экспериментальных исследованиях в соответствии с требованиями нормативных документов на кузов воздействовали все виды испытательных нагрузок, имитирующих эксплуатационные режимы (табл. 3). Продольные нагрузки реализовывали в специальном стенде для статических прочностных испытаний вагонов, оборудованном гидравлической силовой системой и силоизмерительными устройствами (рис. 3). Вертикальные нагрузки тары и брутто создавали штатным пневматическим оборудованием стенда при дискретном приложении распределённых нагрузок на полы первого и второго этажей (рис. 4). Сосредоточенные нагрузки от веса тяжелого оборудования вагона имитировали габаритно-весовыми макетами.

Схемы расположения исследуемых сечений и зон установки тензодатчиков на кузо-

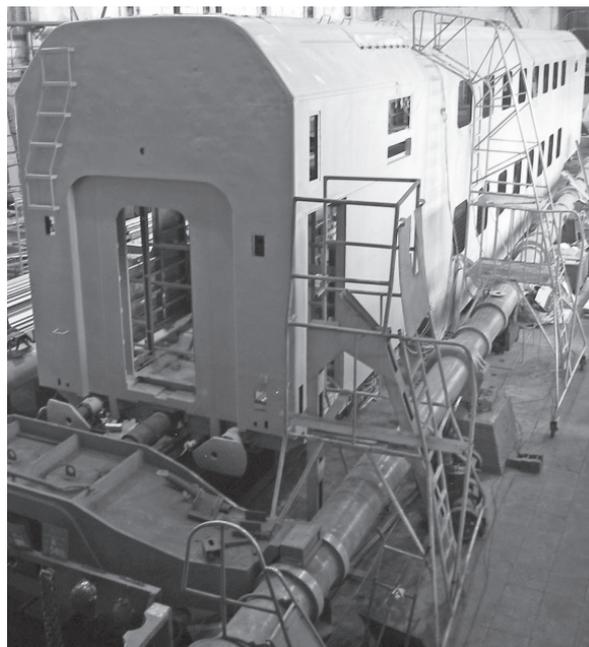


Рис. 3. Кузов двухэтажного пассажирского вагона в стенде для прочностных статических испытаний нормативными нагрузками

ве двухэтажного вагона (рис. 5) учитывают результаты расчетов. При разработке схем установки тензодатчиков особое внимание уделяли исследованию напряженного состояния основных несущих элементов рамы, зонам концентрации в углах вырезов и в узлах соединения элементов, которых существенно различаются по параметрам геометрических характеристик.

Напряженно-деформируемое состояние несущих элементов кузова определяли методом тензометрирования с использованием многоканальной микропроцессорной тензометрической системы ММТС-64.01 и тензометрических датчиков с базой 10 мм [1] (рис. 6). Обработку результатов испытания проводили согласно требованиям [5].

### Оценка полученных результатов

В табл. 4 приведены максимальные напряжения ( $\sigma_x$ , МПа) в конструкции кузова по результатам расчетов и экспериментов [4],

а



б



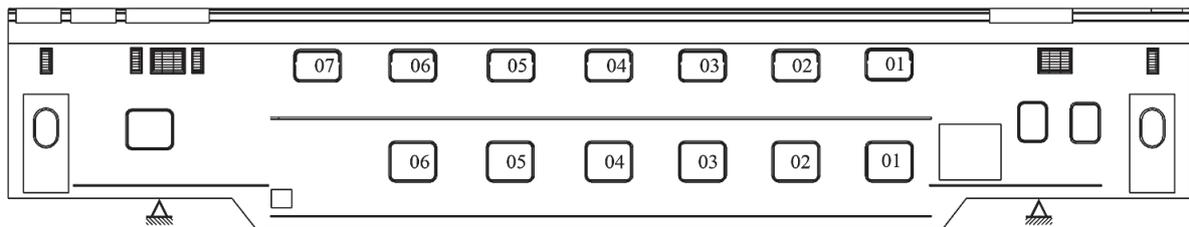
Рис. 4. Комплект пневматических приспособлений (а) и реализация вертикальных нагрузок на первый и второй этажи кузова вагона (б)

