

УДК 629.45

DOI: 10.30987/article\_5d10851fcf3ff3.25702158

С.Н. Ашуркова, Д.Я. Антипин

## ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ КУЗОВОВ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ С ПЕРФОРИРОВАННЫМИ ПОДКРЕПЛЯЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Предложена методика обоснования выбора типа и параметров перфорации элементов подкрепляющего набора кузовов пассажирских вагонов методом многовариантных расчетов с использованием суперэлементного редуцирования. Выполнена апробация предлагаемой методики по выбору рациональной несущей конструкции кузова пассажирского вагона на примере кузова отечественного

вагона по критериям прочности и обеспечения наибольшего снижения массы несущей конструкции.

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

S.N. Ashurkova, D.Ya. Antipin

## SUBSTANTIATION OF DESIGN SOLUTIONS FOR PASSENGER CAR BODY BEARING STRUCTURES WITH PERFORATED REINFORCING ELEMENTS

The aim of the work is a development of a procedure for the choice substantiation of a type and parameters of the perforation of reinforcing set elements in passenger car bodies.

As a method of investigations there is adopted a computer mathematical modeling based on the use of a finite element method. The choice of a type and perforation parameters is connected with the problem in the large array creation of bearing structure design models of passenger car bodies. The analysis of investigations carried out in the field of multi-variation computations has shown that the most efficient investigation method is a super-element reduction. Its use allows decreasing labor and time costs for the body design model development at the expense of the initial super-element with the perforation area for a new one.

The appraisal of the procedure offered on the choice of a body efficient bearing structure with the perforated profiles is carried out by the example of the body of a domestic passenger car according to the criteria of strength and assurance of the highest weight reduction of a bearing structure.

In the first stage of the work there are defined types and parameters of perforation possible for use in the structure. Finite element design models of car bodies are developed. On the basis of strength

computation results the reinforcing elements of the structure are offered which have a margin safety for perforation application in them. Based on the analysis of car body bearing structure there is carried out a choice of an efficient unit of a finite element model which will be used as a super-element. In the next stage of the work there are developed and computed structures of car bodies with the perforation types under consideration and with the use of super-elements.

The computation results have shown that maximum design stresses of car bodies for all perforation types under consideration do not exceed legitimate values. As an efficient bearing structure of a passenger car body there is adopted a car body with the sixth type of perforation ensuring the largest decrease of structure metal intensity and satisfying strength requirements.

The procedure developed can be used at designing modern bearing structures of passenger car bodies having improved technical and economic values.

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

### Введение

Перспективным направлением развития несущих систем современных пассажирских вагонов является снижение их веса. Решение данной задачи возможно за счет оптимизации несущих элементов кузовов, применения легковесных материалов, в том числе алюминиевых сплавов и композитов.

Анализ исследований и конструкторских разработок в области создания совре-

менных стальных подкрепленных несущих оболочек кузовов транспортных средств показал, что одним из перспективных направлений является применение гнутых перфорированных профилей.

Данный подход в области облегчения несущих конструкций широко используется в строительстве, судо- и авиастроении. В последнее время он активно внедряется в пассажирском вагоностроении. Прове-

денный анализ облегченных несущих пространственных конструкций показал, что в них применяются различные типы перфорации: круглая, квадратная, шестиугольная, прямоугольная или продолговатая. Поскольку представленные конструкции, за исключением строительных, эксплуатируются при интенсивном воздействии изменяемых во времени знакопеременных нагрузок, в них применяется круглая и продолговатая перфорация.

Сегодня в разных строительных областях перфорированные балки проектируются по соответствующим нормам и правилам, используются различные методики оценки прочностных характеристик перфорированных балок, а также эмпирические зависимости влияния параметров перфорации на эти характеристики [1-12]. Данные зависимости являются трудоемкими и носят приближенный характер.

На современном этапе развития методов прочностных расчетов вагонных конструкций не существует четкой методики оценки несущей способности кузова пассажирского вагона, выполненного с подкрепляющими элементами перфорированного сечения. При этом важной задачей остается определение рационального типа и параметров перфорации подкрепляющих обшивку элементов на стадии проектирования.

Выбор типа (круглая и/или продолговатая) и параметров перфорации (шаг перфорации, тип ряда, диаметр отверстия, расстояние между центрами отверстий) связан с проблемой создания многовариантных расчетных схем несущей конструкции кузова пассажирского вагона. Создание данных схем предусматривает многократное внесение в конструкцию повторяющихся элементов - участков балок с перфорацией.

