

УДК 629.45

DOI: 10.30987/article\_5d2d923255ba01.62689112

Д.Я. Антипин, С.Н. Ашуркова

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ КУЗОВА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА С ПЕРФОРИРОВАННЫМИ ПОДКРЕПЛЯЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Выполнена оценка усталостной долговечности несущих конструкций кузовов пассажирских вагонов с перфорированными подкрепляющими элементами методами математического моделирования с использованием двух методик: С.В. Серенсена - В.П. Когаева и В.В. Болотина. Проведена уточненная оценка динамического напряженного

состояния наиболее нагруженных зон перфорированных подкрепляющих элементов кузовов.

**Ключевые слова:** кузов пассажирского вагона, перфорированные профили, математическое моделирование, конечноэлементная модель, усталостная долговечность.

D.Ya. Antipin, S.N. Ashurkova

## FATIGUE LIFE PREDICTION OF BEARING STRUCTURE OF PASSENGER CAR BODY WITH PERFORATED SUPPORTING ELEMENTS

The purpose of the work is a fatigue life assessment for bearing structures of passenger car bodies with perforated supporting elements through the methods of computer mathematical modeling.

The fulfilled analysis of investigations in the field of the fatigue life assessment for welded bearing structures of car bodies has shown that its assessment should be carried out in a dynamic setting with the development of a spatial dynamic model of a car body.

The fatigue life assessment in the most loaded areas of perforated supporting elements in car bodies was carried out with the use of two procedures: Serensen-Kogaev procedure and Bolotin one. There are considered ten versions of supporting element perforation in a passenger car body. The development of finite element models of car bodies with the mentioned options is carried out by the example of the body of a domestic passenger car. On the basis of the

design strength computation results there are defined three most loaded areas of perforated supporting elements. The refined assessment of a dynamic stressed state of the areas under investigations is carried out through the method of an area successive accentuation.

As a result of the investigation there are obtained life values of the most loaded areas for a passenger car body bearing structure for all perforation options under consideration.

The results obtained confirm passenger car operation safety with the offered option of perforation and are evidence of the purposefulness in the application of the procedure offered for the fatigue life prediction of similar bearing structures.

**Key words:** passenger car body, perforated profiles, mathematical modeling, finite element model, fatigue life.

### Введение

При проектировании пространственных несущих конструкций подвижного состава железных дорог важной задачей является снижение их металлоемкости. На основе проведенного анализа исследований в области создания легковесных конструкций определены следующие направления решения поставленной задачи: применение материалов, обладающих низкой удельной массой, а также оптимизация несущей конструкции [1]. Для отечественного пассажирского вагоностроения перспективным решением указанной задачи является применение в конструкции кузовов вагонов перфорированных подкрепляю-

щих элементов, выполненных из гнутых профилей [2-4].

Выбор рациональных типов и параметров перфорации, применимых для вагонных конструкций, целесообразно реализовывать на основании многовариантных расчетов методами компьютерного математического моделирования с разработкой детализированных пространственных несущих конструкций кузовов вагонов, отличающихся друг от друга типом и параметрами перфорации.

Поскольку перфорирование несущих элементов конструкции является ее ослаблением, необходимо оценить его влияние не

только на прочность конструкции кузова, жесткость и устойчивость сжатых элементов подкрепляющего набора и элементов обшивки, но и на ее усталостную долговечность [5; 6]. Несущая конструкция кузова вагона в процессе эксплуатации испытывает значительные знакопеременные динамические нагрузки, в результате чего в ней возникают усталостные повреждения, приводящие к потере ее работоспособности. Достаточный уровень усталостной долговечности кузова является дополнительным фактором обеспечения безопасной эксплуатации и снижения стоимости жизненного цикла вагона.

Усталостная долговечность несущей конструкции кузова вагона с перфорированными профилями определяется усталостной долговечностью наиболее нагруженных зон подкрепляющего набора. Вследствие этого актуальной задачей является создание методики анализа уста-

лостной долговечности несущих конструкций кузовов вагонов с перфорированными профилями.

