УДК 629.45:629.4.023.1 DOI: https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-76-85

Разработка и оценка комплекса исследований по повышению частоты изгибных колебаний кузовов современных пассажирских вагонов

А. Н. СКАЧКОВ, С. Л. САМОШКИН, С. Д. КОРШУНОВ, Д. А. НИКИФОРОВ, Д. А. РОМАШОВ

Акционерное общество Научная организация «Тверской институт вагоностроения» (АО НО «ТИВ»), Тверь, 170003, Россия

Аннотация. Описываются исследования частоты изгибных колебаний кузовов вагонов модельного ряда 61-4440, который включает вагоны купейные, штабные, некупейные, с местами для сидения, вагон-ресторан и другие. Кузова всех вагонов этого модельного ряда имеют одинаковые габаритные размеры и изготовлены из коррозийно-устойчивых сталей (нержавеющих) с плоскогофрированной обшивкой нижнего (подоконного) пояса.

Для оценки влияния конструктивных особенностей кузовов из нержавеющих сталей на их изгибную жесткость и параметры изгибных колебаний в вертикальной плоскости проведен расчетно-экспериментальный комплекс работ.

После анализа результатов расчета и экспериментальных данных были выработаны и реализованы предложения по повышению изгибной жесткости металлоконструкции кузова с обшивкой из нержавеющих сталей. Для проверки реализованных предложений были проведены комплексные испытания по определению параметров изгибных колебаний металлоконструкции опытного кузова. Испытания проводились по разработанному авторами комбинированному методу. Для этого использовались вибромашина, устанавливаемая в консольных частях кузова, и импульсное возбуждение.

Полученные результаты испытаний металлоконструкции опытного кузова по сравнению с результатами испытаний кузовов вагонов модельного ряда 61-4440 показали эффективность реализованных предложений, а именно: повышение частоты первого тона изгибных колебаний на 18 %; снижение амплитуды вертикальных колебаний конструкции кузова на частоте первого тона от 12 до 50 %; снижение амплитуды вертикальных ускорений металлоконструкции кузова при колебаниях на частоте первого тона приблизительно в 2 раза; существенное снижение горизонтального ускорения в зоне простенков среднего сечения. Эффективность реализованных предложений по повышению изгибной жесткости металлоконструкции опытного кузова позволяет рекомендовать их для всего модельного ряда вагонов 61-4440.

Ключевые слова: пассажирский вагон; модельный ряд; металлоконструкция кузова; вибрационные испытания; изгибные колебания; шпангоут; изгибная жесткость

Введение. В 2009 г. на ОАО «Тверской вагоностроительный завод» началось серийное производство пассажирских вагонов нового поколения с гофрированной обшивкой из нержавеющей стали нижнего (подоконного) пояса и крыши кузова — вагонов модельного ряда 61-4440. В настоящее время пассажирские вагоны локомотивной тяги этого модельного ряда являются самой массовой продукцией завода.

E-mail: zaotiv@yandex.ru (С. Д. Коршунов)

Указанный ряд включает в себя следующие модели вагонов:

• вагон пассажирский купейный модели 61-4440 (количество спальных мест 36 или 18 по желанию заказчика);

• вагон пассажирский купейный штабной модели 61-4445 (количество спальных мест 26, в том числе 2 места для инвалида и сопровождающего его лица);

• вагон пассажирский некупейный модели 61-4447 (количество спальных мест 54 в девяти 6-местных пассажирских отделениях);

• вагон пассажирский с местами для сидения модели 61-4458 (количество мест для сидения: 60 — для вагона со стандартным интерьером, 40 — для вагона с улучшенным интерьером);

• вагон-ресторан модели 61-4460 (количество посадочных мест: 32 — в салоне, 4 — в баре).

Все вагоны указанных моделей имеют много общих систем и узлов, а именно:

• систему автономного электроснабжения с генератором мощностью 32 кВт и редукторно-карданным приводом от середины оси колесной пары типа WBA 32/2;

• установку кондиционирования воздуха;

• систему экологически чистых туалетов;

• переходные площадки, автосцепки и буфера.

Большинство моделей вагонов установлены на 2-осные тележки безлюлечного типа с дисковым тормозом (модель 68-4095 и модель 68-4096 с приводом), при этом модели вагонов в данном конструктивном исполнении могут быть установлены и на классические люлечные тележки моделей 68-4065 и 68-4066.

Очень близки по конструкции систем и узлов к модельному ряду 61-4440 вагоны поездов постоянного формирования. К ним относятся:

• вагон пассажирский купейный модели 61-4462 (количество спальных мест 36 или 18 по желанию заказчика);

• вагон пассажирский купейный штабной модели 61-4463 (количество спальных мест 26, в том числе 2 места для инвалида и сопровождающего его лица);

• вагон-ресторан модели 61-4464 (количество посадочных мест: 32 — в салоне, 4 — в баре).

© АО «ВНИИЖТ», 2021

В отличие от вагонов модельного ряда 61-4440 вагоны поездов постоянного формирования имеют централизованную систему электроснабжения, оборудованы замкнутыми межвагонными переходами производства фирмы Hubner GmbH и беззазорными сцепными устройствами.

Более подробное описание вагонов указанных моделей приведено в [1]. Особенности металлоконструкции базовой модели рассмотрены в [2].

Постановка задачи исследований. Все вагоны указанных выше моделей прошли обязательную сертификацию и получили сертификаты соответствия требованиям [3]. В процессе проведения приемочных и сертификационных испытаний было установлено, что низшая частота собственных изгибных колебаний в вертикальной плоскости близка к предельно допустимой для нагрузки «брутто» и равна 8 Гц согласно [4]. В [2] отмечалось, что указанный показатель более чем на 1 Гц меньше по сравнению с вагонами, обшивка которых изготовлена из обыкновенных углеродистых сталей. Такое положение дел для вагонов модельного ряда 61-4440 может привести к ухудшению вибрационных и шумовых характеристик при определенных условиях их эксплуатации. Подобные факты имели место и описаны в [5].

В табл. 1 приведены результаты экспериментальных исследований частоты первого тона изгибных колебаний основных моделей пассажирских вагонов модельного ряда 61-4440, которые были проведены за последние годы акционерным обществом Научная организация «Тверской институт вагоностроения» (АО НО «ТИВ»).

Для обеспечения благоприятных условий пребывания пассажиров в вагоне целесообразно повышение собственных частот изгибных колебаний более 8 Гц для нагрузки вагона «брутто». Одним из путей повышения собственных частот колебаний кузова является увеличение его изгибной жесткости [6].

