

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.4.021.2

doi: 10.30987/2782-5957-2024-4-26-33

## ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОБШИВКИ БОКОВЫХ СТЕН И КРЫШИ КУЗОВА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РЕМОНТНЫХ РАБОТ

Дмитрий Яковлевич Антипин<sup>1</sup>, Светлана Николаевна Ашуркова<sup>2✉</sup>, Денис Андреевич Бондаренко<sup>3</sup>, Марина Владимировна Мануева<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

<sup>1</sup> antipindy@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8246-6271>

<sup>2</sup> swetiknk@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-0686-5728>

<sup>3</sup> mari\_s@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-5785-8338>

<sup>4</sup> dilekter@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4638-0438>

### Аннотация

Выполнена оценка устойчивости обшивки боковых стен и крыши кузова пассажирского вагона при проведении ремонтных работ, связанных с несимметричной подъемкой его домкратом с одного конца кузова. Методами математического моделирования определена высота подъёмки, необходимая для обеспечения возможности демонтажа пружин рессорного комплекта центральной ступени подвешивания. Оценка устойчивости подкреплённой обшивки кузова вагона выполнена с использованием разработанной проблемно-ориентированной упруго-диссипативной конечно-элементной модели несущей конструкции кузова пассажирского вагона. Расчёты выполнены в статической нелинейной постановке с учётом геометрической нелинейности и неконсервативности дей-

ствующих нагрузок. Устойчивость подкреплённой несущей обшивки вагона оценивалась как для исходной конструкции, так и для конструкции с геометрическими несовершенствами в виде технологической погиби. Анализ результатов исследования позволил сделать выводы о том, что при проведении технологической операции, связанной с подъёмкой домкратом кузова пассажирского вагона под одну опору, может привести к потере устойчивости обшивки подоконного пояса боковой стены и гладкой обшивки ската крыши. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами осмотра натуральных вагонов в эксплуатации.

**Ключевые слова:** вагон, конструкция, оболочка, ремонтные нагрузки, устойчивость, обшивка, метод конечных элементов.

Ссылка для цитирования:

Антипин Д.Я. Оценка устойчивости обшивки боковых стен и крыши кузова пассажирского вагона при выполнении ремонтных работ / Д.Я. Антипин, С.Н. Ашуркова, Д.А. Бондаренко, М.В. Мануева // Транспортное машиностроение. – 2024. - № 4. – С.26-33. doi: 10.30987/2782-5957-2024-4-26-33.

Original article

Open Access Article

## RATING OF THE LINING STABILITY OF PASSENGER CAR BODY SIDE WALLS AND THE ROOF WHEN PERFORMING REPAIR WORK

Dmitry Yakovlevich Antipin<sup>1</sup>, Svetlana Nikolaevna Ashurkova<sup>2✉</sup>, Denis Andreevich Bondarenko<sup>3</sup>, Marina Vladimirovna Manueva<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> antipindy@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8246-6271>

<sup>2</sup> swetiknk@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-0686-5728>

<sup>3</sup> mari\_s@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-5785-8338>

<sup>4</sup> dilekter@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4638-0438>

## Abstract

The lining stability of the side walls and roof of the passenger car body is assessed during repair work related to its asymmetric lifting with a jack at one end of the body. Using mathematical modeling, the lifting height is determined which is necessary to ensure the possibility to dismantle the springs of the spring set of the central suspension. The stability of the reinforced lining of the car body was assessed using the developed problem-oriented elastic-dissipative finite element model of the supporting structure of the passenger car body. The calculations are performed in a static non-linear formulation, taking into account the geometric nonlinearity and non-conservativeness of the operating

loads. The stability of the reinforced load-bearing lining of the car was assessed both for the initial structure and for a structure with geometric imperfections such as technological loss. The analysis of the research results allows to conclude that during the technological operation associated with lifting the passenger car body with a jack under one support, it can lead to a loss of stability of the sill belt lining of the side wall and the smooth sheathing of the roof slope. The results obtained agree with the results of the inspection of full-scale cars in operation.

