

DOI: 10.12731/2227-930X-2022-12-2-21-35

УДК 629.023

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМОБИЛЯ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Л.А. Кияшко, В.А. Ксенофонтова

Статья посвящена совершенствованию методики экспертизы эксплуатации автомобилей в экстремальных условиях, возникающих при дорожно-транспортных происшествиях (ДТП). Большой интерес в области безопасности дорожного движения представляют собой задачи определения причин ДТП и условий, при которых они происходят. Существуют компьютерные системы, позволяющие моделировать процессы взаимодействия автомобильных транспортных средств с препятствиями и между собой при ДТП. Основу этих разработок составляют различные математические модели процесса столкновения автомобилей. Наиболее достоверными и перспективными являются системы, которые основаны на методах анализа пластических деформаций и разрушения элементов конструкции автомобиля при ДТП. Основу этих методов составляет закон сохранения энергии или модель перехода кинетической энергии движущегося транспортного средства в потенциальную энергию деформированной после ДТП конструкции. Этот процесс описывается с помощью параметра – энергетический эквивалент скорости. Проведен анализ объекта исследования – автомобильных кузовных конструкций. Они могут быть классифицированы, как тонкостенные оболочечные конструкции, которые легко пластически деформируются. Имеющиеся методы решения задач анализа упруго-пластических деформаций в таких конструкциях не позволяют обеспечить высокую точность решения, необходимую для экспертизы ДТП.

Цель – совершенствование методики проведения автотехнической экспертизы ДТП.

Метод или методология проведения работы: решение обратных задач механики сплошных сред.

Результаты: разработан вариант конечно-элементного представления конструкции и методика вариационного подхода к определению энергетических критериев исследуемого процесса. Он обеспечивает наибольшую точность решения поставленных задач.

Область применения результатов: полученные результаты целесообразно применять при проведении проведения автотехнической экспертизы ДТП.

Ключевые слова: энергия деформации; пластические и упругие деформации; эксперимент; скорость деформирования; моделирование

RESEARCH OF DEFORMATION AND DESTRUCTION OF CAR ELEMENTS UNDER EXTREME CONDITIONS

L.A. Kiyashko, V.A. Ksenofontova

The article is devoted to the improvement of the methodology for the examination of the operation the vehicles in extreme conditions that occur during road traffic accidents (RTA). Of great interest in the field of road safety are the tasks of determining the causes of RTA and the conditions under which they occur. There are computer systems that allow modeling the processes of interaction automobile vehicles with obstacles and among themselves during an accident. These developments based on various mathematical models of the car collision process. The most reliable and promising are systems that based on methods for analyzing plastic deformations and destruction of car structural elements during an accident. The basis of these methods is the law of conservation energy or the model of the transition of the kinetic energy of a moving vehicle into the potential energy of a structure deformed after an accident. This process described with the help of the parameter – the energy equivalent of the speed. The analysis of the object is study – automobile body structures carried out. They classified

as thin-walled shell structures that are easily plastically deformed. The available methods for solving the problems of analysis the elastic-plastic deformations in such structures do not allow providing the high accuracy of the solution necessary for the examination of the RTA.

Purpose – *improvement of the methodology for conducting an autotechnical examination of an accident.*

Methodology: *solution of inverse problems of continuum mechanics.*

Results: *a variant of the finite element representation of the design and a method of the variational approach to determining the energy criteria of the process under study were developed. It provides the greatest accuracy in solving the tasks.*

Practical implications: *it is expedient to apply the obtained results when carrying out an autotechnical examination of an accident.*

Keywords: *strain energy; plastic and elastic deformations; experiment; strain rate; modeling*

Введение

В условиях постоянно увеличивающегося парка автомобилей растет количество дорожно-транспортных происшествий. В связи с этим необходимо усовершенствовать методику экспертизы внештатных условий эксплуатации автомобильных транспортных средств.