АО НО «ТИВ» был проведен большой комплекс расчетно-экспериментальных исследований по оценке влияния конструктивных особенностей кузовов из нержавеющих сталей на их изгибную жесткость и параметры изгибных колебаний [7, 8, 9, 10]. Одной из причин проведения указанных работ являлось исследование металлоконструкции для изготовления специализированных вагонов (вагоны-салоны, вагоны-лаборатории и т. д.) [5]. В этих исследованиях рассмотрено влияние конструктивных особенностей кузовов, форм контура поперечного сечения, установки дополнительных стрингеров, фрамуг и перегородок, расположения оборудования, имеющего существенную массу, и др. Выработанные по ходу исследований отдельные рекомендации внедрялись на серийных вагонах модельного ряда 61-4440 и проверялись экспериментально.

После анализа результатов расчета и экспериментальных данных, полученных при эксплуатации серийных кузовов вагонов модельного ряда 61-4440, где внедрялись рекомендации, было принято решение на опытном кузове проверить следующие технические предложения по повышению изгибной жесткости металлоконструкции (рис. 1):

• установить поперечные балки из швеллера 100×60×4 и дуги крыши на участке между шпренгель-

Таблица 1

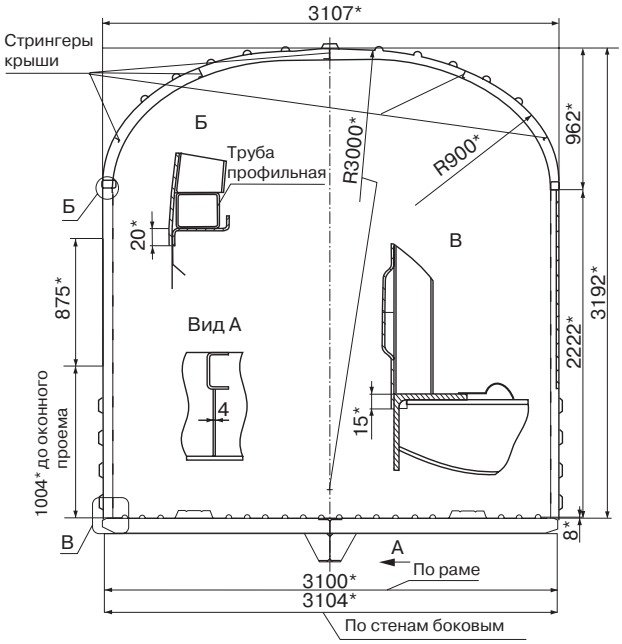
Результаты экспериментального определения частоты первого тона изгибных колебаний вагонов модельного ряда 61-4440

Table 1

Results of experimental determination of the frequency of the first tone of bending vibrations of cars of the 61-4440 model range

Параметр		Единица измерения	Год проведения испытаний				
			2013	2011	2017	2018	2013
			Модель вагона				
			61-4440	61-4445	61-4447	61-4458	61-4462
Размеры	Длина кузова по концам торцевых стен	мм	~ 24 950				
	Длина кузова по раме	мм	~ 24 420				
	База вагона	мм	17 000				
	Ширина кузова по наружной обшивке	мм	3104				
	Высота кузова от пятника	мм	3580				
Масса	Металлоконструкция кузова при испытаниях	кг	12 790	19 500	18 530	18 900	12 750
	Тара кузова	кг	43 960	45 100	43 000	43 400	42 200
	Брутто кузова	кг	48 760	47 900	49 600	47 700	47 000
Частота колебаний	Металлоконструкция кузова	Гц	11,2	10,38	10,53	10,45	10,8
	Тара кузова	Гц	8,5	8,31	8,39	8,36	8,58
	Кузов брутто	Гц	8,1	8,04	8,06	8,05	8,1

© АО «ВНИИЖТ», 2021



*Размер для справок.

Рис. 1. Сечение опытного кузова (по оконному проему)
Fig. 1. Section of the experimental body (along the window opening)

ными балками (усиленные поперечные балки в переходной зоне хребтовой балки рамы) в одной плоскости со стойками боковин для образования с ними шпангоутов;

• установить пять стрингеров в крыше из z-образного профиля (центральный 40×86×45×2,5, два боковых 40×65×45×2,5 и два на скатах крыши 30×30×30×2);

• верхнюю обвязку боковых стен выполнить из замкнутого элемента типа «труба профильная»;

• в зоне соединения поперечных балок рамы с двутавром хребтовой балки установить трапециевидные ребра толщиной 4 мм.

Для оценки влияния внесенных в конструкцию кузова изменений на его параметры изгибных колебаний и сопоставление полученных результатов с результатами ранее проведенных испытаний базовых моделей были проведены вибрационные испытания опытного кузова пассажирского вагона.

На испытания была подана металлоконструкция на технологических тележках со следующими узлами, установленными на штатные места:

• котел опытной системы;
• люки крыши;
• откидные подножки;
• ударно-тяговые приборы;
• буферы.

Масса поданной на испытания металлоконструкции с вышеперечисленными узлами составила 17,6 т. Подготовка металлоконструкции испытуемого кузова проводилась для одного режима опирания, при котором кузов устанавливается на жесткие опоры. В качестве жестких опор использовались домкраты стенда статических испытаний вагонов, расположенные под концами шкворневых балок. Применение жестких опор позволяло достичь более точного позиционирования металлоконструкции.

В соответствии с целью вибрационных испытаний определялись следующие показатели:

• частота первого тона изгибных колебаний металлоконструкции кузова в вертикальной плоскости, (далее — частота первого тона);

• логарифмический декремент колебаний на частоте первого тона, определенный по наиболее характерным процессам ускорения;

• зависимость средней амплитуды перемещения контрольных точек, расположенных вдоль обвязки рамы, от частоты возмущающей силы (далее — АЧХ перемещения);

• зависимость средней амплитуды возмущающей силы от ее частоты.

Для определения указанных показателей регистрировались следующие процессы:

• ускорение в контрольных точках металлоконструкции кузова, м/с^2;

• перемещение в контрольных точках металлоконструкции кузова, мм;

• частота возмущающего усилия вибромашины, Гц;

• возмущающая сила вибромашины, Н.

Вибратор машины ВМ-10 был установлен на полу в тамбуре нетормозного конца вагона, условие жесткой связи его рабочего основания с рамой вагона было обеспечено. Возмущающая сила регистрировалась динамометрическими датчиками, установленными на вибраторе вибромашины. На валу двигателя вибратора установленный тахогенератор обеспечивал замеры частоты возмущающей силы. Также металлоконструкция кузова была оборудована следующими датчиками:

• акселерометры (датчики ускорения) ARF-10A с частотным диапазоном 0–100 Гц, обеспечивающие измерение ускорения в контрольных точках рамы металлоконструкции кузова;

• акселерометры ARF-50A с частотным диапазоном 0–200 Гц, обеспечивающие измерение ускорения в контрольных точках среднего сечения металлоконструкции кузова;

• датчики малого перемещения с диапазоном измерения от 0,02 до 2 мм, обеспечивающие измерение перемещения в контрольных точках рамы металлоконструкции кузова.

