

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.45

doi: 10.30987/2782-5957-2023-7-77-85

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗБЫТОЧНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ И БОКОВОЙ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА ОЦЕНКУ ПРОЧНОСТИ КУЗОВА ДВУХЭТАЖНОГО ВАГОНА

Елена Викторовна Сорокина<sup>1</sup>, Сергей Дмитриевич Коршунов<sup>2✉</sup>, Алексей Петрович Болдырев<sup>3</sup>, Федор Юрьевич Лозбинеv<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup> АО НО «Тверской институт вагоностроения», Тверь, Россия

<sup>3,4</sup> Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

<sup>1</sup> sorokina.e@tiv.ru,

<sup>2</sup> korshunov.s@tiv.ru

<sup>3</sup> apb.tubryansk@gmail.com

<sup>4</sup> psbstu@yandex.ru

### Аннотация

Проанализированы существующие подходы к анализу нагруженности несущих систем кузовов двухэтажных вагонов, а также опыт их эксплуатации на отечественных железных дорогах. Установлено, что для современных несущих конструкций кузовов, имеющих минимально-допустимые запасы по прочности и устойчивости элементов, целесообразно уделять больше внимания специфическим нагрузкам, таким как ветровая и нагрузкам, связанным с избыточной солнечной радиацией.

Предложена методика исследования влияния указанных факторов на несущую способность элементов несущей оболочки кузова вагона. Методика предусматривает как экспериментальную имитацию облучения избыточной солнечной радиацией крыши кузова двухэтажного пассажирского вагона в сочетании с последующим воздействием ремонт-

ных нагрузок, так и проведения комплекса расчетов, основанных на применении метода конечных элементов (МКЭ).

Проведенные исследования указали на необходимость уточненного учета влияния боковой ветровой нагрузки и избыточной солнечной радиации при оценке прочности несущих конструкций кузовов двухэтажных вагонов.

Показано, что предложенная методика позволяет адекватно учитывать указанные специфические нагрузки на основе математического моделирования с подтверждением получаемых результатов данными натурных экспериментов.

**Ключевые слова:** исследования, параметры, вагоны, внешние факторы, методика, прочность, кузов.

Ссылка для цитирования:

Сорокина Е.В. Исследование влияния избыточной солнечной радиации и боковой ветровой нагрузки на оценку прочности кузова двухэтажного вагона / Е.В. Сорокина, С.Д. Коршунов, А.П. Болдырев, Ф.Ю. Лозбинеv // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 07. – С. 77-85. doi: 10.30987/2782-5957-2023-7-77-85.

Original article

Open Access Article

## STUDY OF THE EFFECT OF EXCESSIVE SOLAR RADIATION AND LATERAL WIND LOAD ON THE ASSESSMENT OF THE BODY STRENGTH OF A DOUBLE-DECK CAR

Elena Viktorovna Sorokina<sup>1</sup>, Sergey Dmitrievich Korshunov<sup>2✉</sup>, Aleksey Petrovich Boldyrev<sup>3</sup>, Fedor Yurievich Lozbinev<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup> Tver Institute of Railway Car Building, Tver, Russia

<sup>3,4</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> sorokina.e@tiv.ru,

<sup>2</sup> korshunov.s@tiv.ru

<sup>3</sup> apb.tubryansk@gmail.com

<sup>4</sup> psbstu@yandex.ru

© Сорокина Е. В., Коршунов С. Д., Болдырев А. П., Лозбинеv Ф. Ю., 2023

## Abstract

Approaches to the analysis of the load-bearing systems of the bodies of double-deck cars, as well as the experience of their operation on domestic railways are analyzed. It is found out that for modern load-bearing structures of bodies with minimum permissible safety margin and stability of elements, it is advisable to pay more attention to specific loads, such as wind and loads associated with excessive solar radiation.