Известны методы решения задач, связанных с упруго-пластической деформацией оболочечных конструкций типа кузовов автомобиля, позволяющие проводить автотехническую экспертизу дорожно-транспортных происшествий [4, 6...9, 13, 14]. Разработанная методика основана на решении обратных задач механики сплошных сред и состоит из следующих задач:

- анализ деформаций поврежденного кузова автомобиля;
- определение границ зон пластических деформаций;
- определение перемещений точек деформированных поверхностей;
- представление функций перемещений интерполяционными полиномами;

- интегрирование функционала энергии в перемещениях для больших упруго-пластических деформаций.

Анализ задач для пластически-деформированных конструкций

Конструкция автомобильного кузова имеет несколько особенностей по сравнению с другими инженерными конструкциями [5]. Во-первых, она изготовлена из мягких сталей, допускающих большие пластические деформации, что обусловлено технологией изготовления (штамповка, сварка). Во-вторых, элементы конструкции, в том числе элементы жесткости: лонжероны, пороги, стойки и др., представляют собой комбинации листового материала и изготовлены из листа толщиной до 1 мм, хотя могут иметь в сечении сложную форму.

Для того, чтобы описать и восстановить процесс деформации поврежденной конструкции кузова автомобиля, необходимо использовать несколько методов и схем деформирования конструкций, т.к. при решении данной задачи требуется комбинация нескольких методов и задач.

Для анализа процесса деформации кузова автомобиля при ДТП будем рассматривать обратную задачу механики сплошных сред [3], которая заключается в определении причин, вызвавших деформации, а не в определении деформаций по заданным силам (прямая задача). Исходными данными являются результаты замеров величин остаточных деформаций элементов конструкции автомобиля, попавшего в ДТП [7].

Типовые модели повреждений элементов кузова приведены на рисунке 1.

Для решения задачи необходимо определить энергию деформации, затраченную на преобразование первоначальной конфигурации конструкции в имеющуюся, при этом для нашей задачи следует учитывать не только энергию пластических (остаточных) деформаций, но и энергию, затраченную на упругую деформацию и часть энергии, перешедшую в тепло [2]. Сумма этих энергетических затрат составит часть кинетической энергии, которую имел автомобиль до удара (часть кинетической энергии автомобиля обычно поглощается процессом торможения и другими кинетическими движениями).

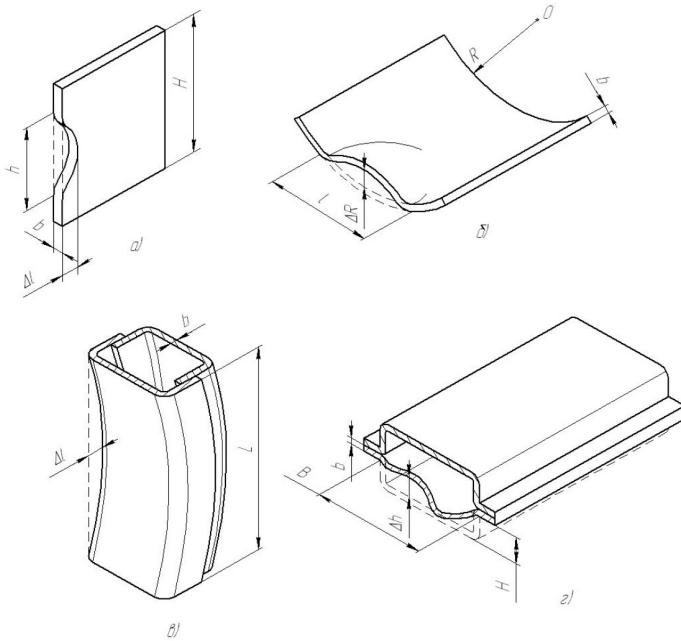


Рис. 1. Типовые модели повреждений элементов кузова

Рассматриваемая задача пластического деформирования при конечных деформациях обладает геометрической и физической нелинейностью [14, 15].

Таким образом, разрабатываемый здесь подход состоит из следующих задач:

- 1) Сканирование поврежденных узлов и деталей.
- 2) Определение точных границ зон пластических деформаций.
- 3) Определение законов распределения интенсивности напряжений (деформаций) в пластических зонах.
- 4) Определение упругой составляющей конструкции в целом.
- 5) Определение энергетического эквивалента скорости.