Проведенный анализ работ, посвященных оценке усталостной долговечности сварных несущих конструкций кузовов вагонов, показал, что решение поставленной задачи целесообразно в рамках двух подходов: в квазистатической постановке с использованием в расчете коэффициента динамики в соответствии с ГОСТ 34093-2017 и в динамической постановке на основе методов компьютерного моделирования. При этом первый подход обеспечивает весьма приближенные результаты и не учитывает в полной мере характер динамических нагрузок, в связи с чем целесообразно использовать второй подход к исследованию долговечности несущих конструкций кузовов вагонов в динамической постановке в программном комплексе (ПК) «Универсальный механизм» [7].

### Методика исследования

Анализ усталостной долговечности конструкций кузовов пассажирских вагонов с подкрепляющими элементами перфорированного сечения выполнялся с использованием методик С.В. Серенсена - В.П. Когаева [8] и В.В. Болотина [9].

В соответствии с методикой В.В. Болотина распределение динамических напряжений, действующих на конструкции, реализуется согласно теории вероятностей, а методика С.В. Серенсена - В.П. Когаева основывается на истории нагружения в виде степенной функции.

В соответствии с методикой С.В. Серенсена - В.П. Когаева срок службы конструкции в годах до наступления предельного состояния с учетом требований ГОСТ 34093-2017 рассчитывается по формуле

$$T = \frac{\left( \frac{\sigma_{a,N}}{[n_y]} \right)^m N_0}{\left( \sum_{i=1}^k \sigma_{ai}^m P_i \right) B f_s}, \quad (1)$$

где  $N$  - суммарное число циклов динамических напряжений до наступления предельного состояния;  $\sigma_{a,N}$  - величина предела

выносливости натурной детали вагона (по амплитуде), вычисленная для симметричного цикла при базовом числе циклов испытаний;  $N_0$  - базовое число циклов испытаний;  $[n_y]$  - допускаемое значение коэффициента запаса сопротивления усталости;  $m$  - показатель степени в уравнении кривой усталости в амплитудах;  $\sigma_{ai}^m$  - уровень амплитуды напряжений;  $P_i$  - вероятность появления амплитуд с уровнем  $\sigma_{ai}^m$ ;  $B$  - коэффициент перевода срока службы в годах во время непрерывного движения в секундах;  $f_s$  - центральная (эффективная) частота процесса изменения динамических напряжений.

В соответствии с методикой В.В. Болотина срок службы конструкции определяется соотношением

$$T = \frac{aN_0 \varphi_{\sigma,N}^m \sigma_{a,N}^m \nu}{1,314 \cdot 10^6 f_s S_{\sigma}^m [n_y] J L_c}, \quad (2)$$

где  $a$  - сумма относительных усталостных повреждений;  $\varphi_{\sigma}$  - коэффициент учета асимметрии циклов нагружения;  $S_{\sigma}$  -

среднее квадратичное отклонение процесса  $\sigma(t)$ ;

$J$  - интеграл, зависящий от коэффициента широкополосности процесса  $\sigma(t)$  и определяемый в соответствии с [9];  $L_c$  - проектный среднесуточный пробег вагона;  $v$  - средняя маршрутная скорость движения вагона.

Предел выносливости области отверстий перфорации подкрепляющего набора кузова вагона  $\sigma_{a,N}$  определялся на основе детализированных проблемно-ориентированных пространственных конечноэлементных моделей выделенных зон отверстий.

Уточненная оценка динамического напряженного состояния наиболее нагруженной зоны перфорированного профиля выполняется путем вычленения ее из конечноэлементной модели кузова вагона методом последовательного выделения областей с разработкой упруго-диссипативной динамической конечноэлементной модели со сгущением сетки [10; 11]. Моделирование вычлененной зоны выполняется объемными конечными элементами. К граничным узлам модели прикладываются динамические нагрузки (в виде осциллограмм изменения усилий во времени), полученные в соответствующих узлах при расчете конечноэлементной модели кузова вагона в процессе движения по реальным неровностям рельсового пути [12].

Согласно линейной гипотезе суммирования усталостных повреждений, долговечность несущей конструкции после достижения ей предельного состояния с уче-

том уравнения Баскуина [13] определяется по формуле

$$N_j = \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_j} \right)^m N_i,$$

где  $N_i, N_j$  - долговечность несущей конструкции в циклах нагружения до и после достижения предельного состояния соответственно;  $\sigma_i, \sigma_j$  - средние динамические напряжения в исходной конструкции и конструкции, достигшей предельного состояния.