The method of studying the influence of these factors on the load-bearing capacity of the elements of car body pressure shell is proposed. The method provides for both experimental simulation of exposure of the double-deck car roof with excessive solar radiation in combination with subsequent exposure to repair

loads, and carrying out a complex of calculations based on the application of the finite element method (FEM).

The conducted studies indicate the need for a more precise account of the influence of lateral wind load and excessive solar radiation when assessing the strength of the load-bearing structures of the double-deck car bodies.

It is shown that the proposed technique makes it possible to take into account these specific loads on the basis of mathematical modeling with confirmation of the results obtained by the data of field experiments.

**Keywords:** research, parameters, cars, external factors, methodology, strength, body.

## Reference for citing:

*Sorokina EV, Korshunov SD, Boldyrev AP, Lozbinev FYu. Study of the effect of excessive solar radiation and lateral wind load on the assessment of the body strength of a double-deck car. Transport Engineering. 2023; 7: 77-85. doi: 10.30987/2782-5957-2023-7-77-85.*

## Введение

Несущая конструкция кузова двухэтажного вагона является сложной несущей системой, воспринимающей широкий спектр эксплуатационных нагрузок. При этом конкурентный рынок пассажирских перевозок предъявляет все более жесткие требования с точки зрения обеспечения безопасности и комфортности перевозок. В совокупности с расширением спектра услуг, оказываемых в процессе перевозок вызывает увеличение веса внутреннего оборудования. В двухэтажных вагонах при сохранении количества осей и осевой нагрузки резервы по массе отсутствуют, что приводит к необходимости снижения массы металлоконструкции кузова и уменьшению соответствующих запасов прочности и устойчивости. В связи с этим возникает необходимость уделять больше внимания к специфическим нагрузкам, возникающим в эксплуатации. Их воздействие на вагоны традиционных конструкций нивелировалось существующими запасами прочности. При этом анализ опыта эксплуатации новых конструкций подвижного состава, спроектированного в рамках существующих подходов к учету нагруженности, указывает на необходимость уточнения ряда специфических нагрузок при проектировании современного пассажирского подвижного состава. К таким нагрузкам можно отнести влияния избыточной солнечной радиации на обшивку крыши и боковой ветро-

вой нагрузки на несущую конструкцию кузова двухэтажного вагона.

Учитывая широкий климатический диапазон эксплуатации двухэтажных вагонов, представляет особый интерес исследование влияния на них избыточной солнечной радиации и ветровой нагрузки, обусловленной существенно увеличенной площади поверхности кузова, на которую воздействуют указанные факторы.

При движении вагона потоки воздуха наталкиваются на стены и крышу вагона и усилия, действующие на несущую систему кузова, это необходимо учитывать при ее проектировании. На территории России существует восемь ветровых районов с различными показателями давления в каждом [1]. Это изменение климата приводит к увеличению вероятности возникновения ветровых потоков со скоростями 25 м/с и более [1].

Наряду с воздействием на вагоны ветровой нагрузки на юге России железнодорожные составы подвергаются избыточной солнечной радиации. При этом южные регионы в настоящее время являются основным полигоном использования отечественных двухэтажных вагонов, обеспечивая поддержание туристического пассажиропотока.

Солнечное излучение воздействует на несущую конструкцию кузова путем нагрева

металла обшивки кузова. В первую очередь от этих явлений страдает крыша вагона.

Анализ опыта эксплуатации показал, что при плановом осмотре части (197 из 217) двухэтажных вагонов, курсирующих на южном направлении, было выявлено 17 вагонов (моделей 61-4465 и 61-4472) с деформированными листами обшивки крыши (из них 11 вагонов постройки 2013 г. и шесть вагонов 2015 г.) [2].

Деформация листов обшивки крыши при осмотре с земли, в большей или меньшей степени была выявлена на всех находящихся в депо двухэтажных пассажирских вагонах на момент обхода. При визуальном осмотре с земли выявлена дефор-

мация обшивки ската крыши вагона модели 61-4472. При более детальном рассмотрении выявлены повреждения и других частей крыши. Характер деформации листов обшивки крыши показан на рис. 1.