Если первая задача не представляет трудностей, то для решения задач 2–5 необходимо рассмотреть задачи упруго-пластического деформирования автомобильных конструкций.

Решение задачи первоначального упругого контактирования

При воздействии на любую поверхность автомобиля или какой-нибудь другой конструкции сосредоточенной силой P , рисунок 2, в ней возникают упругие напряжения и деформации, которые можно оценить энергией, затраченной на их производство.

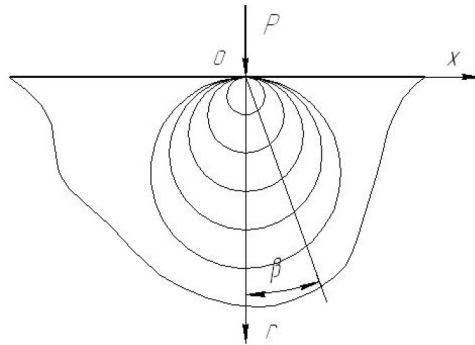


Рис. 2. Упругое воздействие на поверхность автомобиля сосредоточенной силой

Для любых случаев выражения энергии упругих деформаций (через напряжения σ или деформации ε) всегда можно определить ее величину с помощью выражений [2]:

$$W_{упр} = \frac{Ev}{2(1+\nu)(1-2\nu)} \iiint_V [(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)^2 + G(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2) + \frac{1}{2}G(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{zx}^2 + \gamma_{yz}^2)] dv; \quad (1.1)$$

$$W_{упр} = \frac{1}{2E} \iiint_V [(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)^2 + \iiint_V [(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)^2 + 2(1+\nu)(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2 - \sigma_y\sigma_z - \sigma_z\sigma_x - \sigma_x\sigma_y)] dv]; \quad (1.2)$$

$$W_{упр} = \frac{Ev}{2(1+\nu)(1-2\nu)} \iiint_V \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + G \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{1}{2}G \left[\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \right\} dv, \quad (1.3)$$

где E , ν – упругие константы материала;

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} - \text{параметр Ляме};$$

ε, γ – компоненты деформированного состояния;

σ – компоненты напряжений;

u, v, w – перемещение;

$W_{\text{упр}}$ – энергия упругого деформирования.

Для задачи, представленной на рисунке 2 были рассмотрены различные варианты изменения переменных r и β , рисунок 3.

Подстановка решения этой задачи в (1.2) даст $W_{\text{упр}}$ контактного воздействия силой P на поверхность $X=0$ [3]

$$\sigma_r = -\frac{2P}{\pi r} \cos \beta. \quad (1.4)$$

Дальнейшее развитие задачи представляет собой взаимодействие реального элемента конструкции A , рисунок 4, силой F_1 на упруго-деформируемую поверхность $X=0$ элемента конструкции B .

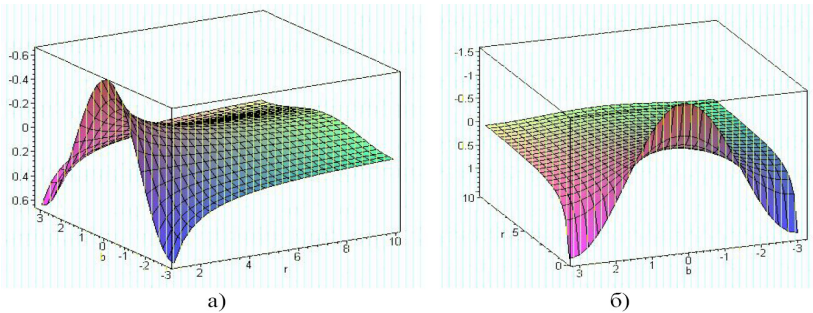


Рис. 3. Варианты решения контактной задачи

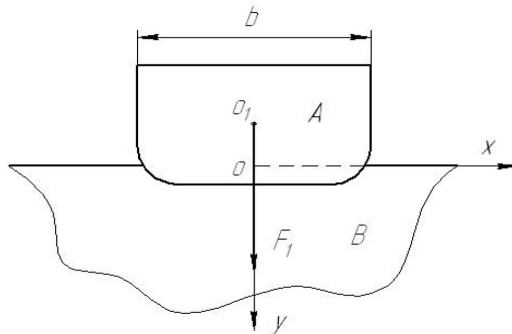


Рис. 4. Контактная задача воздействия на поверхность автомобиля распределенной силой