Средние динамические напряжения определяются из осциллограмм динамических напряжений, полученных при расчете исходной конечноэлементной модели исследуемой зоны и конечноэлементной модели со сквозной трещиной.

Данная методика применена для исследования усталостной долговечности несущих конструкций кузовов вагонов с перфорированными подкрепляющими элементами. Разработка конечноэлементных моделей кузовов вагонов выполнялась в среде ПК трехмерного проектирования Siemens PLM Software NX [14] на примере кузова отечественного пассажирского вагона. Рассмотрены десять вариантов конструкции с продолговатыми и круглыми типами перфорации. В соответствии с конструктивными особенностями несущей системы кузова пассажирского вагона определены параметры перфорации: диаметр отверстия ( $D$ ), расстояние между центрами отверстий ( $l$ ), шаг перфорации ( $L$ ) (табл. 1).

Таблица 1

Параметры перфорации

Вариант перфорации	1	2	3	4	5
$D \times l \times L$ , мм	40×50×320	40×30×320	40×0×320	20×70×320	20×50×320
Вариант перфорации	6	7	8	9	10
$D \times l \times L$ , мм	40×50×220	40×30×220	40×0×220	20×70×220	20×50×220

Анализ прочности несущих конструкций кузовов вагонов в динамической постановке проводится в три этапа. На первом этапе с использованием

динамической трехмерной компьютерной модели вагона получены динамические усилия, передаваемые на несущую конструкцию кузова вагона через скользуны

и пятники при его движении по неровностям пути.

Твердотельная компьютерная модель вагона сформирована из кузова в виде пространственного твердого тела с реальными инерционными характеристиками, связанного с подсистемами, моделирующими тележки.

Верификация полученных результатов проведена на основании данных натурных поездных испытаний вагона-аналога.

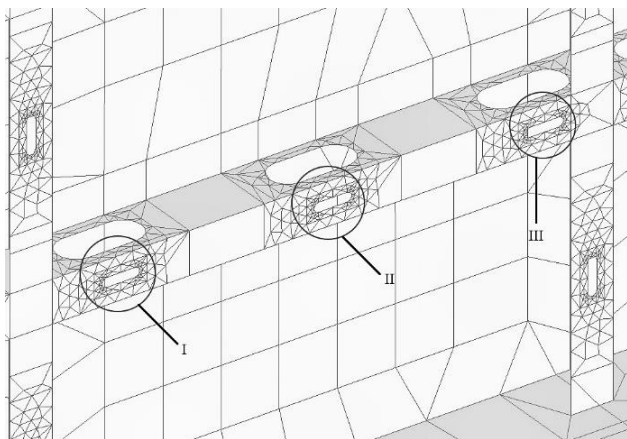
На втором этапе работы диапазоны динамических усилий в виде осциллограмм изменения усилий во времени для рассматриваемых режимов эксплуатации прикладываются к детализированным пластинчатым конечноэлементным моделям несущих конструкций. Оценка напряженно-деформированного состояния конструкций выполняется методом непосредственного интегрирования уравнений узловых перемещений.

В результате расчета конечноэлементных моделей в динамической постановке по картине напряженно-деформированного состояния конструкции определены наиболее нагруженные участки подкрепляющих элементов с отверстиями перфорации.

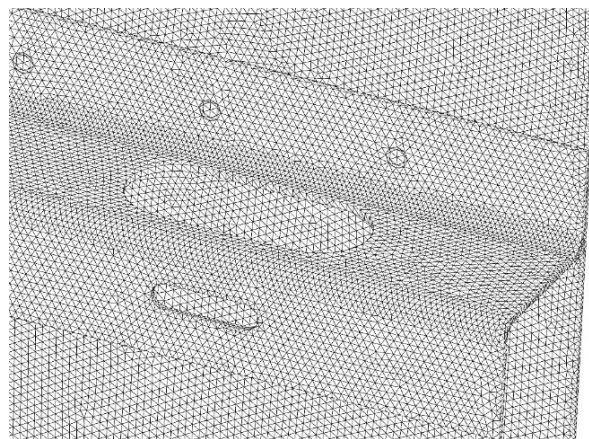
Наиболее нагруженные зоны перфорированных подкрепляющих элементов (рисунок а) располагаются в нижнем стрингере подоконного пояса обшивки, ближайшем к уровню пола, в среднем сечении кузова.

