

## Исследование зависимости деформации кузова автобуса при опрокидывании от величины отклонения координаты центра тяжести

*Б.Ю. Калмыков, И.М. Петриаишвили*

*«Институт сферы обслуживания и предпринимательства»*

*(филиал) ДГТУ в г. Шахты*

**Аннотация:** В статье предложена методика определения общей энергии удара и деформации кузова автобуса при опрокидывании. Данная методика учитывает отклонение координаты центра тяжести. Разработаны скорректированные формулы для расчёта высоты падения центра тяжести и общей энергии удара. Проведены экспериментальные расчёты, на основании которых внесены предложения по оптимизации систем пассивной безопасности.

**Ключевые слова:** автобус, пассивная безопасность, центр тяжести, общая энергия удара, деформация кузова, критическая нагрузка.

Методика оценки прочности конструкции кузова пассажирских транспортных средств (ТС) категории М3 регламентируется Правилами ЕЭК ООН №66 (ГОСТ Р 41.66-00), согласно которым для определения его несущей способности и энергоёмкости производится расчёт общей энергии удара  $E^*$ , Дж. Существует немало научно-исследовательских работ, посвящённых данному вопросу [1 – 6], среди которых можно выделить предложения по приведению к оптимальному значению высоты опрокидывания автобусов в зависимости от их конкретных габаритов [7].

Стоит отметить, что ни один из указанных способов не учитывает влияния на величину энергии удара и соответственно деформации кузова автобуса при опрокидывании такого параметра, как отклонение поперечной координаты центра тяжести  $\Delta x$ , м от вертикальной оси симметрии. Дело в том, что при определении высоты падения центра тяжести автобуса  $h$ , м, необходимо вычислить значение  $r$  – расстояния от общего центра тяжести до внешней стороны колеса, составной частью которого является  $h$  (рис. 1).

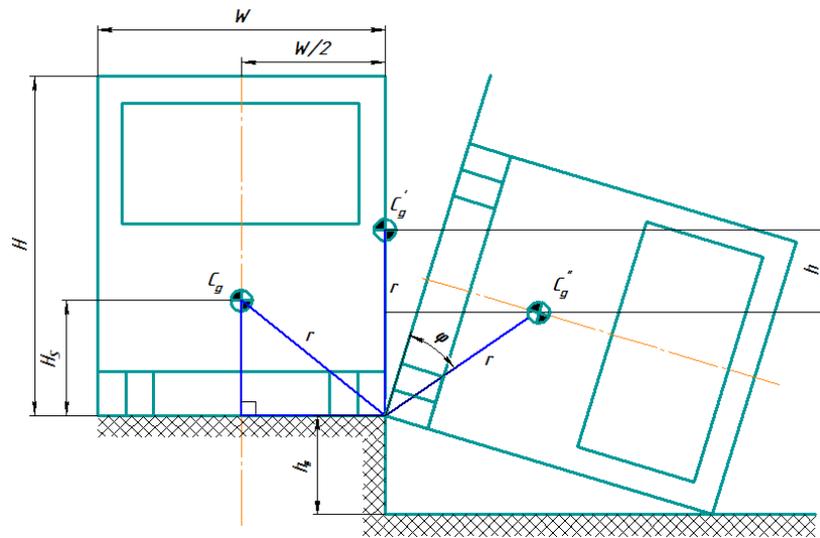


Рис. 1 – Высота падения центра тяжести при опрокидывании

Используя рис. 1, найдём значение  $r$ , м по формуле:

$$r = \sqrt{\left(\frac{W}{2}\right)^2 + H_s^2}, \quad (1)$$

где  $W$  – ширина ТС, м;  $H_s$  – высота центра тяжести порожнего ТС, м.

Ввиду конструктивных особенностей некоторых автобусов поперечная координата центра тяжести  $x$ , м не всегда расположена на вертикальной оси симметрии. В результате возникновения её отклонения  $\Delta x$  изменяется и расстояние от общего центра тяжести до внешней стороны колеса  $r$  (рис. 2).