Можно выделить две возможные причины деформации листов обшивки крыши, которые по отдельности или в совокупности оказывают негативное влияние:

- воздействие избыточной солнечной радиации;
- действие на вагон ремонтных нагрузок при техническом обслуживании;
- остаточные технологические напряжения.



Рис. 1. Характер деформации листов обшивки крыши  
*Fig. 1. The nature of the deformation of the roof sheathing sheets*

Ввиду массовости выявления указанных дефектов становится актуальной задача определения условий потери устойчивости и деформаций элементов обшивки крыши при температурных нагрузках от экстремального воздействия солнечной радиации [3]. Анализ

### Методика исследования

Для решения задачи исследования причин возникновения локальной потери устойчивости несущей обшивки крыши двухэтажных вагонов специалистами АО «Тверской институт вагоностроения» была разработана и согласована в установленном порядке методика проведения расчетов и эксперимента по имитации облучения избыточной солнечной радиацией крыши кузова двухэтажного пассажирского вагона в сочетании с последующим воздействием ремонтных нагрузок [6]. Пред-

отечественного и мирового опыта исследования подобного рода показал, что наиболее эффективным является использование совокупности аналитических и экспериментальных методов [4, 5].

ложенная методика распространяется на железнодорожный подвижной состав (одноэтажные и двухэтажные пассажирские вагоны, а также специальные, багажные и т. п.).

Целью теоретических (расчетных) исследований является определение напряженно-деформированного состояния (НДС) кузова вагона и расчетных значений деформаций всех зон обшивки крыши при воздействии различного сочетания нагрузок [7]:

- вертикальных нагрузок на вагон;
- изменения коэффициента линейного расширения;
- изменения температуры по отношению к температуре замыкания ее в ста-

тически неопределимую систему, при воздействии на различное количество пролетов либо частей крыши. Структурная схема методики приведена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема методики  
Fig. 2. Structural scheme of the technique

Для теоретических исследований были применены следующие варианты приложения нагрузок к несущей конструкции кузова:

- вертикальная нагрузка брутто для всех вариантов расчета;
- нагрузки, соответствующие подъему кузова вагона на домкратах в разных сочетаниях;
- температурная нагрузка на кузов при коэффициенте линейного расширения  $1,6 \times 10^{-5} \times \text{град}^{-1}$ :

- изменение температуры от 40 до 90 °С при воздействии на один пролет крыши (рис. 3 а);
- изменение температуры от 40 до 90 °С при воздействии на пять пролетов крыши (рис. 3 б);
- изменение температуры от 40 до 90 °С при воздействии на половину крыши между люками вдоль поперечной оси вагона (рис. 3 в);
- изменение температуры от 40 до 90 °С при воздействии на половину крыши между люками вдоль продольной оси вагона (рис. 3 г).

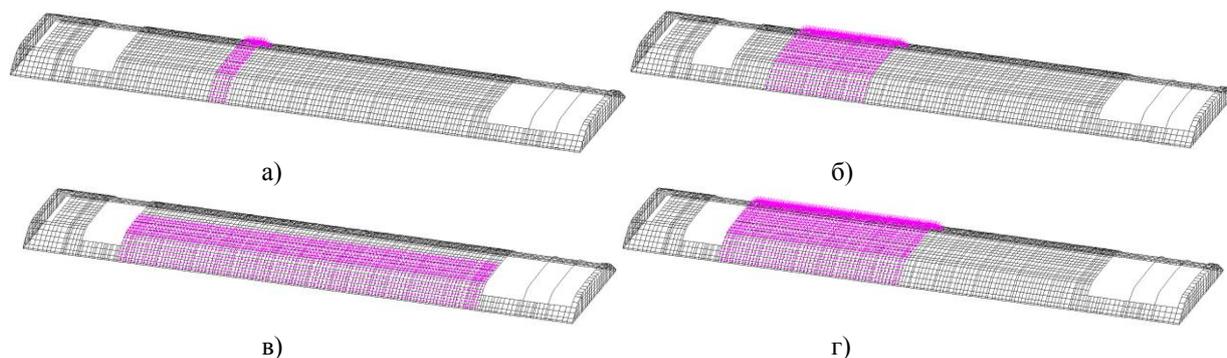


Рис. 3. Схема приложения температурных нагрузок:

а – к одному пролету крыши; б – к пяти пролетам крыши; в – к половине крыши между люками вдоль поперечной оси; г – к половине крыши между люками вдоль продольной оси

*Fig. 3. Scheme of application of temperature loads:*

*a – to one span of the roof; b – to five spans of the roof; in – to half of the roof between hatches along the transverse axis; g – to half of the roof between the hatches along the longitudinal axis*

Разность температур на нижней и верхней поверхности обшивки крыши при приложении температурной нагрузки принималась равной 0 °С.

Вертикальная распределённая нагрузка прикладывалась по площади пола, к горизонтальным балкам и обвязке второго этажа, обвязкам рамы и буферным брускам. Вертикальная нагрузка от оборудования, имеющего существенную массу, учитывалась отдельно как узловая. Неучтённая вертикальная нагрузка прикла-

дывалась как распределённая по массе несущих элементов и обшивке кузова [8].

Целью экспериментальных исследований являлось определение:

- влияния избыточной солнечной радиации на деформацию обшивки крыши;
- влияния воздействия нормативных ремонтных нагрузок на деформацию обшивки крыши при её нагреве;
- возможности образования провалов наружной обшивки крыш вагонов в результате совместного действия указанных выше факторов.

### Исследование влияния избыточной солнечной радиации на прочность кузова двухэтажного вагона

В рамках разработанной методики для определения напряженно-деформированного состояния металлоконструкции кузова вагона использован метод конечных элементов. Для этого в среде программный комплекс SCAD разработана пластинчато-стержневая расчетная схема, в которой обшивка описывалась оболочечными конечными элементами: для гладкой – изотропными, для гофрированной – ортотропными. Элементы несущего каркаса моделировались стержневыми элементами. Расчетная схема содержит более 15500 узлов и 22500 элементов (рис. 4).

Апробация методики проводилась на образце пассажирского двухэтажного купейного вагона со спальными местами модели 61-4465. Прочностные расчеты, проведенные с использованием описанной ко-

нечноэлементной схемы, позволили сделать вывод о том, что наиболее опасным, с точки зрения деформаций и потери устойчивости продольных элементов обшивки крыши, является нагрев половины крыши вдоль поперечной оси вагона и поднятие на домкратах кузова по диагонали с нагретой соответствующим образом крышей. Дополнительным негативным фактором, влияющим на потерю устойчивости обшивки крыши вагона, является наличие остаточных технологических напряжений.

На основании полученных результатов расчета сформирована методика проведения эксперимента на натурном образце двухэтажного вагона.

Проведение эксперимента осуществляется в два этапа. На первом – проводится имитация облучения испытуемого образца избыточной солнечной радиацией, на вто-

ром – приложение к кузову вагона ремонтных нагрузок.

Перед началом проведения эксперимента на предварительно подготовленных участках поверхности (в точках, в которых было удалено лакокрасочное покрытие, грубые неровности зачищены) были опре-

делены толщины обшивки скатов и средней части крыши.

Для обеспечения нагрева поверхности обшивки крыши были использованы инфракрасные излучатели мощностью 6 кВт, установленные с целью обеспечения равномерного нагрева поверхности параллельно обшивке.