**Keywords:** car, structure, case, repair loads, stability, lining, finite element method.

## Reference for citing:

Antipin DYa, Ashurkova SN, Bondarenko DA, Manueva MV. Rating of the lining stability of passenger car body side walls and the roof when performing repair work. *Transport Engineering*. 2024;4:26-33. doi: 10.30987/2782-5957-2024-4-26-33.

## Введение

В процессе эксплуатации пассажирских вагонов на несущую конструкцию кузова вагона наряду с традиционными нагрузками, связанными с движением вагона в составе поезда и маневровыми работами, действуют и дополнительные нагрузки, в частности, возникающие при проведении ремонтных работ. Учет таких нагрузок предусмотрен ГОСТ 34681-2020 для случая подъема экипированного кузова вагона на двух домкратах по диагонали и при поднятии вагона за концевую балку по середине. В эксплуатации возможны случаи нарушения регламентов проведения ремонтных работ и, в частности, подъема вагона под одну опору домкрата. При этом действующие на несущую конструкцию кузова сверхнормативные нагрузки, могут послужить причиной возникновения ее повреждений, таких как зоны локальной потери устойчивости обшивки. В послед-

ствие указанные повреждения приводят к снижению жесткости кузова и появлению пластических деформаций несущей обшивки и подкрепляющего набора [1]. И как результат, усталостные повреждения несущих элементов, разрушение лакокрасочного покрытия с последующим возникновением очагов коррозии. Для несущих конструкций кузовов пассажирских вагонов с гладкой обшивкой боковых стен подобные повреждения приводят также к ухудшению внешнего вида кузова за счет коробления обшивки [2]. Указанные повреждения фиксируются при эксплуатации кузовов пассажирских вагонов и актуальной является задача установления их причины для дальнейшего недопущения подобных нарушений регламентов выполнения ремонтных работ и выработки конструктивных решений по устранению их последствий.

## Методика исследований

Анализ причин рассматриваемых нарушений регламента проведения ремонтных работ показал, что они выполняются для замены упругих элементов ходовых частей вагона без выкатки тележки из-под кузова. В качестве объекта для исследования в работе был принят пассажирский вагон с гладкой наружной обшивкой боковых стен модели 61-4170 производства ОАО «Тверской вагоностроительный завод». Вагон эксплуатируется на тележ-

ках безлюлечного типа модели 68-4095 (68-4096).

Для оценки высоты подъема, необходимой для обеспечения возможности демонтажа пружин рессорного комплекта центральной ступени подвешивания тележки, разработана динамическая твердотельная модель вагона в среде программного комплекса моделирования динамики систем тел «Универсальный механизм» [3]. Модель вагона представляет собой ку-

зов в виде абсолютно твердого тела с реальными геометрическими и инерциальными характеристиками, связанный с подсистемами, описывающими ходовые части посредством контактных силовых элементов и вращательных шарниров. Тележки в модели представлены также совокупностью абсолютно твёрдых тел с реальными инерциальными и геометрическими характеристиками, связанными между собой специальными силовыми и контактными элементами и шарнирами. Характеристики связующих элементов принимаются в соответствии с характеристиками упругих и диссипативных элементов тележки, полученные при натурных испытаниях и замерах.

Высота подъема кузова, достаточная для демонтажа пружин одной стороны центральной ступени рессорного подвешивания определялась путем приложения к кузову вагона в зоне опоры под домкрат внешней силы направленной вертикально вверх. При этом определялось вертикальное перемещение кузова, при котором на освобождаемый рессорный комплект будет действовать усилие, равное только половине веса надрессорного бруса и высота пружин достигнет величины, соответствующей высоте в тележке без установленного кузова. Полученная величина вертикального перемещения составила 320 мм.

