

Д.А. Сулегин, В.Н. Зузов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСИЛИВАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВЕРИ
АВТОМОБИЛЯ НА ПАССИВНУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ БОКОВОМ УДАРЕ**Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия

Представлены разработанные рациональные конечно-элементные модели (КЭМ) кузова и столба, на базе которых возможно обеспечение пассивной безопасности автомобиля при боковом ударе. Рассмотрены вопросы повышения энергоемкости кузова автомобиля с помощью дополнительных усиливающих элементов в полости двери. Проверка решений выполнялась посредством компьютерного моделирования в программном продукте *LS-Dyna*. В качестве режима нагружения был рассмотрен боковой удар автомобиля о столб, регламентированный Правилами ЕЭК ООН №135. Выбор сечений усиливающих элементов двери осуществлялся на основе анализа научных исследований, также предложены три новых варианта, из которых выбраны два наиболее эффективных, проверенные в составе кузова. Критерием эффективности была принята энергоемкость, определяющая величину проникновения внутренней поверхности двери в салон. Все рассмотренные варианты усиления двери имеют разную эффективность, повышая энергоемкость системы от 5 до 19 %. Наиболее эффективным вариантом усиления двери является круглая труба с внутренним ромбом, заполненная пеноалюминием.

Ключевые слова: кузов, столб, пассивная безопасность, дверь, пеноалюминий, конечно-элементная модель, энергоемкость, боковой удар.

Введение

Боковые столкновения являются одними из наиболее опасных аварий, ежегодно приводящих к гибели и травмам людей. Глобальный показатель аварийности показывает, что более трети всех аварий в мире происходят из-за бокового удара о деревья или столб, что указывает на значимость этого удара по сравнению с фронтальными авариями. Существует много исследований, посвященных способности конструкции транспортного средства поглощать энергию удара и уменьшать ударный импульс, передаваемый человеку при боковых ударах [1,2]. В отличие от лобового столкновения, боковые столкновения особенно опасны, так как расстояние между пассажиром и боковой стороной автомобиля минимальны. Бамперы, двигатель и другие элементы конструкции помогают поглощать энергию удара при лобовом ударе, но водитель имеет очень слабую защиту при ударе автомобиля о бок. Чтобы разработать систему безопасности, необходимы энергопоглощающие элементы конструкции для снижения травматизма пассажиров при боковом столкновении [3,4]. Во время бокового удара одним из ключевых элементов защиты пассажиров автомобиля является дверь. Она состоит из внутренней и внешней стальной оболочки. Дверь обычно усилена боковой ударной балкой, которая горизонтально помещается между внутренней и внешней стальными оболочками. Когда преграда ударяется о дверь автомобиля, она деформируется и поглощает энергию. Одной из ключевых характеристик боковых балок является уменьшение проникновения в автомобиль при одновременном распределении энергии удара. Усиление двери автомобиля при боковых ударах о столб требует большого внимания из-за меньшей площади зоны удара и малой жесткости по сравнению с другими элементами кузова.

Цель исследования

Целью работы является исследование путей увеличения энергоемкости двери и выбора наиболее эффективных способов усиления. Внимание было сосредоточено на поиске формы поперечного сечения балки двери для улучшения характера поглощения энергии [5].

Анализ напряженно-деформированных состояний (НДС) кузова легкового автомобиля при боковом ударе

Для легковых автомобилей проводятся испытания и моделирование для оценки безопасности транспортного средства при боковом ударе согласно Правилам ЕЭК ООН. Все остальные испытания (Европейский комитет испытания новых автомобилей – EuroNCAP; Американское управление дорожной безопасности – NHTSA и др.) базируются на методике данных правил, однако проводятся на более высоких скоростях. Согласно Правилам ЕЭК ООН, существуют следующие два вида испытаний автомобиля при боковом ударе [6,7].

1. Правило ЕЭК ООН №95: имитация бокового удара другим автомобилем. При боковом краш-тесте в водительскую дверь неподвижного автомобиля направляется тележка, на которой закреплен деформируемый барьер. Скорость удара составляет 50 ± 1 км.

2. Правило ЕЭК ООН №135: автомобиль со скоростью 32 ± 1 км/ч направляют в столб диаметром в 25,4 см (рис. 1).

