

## Определение критериев выбора параметров материала-наполнителя в несущих тонкостенных конструкциях каркасного типа применительно к задачам пассивной безопасности автомобилей

© Р.Б. Гончаров, В.Н. Зузов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Рассмотрены вопросы повышения эффективности применения материалов-наполнителей в элементах каркасного типа кабин и кузовов автомобилей. Для их решения проведено численное исследование труб из алюминиевого сплава АМгб при квазистатическом трехточечном изгибе с различными наполнителями. В качестве наполнителей были выбраны следующие материалы: хрупкие (эпоксидная смола, полистирол), гиперупругие (резина, полиуретан) и упругопластические (пеноалюминий плотностью 430 и 800 кг/м<sup>3</sup>). Получено, что наиболее эффективным материалом-наполнителем является пеноалюминий плотностью 800 кг/м<sup>3</sup>. Применение такого наполнителя повышает коэффициент нагруженности и удельную энергоемкость по сравнению с аналогичными параметрами полой трубы. Использование хрупких и гиперупругих материалов почти не улучшает механических характеристик. На основании анализа полученных результатов предложены оценочные параметры (удельная энергоемкость, коэффициент нагруженности, изменение площади поперечного сечения в зоне контакта, потеря несущей способности) и их пороговые значения, необходимые для предварительной оценки целесообразности и эффективности использования существующих и вновь разрабатываемых материалов-наполнителей для доработки кабин и кузовов автомобилей по требованиям пассивной безопасности.*

**Ключевые слова:** наполнители, пеноалюминий, МКЭ, конечно-элементная модель, LS-DYNA

**Введение.** В данной работе изучаются проблемы, связанные с использованием материалов-наполнителей и повышением эффективности их применения в каркасных элементах кабин грузовых автомобилей. Основной проблемой при ударном нагружении конструкций кабин является потеря несущей способности из-за образования пластических шарниров в зоне контакта или в местах резкого изменения жесткости. Такую картину напряженно-деформированных состояний (НДС) можно наблюдать при ударе маятником по кабине грузового автомобиля по правилам пассивной безопасности [1–3]. Появление пластического шарнира в конструктивных элементах каркасного типа сопровождается смятием и, как следствие, уменьшением площади поперечного сечения, т. е. в зоне контакта уменьшается изгибный момент инерции конструкции, а следовательно, и ее изгибная жесткость.

Для предотвращения образования пластических шарниров предлагается использовать наполнитель из специального материала, что позволяет увеличить жесткость и энергоемкость композиции. Следует отметить, что в настоящее время не существует четких оценочных параметров, по которым можно было бы определить на предварительном этапе эффективность применения наполнителя, поэтому решение данной проблемы весьма актуально. Особое внимание при подборе материала следует обратить на технологию изготовления материала-наполнителя и способы его введения в элементы каркасного типа конструкций.

Цель работы — определить критерии выбора параметров материала-наполнителя в несущих тонкостенных конструкциях каркасного типа для предотвращения образования пластических шарниров в них и, как следствие, повышения эффективности использования этих материалов в конструкциях при квазистатическом и ударном нагружении применительно к задачам пассивной безопасности грузовых автомобилей.

**Критерии выбора параметров материала-наполнителя.** В качестве наполнителя могут использоваться как пористые, так и однородные по внутренней структуре материалы. В зависимости от характера поведения под воздействием нагрузки их можно разделить на следующие группы: хрупкие (эпоксидная смола), гиперупругие (резина) и упругопластические (пеноалюминий).

В данной работе рассматривается весь указанный спектр материалов с целью выявить наиболее эффективные для применения в конструкциях при квазистатическом и ударном воздействии. На основе проведенных исследований [4–7] для решения этой проблемы предлагается использовать следующие оценочные параметры:

- удельную энергоемкость;
- коэффициент нагруженности;
- изменение площади поперечного сечения в зоне контакта;
- потерю несущей способности.

Значения оценочных параметров для исследуемых материалов определялись по результатам квазистатических натурных испытаний на трехточечный изгиб тонкостенных труб из алюминиевого сплава (с наполнителем и без него). Испытания проводились на универсальной испытательной машине. Допускается моделирование методом конечных элементов (МКЭ) при условии, что модель верифицирована на примере натурных испытаний. Полученные значения сравниваются с пороговыми. В случае если все значения параметров для исследуемого материала превышают пороговые, данный тип материала может использоваться для доработки кабины по правилам пассивной безопасности. Следует отметить, что чем выше значения параметров, тем эффективнее применение материала.