### Методика решения

На основании проведенных исследований рациональным инструментом для создания расчетных детализированных пространственных моделей несущей конструкции кузовов пассажирских вагонов являются промышленные программные комплексы трехмерного проектирования и их модули, использующие метод конечных элементов. В данной работе использован

В результате формируются однотипные схемы несущей конструкции, отличающиеся друг от друга только типом перфорации. Разработку массива расчетных схем целесообразно выполнять методами компьютерного математического моделирования [13; 14].

На основании проведенного анализа методов многовариантных расчетов для создания детализированных пространственных моделей несущей конструкции кузова пассажирского вагона с различными типами перфорации несущих элементов рационально использовать метод суперэлементного редуцирования конструкции.

Принцип, используемый в суперэлементном анализе, предполагает деление расчетной модели на серию компонентов (суперэлементов), каждый из которых обрабатывается независимо, что приводит к набору сокращенных матриц (масса, демпфирование, жесткость и нагрузка), описывающих поведение суперэлемента в местах его соединения с соседними элементами модели.

Метод суперэлементов позволяет повысить эффективность расчёта за счет представления несущей конструкции кузова вагона в виде конечноэлементной сборки, отдельные элементы которой являются суперэлементами и заменяют части структуры несущей конструкции, представляющие собой перфорированные участки балок, которые можно заменить на аналогичные с минимальными временными и трудовыми затратами инженера.

В связи с этим для многовариантных расчетов несущей конструкции кузова вагона актуальным является создание методики обоснования типа и параметров перфорации элементов подкрепляющего набора кузовов пассажирских вагонов с использованием суперэлементов.

программный комплекс *Siemens PLM Software NX*, позволяющий реализовать метод суперэлементного редуцирования [15; 16].

Методика обоснования типа и параметров перфорации элементов подкрепляющего набора кузовов пассажирских вагонов с использованием суперэлементов включает в себя несколько этапов.

На первом этапе работы в программном комплексе создается трехмерная детализированная твердотельная модель исходной несущей конструкции кузова пассажирского вагона, на основании которой (с использованием возможностей модуля *AdvancedSimulation* программного комплекса) формируется пластинчатая конечноэлементная модель.

На основе разработанной геометрической модели оценивается масса исходной металлоконструкции кузова вагона.

Адекватность разработанной модели подтверждается сопоставлением значений нормальных напряжений, полученных в результате математического расчета, со значениями напряжений, полученными в результате натурных стендовых испытаний вагона. Задание граничных условий и нагружение расчетной модели осуществляется в соответствии с условиями испытаний и рекомендациями нормативной документации [17].

На втором этапе работы на основании верифицированной конечноэлементной модели разрабатывается конечноэлементная модель несущей конструкции кузова вагона с гладкой обшивкой боковых стен, подкрепленная стрингерами. Выполняется оценка напряженно-деформированного состояния несущей конструкции с целью определения участков подкрепляющего набора, максимальные значения напряжений которых далеки от допускаемых. На данных участках предполагается применение перфорации.

Затем с учетом конструктивных особенностей подкрепляющего набора кузова и технологических подходов определяются типы и параметры перфорации, возможные для применения в конструкции.

На следующем этапе работы разрабатываются конечноэлементные модели несущей конструкции кузова вагона с исследуемыми типами перфорации с использованием суперэлементов.

Разработка расчетных моделей кузовов вагонов с использованием суперэлементов выполняется в несколько стадий. Изначально выделяется блок конечноэлементной модели с перфорацией, предполагаемый для многократного применения в конструкции, в отдельный компонент сборки. Выполняется суперэлементное ре-

дуцирование выделенного компонента. Определяются внешние степени свободы, по отношению к которым редуцируется конечноэлементный блок (внешние узлы в характерных точках присоединения к основной структуре модели). Затем производится суперэлементный расчет. На конечной стадии разработки модели осуществляется добавление суперэлемента в качестве компонента сборки в основную модель.

Данные стадии суперэлементного редуцирования повторяются для всех рассматриваемых вариантов перфорации. Сокращение времени на разработку многовариантных моделей достигается за счет замены исходного файла суперэлемента на аналогичный с другим типом перфорации.