Датчики малого перемещения были установлены вдоль линии боковой обвязки на массивных, устойчивых опорах и имели возможность подстройки нулевого положения. Датчики ускорения устанавливались на обвязке рамы, а также в среднем сечении кузова и ориентировались на регистрацию амплитуды ускорения

© АО «ВНИИЖТ», 2021

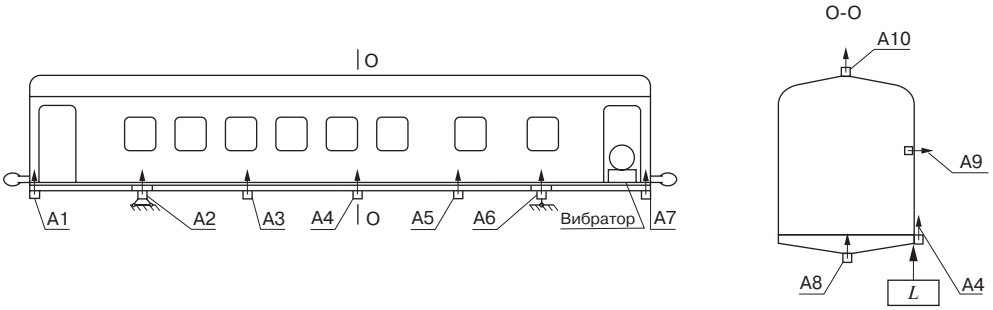


Рис. 2. Расположение датчиков ускорения на металлоконструкции опытного кузова при испытаниях: А1–А10 — зоны установки акселерометров для определения вертикального и горизонтального ускорения элементов кузова; *L* — зона установки датчиков перемещения

Fig. 2. Location of accelerometers sensors on the metal structure of the experimental body during testing: A1—A10 — zones of installation of accelerometers for determining vertical and horizontal acceleration of body elements; *L* — area of installation of motion sensors

в вертикальной и горизонтальной плоскостях кузова. Схемы размещения контрольных точек регистрации ускорения, перемещения и расположения вибратора на металлоконструкции кузова приведены на рис. 2 и 3.

При испытаниях применялся комплект усилительно-регистрирующей аппаратуры, построенный на базе динамических усилителей Spider 8/SR55, обеспечивавший работу с указанными датчиками и частоту дискретизации записываемых процессов 300 Гц. Для получения наиболее полных данных о вибрационных свойствах металлоконструкции кузова испытания объекта проводились тремя методами [11, 12, 13, 14].

Метод 1. Получение данных с помощью вибромашины последовательным дискретным набором. Во время проведения испытаний этим методом на кузов вагона воздействовали синусоидальной динамической силой, которая фиксировалась четырьмя силоизмерительными датчиками, установленными в основании вибромашины. Частота возмущающей силы изменялась ступенчато от 5 до 25 Гц с переменным шагом от 0,3 Гц в начале частотной оси до 1 Гц в конце. Было записано 73 реализации средней длительностью 15 с.

Метод 2. Получение данных с помощью вибромашины последовательным непрерывным набором. Во время проведения испытаний этим методом на кузов вагона воздействовали синусоидальной динамической силой, которая фиксировалась четырьмя силоизмерительными датчиками, установленными в основании вибромашины. Частота возмущающей силы изменялась плавно от 5 до 25 Гц и от 25 до 5 Гц. Было записано 6 реализаций средней длительностью 110 с.

Метод 3. Получение данных импульсным возбуждением. При испытаниях этим методом на кузов вагона оказывалось импульсное силовое воздействие с последующей регистрацией процесса затухающих колебаний в его конструкции при помощи датчиков ускорения. Возбуждение затухающих колебаний осуществлялось сбросом мерного стального груза массой 25 кг с высоты около 1,0 м на пол обоих тамбуров и середины кузова поочередно. Всего было записано 9 реализаций длительностью около 11 с.

В процессе испытаний проводились периодические осмотры и визуальный контроль состояния конструкции кузова вагона.

Анализ результатов вибрационных испытаний опытного и серийного кузовов вагонов. На рис. 4 представлена зависимость возмущающей силы, измеренной на опытном кузове, от ее частоты. Зависимость получена по данным испытаний последовательным непрерывным набором.

Исходными данными для построения АЧХ перемещения являлись соответствующие процессы, записанные при испытаниях последовательным дискретным набором. Исходными данными для построения АЧХ ускорения являлись соответствующие процессы, записанные при испытаниях последовательным непрерывным набором. Квадратичное нарастание возмущающей силы от частоты учтено при обработке данных для построения АЧХ перемещения и ускорения. Типичная зависимость амплитуды перемещения от частоты показана на рис. 5 для датчика *L*4 (см. рис. 3).

На рис. 6 представлена зависимость амплитуды ускорения от частоты для всех датчиков среднего сечения опытного кузова.

На рис. 7 представлены формы вертикальной деформации опытного кузова при его колебаниях (из

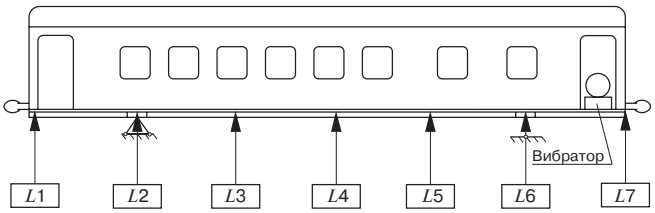


Рис. 3. Расположение датчиков перемещения *L*1-*L*7 на металлоконструкции опытного кузова при испытаниях

Fig. 3. Location of motion sensors L1-L7 on the metal structure of the experimental body during testing

© АО «ВНИИЖТ», 2021

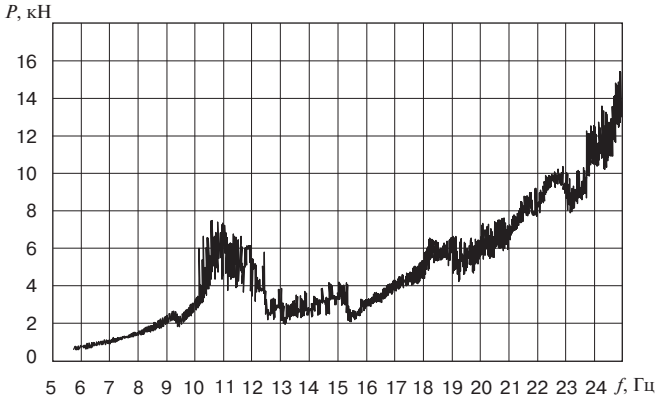


Рис. 4. Зависимость возмущающей силы *P*, измеренной на опытном кузове, от ее частоты *f*
Fig. 4. Dependence of disturbing force *P*, measured on the experimental body, on its frequency *f*