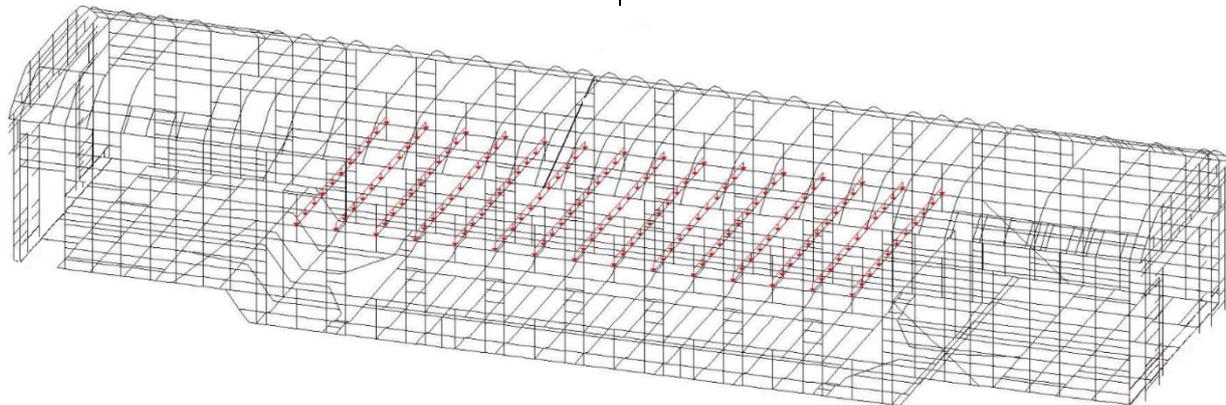


Рис. 4. Расчетная схема кузова двухэтажного пассажирского вагона модели 61-4465 (нагрузка, распределённая по горизонтальным балкам и обвязкам второго этажа)

Fig. 4. Calculation scheme of the body of a double-decker passenger car model 61-4465 (load distributed over horizontal beams and second floor bracing)

Схема установки и подключения излучателей обеспечивала возможность нагрева крыши до плюс 95 °С. «Гирлянда» обогревателей (60 штук) была смонтирована над поверхностью обшивки крыши (включающей среднюю часть и скат) на расстоянии от 500 до 650 мм.

При проведении эксперимента были реализованы две схемы установки обогревателей с расположением вдоль одной стороны вагона – схема №1 (рис. 5а) и с расположением симметрично оси вагона – схема №2 (рис. 5б). Минимальная охватываемая обогревателями поверхность крыши для обеих схем установки – 30,6 м<sup>2</sup>.