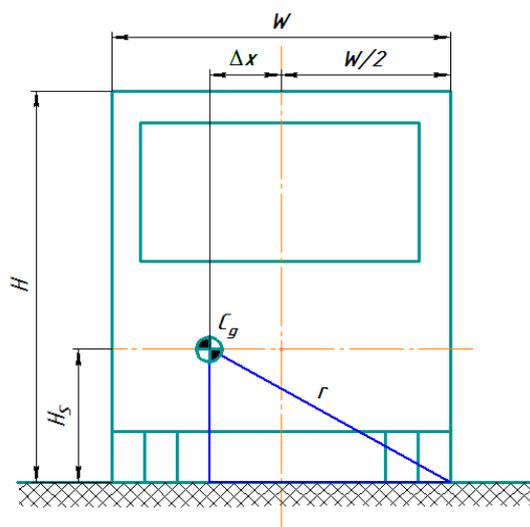


Рис. 2 – Расстояние от центра тяжести до внешней стороны колеса в случае возникновения отклонения  $\Delta x$

Скорректировав формулу (1), получим:

$$r = \sqrt{S_{\Delta x}^2 + H_S^2}, \quad (2)$$

где  $S_{\Delta x} = \frac{W}{2} + \Delta x$  – расстояние от центра тяжести до боковины, на которую происходит опрокидывание ТС, м с учётом отклонения поперечной координаты центра тяжести  $\Delta x$ .

В итоге происходит изменение высоты падения центра тяжести автобуса  $h$  и, следовательно, величины энергии удара  $E^*$ . Для выведения формул расчёта данных параметров, учитывающих величину отклонения поперечной координаты центра тяжести  $\Delta x$  воспользуемся рис. 3.

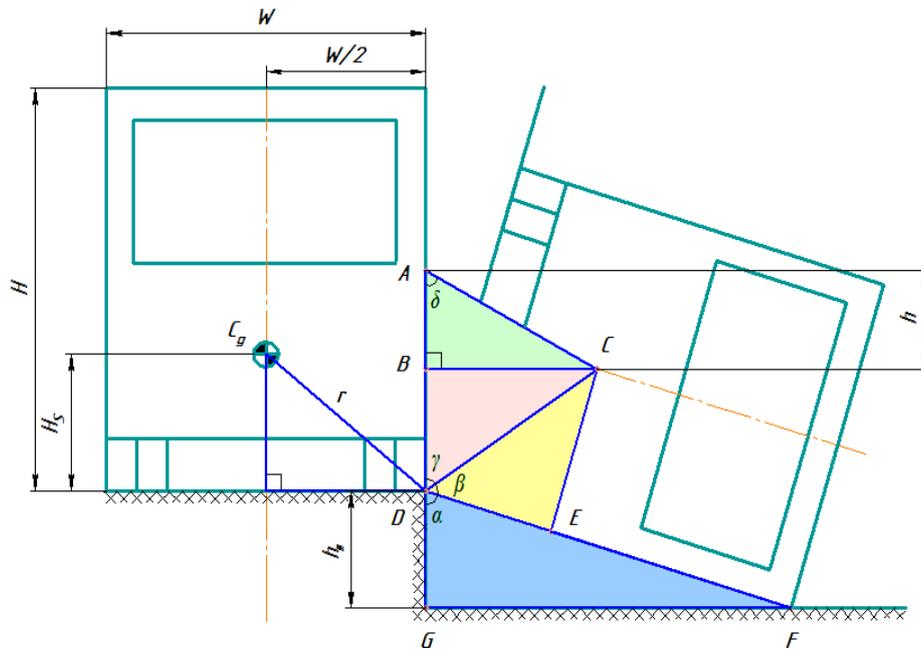


Рис. 3 – Графоаналитический способ определения высоты падения центра тяжести автобуса

Проведя ряд несложных преобразований можно получить формулу для определения скорректированного значения высоты падения центра тяжести:

$$h = \frac{H \cdot r + H_S \cdot h_o - S_{\Delta x} \cdot \sqrt{H^2 - h_o^2}}{H}, \quad (3)$$

где  $H$  – высота ТС, м;  $h_o$  – высота опрокидывания ТС, м.