Нетормозной конец

0 |

1 |

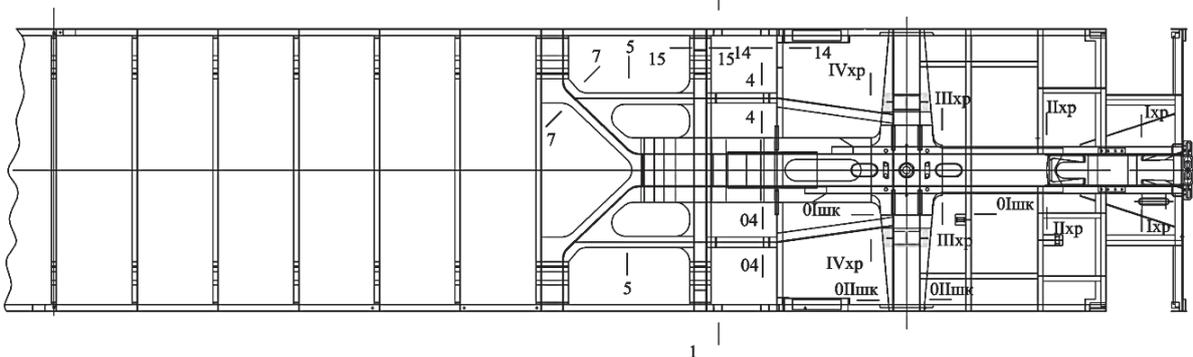
Тормозной конец



n |

1 |

1 |



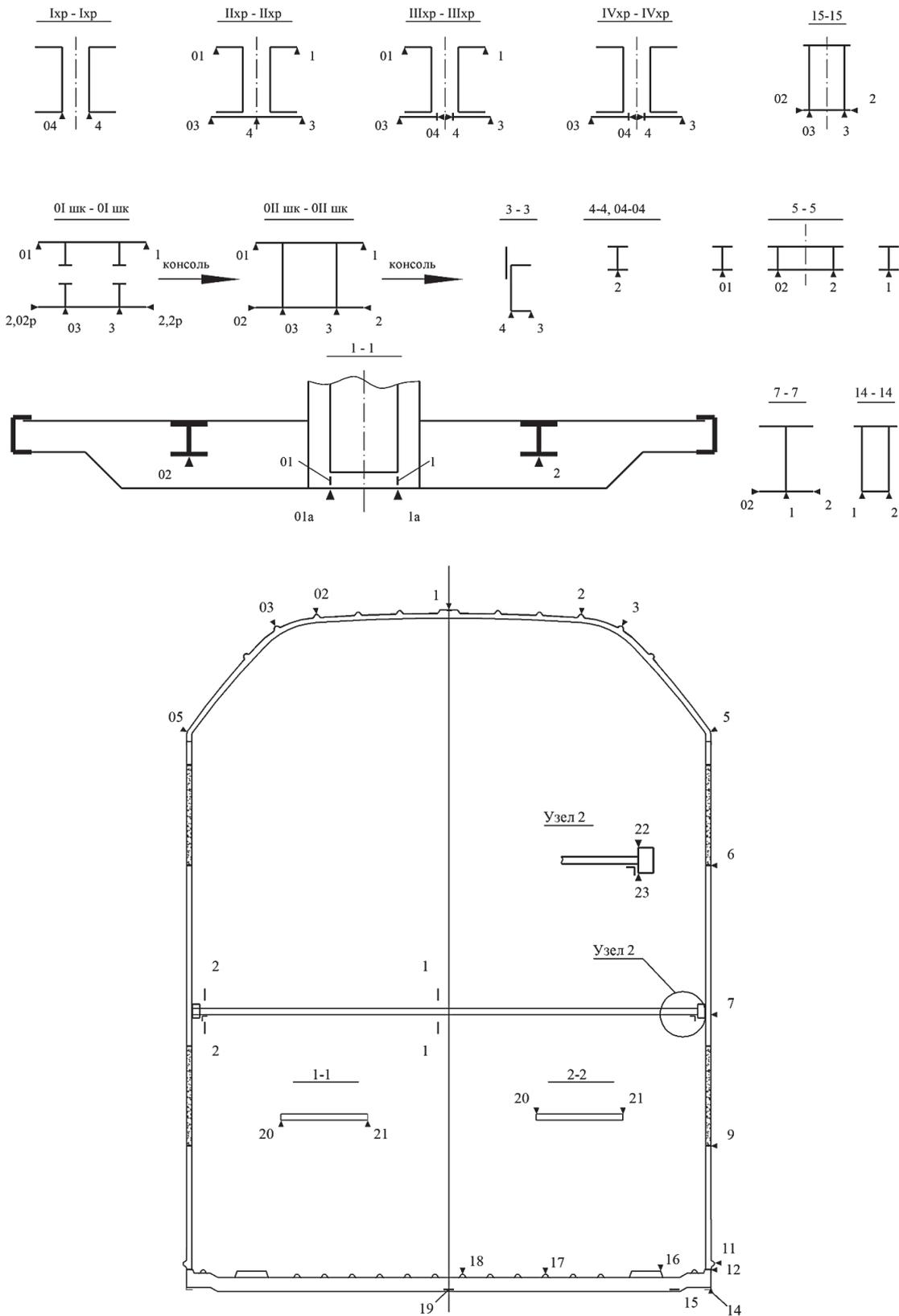


Рис. 5. Схемы расположения тензодатчиков на основных несущих элементах металлоконструкции кузова вагона



Рис. 6. Многоканальная микропроцессорная тензометрическая система ММТС-64.01

из которой видно, что расхождение полученных результатов не превышает 18%.

Анализ результатов расчетов и испытаний от нагрузок различных видов выявил наиболее нагруженные зоны конструкции кузова с точки зрения как прочности рамы, так и устойчивости обшивки боковин. В первую очередь, это относится к местам перегиба рамы кузова в шкворневых зонах. Детальный анализ соотношения действующих в несущих элементах силовых факторов позволил разработать и реализовать эффективные меры, направленные на совершенствование конструкции по условиям прочности и устойчи-

вости. Для повышения несущей способности боковых стен по всей длине кузова введены подоконные продольные балки, повышающие устойчивость боковин и разгружающие зону перегиба рамы при действии продольных нагрузок. На основании результатов расчетно-экспериментальных исследований металлоконструкции кузова выявлены резервы снижения массы за счет оптимизации сечений набора продольных и поперечных элементов жесткости, расположенных выше оконного пояса первого этажа кузова. Данные предложения успешно реализованы на металлоконструкции опытного кузова вагона.

### Заключение

Анализ всего экспериментального и расчетного материала позволил сделать вывод, что методика расчетно-экспериментальной оценки прочности кузовов вагонов при воздействии нормативных нагрузок позволяет выполнять объективную оценку прочности кузовов современного пассажирского подвижного состава по требованиям технического регламента Таможенного союза в части как расчетов, так и испытаний. Методика апробирована при создании новых моделей кузовов пассажирских двухэтажных вагонов

ТАБЛИЦА 4. Максимальные напряжения ( $\sigma_x$ , МПа) в конструкции кузова

Элементы конструкции	$\sigma_T$	Допустимые [ $\sigma$ ]		Режим			
				I		III (+/-)	
		I	III	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
Несущие элементы рамы	345	345/327	190/200	-297	-289	-133	-114
Обшивка и каркас крыши	260	260	172	-63	-52	18	15
Обшивка и каркас боковин	260	260	172	-128	-114	-54	-49
Обшивка и каркас торцевых стен	260	260	172	45	31	26	18

моделей 61-4465, 61-4472, 61-4473 и 61-4492, которые в настоящее время серийно производятся и эксплуатируются на магистральных железных дорогах ОАО «РЖД».