Графики изменения напряжений, полученные в исследуемых зонах перфорированных профилей, приняты в качестве источников повреждающего воздействия при анализе усталостной долговечности кузова вагона.

На третьем этапе работы осуществлялось вычленение наиболее нагруженных зон с отверстиями перфорации из конечноэлементных моделей кузовов и моделирование их объемными элементами.



а)



б)

Рис. Наиболее нагруженные зоны перфорированного стрингера с первым типом перфорации: а - зоны I, II, III в пластинчатой конечноэлементной модели кузова; б - уточненная объемная конечноэлементная модель зоны II

Конечноэлементные модели формировались из четырехузловых тетраэдральных объемных элементов с характерным размером 3 мм (рисунок б). Количество объемных элементов выделенных зон составило порядка 158 тыс., объединенных в 54 тыс. узлов, общее

число степеней свободы - 325 тыс. Нагружение конечноэлементных расчетных схем выполнялось приложением к их соответствующим узлам динамических нагрузок, полученных из конечноэлементных моделей кузовов в целом.

## Результаты исследования

На основании предложенной методики проведена оценка динамической нагруженности и с помощью зависимостей (1) и (2) получены показатели усталостной долговечности несущих конструкций кузовов вагонов для режимов движения вагона по прямому участку пути, в кривых радиусом 300, 500, 700 и 1200 м и с противошерстным прохождением по стрелочным переводам с крестовиной марки 1/11 в скоростном диапазоне 20...160 км/ч с шагом 20 км/ч [15]. Результаты расчета для рассматриваемых вариантов конструкций по трем наиболее нагруженным зонам перфорированных подкрепляющих элементов приведены в табл. 2.

В соответствии с результатами, приведенными в табл. 2, наименьшие сроки службы наблюдаются в зоне II перфорированного стрингера. Сроки службы кузовов вагонов с вариантами перфорации подкрепляющих элементов № 2, 3, 7 и 8 не превышают минимальный назначенный срок службы вагона-аналога с кузовом из углеродистых сталей, равный 28 годам. Значения уточненного расчета с использованием модели выделенного участка превышают значения расчета модели кузова в

целом не более чем на 4 %, что также не превышает назначенный срок службы вагона-аналога. Применение кузовов вагонов с вариантами перфорации № 2, 3, 7 и 8 с точки зрения усталостной долговечности является нецелесообразным.

Сроки службы исследуемых конструкций вагонов с вариантами перфорации № 1, 4, 5, 6, 9, 10 превышают сроки службы вагона-аналога, что свидетельствует о работоспособности данных конструкций и требует дальнейших исследований на их соответствие требованиям нормативной документации с целью выбора рациональной конструкции.

Следует отметить, что результаты, полученные по методике В.В. Болотина, идут в запас, что является предпочтительным для теоретических расчетов прогнозирования усталостной долговечности ответственных конструкций. Максимальный срок службы, рассчитанный по методике В.В. Болотина в наиболее нагруженной зоне, имеет вагон с пятым вариантом перфорации. Он превышает срок службы вагона-аналога на 24,6 % при расчете кузова в целом и на 30 % при уточненном расчете участка кузова.

Таблица 2

Соответствие срока службы несущей конструкции кузова пассажирского вагона (в годах) варианту перфорации подкрепляющих элементов кузова

Вариант перфорации	Зона I				Зона II				Зона III			
	КЭ модель кузова		КЭ модель участка кузова		КЭ модель кузова		КЭ модель участка кузова		КЭ модель кузова		КЭ модель участка кузова	
	Зависимость 1	Зависимость 2	Зависимость 1	Зависимость 2	Зависимость 1	Зависимость 2	Зависимость 1	Зависимость 2	Зависимость 1	Зависимость 2	Зависимость 1	Зависимость 2
1	44,5	32,4	43,1	33,8	43,1	31,4	41,7	32,7	44,6	32,5	43,2	33,9
2	36,1	26,3	34,9	27,4	35,0	25,5	33,9	26,6	36,2	26,4	35,0	27,5
3	32,9	24,0	31,9	25,0	32,0	23,3	30,9	24,3	33,1	24,1	32,0	25,1
4	47,7	34,8	46,2	36,3	46,4	33,8	44,8	35,2	47,9	34,9	46,4	36,4
5	49,4	36,0	47,8	37,5	47,9	34,9	46,4	36,4	49,5	36,1	47,9	37,6
6	42,4	30,9	41,0	32,2	41,2	30,0	39,9	31,3	42,5	31,0	41,2	32,3
7	39,5	28,8	38,2	30,0	27,9	24,5	32,5	25,5	34,7	25,3	33,6	26,4
8	31,6	23,0	30,4	23,9	30,6	22,3	29,6	23,2	31,7	23,1	30,7	24,1
9	44,2	32,2	42,8	33,6	42,8	31,2	41,4	32,5	44,3	32,3	42,9	33,7
10	45,6	33,2	44,1	34,6	44,2	32,2	42,8	33,6	45,7	33,3	44,2	34,7