После прекращения действия активных сил, вызвавших пластическую деформацию в теле, форма тела будет изменена [6].

Решение задачи имеет вид [4]:

$$\sigma_y = -\frac{4F_1}{3\pi\left(\frac{b}{2}\right)^4} \left[\left[\left(\frac{b}{2}\right)^2 + 2x^2 \right] \sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 - x^2} \right]. \quad (1.5)$$

Подобный метод индентора основан на зависимости [5, 8]

$$\sigma_i = (0.32...0.37)HB, \quad (1.6)$$

где HB – твердость по Бринеллю.

Измеряя HB в различных точках деформированного элемента конструкции, можно определить компоненты напряженно-деформированного состояния зоны деформации. При использовании этого метода предварительно строят тарировочный график $\sigma_i - HB$ на образцах материала, нагружаемого статически. По результатам измерения HB определяют удельную потенциальную энергию деформации [7, 13]

$$\varepsilon_{уд} = \exp[(\ln HB - \ln B)m], \quad (1.7)$$

где B и m – эмпирические константы.

Различные варианты решения задачи представлены на рисунке 5.

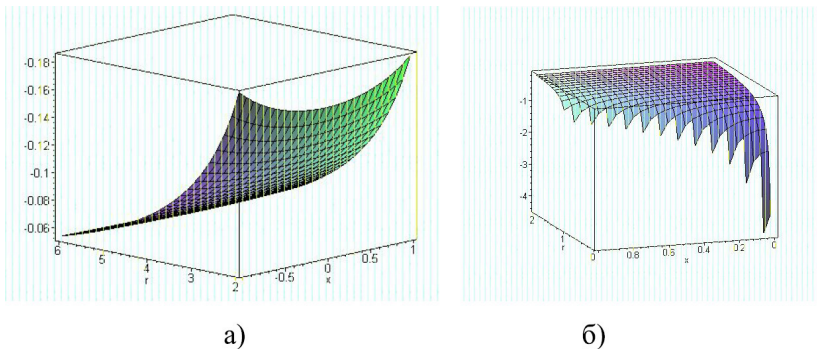


Рис. 5. Решение контактной задачи для реального контакта

В случае, если контактирование осуществляется плоским элементом конструкции П на тело В (рисунок б), решение этой задачи имеет следующий вид:

$$\sigma_y = \frac{F_2}{\pi \sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 - x^2}}. \quad (1.8)$$

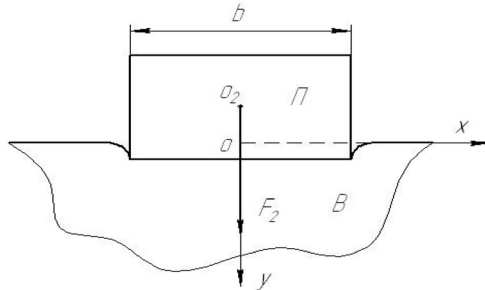


Рис. 6. Контакт с плоской деталью препятствия

Решение этой задачи представлено на рисунке 7.