Удар с левой стороны (вид сверху)

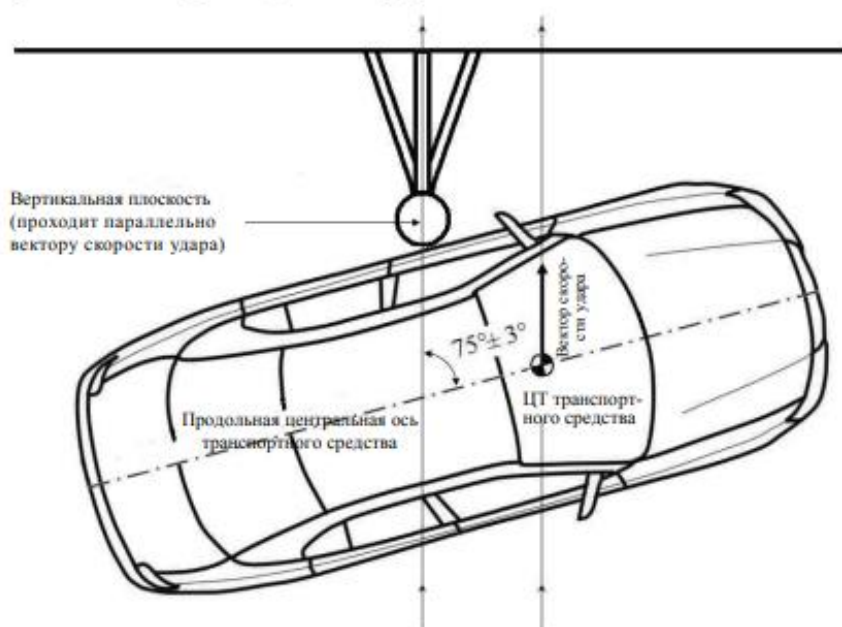


Рис. 1. Испытания по Правилу ЕЭК ООН №135

В качестве объекта исследования рассматривается кузов автомобиля УАЗ. Конечно-элементная модель данного кузова была подробно описана ранее [8]. Она формировалась с использованием оболочечных элементов с формулировкой Бельчко-Цая (рис. 2). Тип элемента – 4-х узловой 1-го порядка, средний размер – 15 мм.

В модели использовались следующие материалы:

- стекло (тип модели Multilinear Isotropic Hardening с критерием разрушения Failure/Principal Stress Failure с уровнем разрушающих напряжений 150 Мпа);
- сталь AISI1020 с описанием напряженно-деформированного состояния моделью Джонсона-Кука;
- пеноалюминий с описанием напряженно-деформированного состояния моделью Дешпенда-Флека (только в моделях с пенонаполненными элементами усиления) [9].

Картина деформированного состояния кузова автомобиля после удара о столб и график распределения энергии представлены на рис. 3-4.