**Заключение**

Полученные результаты исследования подтверждают возможность применения предлагаемой методики для прогнозирования усталостной долговечности свар-

ных несущих конструкций кузовов вагонов с подкрепляющими элементами перфорированного сечения.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Sun, W. Analysis of modal frequency optimization of railway vehicle car body / W. Sun, J. Zhou, D. Gong, T. You // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2016. – Vol. 8 (4). – P. 1-12.
2. Притыкин, А.И. Распределение напряжений в перфорированных балках с круглыми вырезами при поперечном изгибе / А.И. Притыкин, А.С. Лаврова // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2017. – № 2. – С. 81-85.
3. Горохова, М.В. Динамическая жесткость пластин с вырезами / М.В. Горохова // *Вестник Волжской государственной академии водного транспорта*. – 2004. – № 10. – С. 11-14.
4. Castellated and Cellular Beam Design / Sameer S. Fares, P.E., S.E., P. Eng, John Coulson, P.E., David W. Dinehart, Ph.D. // *31 Steel Design Guide*. - American Institute of Steel Construction, 2016. – 117 p.
5. Kaveh, A. Cost optimization of castellated beams using charged system search algorithm / A. Kaveh, F. Shokohi // *Transactions of Civil Engineering*. – 2014. – Vol. 38. – № C1. – P. 235-249.
6. Jamadar, A.M. Parametric study of castellated beam with circular and diamond shaped openings / A.M. Jamadar, P.D. Kumbhar // *International Research Journal of Engineering and Technology*. – 2015. – Vol. 2. – № 2. – P. 715-722.
7. Погорелов, Д.Ю. Алгоритмы моделирования динамики систем тел с большим числом степеней свободы / Д.Ю. Погорелов // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. – 2011. – № 4 (2). – С. 278-279.
8. Когаев, В.П. Прочность и износостойкость деталей машин / В.П. Когаев, Ю.Н. Дроздов. – М.: Высш. шк., 1991. – 319 с.
9. Бирюков, И.В. Механическая часть тягового подвижного состава / И.В. Бирюков, А.Н. Савоськин, Г.П. Бурчак [и др.]; под ред. И.В.Бирюкова. – М.: Транспорт, 1992. - 440 с.
10. Ashurkova, S.N. Methods of analysis of the impact of design features of bodies of passenger cars on their stiffness and strength characteristics / S.N. Ashurkova, V.V. Kobishchanov, E.V. Kolchina // *Procedia Engineering*. - 2017. – Т. 206. – P. 1623-1628.
11. Ашуркова, С.Н. Обоснование конечноэлементной модели для исследования напряженно-деформированного состояния кузова пассажирского вагона / С.Н. Ашуркова, А.М. Высоцкий // *Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке: сб. материалов IV всерос. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и молодых ученых с междунар. участием*. – Ижевск: ИННОВА, 2016. – С. 880-885.
12. Carlbom, P. Carbody and Passengers in Rail Vehicle Dynamics: doctoral thesis / P. Carlbom. – Stockholm, 2000. – 107 p.
13. Почтенный, Е.К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин / Е.К. Почтенный. - Минск: Наука и техника, 1983. – 246 с.
14. Гончаров, П.С. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ / П.С. Гончаров. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 504 с.
15. Светлов, В.И. Технические решения по механике пассажирских вагонов. Методы обоснования / В.И. Светлов. – М.: Глобус, 2002. – 200 с.
1. Sun, W. Analysis of modal frequency optimization of railway vehicle car body / W. Sun, J. Zhou, D. Gong, T. You // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2016. – Vol. 8 (4). – P. 1-12.
2. Pritykin, A.I. Stress distribution in perforated beams with round notches at cross bending / A.I. Pritykin, A.S. Lavrova // *Industrial and Civil Engineering*. – 2017. – No.2. – pp. 81-85.
3. Gorokhova, M.V. Dynamic stiffness of notched plates / M.V. Gorokhova // *Bulletin of Volzhsky State Academy of Water Transport*. – 2004. – No.10. – pp. 11-14.
4. Castellated and Cellular Beam Design / Sameer S. Fares, P.E., S.E., P. Eng, John Coulson, P.E., David W. Dinehart, Ph.D. // *31 Steel Design Guide*. - American Institute of Steel Construction, 2016. – 117 p.
5. Kaveh, A. Cost optimization of castellated beams using charged system search algorithm / A. Kaveh, F. Shokohi // *Transactions of Civil Engineering*. – 2014. – Vol. 38. – № C1. – P. 235-249.
6. Jamadar, A.M. Parametric study of castellated beam with circular and diamond shaped openings / A.M. Jamadar, P.D. Kumbhar // *International Research Journal of Engineering and Technology*. – 2015. – Vol. 2. – № 2. – P. 715-722.
7. Pogorelov, D.Yu. Modeling algorithms for dynamics of systems of bodies with large number of freedom degrees / D.Yu. Pogorelov // *Bulletin of Lobachevsky University of Nizhny Novgorod*. – 2011. – No.4 (2). – pp. 278-279.
8. Kogaev, V.P. Machinery Strength and Wear-resistance / V.P. Kogaev, Yu.N. Drozdov. – M.: Higher School, 1991. – pp. 319.