Использование суперэлементов в расчетных конечноэлементных моделях позволяет значительно сократить размерность моделей и снизить трудоемкость их разработки более чем в 2 раза.

Оценка прочности несущих конструкций кузовов вагонов с различными типами перфорации выполняется на основании разработанных многовариантных расчетных моделей. Задание граничных условий и нагружение расчетных моделей осуществляется в соответствии с рекомендациями нормативной документации [17].

На основе разработанных геометрических моделей оценивается масса металлоконструкций вагона с рассматриваемыми типами перфорации.

Адекватность разработанных методом суперэлементного редуцирования конечноэлементных моделей устанавливается по картине местного напряженно-деформированного состояния в зоне перфорации тестового образца путем сопоставления результатов расчета разработанной конечноэлементной модели, выполненной с суперэлементами, с результатами, полученными на основании модели, выполненной традиционным способом, и данными натурных стендовых испытаний. В качестве тестового образца выступает участок балки перфорированного сечения. Задание граничных условий и нагружение расчетной модели образца осуществляется в соответствии с условиями испытаний.

### Апробация методики

Апробация предлагаемой в работе методики выполнена на примере несущей конструкции кузова отечественного пассажирского вагона модели 61-4447.

На первом этапе работы средствами программного комплекса разработана геометрическая детализированная компьютерная модель несущей конструкции кузова вагона-аналога. На ее основе выполнено формирование конечноэлементной модели трех- и четырехузловыми пластинчатыми конечными элементами, обладающими изотропными свойствами.

На основе разработанной геометрической модели выполнена оценка массы металлоконструкции кузова вагона.

Верификация разработанной конечноэлементной модели осуществлялась сопоставлением данных прочностного расчета методом конечных элементов с данными натурных стендовых испытаний. Для расчета использованы три варианта нагружения: продольная сжимающая (2,5 МН) и растягивающая нагрузка (1,5 МН), а также вертикальная нагрузка от веса брутто кузова. Отмечена удовлетворительная качественная и количественная сходимость полученных результатов.

На втором этапе работы на основании исходной верифицированной модели разработана модель кузова вагона с глад-

кой обшивкой боковых стен. В качестве элемента подкрепляющего набора кузова принят гнутый зетовый профиль размером  $65 \times 45 \times 40 \times 2,5$  мм, широко применяемый в пассажирском вагонеостроении.

Расчет несущей конструкции на прочность проводился в статической постановке в соответствии с рекомендациями [17] для I и III расчетных режимов. Полученная картина напряженно-деформированного состояния кузова вагона позволила определить наиболее нагруженные участки подкрепляющего набора кузова. Максимальные напряжения в несущей конструкции наблюдаются в стрингере, ближайшем к уровню пола, но при этом имеется достаточный запас прочности для применения перфорации. Не рекомендуется использовать перфорацию в стойках кузова в зоне установки домкратов.

В качестве исследуемых типов перфорации использованы круглая и продолговатая перфорации с прямым рядом, позволяющие снизить концентрацию напряжений в зоне отверстий перфорации. Рассмотрены два наиболее рациональных шага перфорации для применения в несущей конструкции кузова. Всего в работе рассмотрено десять типов перфорации, параметры которых представлены в таблице.

Таблица

Параметры перфорации несущих элементов

Тип перфорации	Шаг перфорации $L$ , мм	Диаметр отверстия $D$ , мм	Расстояния между центрами отверстий $l$ , мм
1	320	40	50
2			30
3			–
4		20	70
5			50
6	220	40	50
7			30
8			–
9		20	70
10			50

Схематичное изображение перфорации несущих элементов используемых типов на участке балки представлено на рис. 1.