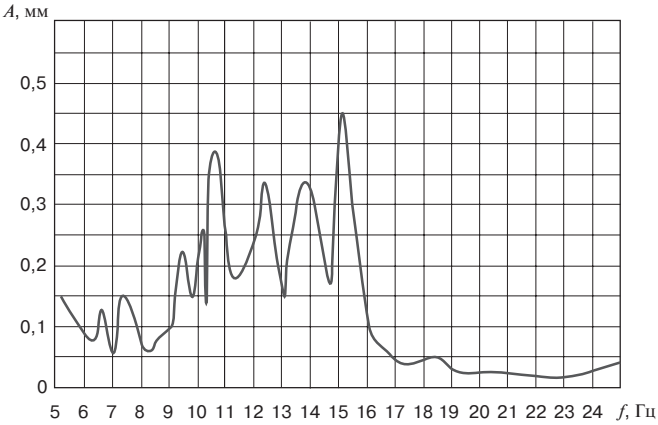


Рис. 5. Зависимость амплитуды перемещения *A* датчика *L*4 от частоты *f* на опытном кузове
Fig. 5. Dependence of amplitude of *A* motion of the sensor *L*4 on the frequency *f* on the experimental body

Таблица 2

Логарифмические декременты колебаний опытного кузова на частоте 12,4 Гц

Table 2

Logarithmic decrements of vibrations of the experimental body at a frequency of 12.4 Hz

Зона металлоконструкции кузова	Процесс	Декремент колебаний
Тормозной конец. Концевая балка	A1	0,09
Среднее сечение. Нижняя обвязка	A4	0,08
Среднее сечение. Хребтовая балка	A8	0,08
Среднее сечение. Зона простенка	A9	0,06
Среднее сечение. Конек крыши	A10	0,08
Нетормозной конец. Концевая балка	A7	0,08

предположения совпадения с формой деформации нижней обвязки), построенные для частот, на которых получены экстремумы АЧХ перемещения. Формы деформации кузова получены по данным с датчиков перемещения *L*1–*L*7.

Осциллограмма и спектральная плотность наиболее характерного процесса ускорения, полученные при испытаниях импульсным возбуждением кузова, установленного на жестких опорах, представлены на рис. 8.

Логарифмические декременты колебаний опытного кузова представлены в табл. 2. Исходными данными для определения декрементов являлись осциллограммы затухающих ускорений, полученные при импульсном методе возбуждения колебаний металлоконструкции.

При испытаниях металлоконструкции опытного кузова, установленного на жесткие опоры, максимальное значение векторной суммы возмущающей силы составило 16 кН и было получено на частоте 25 Гц (рис. 4). Возмущающая сила нарастает в целом пропорционально квадрату частоты и имеет значительный локальный подъем (до 7,5 кН) в области частот от 10,5 до 12,5 Гц.

Полученные в испытаниях АЧХ перемещения по датчикам *L*1–*L*7 имеют сложный вид, включающий в себя ряд экстремумов на частотах 9,5; 10,6; 12,4; 13,9 и 15,2 Гц. Максимальная амплитуда перемещения средней части кузова (см. рис. 5) составила 0,45 мм, а консольных частей — 1,44 мм на частоте 10,8 Гц (датчики *L*1 и *L*7).

АЧХ ускорения в зоне боковой обвязки имеют в целом экстремумы на тех же частотах, что и АЧХ перемещения, при этом не один из них существенно не доминирует, исключением является АЧХ, полученная с датчика A7, которая имеет преобладающий экстремум на частоте 10,8 Гц.

АЧХ вертикального ускорения, полученные с датчиков, размещенных в среднем сечении кузова (рис. 6), существенно отличаются. Так, АЧХ ускорения в зоне хребтовой балки имеет подъем в зоне частот от 10,4 до 14,2 Гц и два экстремума на частотах 10,6 и 13,9 Гц, АЧХ ускорения крыши имеет более узкую полосу подъема (от 10,4 до 12,5 Гц) и два экстремума на частотах 10,6 и 12,4 Гц. Максимальная амплитуда ускорения хребтовой балки составляет 4,8 м/с^2 (крыши — 5,3 м/с^2) и вдвое превосходит амплитуду ускорения обвязки на частотах ниже 13 Гц.

АЧХ горизонтального ускорения, полученная с датчика, размещенного на простенке среднего сечения кузова, имеет множественные экстремумы, незначительно доминирующим из которых является экстремум на частоте 10,6 Гц.

При импульсном методе возбуждения частоты затухающих колебаний составили 9,8; 12,5 и 15,4 Гц, частота основного максимума, присутствующего на всех спектральных плотностях записанных процессов ускорения, — 12,5 Гц.

Значение частоты первого тона колебаний металлоконструкции опытного кузова, определенное при испытаниях, составляет 12,4 Гц.

© АО «ВНИИЖТ», 2021

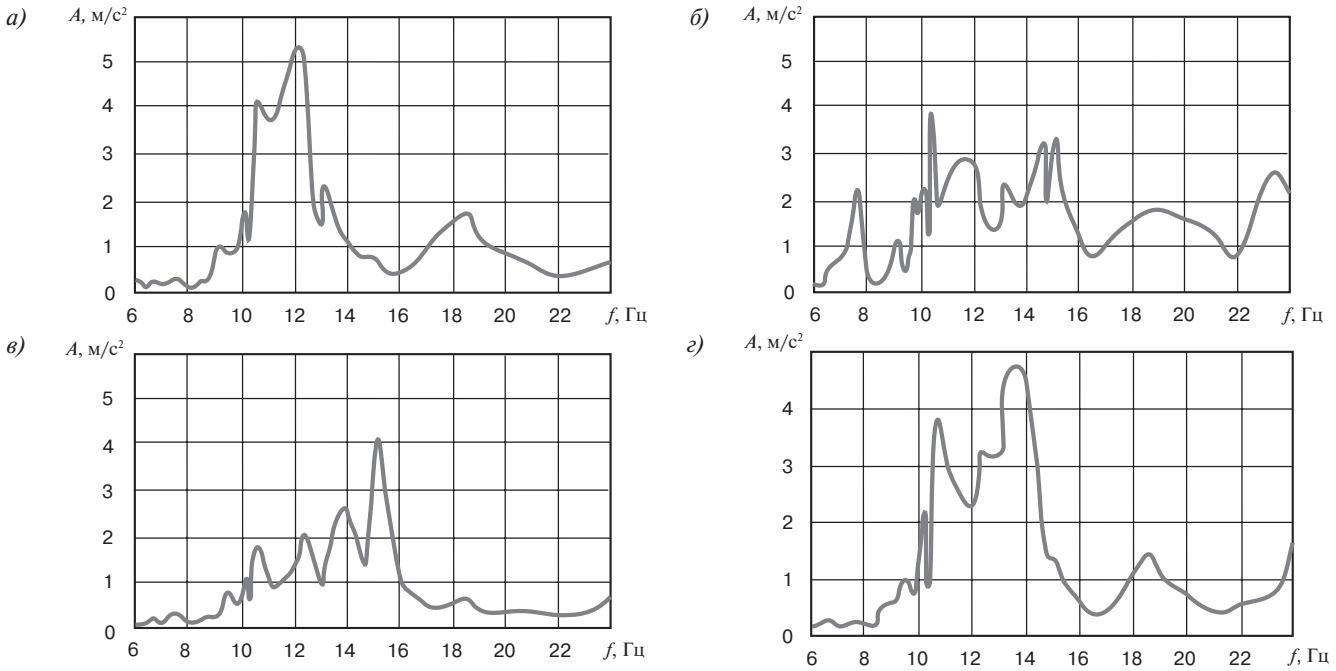


Рис. 6. Зависимость амплитуды ускорения от частоты, полученная в зоне среднего сечения опытного кузова для датчиков ускорения:
а — A10; *б* — A9; *в* — A4; *г* — A8