Mesh

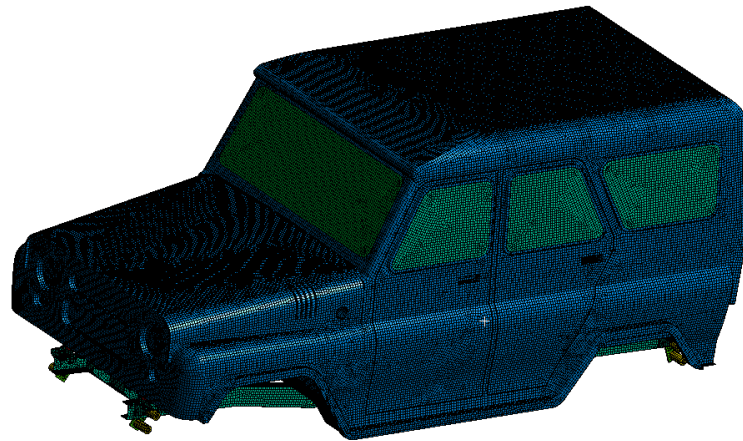


Рис. 2. Конечно-элементная модель кузова с рамой

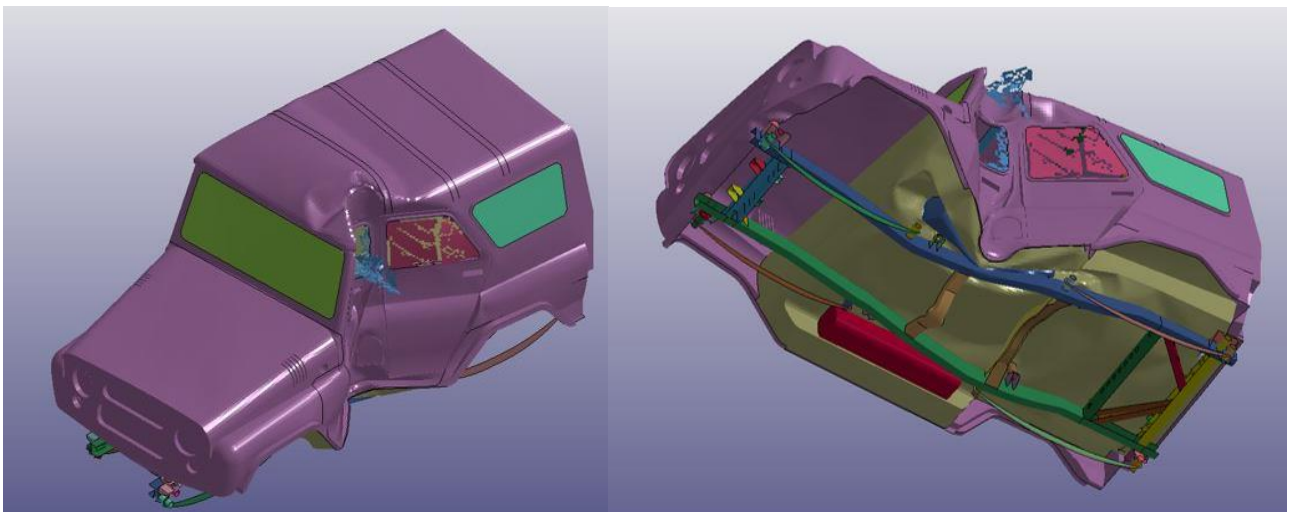


Рис. 3. Деформированное состояние исходного варианта кузова

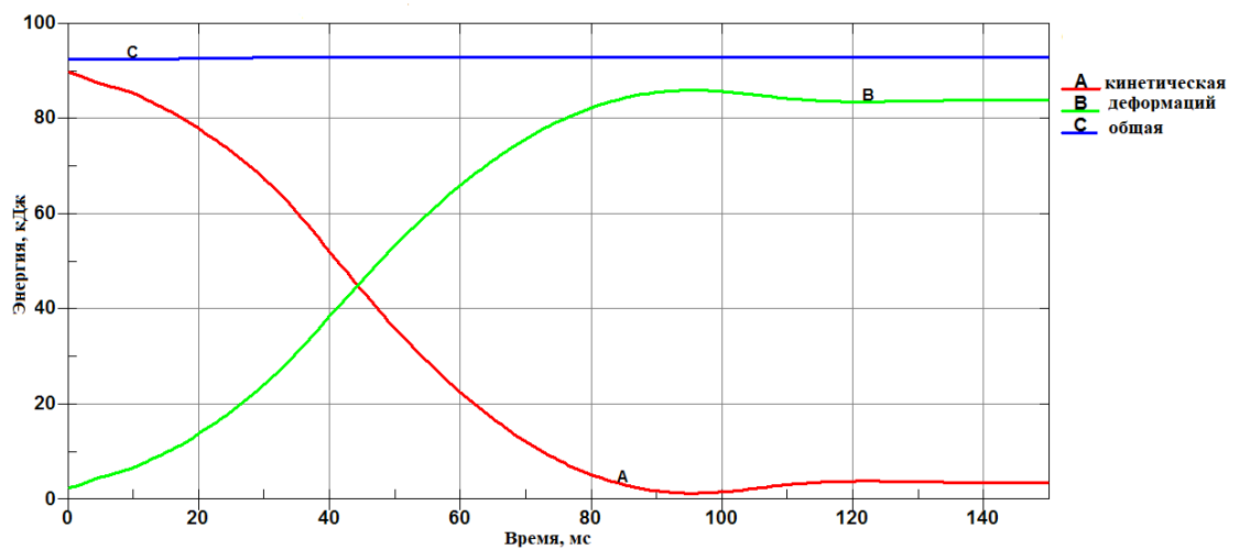


Рис. 4. График распределения энергий исходной конструкции

Подробный анализ картины деформированного состояния кузова автомобиля при ударе о столб представлен в [8]. Необходимо особо отметить, что дверь сильно деформируется и работает в большей степени на изгиб на протяжении всего соударения, поэтому необходим анализ различных способов усиления двери.