### Библиографический список

1. Коршунов С. Д. Современные методы испытаний железнодорожного подвижного состава, прошедшего ремонт различных объемов и вновь построенного / С. Д. Коршунов, С. Л. Самошкин // Вагонный парк. – 2012. – № 7. – С. 15–18.

2. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизированных вагонов железных дорог колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ВНИИВ–ВНИИЖТ, 1983. – 260 с.

3. Оценка несущей способности кузовов одноэтажного и двухэтажного вагонов нового модельного ряда и выбор рационального варианта стрингерной конструкции боковых стен : отчет о НИР ; 11.11.211. – 2011. – 139 с.

4. Проведение предварительных испытаний и оценка прочности кузова двухэтажного пассажирского вагона модели 61-4465 : отчет о НИР/ЗАО НО «ТИВ»; 09.09.246. – Тверь, 2009. – 73 с.

5. РД 24.050.37-95. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. – М. : ГосНИИ Вагоностроения, 1995. – 100 с.

6. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава» (ТР ТС 001/2011) (утв. решением комиссии Таможенного союза от 15.07.2011 г. № 710).

7. SCAD. Описание и применение. – М., 1995. – 220 с.

### References

1. Korshunov S. D. & Samoshkin S. L. *Vagonnyy park – Rolling Stock*, 2012, no. 7, pp. 15-18.

2. Normy dlya rascheta i proyektirovaniya novykh i modernizirovannykh vagonov zheleznyh dorog kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Norms for Calculation and Design of New and Modernised Carriages for 1,520-mm Gauge Railways (Non-Self-Propelled)]. Moscow, VNIIV–VNIIZhT, 1983. 260 p.

3. Otsenka nesushchey sposobnosti kuzovov odnoetazhnogo i dvukhetazhnogo vagonov novogo modelnogo ryada i vybor ratsionalnogo varianta stringerной konstruksii bokovykh sten [Evaluation of Load-Bearing Capacity of Bodies of New Model Range of Single- and Double-Deck Carriages and Choice of Rational Option for Stringer Structure of Side Walls]. Research report; 11.11.211. 2011. 139 p.

4. Provedeniye predvaritelnykh ispytaniy i otsenka prochnosti kuzova dvukhetazhnogo passazhirskogo vagona modeli 61-4465 [Conducting Preliminary Tests and Strength Assessment of Model 61–4465 Double-Deck Passenger Carriage Body]. Research report; Tver Carriage-Building Institute JSC; 09.09.246. Tver, 2009. 73 p.

5. RD 24.050.37-95. Vagony gruzovyye i passazhirskiye. Metody ispytaniy na prochnost i khodovyye kachestva [Freight and Passenger Carriages. Methods for Strength and Ride Performance Tests]. Moscow, GosNII Vagonostroyeniya, 1995. 100 p.

6. Customs Union technical guidelines “On Safety of Railway Rolling Stock” (TR TS 001/2011) (approved by Customs Union commission on Jul. 15, 2011, no. 710).

7. SCAD. Opisaniye i primeneniye [Description and application]. Moscow, 1995. 220 p.

\*КОРШУНОВ Сергей Дмитриевич – канд. техн. наук, зав. лабораторией, TIV-5@yandex.ru; СКАЧКОВ Александр Николаевич – канд. техн. наук, директор; САМОШКИН Сергей Львович – д-р техн. наук, начальник управления «Научно-технического обеспечения и развития»; ГОНЧАРОВ Дмитрий Игоревич – канд. техн. наук, зав. лабораторией; ЖУКОВ Александр Сергеевич – инженер (ЗАО НО «Тверской институт вагоностроения»).