Fig. 6. Dependence of amplitude of acceleration on the frequency, obtained in the zone of the middle section of the experimental body for acceleration sensors:
а — A10; *б* — A9; *в* — A4; *г* — A8

Форма деформации кузова при колебаниях на частоте 12,4 Гц (рис. 7, *в*) совпадает с формой деформации балки на двух опорах при колебаниях на частоте первого тона.

Среднее значение логарифмического декремента вертикальных колебаний металлоконструкции кузова при испытаниях, определенное для частоты первого тона, составляет 0,08.

Для оценки эффективности увеличения жесткости металлоконструкции опытного кузова на повышение частоты изгибных колебаний проведем сопоставление результатов с данными по металлоконструкции кузова вагона модели 61-4447 [15]. Вагоны этой модели проходили наибольшее количество вибрационных, динамических и стационарных испытаний [16, 17] при постановке на производство и в процессе сертификации.

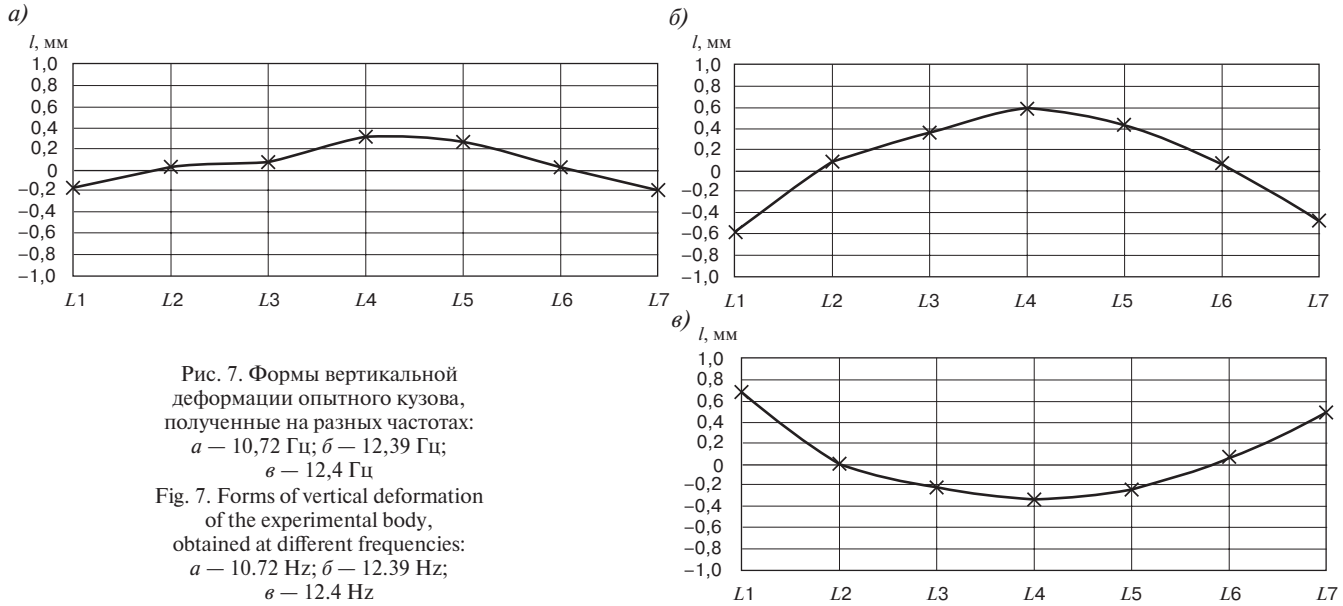


Рис. 7. Формы вертикальной деформации опытного кузова, полученные на разных частотах:
а — 10,72 Гц; *б* — 12,39 Гц;
в — 12,4 Гц

Fig. 7. Forms of vertical deformation of the experimental body, obtained at different frequencies:
а — 10.72 Hz; *б* — 12.39 Hz;
в — 12.4 Hz

© АО «ВНИИЖТ», 2021

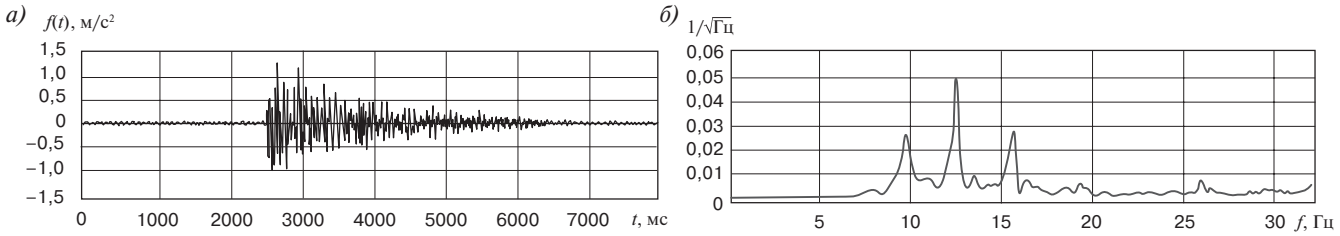


Рис. 8. Осциллограмма и спектральная плотность ускорения по датчику А4:
а — осциллограмма процесса; *б* — спектральная плотность процесса
Fig. 8. Oscillogram and spectral density of acceleration according to A4 sensor:
а — oscillogram of the process; *б* — spectral density of the process

На рис. 9 показана зависимость амплитуды ускорения от частоты для сравниваемых кузовов. По сравнению с кузовом вагона модели 61-4447 у опытного кузова для АЧХ ускорения в зоне среднего сечения характерно большее число экстремумов с меньшей амплитудой ускорения, амплитуда ускорения в зоне хребтовой балки ниже в 2 раза, а поперечные колебания в зоне простенка — в 4 раза.

В табл. 3 приведены значения ускорения различных зон металлоконструкции опытного кузова и кузова вагона модели 61-4447, полученные при колебаниях на частоте первого тона. Значения в таблице приведены к возмущающей силе, равной 7,5 кН. Как видно из результатов, значения ускорения на металлоконструкции опытного кузова в большинстве зон существенно меньше, чем значения ускорения на металлоконструкции кузова вагона модели 61-4447.