9. Biryukov, I.V. Mechanical Part of Propulsion Rolling-Stock / I.V. Biryukov, A.N. Savoskin, G.P. Burchak [et al.]; under the editorship of I.V. Biryukov. – M.: Transport, 1992. – pp. 440.
10. Ashurkova, S.N. Methods of analysis of the impact of design features of bodies of passenger cars on their stiffness and strength characteristics / S.N. Ashurkova, V.V. Kobishchanov, E.V. Kolchina // Procedia Engineering. - 2017. – Т. 206. – P. 1623-1628.
11. Ashurkova, S.N. Finite element model substantiation for investigation of stress-strain state of passenger car body / S.N. Ashurkov, A.M. Vysotsky // Young Scientists for Scientific-Engineering Progress in the XXI-th Century: Proceedings of the IV-th All-Russian Scientific-technical Conf. of Post Graduate Students, Master Degree Students and Young Scientists with Inter. Participation. – Izhevsk: INNOVA, 2016. – pp. 880-885.
12. Carlbom, P. Carbody and Passengers in Rail Vehicle Dynamics: doctoral thesis / P. Carlbom. – Stockholm, 2000. – 107 p.
13. Pochtenny, E.K. Life prediction and machine parts fatigue diagnostics / E.K. Pochtenny. – Minsk: Science and Engineering, 1983. – pp. 246.
14. Goncharov, P.S. NX Advanced Simulation. Engineering Analysis / P.S. Goncharov. – M.: DMK Press, 2012. – pp. 504.
15. Svetlov, V.I. Engineering Solutions on Passenger Car Mechanics. Methods for Substantiation / V.I. Svetlov. – M.: Globe, 2002. – pp. 200.

*Статья поступила в редакцию 17.05.19*

*Рецензент: д.т.н., профессор Омского государственного университета путей сообщения*

*Николаев В.А.*

*Статья принята к публикации 7. 06. 19.*

#### **Сведения об авторах:**

**Ашуркова Светлана Николаевна**, соискатель кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, e-mail: [swetiknk@yandex.ru](mailto:swetiknk@yandex.ru).

**Ashurkova Svetlana Nikolaevna**, Applicant of the Dep. "Railway Rolling-Stock", Bryansk State Technical University, e-mail: [swetiknk@yandex.ru](mailto:swetiknk@yandex.ru).

**Антипин Дмитрий Яковлевич**, к.т.н., доцент, директор Учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, e-mail: [adya24@rambler.ru](mailto:adya24@rambler.ru).

**Antipin Dmitry Yakovlevich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Director of Educational Scientific Institute of Transport, Bryansk State Technical University, e-mail: [adya24@rambler.ru](mailto:adya24@rambler.ru).