Удельная энергоемкость — оценочный параметр, позволяющий определить эффективность энергопоглощения материала. Поскольку наиболее тяжелыми режимами нагружения с точки зрения правил пассивной безопасности являются ударные, удельная энергоемкость — это наиболее важный параметр для определения целесообразности применения материала.

Коэффициент нагруженности — оценочный параметр, вычисляемый как отношение воспринимаемой силы образца без наполнителя (эталонный образец) к воспринимаемой силе образца с наполнителем в момент образования пластического шарнира (потеря несущей способности). Данный коэффициент необходим для определения жесткости материала-наполнителя (чем больше значение этого параметра, тем выше жесткость).

Параметр, отвечающий за изменение площади поперечного сечения тонкостенного элемента каркасного типа в зоне контакта, и потеря несущей способности (появление ниспадающей ветви на графике сила — перемещение) характеризуют образование пластического шарнира в месте контакта. Появление пластического шарнира недопустимо, поскольку в таком случае конструкция теряет свои механические свойства, превращается в механизм и, как следствие, начинает хуже сопротивляться нагрузкам, в том числе ударным.

Для пористых материалов существует дополнительный сравнительный параметр, который показывает, как изменяется модуль упругости в процессе деформирования в зоне контакта благодаря «схлопыванию» пор в материале.

**Моделирование свойств наполненных труб из алюминиевого сплава с помощью МКЭ в программе LS-DYNA.** Для определения пороговых значений оценочных параметров было рассмотрено несколько вариантов наполнителя. Расчеты трубы с наполнителем и без него проводились с применением МКЭ в явной постановке в программе LS-DYNA. Конечно-элементная модель (КЭМ) трубы с наполнителем приведена на рис. 1. Предлагаемый тип элемента — восьмиузловой constant stress solid. Базовый размер конечного элемента 2 мм, что характерно для высокоточных моделей [8]. Элемент такого типа и размера наилучшим образом подходит для решения задач трехточечного изгиба трубы с наполнителем [9], в том числе многовариантных и оптимизационных [10]. Материал трубы — алюминиевый сплав АМгб. Диаметр трубы 40 мм, длина 270 мм, толщина стенки 3 мм, расстояние между опорами для трехточечного изгиба 200 мм.

В качестве наполнителей использовались доступные материалы: эпоксидная смола, резина, полиуретан, полистирол, а также пеноалюминий плотностью 430 и 800 кг/м<sup>3</sup>.

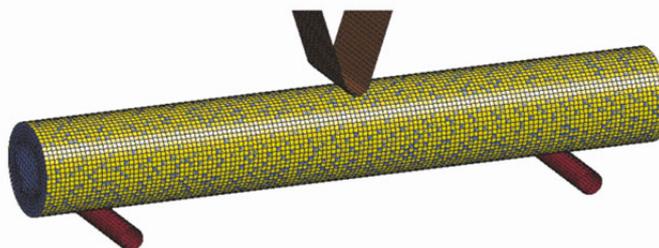


Рис. 1. Конечно-элементная модель трубы с наполнителем и нагружающим устройством

Пеноалюминий в программе LS-DYNA описывается моделью DESHPANDE\_FLECK\_FOAM, предложенной Дешпендом и Флекком [11]. Данная модель позволяет смоделировать механические свойства пористого материала без непосредственного моделирования пор, что существенно сокращает время, затрачиваемое на подготовку расчета, и машинное время счета.

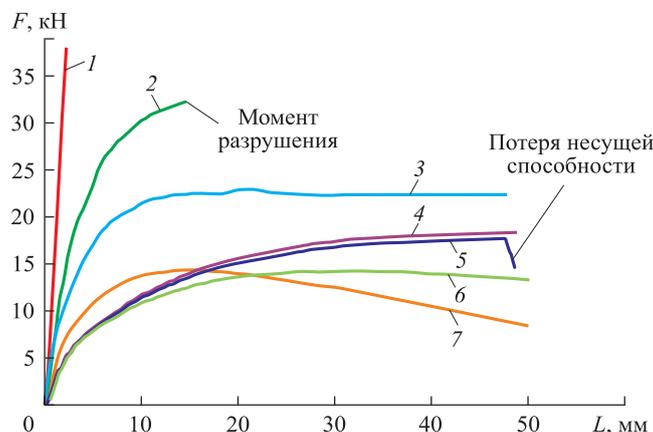
В данной работе моделируют свойства материалов, у которых ярко выражены хрупкие, гиперупругие и упругопластические свойства. Для адекватного моделирования таких материалов необходимо знать зависимости напряжений от деформаций при конкретном нагрузочном режиме (растяжение, сжатие, изгиб). Такого рода зависимости лучше всего получать экспериментально [12].