В табл. 4 приведены сравнительные значения логарифмических декрементов колебаний сравниваемых металлоконструкций кузовов вагонов. Как видно из приведенных результатов испытаний, среднее значение логарифмического декремента вертикальных колебаний металлоконструкции, определенное для частоты первого тона, у кузова вагона модели 61-4447 на 27 % больше значения, полученного для опытного кузова.

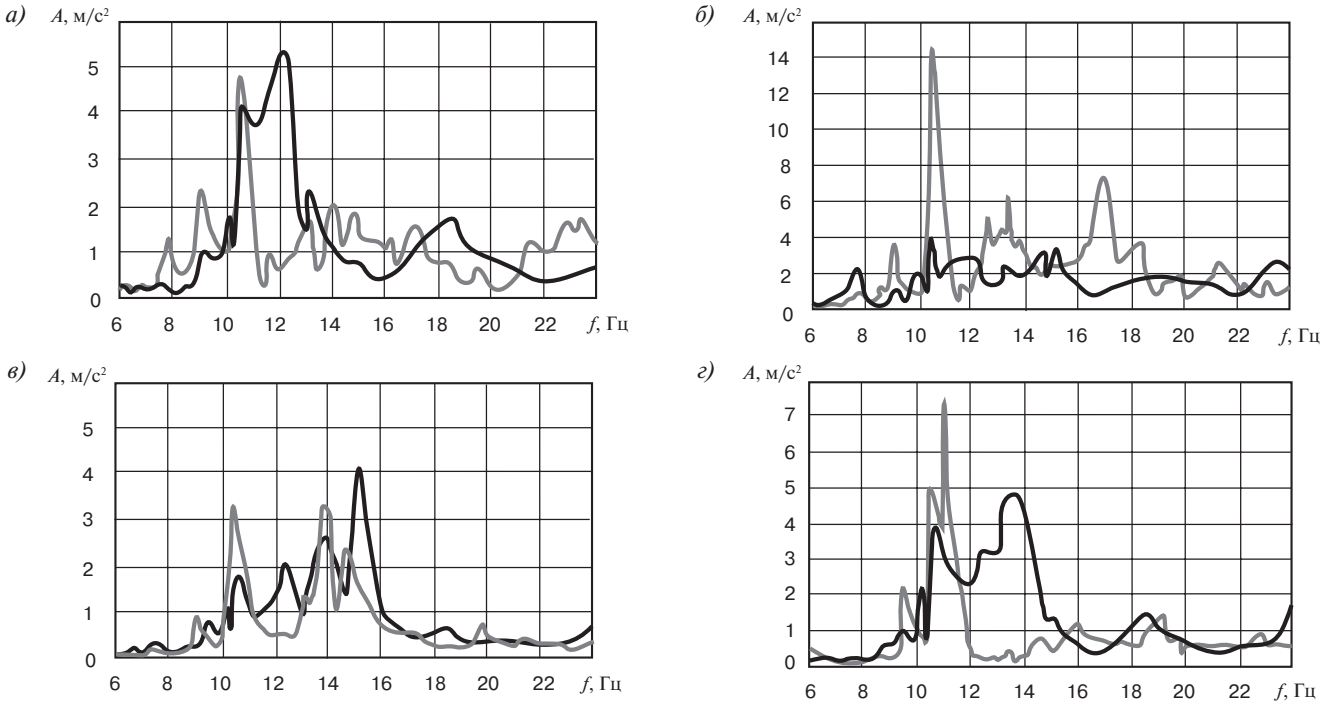


Рис. 9. Зависимость амплитуды ускорения от частоты, полученная
в зонах среднего сечения опытного кузова (черная линия) и кузова вагона модели 61-4447 (серая линия) для датчиков ускорения:
а — А10; *б* — А9; *в* — А4; *г* — А8
Fig. 9. Dependence of acceleration amplitude on the frequency, obtained in the zones of the middle section
of the experimental body (black line) and the car body of the 61-4447 model range (gray line) for acceleration sensors:
а — А10; *б* — А9; *в* — А4; *г* — А8

© АО «ВНИИЖТ», 2021

Таблица 3

Значения ускорения в металлоконструкциях опытного и серийного кузовов вагонов при одинаковой возмущающей силе

Table 3

Acceleration values in metal structures of experimental and serial car bodies with the same disturbing force

Зона металлоконструкции кузова	Процесс (в соответствии с рис. 2)	Ускорение в металлоконструкции, Гц	
		Опытный кузов	Кузов вагона модели 61-4447
Тормозной конец. Концевая балка	A1	2,5	6,3
Среднее сечение. Нижняя обвязка	A4	2,6	3,3
Среднее сечение. Хребтовая балка	A8	4,1	7,8
Среднее сечение. Зона простенка	A9	1,9	14,9
Среднее сечение. Конек крыши	A10	6,8	4,9
Нетормозной конец. Концевая балка	A7	3,2	8,5
Частота сравнения	частота первого тона	12,4	10,5

Таблица 4

Логарифмические декременты колебаний опытного и серийного кузовов вагонов

Table 4

Logarithmic decrements of vibrations of experimental and serial car bodies

Зона металлоконструкции кузова	Процесс	Декремент колебаний	
		Опытный кузов	Кузов вагона модели 61-4447
Тормозной конец. Концевая балка	A1	0,09	0,11
Среднее сечение. Нижняя обвязка	A4	0,08	0,11
Среднее сечение. Хребтовая балка	A8	0,08	0,10
Среднее сечение. Зона простенка	A9	0,06	0,04
Среднее сечение. Конек крыши	A10	0,08	0,11
Нетормозной конец. Концевая балка	A7	0,08	0,12

Заключение. Проведенные экспериментальные исследования металлоконструкции опытного кузова и экспертиза результатов ранее выполненных испытаний металлоконструкции серийных вагонов показали положительную динамику параметров, характеризующих изгибные колебания, а именно:

- повышение частоты первого тона колебаний на 18,1 % (с 10,5 до 12,4 Гц);
- снижение (от 12 до 50 %) амплитуды вертикальных колебаний кузова на частоте первого тона;
- снижение (в среднем вдвое) амплитуды вертикальных ускорений кузова при колебаниях на частоте первого тона;
- существенное (с 14,9 до 1,9 м/с^2) снижение горизонтального ускорения в зоне простенка среднего сечения при колебаниях на частоте первого тона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективный пассажирский подвижной состав / К. В. Бобрышев [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2015. № 7. С. 43–45.

2. Анализ и оценка расчетно-экспериментального определения частоты изгибных колебаний кузовов пассажирских вагонов / А. Н. Скачков [и др.] // Тяжелое машиностроение. 2017. № 9. С. 24–31.

3. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности подвижного состава»: ТРТС 001/2011. Минск: БелГИИС, 2012. 46 с.