Преобразуем формулу для расчёта общей энергии удара  $E^*$  (ГОСТ Р 41.66-00) с помощью формулы (3):

$$E^* = 0,75 \cdot M \cdot g \cdot \frac{H \cdot r + H_s \cdot h_o - S_{\Delta x} \cdot \sqrt{H^2 - h_o^2}}{H} \quad (4)$$

Для обоснования выдвинутого ранее предположения о влиянии отклонения поперечной координаты центра тяжести  $\Delta x$  на величину энергии удара  $E^*$  произведём её расчёт, используя формулу (4), по известным массогабаритным параметрам пяти автобусов (таблица №1).

Таблица №1

Исходные данные для расчетов

Марка и модель автобуса	Массогабаритные параметры					
	Высота, м	Ширина, м	Высота расположения центра тяжести, м	Высота опрокидывания, м	Скорректированная высота опрокидывания, м	Полная масса, кг
КаВЗ-3976	3,03	2,38	0,99	0,8	1,09	6289
ПАЗ-3205	2,95	2,5	0,9	0,8	0,93	7460
ЛиАЗ-5256	3,007	2,5	0,87	0,8	0,95	17930
IKARUS-350.00	3,37	2,5	1,2	0,8	1,29	15926
MERCEDES-BENZ O 302 V-8	3,14	2,5	1,24	0,8	1,19	17500

В целях дальнейшего аналитического исследования при осуществлении расчёта были введены следующие условия:

- опрокидывание транспортного средства производится на правый бок;
- $\Delta x$  принимает отрицательные значения, если поперечная координата центра тяжести  $x$  смещена вправо относительно вертикальной оси симметрии.

В результате произведённого расчета построены диаграммы, отображающие зависимость энергии удара  $E^*$  от отклонения поперечной координаты центра тяжести  $\Delta x$  при стандартной высоте опрокидывания (рис. 4, а) и скорректированной (рис. 4, б).

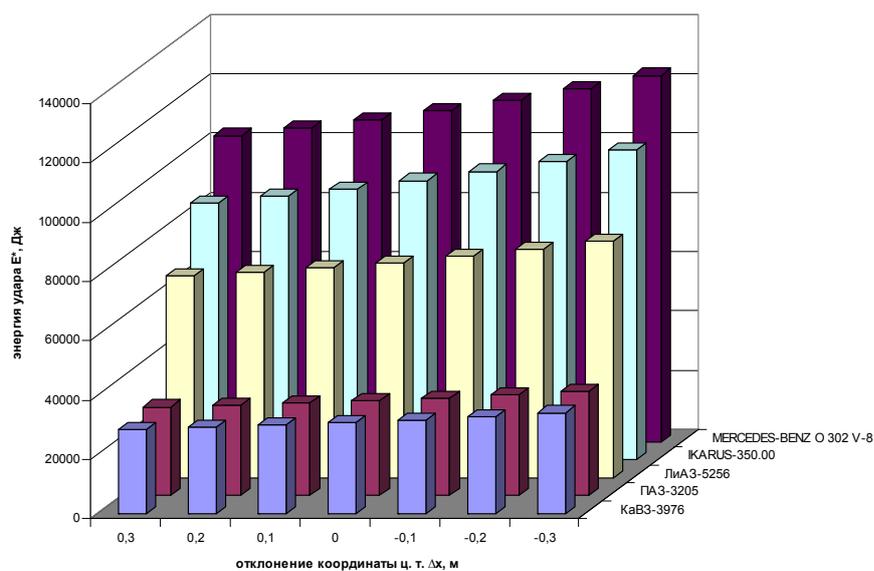
Используя расчетные данные автобуса ЛиАЗ-5256, найдём отклонения энергии удара  $\Delta E^*$ , % при достижении  $\Delta x$  максимального и минимального значений:

а) при стандартной высоте опрокидывания:

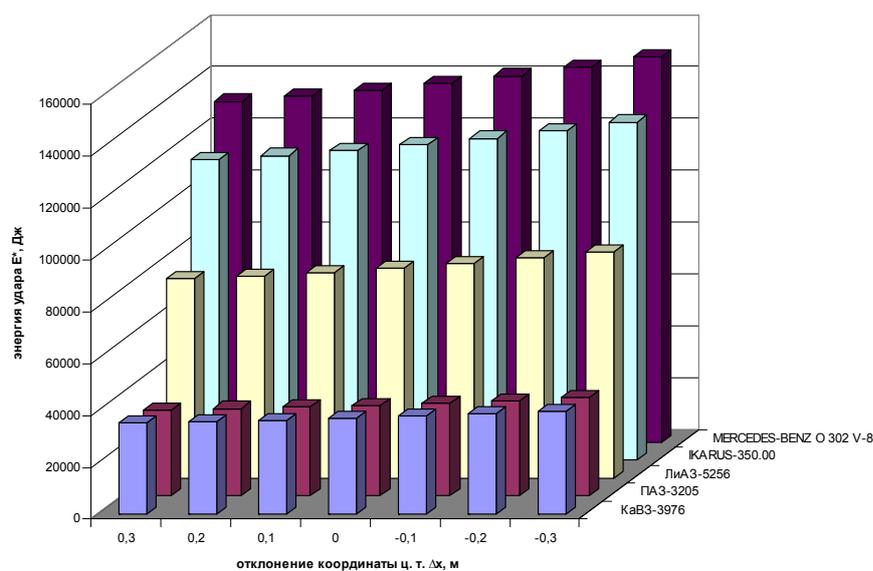
Если  $\Delta x = 0,3$  м, то:

$$\Delta E_{\max}^* = \left| \frac{E_{0,3}^*}{E_0^*} - 1 \right| \cdot 100\%,$$

где  $E_0^*$  – величина энергии удара, Дж при  $\Delta x = 0$ ;  $E_{0,3}^*$  – величина энергии удара, Дж при  $\Delta x = 0,3$  м.



а)



б)

Рис. 4 – Диаграмма зависимости общей энергии удара от отклонения поперечной координаты центра тяжести: а) при стандартной высоте опрокидывания; б) при скорректированной высоте опрокидывания.

Подставим известные значения:

$$\Delta E_{\max}^* = \left| \frac{67911,2}{72485,6} - 1 \right| \cdot 100\% = 6,31\% .$$

Если  $\Delta x = -0,3$  м, то:

$$\Delta E_{\min}^* = \left| \frac{E_{-0,3}^*}{E_0^*} - 1 \right| \cdot 100\%,$$

где  $E_{-0,3}^*$  – величина энергии удара, Дж при  $\Delta x = - 0,3$  м.

Подставим известные значения:

$$\Delta E_{\min}^* = \left| \frac{79663,1}{72485,6} - 1 \right| \cdot 100\% = 9,9\%.$$

б) при скорректированной высоте опрокидывания:

Если  $\Delta x = 0,3$  м, то:

$$\Delta E_{\max}^* = \left| \frac{76739,9}{80713,6} - 1 \right| \cdot 100\% = 4,92\%.$$

Если  $\Delta x = - 0,3$  м, то:

$$\Delta E_{\min}^* = \left| \frac{87290,4}{80713,6} - 1 \right| \cdot 100\% = 8,14\%$$

Исследуемые зависимости можно аппроксимировать полиномами второго порядка:

$$E^* = 144,82\Delta x^2 + 784,5\Delta x + 67027 \text{ – для первого случая (рис. 4, а);}$$

$$E^* = 144,83\Delta x^2 + 584,25\Delta x + 76056 \text{ – для второго случая (рис. 4, б).}$$

Таким образом, энергия удара у автобуса ЛиАЗ-5256 может увеличиться до 10%.

Далее используя диаграмму деформации для материала, обладающего идеальными упругопластическими свойствами (рис. 5), можно определить перемещения стоек кузова, возникающие в результате опрокидывания, по следующей формуле:

$$l_i = \frac{E_i - 0,5 \cdot P_{кр}^2 \cdot l_{cm}}{P_{кр} P_l}, \quad (5)$$

где  $l_i$  – искомое перемещение стойки кузова, мм;

$E_i$  – энергия удара, приходящаяся на стойку кузова, Дж;  
 $P_{кр}$  – критическая нагрузка для стойки, кН;  
 $P_1$  – сила, приложенная к кузову автобуса по схеме эксперимента, представленного на рис. 6.  
 $l_{ст}$  – перемещение, соответствующее значению заданной силы  $P_1$ , мм.