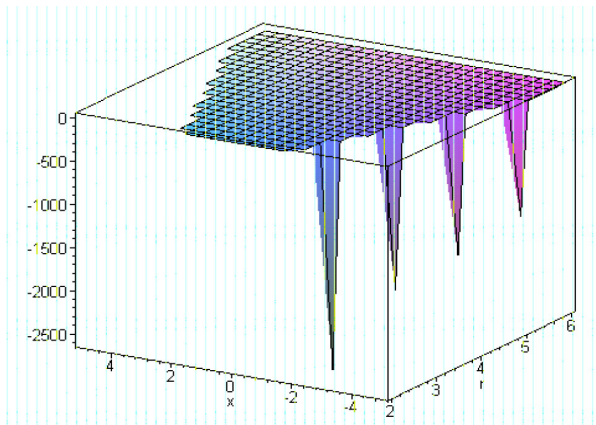


Рис. 7. Решение контактной задачи для плоского случая

Решение задачи для упругого взаимодействия автомобиля с неподвижным препятствием

При ударе на автомобиль действуют инерционные силы, приведенные условно к составляющим $m_j \ddot{y}$, $m_2 \ddot{y}$, $m_3 \ddot{y}$, расположенным от точки контакта А на расстояниях l_1 , l_2 , l_3 соответственно.

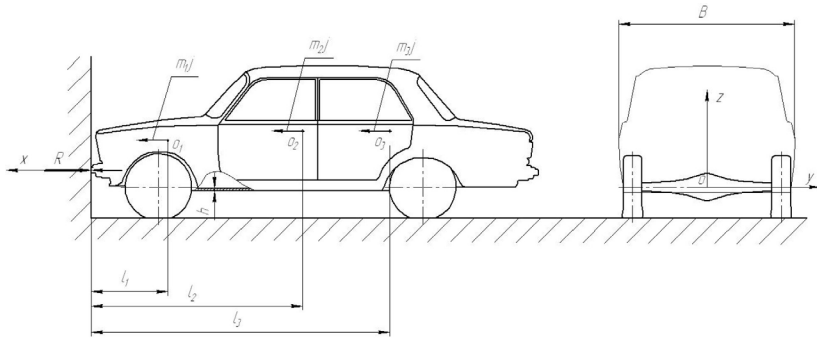


Рис. 8. Упругое взаимодействие автомобиля с неподвижным препятствием

Количество приведенных масс может быть уточнено в каждом конкретном случае (это зависит от конструктивных особенностей модели автомобиля), но в любом случае их сумма равна реакции опоры R

$$R = \sum_{i=1}^n m_i j, \quad (1.9)$$

где j – ускорение (замедление), величина неизвестная при ударе.

В координатной системе x, y, z процесс взаимодействия конструкции с препятствием описывается уравнением [4, 12].

$$\nabla^2 \nabla^2 u_z = -\frac{12R(1-\nu^2)}{Eh^3} \cdot \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2}, \quad (1.10)$$

где u_z – волна упругого изгиба, представляемая как

$$u_z = a_{mn} \sin \frac{m\pi x}{l_3} \sin \frac{n\pi y}{B}, \quad (1.11)$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$;

E – модуль упругости материала кузова;

h – приведенная толщина лонжеронов;

ν – коэффициент Пуассона;

l_3 и B – размеры объекта.

Подстановка (1.11) в (1.3) дает искомую величину упругой деформации $W_{\text{УПР}}$.

Изменение U_z при различных видах нагрузки представлено на рисунке 9.

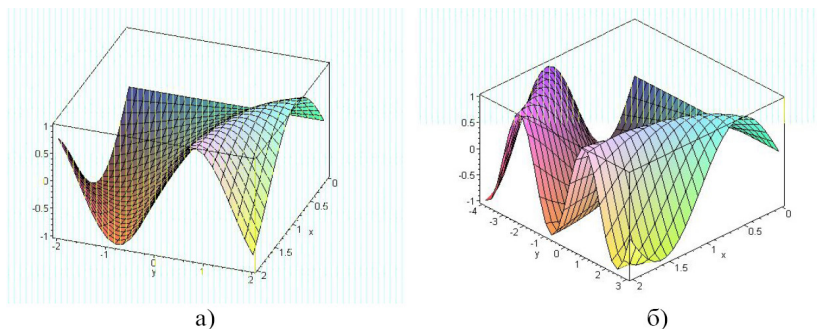


Рис. 9. Волна упругих деформаций

Заключение

Проведенный анализ объекта исследования – автомобильных кузовных конструкций показал, что они могут быть классифицированы, как тонкостенные оболочечные конструкции, легко пластически деформируемые.