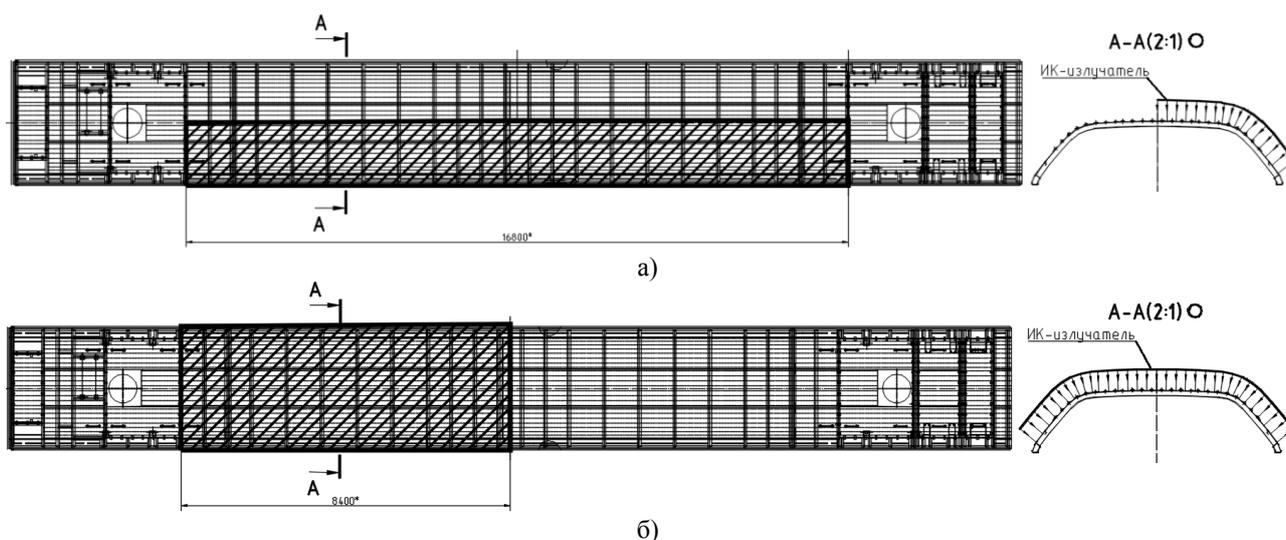


Рис. 5. Минимальная охватываемая обогревателями поверхность крыши при расположении обогревателей: а – по схеме 1; б – по схеме 2

Fig. 5. The minimum roof surface covered by heaters when placing heaters: a – according to scheme 1; b – according to scheme 2

После монтажа обогревателей и проверки их работоспособности проводилось по 10 циклов температурного нагружения (нагрева-охлаждения) участка крыши для каждой схемы установки обогревателей.

Максимальная температура поверхности контролировалась восемью термоэлектрическими преобразователями и восемью термометрами сопротивления, расположенными на крыше (средняя часть и скат) и боковой стене вагона.

Охлаждение исследуемого участка крыши проводилось до температуры воздуха помещения, в котором осуществлялся эксперимент.

После завершения каждого цикла температурного нагружения осуществлялся визуальный контроль поверхности обшивки крыши. При выявлении провалов проводилось измерение их геометрических размеров (длины, ширины, глубины), также фиксировались иные дефекты, выявленные при проведении эксперимента.

На втором этапе эксперимента проводилось приложение нормативных ремонтных нагрузок – осуществлялся подъем испытуемого вагона на домкратах.

При этом были реализованы пять схем подъема:

### Основные результаты и выводы

В результате выполненных исследований определены условия, способствующие потере устойчивости элементов жесткости продольного набора крыши двухэтажного вагона, при ее нагреве воздействием солнечной радиации. Они связаны с совпадением ряда факторов, влияющих на снижение устойчивости несущей обшивки крыши двухэтажного вагона:

– при расчете на устойчивость продольных элементов крыши нормативными документами не предусмотрен учет температурных напряжений;

– применение при изготовлении кузова стали X6CrNiTi18-10-1.4541 EN 10088-2 с увеличенным на 33 % коэффициентом линейного расширения по сравнению с применяемой ранее низкоуглеродистой сталью;

– пониженный модуль упругости у стали X6CrNiTi18-10-1.4541 EN 10088-2 по

– одновременно за четыре штатных места с установкой домкратов в строгом соответствии со знаками (домкратов), расположенными на боковине кузова;

– за два штатных места с установкой домкратов на одном конце вагона (наиболее близком к участку нагрева поверхности обшивки крыши) в соответствии со знаками домкратов, расположенными на боковине кузова;

– за два штатных места с установкой домкратов по диагонали вагона;

– за сцепку;

– за сцепку, без разъединения тележек и вагона.

При выполнении второго этапа эксперимента, подъёмки на домкратах и подъёмки за сцепку предшествовал, нагрев участка обшивки крыши до температуры от +40 до +45 °С. Высота подъема на домкратах – до 300 мм, за автосцепку – до 30 мм.

Всего проводилось по три цикла подъема для схем №1–4 и подъем кузова с тележками по схеме № 5. После завершения каждого цикла подъема осуществлялся визуальный и инструментальный контроль испытуемого вагона на наличие деформаций металлоконструкции кузова.