В программе LS-DYNA время расчета ограничивалось 0,1 с при скорости нагружения 0,5 м/с. Зависимость механических свойств материала от скорости нагружения не учитывалась. Верификация КЭМ проводилась в работе [13]. Результаты моделирования представлены в таблице.

**Значения оценочных параметров по результатам моделирования свойств труб из алюминиевого сплава АМг6**

Тип материала-наполнителя	Удельная энергоемкость, Дж/кг	Коэффициент нагруженности (сила, кН)	Изменение площади поперечного сечения в зоне контакта (площадь, мм <sup>2</sup> )	Потеря несущей способности
Без наполнителя	2284	1 (14,1)	1 (1256)	Есть
Пеноалюминий				
плотностью, кг/м <sup>3</sup> :				
800	26 295	364 (5140)	1,05 (1196)	Нет
430	2525	1,6 (22,5)	1,15 (1092)	Нет
Эпоксидная смола	1697	2,3 (32,3)	—	Разрушение
Резина	1056	1,25 (17,7)	1,15 (1091)	Есть
Полиуретан	1275	1,3 (18,6)	1,16 (1080)	Нет
Полистирол	1406	1,01 (14,2)	1,34 (936)	Есть

На рис. 2 показаны диаграммы нагружения образцов с рассматриваемыми вариантами наполнителей.



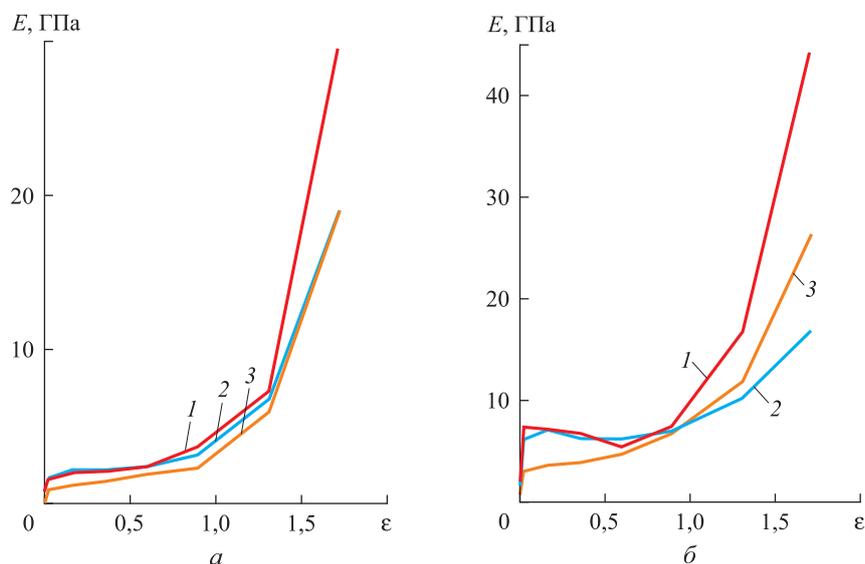
**Рис. 2.** Диаграммы нагружения изучаемых образцов: 1, 3 — с пеноалюминием плотностью 800 и 430 кг/м<sup>3</sup> соответственно; 2 — с эпоксидной смолой; 4 — с полиуретаном; 5 — с резиной; 6 — с полистиролом; 7 — без наполнителя

Анализ результатов показал, что наполнители такого типа, как полиуретан, полистирол и резина, не дают значительного прироста коэффициента нагруженности, показатели удельной энергоемкости у них хуже, чем для полой трубы. Наполнитель на основе эпоксидной смолы в процессе деформирования воспринял бóльшую нагрузку, чем полая труба, но растрескался, и труба потеряла несущую способность при относительно малых перемещениях нагружающего элемента.

Значительно лучше проявил себя пористый материал — пеноалюминий. Из данных таблицы рис. 2 следует, что пеноалюминий плотностью 430 кг/м<sup>3</sup> при аналогичной удельной энергоемкости позволил конструкции воспринять усилие в 1,6 раза больше, чем в случае полой трубы из алюминиевого сплава. Следует отметить также, что на графике сила — перемещение (см. рис. 2) данная конструкция не имеет ниспадающей ветви (перегиба), т. е. возникшие пластические деформации в материале не образовали зону с пластическим шарниром и, как следствие, конструкция не потеряла несущую способность.