Оценка пассивной безопасности кузова автомобиля с внесенными конструктивным изменениями

Проанализируем влияние использования различных усиливающих элементов двери на ее проникновение в пространство салона. Дверь работает преимущественно на изгиб, следовательно, эффективным является повышение ее жесткости увеличением расстояния между внешней и внутренней панелями с установкой между ними связующих элементов. Однако этот вариант не является рациональным с позиции ее собираемости. Более выгодной является установка в пространство между внешней и внутренней панелями балки с креплением ее к боковинам двери. Выбор типов балок производился на основании анализа публикаций по данной теме [10,11], наружный размер балок определялся возможностью их установки во внутреннее пространство двери. Важным являлось наличие внутренней зоны, которую можно заполнить пеноалюминием. Уменьшение внутреннего пространства салона происходит за счет деформации двери, которая передается с внешней панели, контактирующей со столбом после ее вдавливания на величину зазора между панелями, на внутреннюю, следовательно, усиливающий элемент должен сопротивляться изгибу и смятию. Это позволит уменьшить передачу деформаций с внешней панели на внутреннюю и сохранить жизненное пространство салона.

В результате был рассмотрен ряд балок различного сечения (рис. 5), две из которых также были запенены алюминием. Схема установки на примере круглой балки приведена на рис. 9, но для наиболее точного определения места расположения балки необходимо в будущем провести топологическую оптимизацию двери.

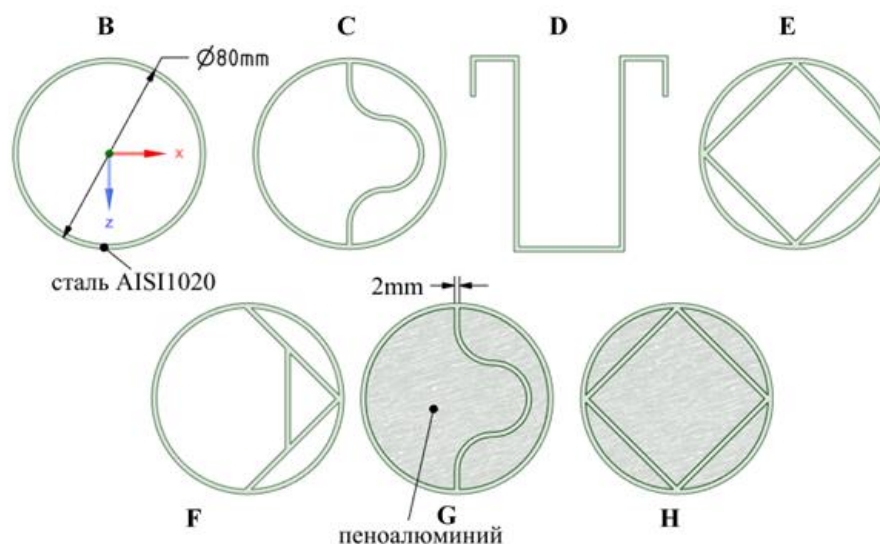


Рис. 5. Сравнимые сечения балок в двери

При этом два из предлагаемых вариантов сечения балок (E и F) выбирались на основании направленного вычислительного эксперимента, суть которого заключалась в следующем. Предполагая, что усиливающая балка в двери является двухопорной и работает на изгиб, были рассмотрены соударения с ней некоего тела с начальной скоростью с фиксацией остаточных прогибов, а также три сечения балки (рис. 6). Схема вычислительного эксперимента приведена на рис. 7. На рис. 6 представлены также остаточные прогибы балок со стороны салона.