На втором этапе работы для оценки устойчивости подкрепленной обшивки кузова вагона при его подъеме разработана детализированная упруго-диссипативная конечно-элементная модель. Модель сформирована пластинчатыми конечными элементами с характерным размером 50 мм с использованием автоматического генератора конечно-элементной сетки по ранее созданной геометрической модели. Особенностью несущей конструкции кузова рассматриваемого вагона является применение двухслойной обшивки боковых стен, сформированной из гладкого наружного листа и гофрированного внутреннего с трапецевидными гофрами. Соединение листов в единую несущую систему осуществлено точечной сваркой. Описание работы двухслойной обшивки боковых стен проводилось с использованием ме-

тодики, предложенной в работах [4, 5]. Отдельными пластинчатыми элементами моделировалась гладкая наружная обшивка и гофрированная внутренняя. Точечная сварка наружных и внутренних листов описывалась введением в модель стержневых конечных элементов длиной 0,03 мм в узлы, соответствующие размещению сварных точек в реальной конструкции обшивки. Параметры стержневых конечных элементов определялись из условия взаимодействия обшивок при их относительном сдвиге в продольном направлении. Тяжеловесное внутривагонное и подвагонное оборудование представлялось сосредоточенными массами, соответствующими массам реального оборудования, расположенными в узлах модели, совпадающим с координатами центров тяжести реального оборудования. Соединение сосредоточенных масс с узлами конечно-элементной модели выполнено стержневыми элементами, жесткостные характеристики которых, определялись исходя из обеспечения отсутствия их деформаций при действии внешних нагрузок.

Конечноэлементная модель кузова с тяжеловесным оборудованием закрепляется в пространстве посредством упруго-диссипативных стержневых конечных элементов 1 (рис. 1), представляющих собой упругие элементы с упруго-диссипативными свойствами по всем шести степеням свободы и имитирующих комплекты рессорного подвешивания.

Одним концом упруго-диссипативные элементы соединены с узлами конечноэлементной модели, расположенными в зонах опирания вагона на скользуны, другим – с жестко закрепленными в пространстве узлами. В зоне пятника введены упругие элементы, препятствующие перемещению кузова в поперечном и продольном направлениях 2 (рис. 1), моделирующие взаимодействие пятника кузова с подпятником тележки.

Жесткостные параметры стержневых упруго-диссипативных элементов эквивалентны упругим свойствам комплектов двух ступеней рессорного подвешивания тележек и диссипативным свойствам гаси-

телей колебаний центральной ступени подвешивания [6].

Все конечные элементы модели кузова объединены в 79 тыс. узлах. Общее число степеней свободы модели составило  $47 \cdot 10^4$ .

Подъемка кузова моделировалась перемещением соответствующих узлов конечноэлементной модели (расположенных в зоне опоры под домкрат) в вертикальном направлении на высоту, определенную в твердотельной динамической модели вагона (рис. 1).

Расчет устойчивости несущей подкрепленной обшивки кузова вагона салона производился на основе геометрически нелинейного статического расчета, алгоритм которого реализован в промышленном программном комплексе, реализующем метод конечных элементов [7, 8].

При расчете перемещение узлов кузова в зоне опоры под домкрат было разбито на пять этапов. На каждом последующем этапе после первого перемещение увеличивалось на одну пятую от абсолютного значения, определенного из твердотельной динамической модели. После каждого этапа соответствующая часть перемещения задавалась деформированной на предыдущем этапе модели. Итоговая картина напряженно-деформированного состояния получена в результате пяти итераций расчета.

При расчетах рассматривались исходная конструкция вагона, конструкция имеющая технологическую погибь обшивки боковой стены и скатов крыши, величиной 1 мм/1м и 2 мм/1м.