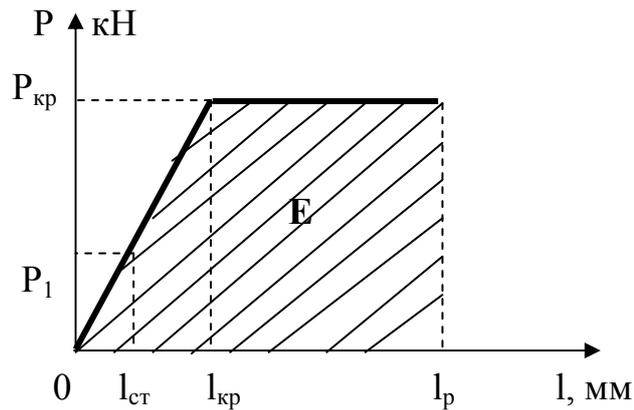


Рис. 5 – Диаграмма деформирования j-той стойки кузова автобуса

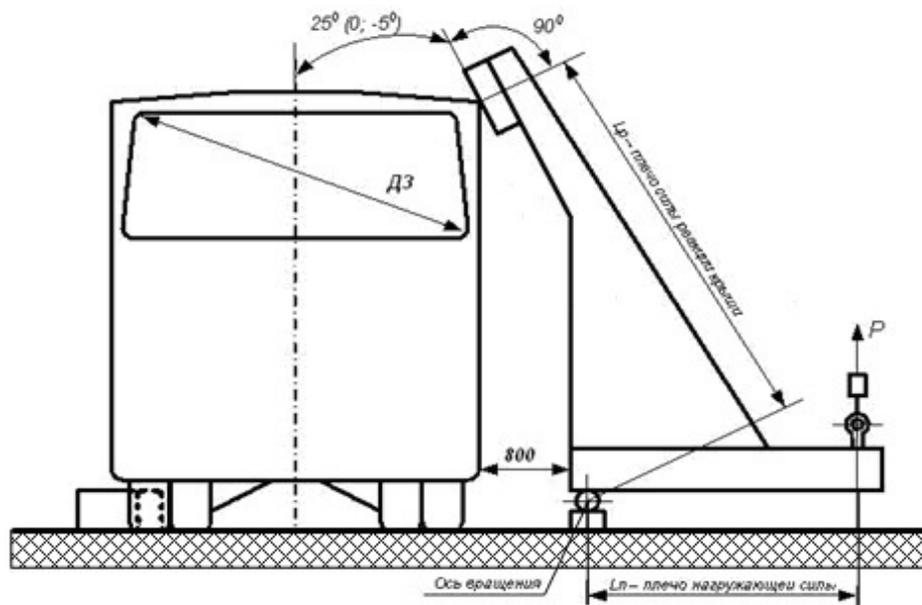


Рис. 6 – Нагружение кузова автобуса ЛиАЗ-5256

Значения перемещений, рассчитанных по формуле (5) для автобуса ЛиАЗ-5256 представим в виде таблицы №2.

Полученные данные свидетельствуют о достоверности выдвинутого предположения о влиянии отклонения поперечной координаты центра тяжести на величину энергии удара. При этом, необходимо отметить, что при отрицательных значениях  $\Delta x$  происходит практически двукратное увеличение отклонения энергия удара  $\Delta E^*$ , % относительно его величины при положительных значениях  $\Delta x$ , что играет немаловажную роль при проведении инженерных расчётов. Кроме того, увеличение энергии удара на 10% на такую же величину увеличивает значение перемещений стоек кузова в сторону остаточного пространства автобуса.

Таблица №2

Результаты расчета перемещений стоек кузова автобуса ЛиАЗ-5256

№ стойки	Перемещение стойки без смещения центра тяжести, мм	Перемещение стойки со смещением центра тяжести до 0,3 м, мм	Перемещение стойки кузова, %
1	69,7	77,0	9,5%
2	72,3	80,0	10,7%
3	76,0	84,1	9,6%
4	79,7	88,2	9,5%
5	83,4	92,4	9,7%
6	160,4	177,4	9,6%
7	168,3	186,5	9,8%
8	177,0	196,3	9,8%
9	181,2	201,0	9,9%
10	182,4	202,3	9,8%

Результаты экспериментального исследования позволяют учитывать конструктивные особенности ТС [8, 9] при установке дополнительного



оборудования, например, систем безопасности [10], что даёт возможность оптимизировать массогабаритные параметры таких систем и устройств.