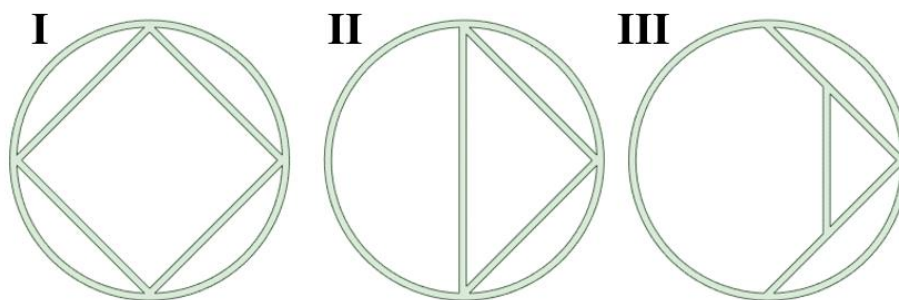


Рис. 6. Сечения для направленного вычислительного эксперимента

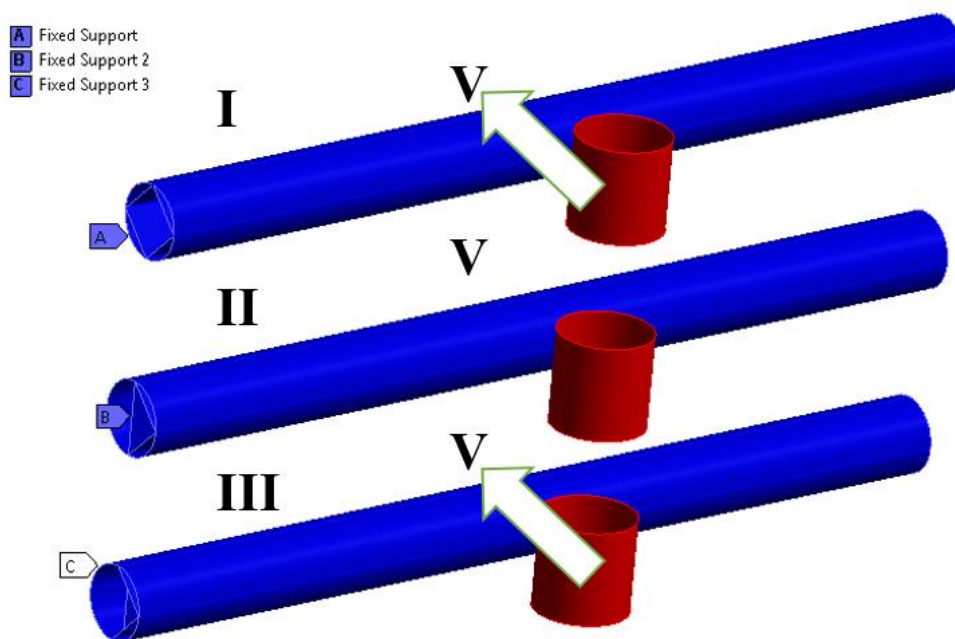


Рис. 7. Схема вычислительного эксперимента

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что балка с большим треугольником (вариант II, рис. 6) уступает двум остальным балкам по энергоемкости. На основании данного виртуального эксперимента и были выбраны два сечения (варианты I и III), которые далее рассматривались в составе кузова.

На рис. 10-11 представлены результаты по энергиям системы для подтверждения отсутствия вычислительных проблем, а также относительным перемещениям элементов кузова для двух вариантов: С и G. Относительные перемещения измерялись как результирующие перемещения по отношению к плоскости, проходящей через узлы порога с неударной стороны кузова.

Для установления дискретной величины относительного перемещения (внедрения двери в салон) деформированная геометрия кузова экспортировалась в САD-формат и производился контроль поперечного размера кузова (рис. 12). Результаты по остальным вариантам сведены в табл. 1. Энергоемкость определялась как отношение начальной энергии к разности между начальным (при недеформированном состоянии кузова) и конечным (при деформированном состоянии кузова), результаты приведены в табл. 1 и на рис. 13.

На рис. 14-15 приведены для визуального сравнения деформированные состояния: усилителей, дверей и кузовов.