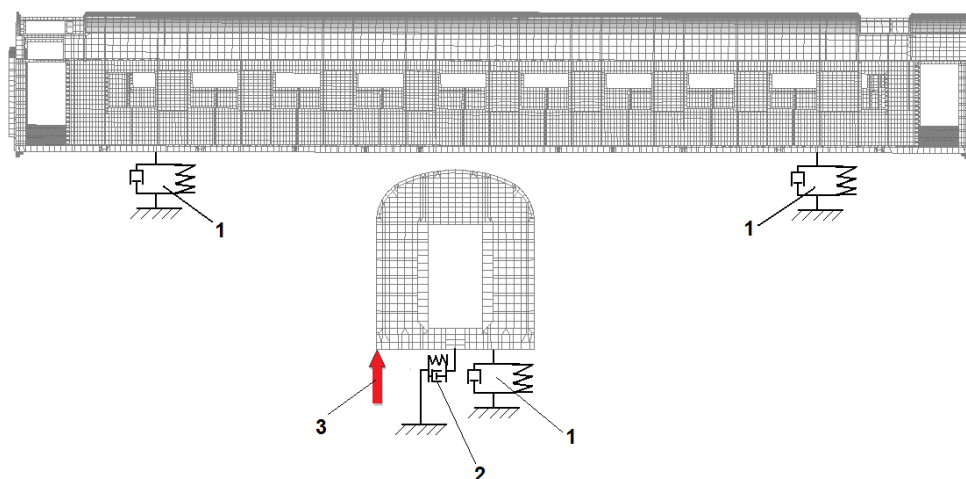


Рис. 1. Схема закрепления и нагружения конечно-элементной модели: 1 – упруго-диссипативные элементы, моделирующие опирание кузова на скользуны тележки; 2 – упруго-диссипативные элементы, моделирующие взаимодействие пятника кузова с подпятником тележки; 3 – направление перемещения кузова при подъёмке  
*Fig. 1. Scheme of fastening and loading of the finite element model: 1 – elastic-dissipative elements simulating the support of the body on the bogie slides; 2 – elastic-dissipative elements simulating the interaction of the body foot with the bogie foot; 3 – direction of body movement when lifting*

### Оценка устойчивости обшивки боковых стен и крыши кузова вагона

Результаты оценки устойчивости обшивки боковых стен и крыши кузова вагона представлены в виде картин деформированного состояния несущей конструкции кузова (рис. 2–4) и величин отклонения обшивки от прямолинейности (табл.1).

На рис. 2 представлена картина деформированного состояния кузова исходной конструкции, на рис. 3 с начальной погибью 1 мм/м и на рис. 4 с

начальной погибью 2 мм/м. Для визуализации мест и форм потери устойчивости на рисунках деформированное состояние увеличено в 1,2 раза.

Как видно из рис. 2–4 местная потеря устойчивости для варианта без начальной погиби наблюдается в подоконном поясе с двух сторон вагона в области середины базы кузова. Местная потеря устойчивости обшивки боковой стены кузова

проявляется в виде выпучивания обшивки наружу вагона. При перемещении в

сторону места подъёмки величина выпучивания снижается.