4. ГОСТ Р 55182–2012. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Общие технические требования: нац. стандарт Российской Федерации: утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 ноября 2012 г. № 1161-ст: дата введения 2014-01-01. М.: Стандартинформ, 2013. 24 с.

5. Скачков А. Н., Самошкин С. Л., Зайцев А. В. Способы управления параметрами вибрации пассажирских вагонов // Мир транспорта. 2017. № 2. С. 60–73.

6. Самошкин С. Л., Скачков А. Н., Коршунов С. Д. О необходимости интенсификации научно-исследовательских работ по определению изгибной жесткости и параметров колебаний кузовов современных пассажирских вагонов // Техника и технологии наземного транспорта: материалы Всерос. науч. конф. аспирантов, посвященной 50-летию кафедры «Вагоны» (25–26 января 2018 г.) / Уральский гос. ун-т путей сообщения (УрГУПС). Екатеринбург: УрГУПС, 2018. Вып. 2 (232). С. 86–90.

7. Скачков А. Н., Самошкин С. Л., Коршунов С. Д. Влияние снижения массы кузовов вагонов на их изгибную жесткость и параметры изгибных колебаний // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 5–9 июля 2017 г.) / Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС). СПб.: ПГУПС, 2017. С. 88–90.

8. Скачков А. Н., Самошкин С. Л., Коршунов С. Д. Влияние габаритно-весовых параметров кузовов пассажирских вагонов на их изгибную жесткость и параметры изгибных колебаний // Транспорт: наука, образование, производство: тр. Междунар. науч.-практ.

© АО «ВНИИЖТ», 2021

конф. (Ростов-на-Дону, 2017) / Ростовский гос. ун-т путей сообщения (РГУПС). Ростов н/Д.: РГУПС, 2017. Т. 1: Технические науки. С. 254–257.

9. Скачков А. Н., Самошкин С. Л., Коршунов С. Д. Определение изгибной жесткости кузовов пассажирских вагонов по результатам статических испытаний // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 4–8 июля 2018 г.) / Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС). СПб.: ПГУПС, 2018. С. 89–91.

10. Ломаков П. С., Скачков А. Н., Самошкин С. Л. Расчетные исследования влияния конструктивных особенностей кузова пассажирского вагона из нержавеющих сталей на параметры его изгибных колебаний // Проблемы и перспективы развития вагоностроения: сб. науч. тр. VIII Всерос. науч.-техн. конф. (Брянск, 18–19 апреля 2019 г.) / Брянский гос. техн. ун-т (БГТУ). Брянск: БГТУ, 2019. С. 163–165.

11. Никифоров Д. А., Скачков А. Н. Отработка методики определения первого тона собственной частоты при испытаниях кузова вагона модели 61-4514 // Проблемы безопасности на транспорте: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 23–24 ноября 2017 г.): в 2 ч. / Белорусский гос. ун-т транспорта (БелГУТ); под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. Гомель: БелГУТ, 2017. Ч. 1. С. 132–133.

12. Скачков А. Н., Самошкин С. Л., Дементьев С. А. Анализ методов экспериментального определения параметров изгибных колебаний кузовов пассажирских вагонов // Проблемы безопасности на транспорте: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 23–24 ноября 2017 г.): в 2 ч. / Белорусский гос. ун-т транспорта (БелГУТ); под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. Гомель: БелГУТ, 2017. Ч. 1. С. 159–160.

13. Скачков А. Н., Самошкин С. Л., Коршунов С. Д. Экспериментальные исследования параметров изгибных колебаний кузовов вагонов метрополитена комбинированным способом // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 9 июля 2019 г.) / Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС). СПб.: ПГУПС, 2019. С. 280–282.

14. Совершенствование методов экспериментального определения параметров изгибных колебаний пассажирских вагонов / А. Н. Скачков [и др.] // Труды РГУПС. 2019. № 4 (49). С. 108–111.

15. Разработка основополагающих принципов экспериментального метода определения изгибной жесткости кузовов цельнометаллических вагонов / А. Н. Скачков [и др.] // Тяжелое машиностроение. 2018. № 10. С. 32–37.

16. Коршунов С. Д. Методика расчетно-экспериментальных исследований кузовов современного подвижного состава / С. Д. Коршунов [и др.] // Известия ПГУПС. 2015. № 4. С. 38–47.

17. Коршунов С. Д. Развитие методов поколесного взвешивания железнодорожного подвижного состава // Вестник РГУПС. 2020. № 4. С. 60–64.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

СКАЧКОВ Александр Николаевич,
канд. техн. наук, заместитель генерального директора — технический директор, АО НО «ТИВ»

САМОШКИН Сергей Львович,
д-р техн. наук, начальник управления научно-технического обеспечения и развития, АО НО «ТИВ»

КОРШУНОВ Сергей Дмитриевич,
канд. техн. наук, заведующий лабораторией «Динамико-прочностные испытания вагонов», АО НО «ТИВ»

НИКИФОРОВ Дмитрий Александрович,
инженер первой категории, лаборатория «Динамико-прочностные испытания вагонов», АО НО «ТИВ»

РОМАШОВ Дмитрий Александрович,
инженер второй категории, лаборатория «Динамико-прочностные испытания вагонов», АО НО «ТИВ»

Статья поступила в редакцию 07.04.2021 г., принята к публикации 16.04.2021 г.

Для цитирования: Разработка и оценка комплекса исследований по повышению частоты изгибных колебаний кузовов современных пассажирских вагонов / А.Н. Скачков [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 2. С. 76–85. DOI: https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-76-85.

Development and evaluation of a complex of studies to increase the frequency of bending vibrations of modern passenger car bodies

A. N. SKACHKOV, S. L. SAMOSHKIN, S. D. KORSHUNOV, D. A. NIKIFOROV, D. A. ROMASHOV

Joint Stock Company Scientific Organization "Tver Institute of Car Construction" (JSC NO "TIV"), Tver, 170003, Russia

Abstract. Investigations of the frequency of bending vibrations of the car bodies of 61-4440 model range, which includes compartment cars, staff cars, non-compartment cars, coach cars, restaurant cars and others, are described. The bodies of all cars of this model range have the same overall dimensions and are made of corrosion-resistant steels (stainless) with flat corrugated sheathing of the lower (under the window) belt.

To assess the influence of the design features of stainless steel bodies on its bending stiffness and the parameters of bending vibrations in the vertical plane, a computational and experimental complex of works was carried out.

After analyzing the calculation results and experimental data, proposals were developed and implemented to increase the bending stiffness of the metal body structure with stainless steel skin. To check the implemented proposals, complex tests were carried out to determine the parameters of bending vibrations of the metal structure of the experimental body. The tests were carried out according to the combined method developed by the authors. For this, a vibrator, installed in the console parts of the body, and impulse excitation were used.