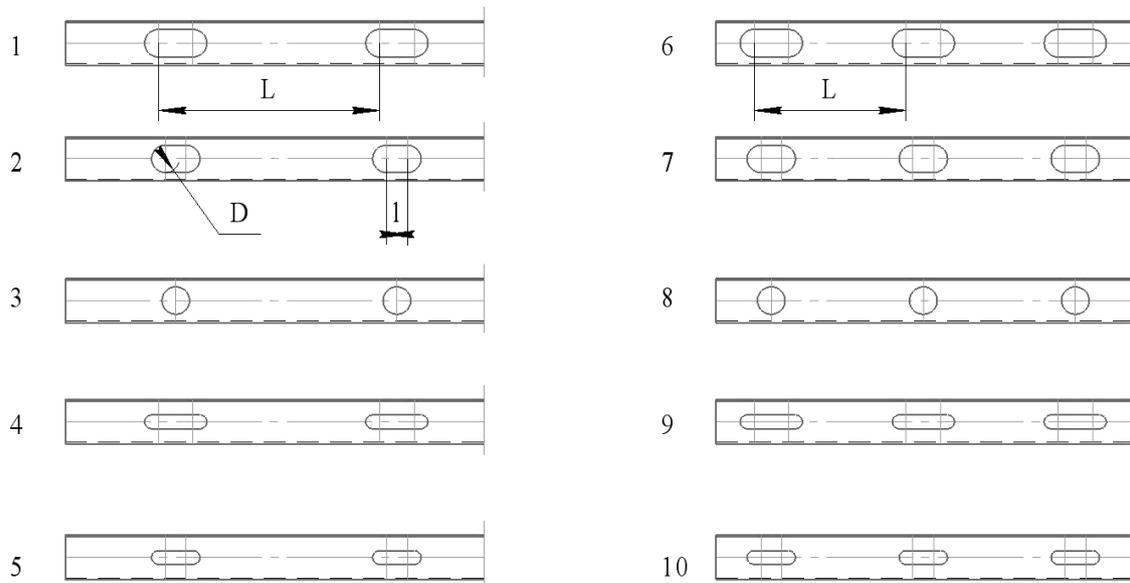


Рис.1. Схемы перфорации несущих элементов используемых типов на участке балки

Следующим этапом методики является суперэлементное редуцирование конструкций с перфорированными элементами подкрепляющего набора кузова.

При суперэлементном редуцировании важной задачей является выделение рационального блока конечноэлементной модели с перфорацией, предполагаемого для многократного применения в конструкции.

С учетом анализа разработанной стрингерной конечноэлементной модели в работе рассмотрены четыре варианта возможного выделения блока модели в качестве суперэлемента. Для этого может быть выделен типовой участок балки с различным количеством отверстий перфорации (рис. 2а,б,в) либо обособленный участок с одним отверстием (рис. 2г).

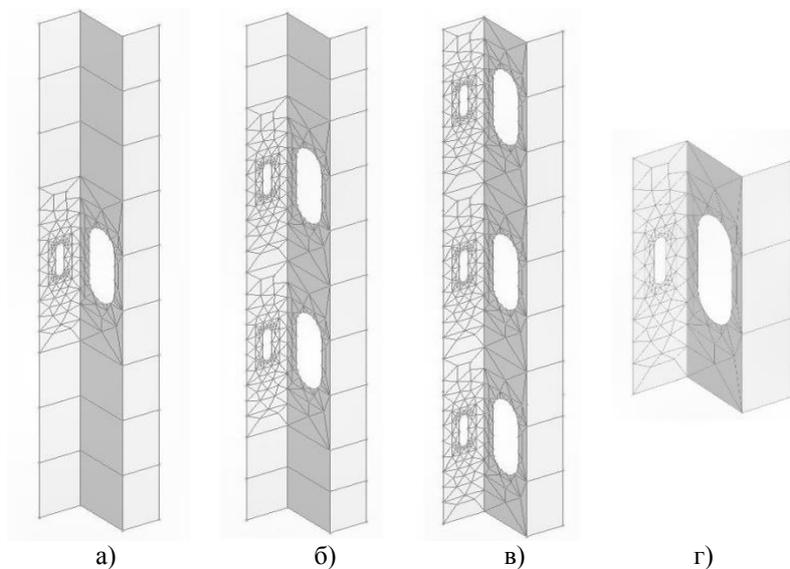


Рис.2. Схемы конечноэлементной модели участка стрингера межоконного простенка с одним (а), двумя (б), тремя (в) отверстиями перфорации, обособленного участка стрингера с одним отверстием (г), используемые в качестве суперэлемента

На основе проведенного исследования конструкции можно сделать вывод, что в кузове пассажирского вагона существует несколько типовых участков балок, что предполагает создание нескольких типов суперэлементов; дополнительная разработка суперэлементов требуется для балок в концевых частях вагона, что увеличивает время разработки конструкции в целом.