Пеноалюминий плотностью 800 кг/м<sup>3</sup> демонстрирует наилучшие показатели по всем оценочным параметрам: коэффициент нагруженности возрос в 364 раза, удельная энергоемкость — в 11,5 раза, пластические деформации, возникшие в материале, незначительны и не образуют пластического шарнира. Однако применение пеноалюминия ограничено технологическими возможностями производства и установки, поэтому в данной работе наряду с ним рассматриваются альтернативные варианты материалов-наполнителей.

Следует отметить, что для пористых материалов типа пеноалюминия характерно увеличение модуля упругости в процессе деформирования (рис. 3).

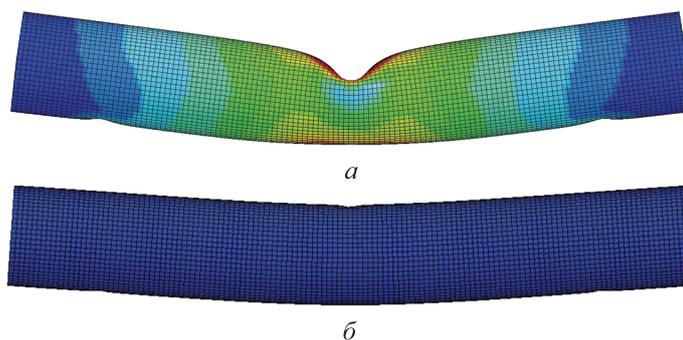


**Рис. 3.** Зависимость модуля упругости от деформации для пеноалюминия плотностью  $430 \text{ кг/м}^3$  (а) и  $800 \text{ кг/м}^3$  (б):

1 — вдоль оси  $Ox$ ; 2 — вдоль оси  $Oy$ ; 3 — вдоль оси  $Oz$

Указанная тенденция обусловлена наличием пор. При сжатии они сминаются и пеноматериал приобретает характеристики базового материала (в данном случае алюминия).

На рис. 4 и 5 приведены результаты моделирования тонкостенной трубы с наполнителями, максимально различающимися по своим свойствам.



**Рис. 4.** Картина НДС трубы с различными наполнителями в процессе нагружения:

а — с резиной; б — с пеноалюминием плотностью  $800 \text{ кг/м}^3$

На рис. 4 представлена картина распределения пластических деформаций по структуре материала-наполнителя, а на рис. 5 — поперечное сечение трубы в месте контакта после снятия нагрузки.

Как видно, сечение трубы с наполнителем из резины сильно уменьшилось, в материале возникли намного более обширные пластические деформации, чем в пеноалюминии плотностью  $800 \text{ кг/м}^3$ , у которого пластические деформации незначительные. В результате композиция с резиной потеряла несущую способность, а композиция с пеноалюминием — нет.

На основе проведенного анализа были предложены следующие пороговые значения оценочных параметров:

Удельная энергоёмкость.....	>2500 Дж/кг
Коэффициент нагруженности.....	>1,5
Изменение площади поперечного сечения в зоне контакта.....	<1,25
Потеря несущей способности.....	Отсутствует

При создании новых материалов для заполнения каркасных элементов конструкций кабин и кузовов автомобилей в целях увеличения значений механических характеристик для удовлетворения требованиям пассивной безопасности необходимо проводить предварительные испытания образцов, направленные на определение оценочных параметров. Если вновь разрабатываемые материалы не удовлетворяют требованиям, дальнейшее их использование для заполнения каркасных элементов конструкции нецелесообразно. Из рассмотренных материалов предложенным оценочным параметрам удовлетворяют только два: пеноалюминий плотностью  $800$  и  $430 \text{ кг/м}^3$ .

**Заключение.** Предложенные оценочные параметры (удельная энергоёмкость, коэффициент нагруженности, изменение площади поперечного сечения в зоне контакта, потеря несущей способности) необходимы для предварительной оценки целесообразности и эффективности использования существующих и вновь разрабатываемых материалов-наполнителей.