Имеющиеся методы решения задач анализа упруго-пластических деформаций в таких конструкциях не позволяют обеспечить высокую точность решения, необходимую для экспертизы ДТП. Наибольшую точность решения поставленных задач обеспечивает методика вариационного подхода к определению энергетических критериев исследуемого процесса.

Список литературы

1. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. М.:Мир, 1987. 542 с.
2. Ветрогон А.А. Уточнение количества энергии поглощенной кузовом автомобиля при ДТП // Вестник СевГТУ. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2014. Вып. 152: Машиноприборостроение и транспорт. С. 134-136.
3. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. М: Наука, 1980. 304 с.
4. Гольчевский В.Ф. Экспертное исследование прочностных свойств кузовов транспортных средств, подвергшихся конструктивным из-

- менениям: монография. Иркутск: ФГКОУ ВПО ВСИ МВД РФ, 2015. С. 56-69.
5. Дэниэлс Д. Современные автомобильные технологии. М.: Астрель-АСТ, 2003. 223 с.
 6. Ксенофонтова В.А. Анализ остаточных деформаций в элементах кузова легкового автомобиля методом прямого интегрирования / Ксенофонтова В.В., Аблаев А.Р., Аблаев Р.Р., Абрамова Л.С. // Международный журнал перспективных исследований, Т. 10, №1, 2020. С. 35-49.
 7. Ксенофонтова В.А. Исследование процесса деформации кузова легкового автомобиля при наезде на неподвижное препятствие / В.А. Ксенофонтова, А.В. Бабкин, В.Н. Торлин // Автомобильный транспорт. Харьков: Изд-во ХНАДУ, 2002. С. 56–58.
 8. Ксенофонтова В.А. Исследование процесса диссипации энергии в элементах кузова автомобиля при дорожно-транспортных происшествиях / Ксенофонтова В.А., Аблаев А.Р., Аблаев Р.Р., Кияшко Л.А. // Мир транспорта и технологических машин. Орёл: Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, 2020. № 2 (69). С. 56-62.
 9. Ксенофонтова В.А. Методика определения скорости движения транспортного средства в момент столкновения по остаточным деформациям элементов конструкции / Ксенофонтова В.А., Аблаев А.Р., Аблаев Р.Р. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орёл: Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева. 2019. № 4-1 (336). С. 130-134.
 10. Огородников В.А. Энергия. Деформация. Разрушение (Задачи автотехнической экспертизы). Винн.: Универсум, 2005. 204 с.
 11. Смирнов-Аляев Г.А. Соппротивление материалов пластическому деформированию. Л.: Машиностроение, 1978. 368 с.
 12. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки. М.: Наука, 1984. 425 с.
 13. Торлин В.Н. Конечно-элементный анализ энергопоглощающей способности кузова автомобиля // Вестник восточно-украинского национального университета им. В. Даля. Луганск: изд-во СНУ, 2006. №7. С.115-119.

14. Hiemer M., Barho J. Observer design for road gradient estimation. Reports in Industrial Information Technology, Vol.7, Shaker Verlag, Aachen: pp. 23-30, 2004.
15. Nurkhaliesa B.H., Halim S., Zulkepli M. Reconstruction of traffic accident scene using close-range photogrammetry technique. Geoinformation Science Journal, Vol. 10, No. 1, 2010, pp. 17-37.