В качестве универсального суперэлемента выступает обособленный участок балки с одним отверстием, позволяющий комбинировать на одном участке балки несколько суперэлементов для достижения требуемого результата. Габаритные размеры универсального участка балки должны вмещать в себя максимальный размер перфорации. Данный вариант был использован в работе в качестве суперэлемента. На выделенном участке балки с отверстием перфорации следует предусмотреть узлы в характерных точках присоединения к основной структуре модели.

На следующем этапе работы блок конечноэлементной модели с перфорацией выделяется в отдельный компонент сборки. Выполняется суперэлементное редуцирование и добавление суперэлемента в ос-

новную модель конструкции. Стадии суперэлементного редуцирования повторяются для всех рассматриваемых вариантов перфорации.

Адекватность разработанных конечноэлементных моделей подтверждена качественным и количественным соответствием полученных результатов расчета с использованием суперэлементов результатам расчета модели, сформированной традиционным способом. Расхождение значений напряжений не превысило 1%, что подтверждает работоспособность предложенных конструкций, разработанных с использованием суперэлементов.

Разработанные конечноэлементные модели кузовов вагонов с рассматриваемыми типами перфорации позволили определить массу металлоконструкций, а также их напряженно-деформированное состояние. Результаты расчета показали, что максимальные расчетные напряжения в целом по конструкции кузовов вагонов для всех рассматриваемых типов перфорации не превышают допустимых значений. При этом наибольшее снижение массы металлоконструкции отмечено при использовании в конструкции шестого типа перфорации.

## Заключение

Предложенная методика обоснования выбора типа и параметров перфорированных элементов подкрепляющего набора кузова пассажирского вагона с использованием суперэлементов позволяет производить многовариантные расчеты с минимальными трудозатратами и сокращением времени на разработку расчетных моделей относительно традиционного метода раз-

работки с обеспечением идентичных результатов.

В качестве рациональной несущей конструкции кузова пассажирского вагона принят кузов вагона с шестым типом перфорации, обеспечивающий наибольшее снижение металлоемкости конструкции и удовлетворяющий требованиям прочности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. BS5950-1. Code of practice for design. Rolled and welded sections. -British Standard Institution, 2000.
2. Притыкин, А.И. Влияние ширины перемычек на местную устойчивость балок шестиугольными вырезами/ А.И. Притыкин, И.А. Притыкин// Вестник МГСУ. – 2011. – № 2-2. – С. 169.
3. Притыкин, А.И. Прогибы перфорированных балок с круглыми вырезами/ А.И. Притыкин, А.С. Лаврова// Вестник Томского государствен-

ного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 3 (50). – С. 94-102.

4. Притыкин, А.И. Прогибы перфорированных балок с шестиугольными вырезами: две формы решения/ А.И. Притыкин// Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 5. – С. 10-16.
5. Притыкин, А.И. Распределение и концентрация напряжений во флорах с овальными и круглыми вырезами/ А.И. Притыкин// Морские интеллек-