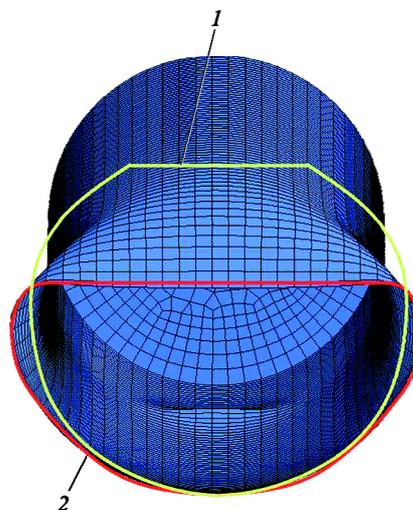


Рис. 5. Внешний вид поперечного сечения после снятия нагрузки ( $\sigma$ ):  
1 — пеноалюминий плотностью  $800 \text{ кг/м}^3$ ; 2 — резина

Наиболее эффективным материалом-наполнителем является пеноалюминий плотностью  $800 \text{ кг/м}^3$ . Коэффициент нагруженности при его использовании возрос в 364 раза, а удельная энергоемкость — в 11,5 раза по сравнению с аналогичными параметрами полой трубы.

Применение хрупких материалов не позволяет добиться значительного улучшения механических характеристик композиции. Так, при использовании в качестве наполнителя эпоксидной смолы коэффициент нагруженности возрос в 2,3 раза, однако при этом удельная энергоемкость уменьшилась в 1,35 раза.

Применение гиперупругих материалов почти не дает улучшения механических характеристик. Так, при использовании в качестве наполнителя полиуретана коэффициент нагруженности увеличился в 1,3 раза, а удельная энергоемкость уменьшилась в 1,8 раза.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шабан Б.А., Зузов В.Н. Анализ влияния конструктивных факторов на пассивную безопасность кабины грузового автомобиля при фронтальном ударе. *Наука и образование*, 2013, № 8, с. 91–108. DOI: 10.7463/0813.0580257
- [2] Шабан Б.А., Зузов В.Н. Анализ влияния конструктивных факторов кабины на пассивную безопасность грузовых автомобилей при ударе по передним стойкам. *Наука и образование*, 2013, № 11, с. 95–106. DOI: 10.7463/1113.0636798
- [3] Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Проблемы поиска оптимальных решений для обеспечения пассивной безопасности кабин грузовых автомобилей при минимальной массе. *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*, 2018, № 4 (38), с. 92–102.
- [4] Xiao Zh., Fang J., Sun Gu., Li Q. Crashworthiness design for functionally graded foam-filled bumper beam. *Int. J. Advances in engineering software*, 2015, vol. 85, pp. 81–95.
- [5] Li Zh., Yu Q., Zhao X., Yu M., Shi P., Yan C. Crashworthiness and lightweight optimization to applied multiple materials and foam-filled front end structure of autobody. *Adv. Mech. Eng.*, 2017, vol. 9 (8), pp. 1–21. DOI: 10.1177/1687814017702806
- [6] Бутарович Д.О., Смирнов А.А., Рябов Д.М. Пеноалюминий как энергопоглощающий материал и его механические свойства. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2011, № 7, с. 53–57.
- [7] Бутарович Д.О., Смирнов А.А. Моделирование механических свойств пеноалюминия. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2009, № 3, с. 120–123.
- [8] Шабан Б.А., Зузов В.Н. Особенности построения конечно-элементных моделей кабин для исследования пассивной безопасности при ударе в соответствии с правилами ЕЭК ООН № 29. *Наука и образование*, 2013, № 3, с. 129–156. DOI: 10.7463/0313.0542301
- [9] Guo L., Yu J. Dynamic bending response of double cylindrical tubes filled with aluminum foam. *Int. J. of Impact Engineering*, 2011, no. 38, pp. 85–94.
- [10] Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Топологическая оптимизация конструкции бампера автомобиля при ударном воздействии с позиций пассивной безопасности. *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*, 2018, № 2 (36), с. 2–9.