References

1. Vasidzu K. *Variacionnye metody v teorii uprugosti i plastichnosti* [Variational methods in the theory of elasticity and plasticity]. M.: Mir, 1987, 542 p.
2. Vetrogon A.A. *Vestnik SevNTU* [Bulletin of SevNTU]. Sevastopol, Sevastopol: SevNTU PH, 2014. Issue. 152: Mechanical engineering and transport, pp. 134-136.
3. Galin L.A. *Kontaktnye zadachi teorii uprugosti i vjazkouprugosti* [Contact problems of the theory of elasticity and viscoelasticity]. M: Nauka, 1980, 304 p.
4. Golchevsky V.F. Gol'chevskij V.F. *Jekspertnoe issledovanie prochnostnyh svojstv kuzovov transportnyh sredstv, podvergshihjsja konstruktivnym izmenenijam: monografija* [Expert study of the strength properties of vehicle bodies subjected to structural changes: monograph]. Irkutsk: FGKOU VPO VSI MVD RF, 2015, pp. 56-69.
5. Daniels D. *Sovremennye avtomobil'nye tehnologii* [Modern automotive technologies]. M.: Astrel-AST, 2003, 223 p.
6. Ksenofontova V.A., Ablaev R.R., Ablaev A.R., Abramova L.S. *Mezhdunarodnyj zhurnal perspektivnyh issledovanij* [International Journal of Advanced Studies], 2020, vol. 10, no. 1, pp. 35-49.
7. Ksenofontova V.A., Babkin A.V. Torlin V.N. *Avtomobil'nyj transport* [Automobile transport]. 2002. Issue. 6. Kharkov: PH of KhNADU, 2002, pp. 56-58.
8. Ksenofontova V.A., Ablaev A.R., Ablaev R.R., Kiyashko L.A. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin* [World of transport and technological machines]. Oryol: Oryol State University. I.S. Turgenev, 2020, no. 2 (69), pp. 56-62.

9. Ksenofontova V.A., Ablaeв A.R., Ablaeв R.R. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and applied problems of engineering and technology]. Oryol: Oryol State University. I.S. Turgenev, 2019, no. 4-1 (336), pp. 130-134.
10. Ogorodnikov V.A. *Jenergija. Deformacija. Razrushenie (Zadachi avtotekhnicheskoy jekspertizy)* [Energy. Deformation. Destruction (Tasks of autotechnical expertise). Winn.: Universum, 2005, 204 p.
11. Smirnov-Aljaev G.A. *Soprotivlenie materialov plasticheskomu deformirovaniyu* [Resistance of materials to plastic deformation]. L.: Mashinostroenie, 1978, 368 p.
12. Timoshenko S.P. *Plastinki i obolochki* [Plates and shells]. M.: Nauka, 1984, 425 p.
13. Torlin V.N. *Vestnik vostochno-ukrainskogo nacional'nogo universiteta im. V. Dalja* [Bulletin of the East Ukrainian National University. V. Dahl]. Lugansk: SNU publishing house, 2006, no. 7, pp.115-119.
14. Hiemer M., Barrho J. *Reports in Industrial Information Technology*, vol. 7, Shaker Verlag, Aachen: 2004, pp. 23-30/
15. Nurkhaliesа B.H., Halim S., Zulkepli M. *Geoinformation Science Journal*, 2010, vol. 10, no. 1, pp. 17-37.

ДАНИЕ ОБ АВТОРАХ

Кияшко Лариса Александровна, старший преподаватель кафедры Автомобильный транспорт Политехнического института Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Российская Федерация
LAKiyashko@sevsu.ru

Ксенофонтова Виктория Анатольевна, доцент кафедры Автомобильный транспорт Политехнического института, канд. техн. наук
Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Российская Федерация
vaksenofontova.v@gmail.com

DATA ABOUT THE AUTHORS

Larisa A. Kiyashko, Senior Lecturer, Department Automobile Transport, Polytechnic Institute
Sevastopol State University
33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
LAKiyashko@sevsu.ru

Victoria A. Ksenofontova, Associate Professor, Department Automobile Transport, Polytechnic Institute, Ph.D. tech. sciences, associate professor
Sevastopol State University
33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
vaksenofontova.v@gmail.com
SPIN-code: 2786-9966

Поступила 13.04.2022
После рецензирования 15.04.2022
Принята 17.04.2022

Received 13.04.2022
Revised 15.04.2022
Accepted 17.04.2022