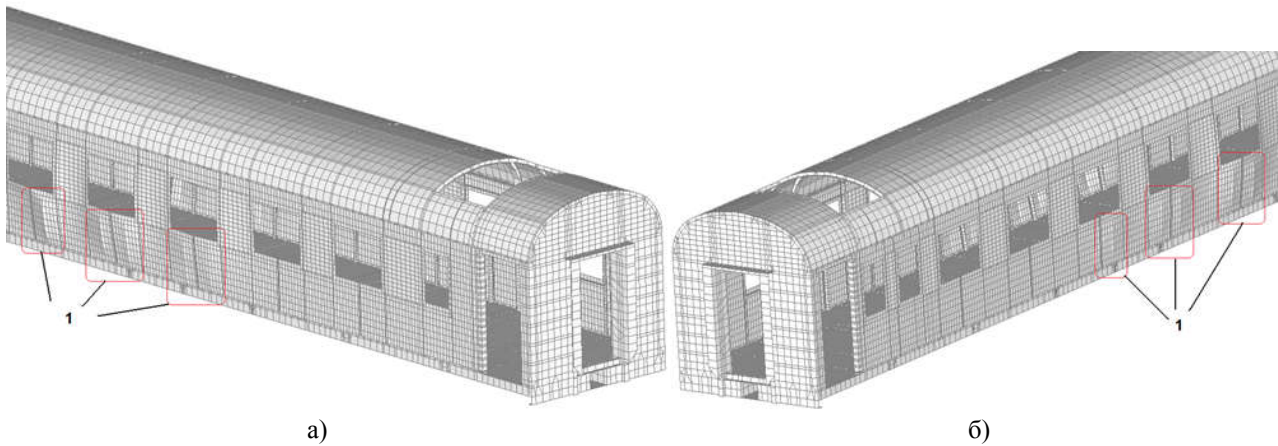


Рис. 2. Картина деформированного состояния кузова исходной конструкции: а – сторона подъёмки кузова; б – противоположная сторона кузова

*Fig. 2. The picture of the deformed state of the body of the original structure: a – the side of the lifting body; b – the opposite side of the body*

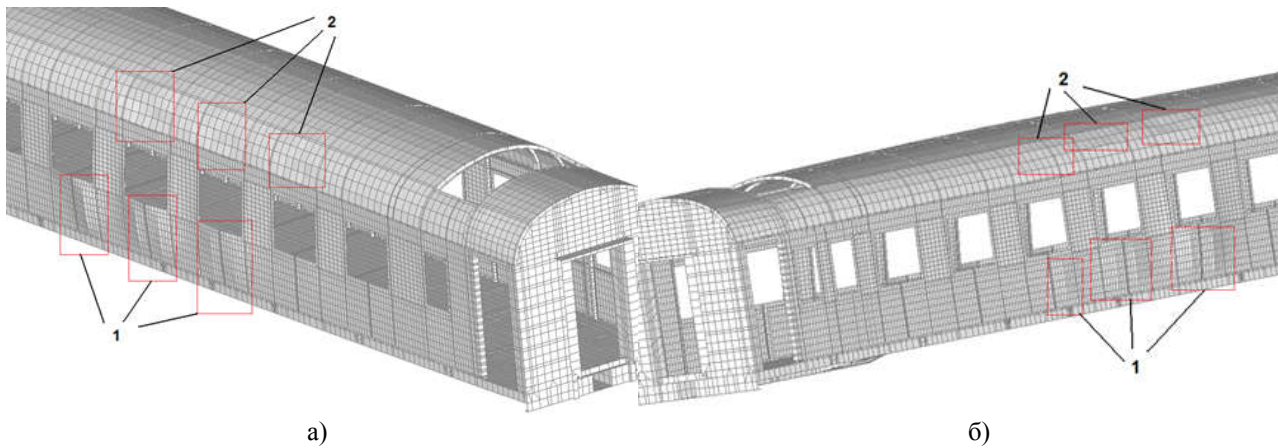


Рис. 3. Картина деформированного состояния кузова с начальной погибью боковых стен и скатов крыши 1 мм/м: а – сторона подъёмки кузова; б – противоположная сторона кузова

*Fig. 3. A picture of the deformed state of the body with an initial loss of side walls and roof slopes of 1 mm/m: a – the side of the body lift; b – the opposite side of the body*