сравнению с низкоуглеродистой сталью, что приводит к уменьшению изгибной жесткости элементов продольного набора;

– снижение толщины металла с 2 до 1,5 мм, которая стала возможной из-за применения коррозионностойкой стали, что также приводит к снижению изгибной жесткости элементов продольного набора (гофров 21×1,5 мм) при уменьшении момента инерции сечения;

– сохранение длины пролётов равной 900 мм, как у моделей вагонов из низкоуглеродистой стали;

– отсутствие связи в единый каркас подкрепляющих элементов ската (стрингеров) и дуг крыши по всей длине, что упрощает технологию сборки, но при этом, напряжения, полученные при нагревании, увеличиваются на 10-30 % на скатах и до 50 % в средней части крыши;

– окрашивание скатов и средней части крыши не в белый или серебристо-белый цвет, что повышает, нагрев на 15 °С);

На основании анализа полученных результатов расчетов и экспериментов выработаны конструктивные и технологические предложения по доводке кузова вагона до нормативных параметров. Для повышения устойчивости можно рекомендовать следующие мероприятия:

– расчёт на устойчивость продольных элементов жёсткости крыши необходимо проводить с учетом температурных напряжений;

– применение для конструкции крыши материала с меньшим коэффициентом линейного расширения и большим модулем упругости;

– повышение момента инерции элементов продольного набора крыши при увеличении их количества и/или примене-

ния подкрепляющих элементов большей высоты;

– уменьшение длины пролетов до 680-700 мм;

– объединение по всей длине в единый каркас дуг крыши и продольных подкрепляющих элементов;

– окрашивание крыши в белый или серебристо-белый цвет.

При проектировании необходимо объективно учитывать устойчивость двухэтажных вагонов от опрокидывания и проводить оценку аварийного риска ветровых и других опасных воздействий окружающей среды на движение подвижного состава по определенному маршруту. Для решения этих задач форма кузова вагона должна способствовать уменьшению аэродинамического сопротивления, а тележки вагона оснащены стабилизаторами поперечной устойчивости, снижающими амплитуду боковых колебаний вагона.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Баландова Ю. К. Методы оценки устойчивости от опрокидывания контейнеров при перевозке на специализированных железнодорожных платформах. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, МИИТ, 2021.
2. Отчет о работе на тему «Выявление причин образования провалов наружной обшивки крыш вагонов модели 61-4465», Тверь, 2018.
3. Коршунов С. Д., Гончаров Д. И., Красивов Д. В., Ромашов Д. А., Смирнов А. А. Испытания кузова на прочность и устойчивость от воздействия нормативных ремонтных нагрузок при облучении солнечной радиацией крыши. //Сборник научных трудов VIII Всероссийской конференции научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития вагоностроения», 18-19 апреля, г. Брянск, БГТУ, 2019, 179 с., с. 72-75
4. Kader, Md & JINNAH, MOHAMMAD & LEE, KUM-BAE. (2012). The effect of solar radiation on automobile environment through natural convection and mixed convection. *Journal of Engineering Science and Technology*. 7. 589-600.

5. Wang, X.-T & Zhang, Jingzhou & Shan, Yong. (2016). Numerical investigation of solar radiation effects on aircraft skin infrared characteristics. 37. 235-241. 10.13675/j.cnki.tjjs.2016.02.005.
6. Коршунов С. Д., Удельнов А. Г., Щеглов А. С., Смирнов А. А., Ромашов Д. А. Экспериментальные исследования динамики и прочности двухэтажных пассажирских вагонов отечественной постройки. // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство», Том 2. Технические науки, РГУПС, Ростов на Дону, 2018, 515 с., с. 114-118.
7. Коршунов С.Д., Ворон О.А. «Комплексные испытания, оценка несущей способности и остаточного ресурса специализированного пассажирского вагона». / С. Д. Коршунов, О. А Ворон // Вестник РГУПС, 2014,-№ 1-с. 8-12.
8. Коршунов С. Д. Методика расчетно-экспериментальных исследований кузовов современного подвижного состава / С. Д. Коршунов, А. Н. Скачков, С. Л. Самошкин, Д. И. Гончаров, А. С. Жуков // Известия ПГУПС, 2015, № 4, с. 38-47.