- [11] Deshpande V.S., Fleck N.A. Isotropic constitutive models for metallic foams. *J. Mech. Phys. Solids*, 2000, vol. 48, pp. 1253–1283.
- [12] Арутюнян Г.А., Карташов А.Б. Разработка математической модели разрушения углепластиковых энергопоглощающих элементов несущей системы автомобиля. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 1 (694), с. 45–54. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-1-45-54
- [13] Гончаров Р.Б., Зузов В.Н., Чайко Д.Н. Моделирование поведения тонкостенных труб с разными наполнителями при предельном нагружении применительно к решению проблем пассивной безопасности автомобилей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 3 (87). DOI: 10.18698/2308-6033-2019-3-1856

Статья поступила в редакцию 04.04.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Определение критериев выбора параметров материала-наполнителя в несущих тонкостенных конструкциях каркасного типа применительно к задачам пассивной безопасности автомобилей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-4-1865>

**Гончаров Роман Борисович** — аспирант кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [goncharov.roman@bmstu.ru](mailto:goncharov.roman@bmstu.ru)

**Зузов Валерий Николаевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор более 50 работ в области машиностроения, e-mail: [zuzvalery@rambler.ru](mailto:zuzvalery@rambler.ru)

## On criteria of selecting filler material parameters in supporting thin-walled frame-type structures in relation to the tasks of cars and tractors passive safety

© R.B. Goncharov, V.N. Zuzov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*This paper addresses the issues of improving the efficiency of using filler materials in frame elements of truck cabs. To solve this problem, we carried out a numerical study of aluminum alloy AMg6 pipes with quasi-static three-point bending with various fillers. The following materials can be used as fillers: brittle materials, i.e. epoxy resin, polystyrene; hyperelastic materials, i.e. rubber, polyurethane; elastic-plastic materials, i.e. foam aluminum with a density of 430 kg / m<sup>3</sup> and 800 kg / m<sup>3</sup>. Foam aluminum with a density of 800 kg / m<sup>3</sup> appears to be the most effective filler material. The load factor is 364, and the specific energy consumption is 22.295 more than that of a hollow pipe. As for brittle and hyperelastic materials, they were found to make almost no improvement in mechanical characteristics. Based on the analysis of the results obtained, we propose parameters, such as specific energy consumption, load factor, change in cross-sectional area in the contact zone, loss of bearing capacity, and their threshold values, which are necessary for preliminary assessment of the feasibility and effectiveness of using existing and newly developed fillers to modify cabs and car bodies according to the requirements of passive safety.*

**Keywords:** fillers, foam aluminum, FEM, finite element model, LS-DYNA

### REFERENCES

- [1] Shaban B.A., Zuzov V.N. *Nauka i obrazovanie— Science and Education*, 2103, no. 8, pp. 91–108. DOI: 10.7463/0813.0580257
- [2] Shaban B.A., Zuzov V.N. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2013, no. 11, pp. 95–106. DOI: 10.7463/1113.0636798
- [3] Goncharov R.B., Zuzov V.N. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI — Izvestiya MGTU “MAMI”*, 2018, no. 4 (38), pp. 92–102.
- [4] Xiao Zh., Fang J., Sun Gu., Li Q. Crashworthiness design for functionally graded foam-filled bumper beam. *Int. J. Advances in Engineering Software*, 2015, vol. 85, pp. 81–95.
- [5] Li Zh., Yu Q., Zhao X., Yu M., Shi P., Yan C. Crashworthiness and lightweight optimization to applied multiple materials and foam-filled front-end structure of auto-body. *Adv. Mech. Eng.*, 2017, vol. 9(8), pp. 1–21. DOI: 10.1177/1687814017702806
- [6] Butarovich D.O., Smirnov A.A., Ryabov D.M. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2011, no. 7, pp. 53–57.
- [7] Butarovich D.O., Smirnov A.A. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2009, no. 3, pp. 120–123.
- [8] Shaban B.A., Zuzov V.N. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2013, no. 3, pp. 129–156. DOI: 10.7463/0313.0542301

- [9] Guo L., Yu J. Dynamic bending response of double cylindrical tubes filled with aluminum foam. *Int. J. of Impact Engineering*, 2011, no. 38, pp. 85–94.
- [10] Goncharov R.B., Zuzov V.N. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI — Izvestiya MGTU “MAMI”*, 2018, no. 2 (36), pp. 2–9.
- [11] Deshpande V.S., Fleck N.A. Isotropic constitutive models for metallic foams. *J. Mech. Phys. Solids*, 2000, vol. 48, pp. 1253–1283.
- [12] Arutyunyan G.A., Kartashov A.B. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 1 (694), pp. 45–54. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-1-45-54
- [13] Goncharov R.B., Zuzov V.N., Chayko D.N. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 3 (87). DOI: 10.18698/2308-6033-2019-3-1856

**Goncharov R. B.**, post-graduate, Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: goncharov.roman@bmstu.ru

**Zuzov V.N.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: zuzvalery@rambler.ru