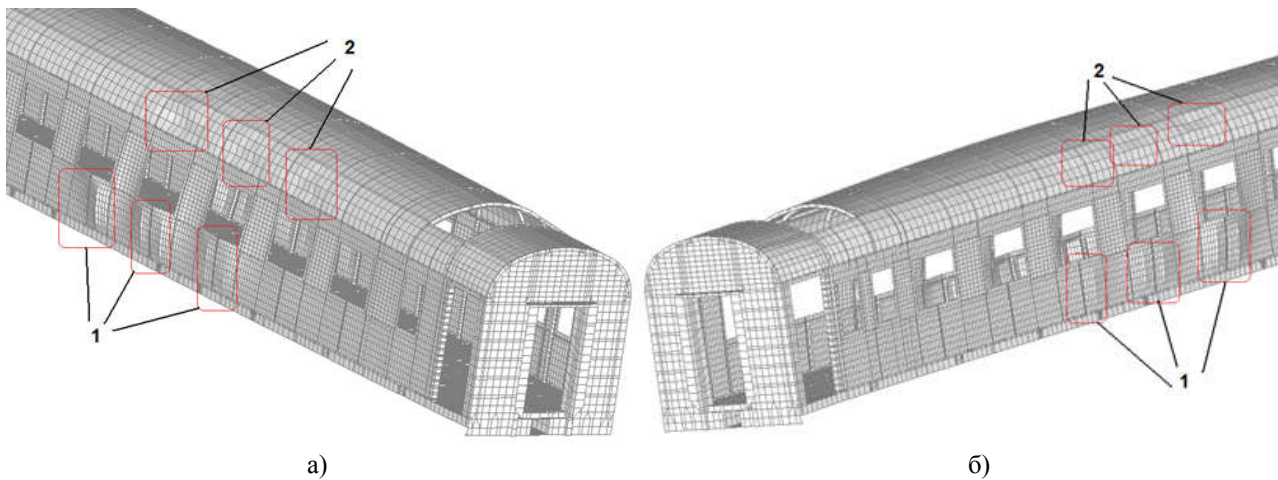


Рис. 4. Картина деформированного состояния кузова с начальной погибью боковых стен и скатов крыши 2 мм/м: а – сторона подъёмки кузова; б – противоположная сторона кузова

*Fig. 4. A picture of the deformed state of the body with an initial thickness of the side walls and roof slopes of 2 mm/m: a – the side of the body lift; b – the opposite side of the body*

Для вариантов с начальной погибью 1 мм/м и 2 мм/м наблюдается местная потеря устойчивости обшивки боковой стены кузова в виде ее выпучивания наружу вагона, а также местная потеря устойчивости обшивки на скатах крыши в виде ее прогибов внутрь кузова между дугами в средней части вагона.

В табл. 1 приведены величины максимальных отклонений обшивки от исходного положения на расстоянии между соседними стойками боковых стен и дугами крыши для двух сторон вагона. Результаты приведены для трех участков кузова в соответствии с рис. 5 и двух сторон кузова – стороны подъемки и противоположной ей.

Таблица 1

Величины максимальных отклонений обшивки от исходного положения на расстоянии между соседними стойками боковых стен и дугами крыши

Table 1

*The values of the maximum deviations of the cladding from the initial position at the distance between the adjacent pillars of the side walls and the arches of the roof*

№ п/п	Вариант конструкции	участок, мм					
		1		2		3	
		а	б	а	б	а	б
1	исходная	6,16	4,58	3,06	1,38	1,16	0,34
	с начальной погибью 1 мм/м	8,44	5,20	5,96	3,04	4,54	1,88
	с начальной погибью 2 мм/м	9,56	6,14	7,89	4,64	5,11	3,83
2	исходная	-	-	-	-	-	-
	с начальной погибью 1 мм/м	2,54	1,72	0,92	0,72	0,55	0,28
	с начальной погибью 2 мм/м	3,16	2,08	1,95	0,86	0,91	0,43