### Литература

1. Калмыков Б.Ю., Петриашвили И.М. Экспериментальное исследование прочностных характеристик кузова автобуса // Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2354](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2354).
2. Иванов А.М., Адаев А.В., Юрчевский А.А., Кондратьев В.Д. Методы и инструменты количественной оценки уровня пассивной безопасности автомобилей // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2012. № 1. С. 3-9.
3. Калмыков Б.Ю., Высоцкий И.Ю., Овчинников Н.А. Предложения по оценке прочности конструкции пассажирских транспортных средств // Инженерный вестник Дона, 2012, №2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/765](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/765).
4. Овчинников Н.А. Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния элементов поперечных силовых сечений кузова автобуса в эксплуатации // Инженерный вестник Дона, 2013, №2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1614](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1614).
5. Орлов Л.Н., Рогов П.С., Тумасов А.В., Вашурин А.С. Повышение пассивной безопасности кузовов автобусов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. С. 17.
6. Рогов П.С., Орлов Л.Н., Тумасов А.В. Методика экспресс-оценки пассивной безопасности кузовов автобусов // Фундаментальные исследования. 2014. № 9-1. С. 36-40.
7. Калмыков Б.Ю., Высоцкий И.Ю., Овчинников Н.А., Бочаров С.В. Способ определения высоты опрокидывания автобуса для оценки прочности



конструкции его кузова по правилам ЕЭК ООН №66 // Инженерный вестник Дона, 2012, №3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/888](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/888).

8. Genta, G., Morello, L. Automotive chassis. Volume 1: Components design // Springer, 2009. 621 p.

9. Genta, G., Morello, L. Automotive chassis. Volume 2: System design // Springer, 2009. 825 p.

10. Пат. № 2483961 РФ, МПК В 62 D 25/04, В 60 R 21/13. Устройство для повышения прочности кузова транспортного средства при опрокидывании / Калмыков Б.Ю., Богданов В.И., Фетисов В.М., Овчинников Н.А., Нагай С.Г., Петриашвили И.М.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса». – № 2011151627/11 ; заявл. 16.12.2011 ; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 16.

### References

1. Kalmykov B.Yu., Petriashvili I.M. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2354](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2354).

2. Ivanov A.M., Adaev A.V., Yurchevskiy A.A., Kondrat'ev V.D. Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI). 2012. № 1. pp. 3-9.

3. Kalmykov B.Yu., Vysotskiy I.Yu., Ovchinnikov N.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/765](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/765).

4. Ovchinnikov N.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1614](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1614).

5. Orlov L.N., Rogov P.S., Tumasov A.V., Vashurin A.S. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. № 3. p. 17.

6. Rogov P.S., Orlov L.N., Tumasov A.V. Fundamental'nye issledovaniya. 2014. № 9-1. pp. 36-40.



7. Kalmykov B.Yu., Vysotskiy I.Yu., Ovchinnikov N.A., Bocharov S.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/888](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/888).

8. Genta, G., Morello, L. Automotive chassis. Volume 1: Components design // Springer, 2009. 621 p.

9. Genta, G., Morello, L. Automotive chassis. Volume 2: System design // Springer, 2009. 825 p.

10. Pat. № 2483961 RF, MPK B 62 D 25/04, B 60 R 21/13. Ustroystvo dlya povysheniya prochnosti kuzova transportnogo sredstva pri oprokidyvanii [Device for vehicle body strengthening in case of roll-over] / Kalmykov B.Yu., Bogdanov V.I., Fetisov V.M., Ovchinnikov N.A., Nagay S.G., Petriashvili I.M. ; zayavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO «Yuzhno-Ros. gos. un-t ekonomiki i servisa». № 2011151627/11; zayavl. 16.12.201 ; opubl. 10.06.2013, Byul. № 16.