The results of testing the metal structure of the experimental body in comparison with the results of testing the car bodies of 61-4440 model range showed the effectiveness of the implemented proposals, namely: increasing the frequency of the first tone of bending vibrations by 18 %; decrease in the amplitude of vertical vibrations of the body structure at the frequency of the first tone from 12 to 50 %; decrease in the amplitude of the vertical accelerations of the metal structure of the body during oscillations at the

© АО «ВНИИЖТ», 2021

frequency of the first tone approximately by 2 times; significant reduction in horizontal acceleration in the area of the middle section walls. The effectiveness of the implemented proposals for increasing the bending stiffness of the metal structure of the experimental body allows recommending them for the entire model range of 61-4440 cars.

Keywords: passenger car; car model range; body metal structure; vibration tests; bending vibrations; frame; bending stiffness

DOI: https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-76-85

REFERENCES

1. Bobryshev K. V., Kornev Yu. V.,. Pokrovskiy B. C., Samoshkin O. S. *Promising passenger rolling stock*. Zheleznodorozhnyy transport, 2015, no. 7, pp. 43–45.

2. Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Korshunov S. D., Gorin S. A. *Analysis and evaluation of the calculated and experimental determination of the frequency of bending vibrations of the bodies of passenger cars*. Tyazheloe mashinostroenie, 2017, no. 9, pp. 24–31.

3. *Technical regulations of the Customs Union "On the safety of rolling stock": TRTS 001/2011*. Minsk, BelGIIS Publ., 2012, 46 p. (in Russ.).

4. GOST R 55182–2012. *Passenger cars on locomotive traction. General technical requirements*. National standard of the Russian Federation, approved and put into effect by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of November 26, 2012 No. 1161-st. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 24 p. (in Russ.).

5. Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Zaytsev A. V. *Methods of controlling the vibration parameters of passenger cars*. World of Transport and Transportation, 2017, no. 2, pp. 60–73.

6. Samoshkin S. L., Skachkov A. N., Korshunov S. D. *On the need to intensify research work to determine the flexural stiffness and vibration parameters of the bodies of modern passenger cars*. Technics and technologies of ground transport: materials of the All-Russian scientific conf. for postgraduate students dedicated to the 50th anniversary of the Department "Cars" (January 25–26, 2018). Ural state University of Railways (UrGUPS). Yekaterinburg, UrGUPS Publ., 2018, no. 2 (232), pp. 86–90.

7. Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Korshunov S. D. *The effect of reducing the mass of car bodies on its bending stiffness and bending vibration parameters*. Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects: materials of the XII Int. scientific and technical conf. (St. Petersburg, July 5–9, 2017). St. Petersburg State University of Railway Transport of Emperor Alexander I (PGUPS). St. Petersburg, PGUPS Publ., 2017, pp. 88–90.

8. Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Korshunov S. D. *Influence of the overall and weight parameters of passenger car bodies on its bending stiffness and bending vibration parameters*. Transport: science, education, production: proc. of the Int. scientific and practical conf. (Rostov-on-Don, 2017). Rostov State University of Railways (RGUPS). Rostov n/D, RGUPS Publ., 2017, Vol. 1: Tekhnicheskie nauki [Technical Sciences], pp. 254–257.

9. Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Korshunov S. D. *Determination of the flexural stiffness of passenger car bodies according to the results of static tests*. Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects: materials of the XIII Int. scientific and technical conf. (St. Petersburg, July 4–8, 2018). St. Petersburg State University of Railway Transport of Emperor Alexander I (PGUPS). St. Petersburg, PGUPS Publ., 2018, pp. 89–91.

10. Lomakov P. S., Skachkov A. N., Samoshkin S. L. *Computational studies of the influence of the design features of a passenger car body made of stainless steels on the parameters of its bending vibrations*. Problems and prospects for the development of car building: coll. of scientific papers of the VIII All-Russian scientific and technical conf. (Bryansk, April 18–19, 2019). Bryansk State Technical University (BGTU). Bryansk, BGTU Publ., 2019, pp. 163–165.

11. Nikiforov D. A., Skachkov A. N. *Development of the method for determining the first tone of the natural frequency when testing the 61-4514 car body*. Problems of safety in transport: materials of the VIII Int. scientific and practical conf. (Gomel, November 23–24, 2017): in 2 parts. Belarusian State University of Transport (BelGUT). Gomel, BelGUT Publ., 2017, Part 1, pp. 132–133.

12. Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Dement'ev S. A. *Analysis of methods of experimental determination of the parameters of bending vibrations of passenger car bodies*. Problems of safety in transport: materials of the VIII Int. scientific and practical conf. (Gomel, November 23–24, 2017): in 2 parts. Belarusian State University of Transport (BelGUT). Gomel, BelGUT Publ., 2017, Part 1, pp. 159–160.

13. Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Korshunov S. D. *Experimental studies of the parameters of bending vibrations of metro car bodies in a combined way*. Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects: materials of the XIV Int. scientific and technical conf. (St. Petersburg, July 9, 2019). St. Petersburg State University of Railway Transport of Emperor Alexander I (PGUPS). St. Petersburg, PGUPS Publ., 2019, pp. 280–282.

14. Skachkov A. N. *Improvement of methods for experimental determination of the parameters of flexural vibrations of passenger cars*. Trudy RGUPS [Proceedings of the RGUPS], 2019, no. 4 (49), pp. 108–111.

15. Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Korshunov S. D., Zhukov A. S., Nikiforov D. A. *Development of the fundamental principles of the experimental method for determining the bending stiffness of the bodies of all-metal cars*. Tyazheloe mashinostroenie, 2018, no. 10, pp. 32–37.

16. Korshunov S. D., Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Goncharov D. I., Zhukov A. S. *Method of calculation and experimental research of bodies of modern rolling stock*. Proceedings of Petersburg Transport University, 2015, no. 4, pp. 38–47.

17. Korshunov S. D. *Development of methods for wheel weighing of railway rolling stock*. Vestnik RGUPS, 2020, no. 4, pp. 60–64.

ABOUT THE AUTHORS

Aleksander N. SKACHKOV,
Cand. Sci. (Eng.), Deputy General Director — Technical Director, JSC NO "TIV"

Sergey L. SAMOSHKIN,
Dr. Sci. (Eng.), Head of Scientific and Technical Support and Development Department, JSC NO "TIV"

Sergey D. KORSHUNOV,
Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory "Dynamic Strength Testing of Cars", JSC NO "TIV"

Dmitriy A. NIKIFOROV,
1st Category Engineer, Laboratory "Dynamic Strength Testing of Cars", JSC NO "TIV"

Dmitriy A. ROMASHOV,
2nd Category Engineer, Laboratory "Dynamic Strength Testing of Cars", JSC NO "TIV"

E-mail: zaotiv@yandex.ru (S. D. Korshunov)

Received 07.04.2021
Accepted 16.04.2021

For citation: Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Korshunov S. D., Nikiforov D. A., Romashov D. A. Development and evaluation of a complex of studies to increase the frequency of bending vibrations of modern passenger car bodies // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (2): 76–85 (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-76-85.

© АО «ВНИИЖТ», 2021