Примечание: а – сторона подъемки вагона; б – противоположная сторона вагона

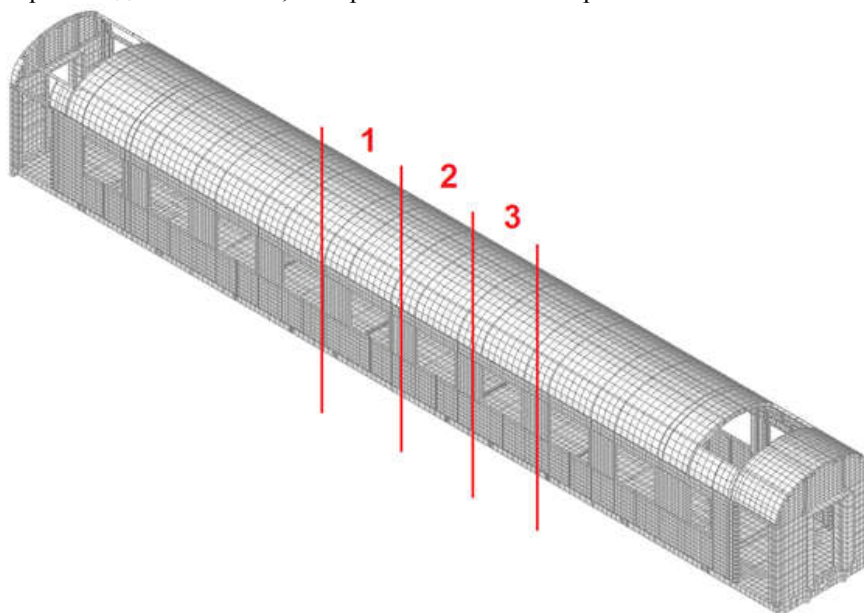


Рис. 5. Схема расположения участков кузова с потерей устойчивости  
Fig. 5. Diagram of the location of the body sections with loss of stability

### Заключение

Анализ результатов представленных в табл. 1, показывает, что несимметричная

подъемка вагона за одну опору под домкрат на величину 320 мм приводит в



случае отсутствия начальной погиби к местной потере устойчивости обшивки в подоконном поясе в средней части вагона, проявляемой в виде выпучивания обшивки боковой стены на максимальную величину 6,16 мм в средней части вагона со стороны подъема кузова, с противоположной стороны кузова величина выпучивания обшивки составляет 4,6 мм. Незначительная местная потеря устойчивости также наблюдается у подоконных поясов еще двух окон (участки 2, 3 на рис. 5). На скатах крыши местная потеря устойчивости не наблюдается.

При наличии начальной погиби обшивки картина местной потери устойчивости в подоконном поясе сохраняется, но величина выпучивания увеличивается со стороны подъема до 8,4 мм и до 5,2 мм с противоположной стороны. При наличии начальной погиби на скатах крыши величиной 1 мм/м происходит местная потеря устойчивости скатов крыши в зонах расположения окон в подоконных поясах. Местная потеря

устойчивости скатов крыши проявляется в виде прогиба обшивки на величину 2,5 мм со стороны подъема кузова и 1,7 мм с противоположной.

Наличие начальной погиби 2 мм/м при подъеме вагона приводит к потере устойчивости подоконных поясов в средней части с выпучиванием обшивки со стороны подъема на 9,6 мм, с противоположной стороны на 6 мм и к прогибам скатов крыши в зонах расположения окон на величину 3 мм со стороны подъема кузова и 2 мм с противоположной стороны.

Таким образом, проведенное исследование показало, что подъемка кузова пассажирского вагона под одну опору домкрата может привести к потере устойчивости обшивки подоконного пояса боковой стены и гладкой обшивки ската крыши. Указанная картина потери устойчивости обшивки кузова согласуется с результатами осмотра натуральных вагонов в эксплуатации.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Lee W.G. The next generation material for lightweight railway car body structures: magnesium alloys/ W.G. Lee, J.-S. Kim, S.Ju Sun, J.-Y. Lim// Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit. – 2016. – pp.1-18. DOI: 10.1177/0954409716646140
2. Cascino, A., Meli, E. & Rindi, A. A strategy for lightweight designing of a railway vehicle car body including composite material and dynamic structural optimization. Rail. Eng. Science 31, 340–350 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40534-023-00312-6>
3. Погорелов, Д.Ю. Алгоритмы моделирования динамики систем тел с большим числом степеней свободы [Текст]/ Д.Ю. Погорелов// Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – №4(2). – С. 278-279.
4. Высоцкий, А.М. Обоснование методики моделирования двухслойной обшивки боковых стен кузовов пассажирских вагонов при анализе их нагруженности/А.М. Высоцкий, В.В. Кобищанов, Д.Я. Антипин//Вестник Брянского государственного технического университета, 2013– № 3 – С. 10-13.