## REFERENCES

1. Baladnova YuK. Methods for assessing the stability from overturning containers during transportation on specialized railway platforms [abstract of dissertation]. [Moscow (RF)]; Russian University of Transport; 2021.

2. Report on the topic Identification of the causes of occurring failures of the exterior shell of 61-4465 car roofs. Tver; 2018.
3. Korshunov SD, Goncharov DI, Krasivov DV, Romashov DA, Smirnov AA. Tests of the body for strength and stability from the impact of regulatory

- repair loads when irradiated with solar radiation of the roof. Problems and prospects of development of car building. Collection of scientific papers of the VIII All-Russian Conference of Scientific and practical conference; 2019 Apr 18-19; Bryansk: BSTU; 2019. p. 72-75.
4. Kader Md, JINNAH, MOHAMMAD LEE, KUMBAE. The effect of solar radiation on automobile environment through natural convection and mixed convection. Journal of Engineering Science and Technology. 2012;7:589-600.
  5. Wang XT, Zhang, Jingzhou, Shan, Yong. Numerical investigation of solar radiation effects on aircraft skin infrared characteristics. 2016;37:235-241. 10.13675/j.cnki.tjjs.2016.02.005.

6. Korshunov SD, Udelnov AG, Shcheglov AS, Smirnov AA, Romashov DA. Experimental study of dynamics and strength of domestic double-deck cars. Transport: Science, Education, Education. Collection of Scientific Papers. Rostov-on-Don : RGUPS; 2018;2:114-118.
7. Korshunov SD, Voron OA. Complex tests and evaluation of the bearing capacity and remaining life of a specialized car. RSTU Vestnik. 2014;1:8-12.
8. Korshunov SD, Skachkov AN, Samoshkin SL, Goncharov DI, Zhukov AS. Methodology of computational and experimental studies of the body of a rolling stock. Proceedings of Petersburg Transport University. 2015;4:38-47.

#### Информация об авторах:

**Сорокина Елена Викторовна** – Акционерное общество Научная организация «Тверской институт вагоностроения», Петербургское шоссе, д. 45-г, г. Тверь, Россия, 170003. Отдел кузовов и компонентов железнодорожной техники Ведущий инженер телефон 8(4822)55-44-00, email: sorokina.e@tiv.ru.

**Коршунов Сергей Дмитриевич** – Акционерное общество Научная организация «Тверской институт вагоностроения», Петербургское шоссе, д.

**Sorokina Elena Viktorovna** – Tver Institute of Railway Car Building, 45-g, Peterburgskoe Highway, Tver, 170003, Russia. Department of Bodies and Components of Railway Equipment, Lead Engineer; phone: 8 (4822) 55-44-00; email: sorokina.e@tiv.ru.

**Korshunov Sergey Dmitrievich** – Tver Institute of Railway Car Building, 45-g, Peterburgskoe Highway, Tver, 170003, Russia. Department of Bodies and Components of Railway Equipment, Chief Specialist, Can-

45-г, г. Тверь, Россия, 170003. Отдел кузовов и компонентов железнодорожной техники Главный специалист, кандидат технических наук телефон 8 (4822) 55-93-07, email: korshunov.s@tiv.ru.

**Болдырев Алексей Петрович** – доктор технических наук, профессор, Брянский государственный технический университет; тел. 84832560466.

**Лозбинец Федор Юрьевич** – доктор технических наук, профессор, Брянский государственный технический университет; тел. 84832560466.

didate of Technical Sciences; phone: 8(4822)55-93-07; email: korshunov.s@tiv.ru.

**Boldyrev Aleksey Petrovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Bryansk State Technical University; phone: 84832560466.

**Lozbinev Fedor Yurievich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Bryansk State Technical University; phone: 84832560466.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 15.05.2023; одобрена после рецензирования 19.06.2023; принята к публикации 27.06.2023. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редколлегии журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 15.04.2023; approved after review on 19.06.2023; accepted for publication on 27.06.2023. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.