- туальные технологии. – 2017. – № 1-3 (37). – С. 29-34.
6. Лаврова, А.С. Экспериментально-теоретическое исследование жесткости и устойчивости перфорированных балок с круглыми вырезами/ А.С. Лаврова, А.И. Притыкин// Известия КГТУ. – 2017. – № 46. – С. 151-162.
  7. Емельянов, К.А. Эмпирическая оценка местной устойчивости перфорированных балок с круглыми вырезами/ К.А. Емельянов, А.И. Притыкин, А.С. Лаврова // Балтийский морской форум: сб. материалов VI Международ. Балтийского морского форума: в 6 т. – Калининград, 2018. – С. 114-122.
  8. 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.
  9. A new generation of castellated beams/ ArcelorMittal Europe: ACB® and ANGELINA™ beams. – 2015. – 64 p.
  10. 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.
  11. Притыкин, А.И. Концентрация напряжений во флорах с круглыми и овальными вырезами/ А.И. Притыкин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия «Морская техника и технология». – 2009. – № 1. – С. 76-81.
  12. 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.
  13. Ашуркова, С.Н. Анализ несущей способности кузова пассажирского вагона с подкрепляющими элементами боковой стены перфорированного сечения/ С.Н. Ашуркова// Совершенствование транспортных машин: сб. науч. тр./ под ред. В.В. Рогалева. – Брянск: БГТУ, 2018. – С.177-180.
  14. Ашуркова, С.Н. Оценка прочностных характеристик кузова пассажирского вагона с подкрепляющими элементами перфорированного сечения/ С.Н. Ашуркова// Перспективное развитие науки, техники и технологий: сб. науч. ст. 8-й междунар. науч.-практ. конф. – Курск: Университетская книга, 2018. – С. 13-15.
  15. Гончаров, П.С. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ/ П.С. Гончаров. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 504 с.
  16. NX Advanced Simulation. Практическое пособие/П.С. Гончаров, И.А. Артамонов, Т.Ф. Халитов[и др.]. – М.: МДК Пресс, 2014. – 112 с.
  17. ГОСТ 34093-2017. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Требования к прочности и динамическим качествам. – Введ. 2018-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2017. – 42 с.
  1. BS5950-1. Code of practice for design. Rolled and welded sections. - British Standard Institution./ 2000.
  2. Pritykin, A.I. Impact of straight arch width upon local stability of beams with hexagonal cuts / A.I. Pritykin, I.A. Pritykin // *Bulletin of MSBU*. – 2011. – No.2-2. – pp. 169.
  3. Pritykin, A.I. Deflection of perforated beams with round cuts / A.I. Pritykin, A.S. Lavrova // *Bulletin of Tomsk State Architectural-Constructional University*. – 2015. – No.3(50). – pp. 94-102.
  4. Pritykin, A.I. Deflections of perforated beams with hexagonal cuts: two solution forms/ A.I. Pritykin // *Industrial and Civil Construction*. 2015. – No.5. – pp. 10-16.
  5. Pritykin, A.I. Distribution and concentration of stresses in flora with oval and round cuts / A.I. Pritykin // *Marine Intelligence Technologies*. – 2017. – No.1-3 (37). – pp. 29-34.
  6. Lavrova, A.S. Experimental-theoretical investigation of stiffness and stability of perforated beams with round cuts / A.S. Lavrova, A.I. Pritykin // *Proceedings of KSTU*. – 2017. – No.46. – pp. 151-162.
  7. Yemelianov, K.A. Empirical assessment of local stability of perforated beams with round cuts / E.K. Yemeliyanov, A.I. Pritykin, A.S. Lavrova // *Baltic Marine Forum: Proceedings of the VI-th Inter. Baltic Marine Forum*: in 6 Vol. – Kaliningrad, 2018. – pp. 114-122.
  8. 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.
  9. A new generation of castellated beams/ ArcelorMittal Europe: ACB® and ANGELINA™ beams. – 2015. – 64 p.
  10. 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.
  11. Pritykin, A.I. Stress concentration in flora with round and oval cuts / A.I. Pritykin // *Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series "Marine Engineering and Technology"*. – 2009. – No.1. – pp. 76-81.
  12. Pritykin, A.I. Stress distribution in perforated beams with round cut at cross bending / A.I. Pritykin, A.S. Lavrova // *Industrial and Civil Construction*. – 2017. – No.2. – pp. 81-85.
  13. Ashurkova, S.N. Bearing capacity analysis of passenger car body with reinforcing elements of perforated section sidewall / S.N. Ashurkova // *Transport Machinery Updating: Proceedings / under the editorship of V.V. Rogalyov*. – Bryansk: BSTU, 2018. – pp. 177-180.

14. Ashurkova, S.N. Assessment of strength characteristics of passenger car body with reinforcing elements with perforated section / S.N. Ashurkova // *Promising Development of Science, Engineering and Technologies: Proceedings of the VIII-th Inter. Scientif.-Pract. Conf.* – Kursk: University Book, 2018. – pp. 13-15.
15. Goncharov, P.S. *NX Advanced Simulation. Engineering Analysis* / P.S. Goncharov. – М.: DMK Press, 2012. – pp. 504.
16. *NX Advanced Simulation. Practical Manual* / P.S. Goncharov, I.A. Artamonov, T.F. Khalitov [et al.]. – М.: MDK Press, 2014. – pp. 112.
17. RSS 34093-2017. *Passenger Cars for Locomotive Traction. Requirements to Strength and Dynamic Properties.* – Introduction. 2018-01-01. – М.: Publishing House of Standards, 2017. – pp. 42.

*Статья поступила в редакцию 15.05.19*

*Рецензент: д.т.н., профессор Тверского  
института вагоностроения*

*Самошкин С.Л.*

*Статья принята к публикации 27. 05. 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).