5. Высоцкий, А.М. Выбор рациональной конструкции двухслойной обшивки боковых стен пассажирских вагонов/ А.М. Высоцкий, В.В. Кобищанов, Д.Я. Антипин, Д.Ю. Расин// Вестник Брянского государственного технического университета, 2014. – № 4 (44). – С. 8-11.
6. Светлов, В.И. Технические решения по механике пассажирских вагонов. Методы обоснования [Текст]/ В.И. Светлов. – М.: Глобус, 2002. – 200 с.
7. Carlbom, P. Carbody and Passengers in Rail Vehicle Dynamics/ Doctoral thesis. – Stockholm, 2000. – 107 p.
8. Wennberg D. Light-Weighting Methodology in Rail Vehicle Design through Introduction of Load Carrying Sandwich Panels: Licentiate Thesis/ D. Wennberg. – Stockholm, 2011. – 28 p.

## REFERENCES

1. Lee WG, Kim J-S, Sun SJu, Lim J-Y. The next generation material for lightweight railway car body structures: magnesium alloys. Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit. 2016;1-18. DOI: 10.1177/0954409716646140

2. Cascino A, Meli E, Rindi A. A strategy for lightweight designing of a railway vehicle car body including composite material and dynamic structural optimization [Internet]. Rail. Eng. Science 31.

- 2023; 340–350. Available from: <https://doi.org/10.1007/s40534-023-00312-6>
3. Pogorelov DYu. Algorithms for modeling the dynamics of bodies systems with a large number of degrees of freedom. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2011;4(2):278-279.
  4. Vysotsky AM, Kobishchanov VV, Antipin DYa. Grounds for the method of modeling the double-layer lining of the side walls of passenger car bodies in the analysis of their loading. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2013;3:10-13.
  5. Vysotsky AM, Kobishchanov VV, Antipin DYa, Rasin DYu. The choice of a rational design of a

- two-layer lining of the side walls of passenger cars. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2014;4(44):8-11.
6. Svetlov VI. Technical solutions for the mechanics of passenger cars. *Methods of justification*. Moscow: Globus; 2002.
  7. Carlbom P. Carbody and passengers in rail vehicle dynamics [dissertation]. Stockholm; 2000.
  8. Wennberg D. Light-weighting methodology in rail vehicle design through introduction of load carrying sandwich panels: [dissertation]. Stockholm; 2011.

#### **Информация об авторах:**

**Антипин Дмитрий Яковлевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор Учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, тел. 8 (4832) 56-04-66, e-mail: antipindy@yandex.ru.

**Ащуркова Светлана Николаевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, тел. 8 (4832) 56-04-66, email: swetiknk@yandex.ru.

**Antipin Dmitry Yakovlevich** – 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; phone: 8 (4832) 56-04-66, e-mail: antipindy@yandex.ru.

**Ashurkova Svetlana Nikolaevna** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock at Bryansk State Technical University; phone: 8 (4832) 56-04-66, email: swetiknk@yandex.ru.

**Бондаренко Денис Андреевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, тел. 8 (4832) 56-04-66, email: dilekter@gmail.com.

**Мануева Марина Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, тел. 8 (4832) 56-04-66, email: mari\_s@mail.ru.

**Bondarenko Denis Andreevich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock at Bryansk State Technical University; phone: 8 (4832) 56-04-66, email: dilekter@gmail.com.

**Manueva Marina Vladimirovna** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock at Bryansk State Technical University; phone: 8 (4832) 56-04-66, email: mari\_s@mail.ru.

**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 18.03.2024; одобрена после рецензирования 21.03.2024; принята к публикации 26.03.2024. Рецензент – Волохов Г.М., доктор технических наук, главный научный эксперт динамики и прочности подвижного состава и инфраструктуры Акционерного общества «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава, член редколлегии журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 18.03.2024; approved after review on 21.03.2024; accepted for publication on 26.03.2024. The reviewer is Volokhov G.M., Doctor of Technical Sciences, Chief scientific expert of Rolling Stock and Infrastructure Dynamics and Strength of "Research and Development and Technological Institute of Rolling Stock", member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.