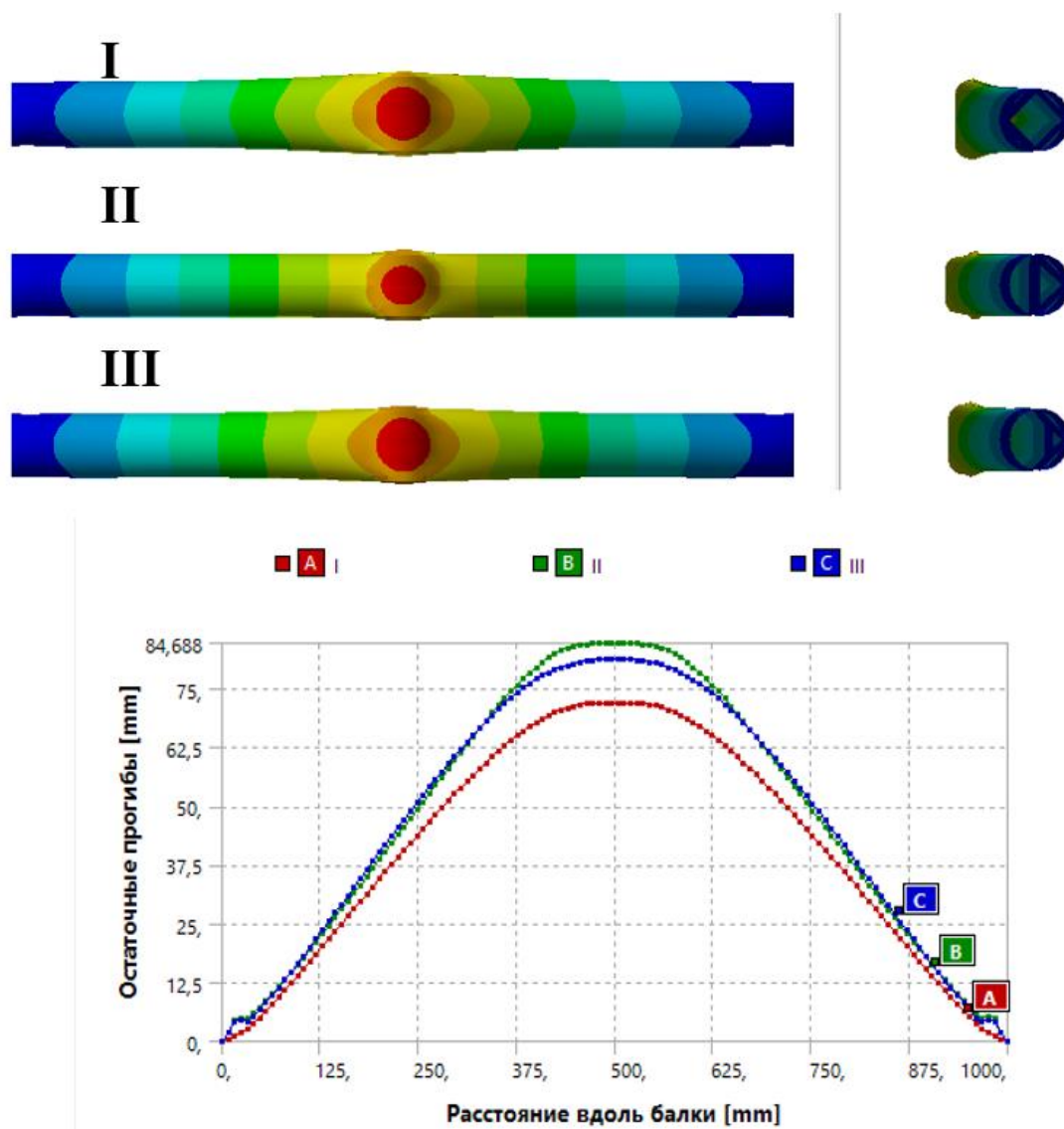


Рис. 8. Графики изменения прогиба балок в процессе деформирования

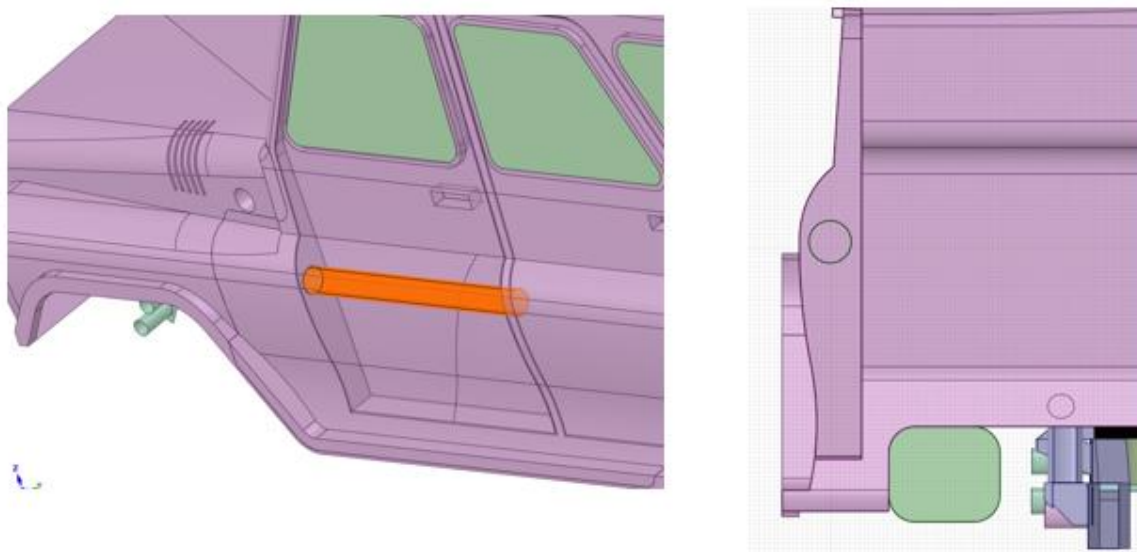


Рис. 9. Схема установки балок в двери

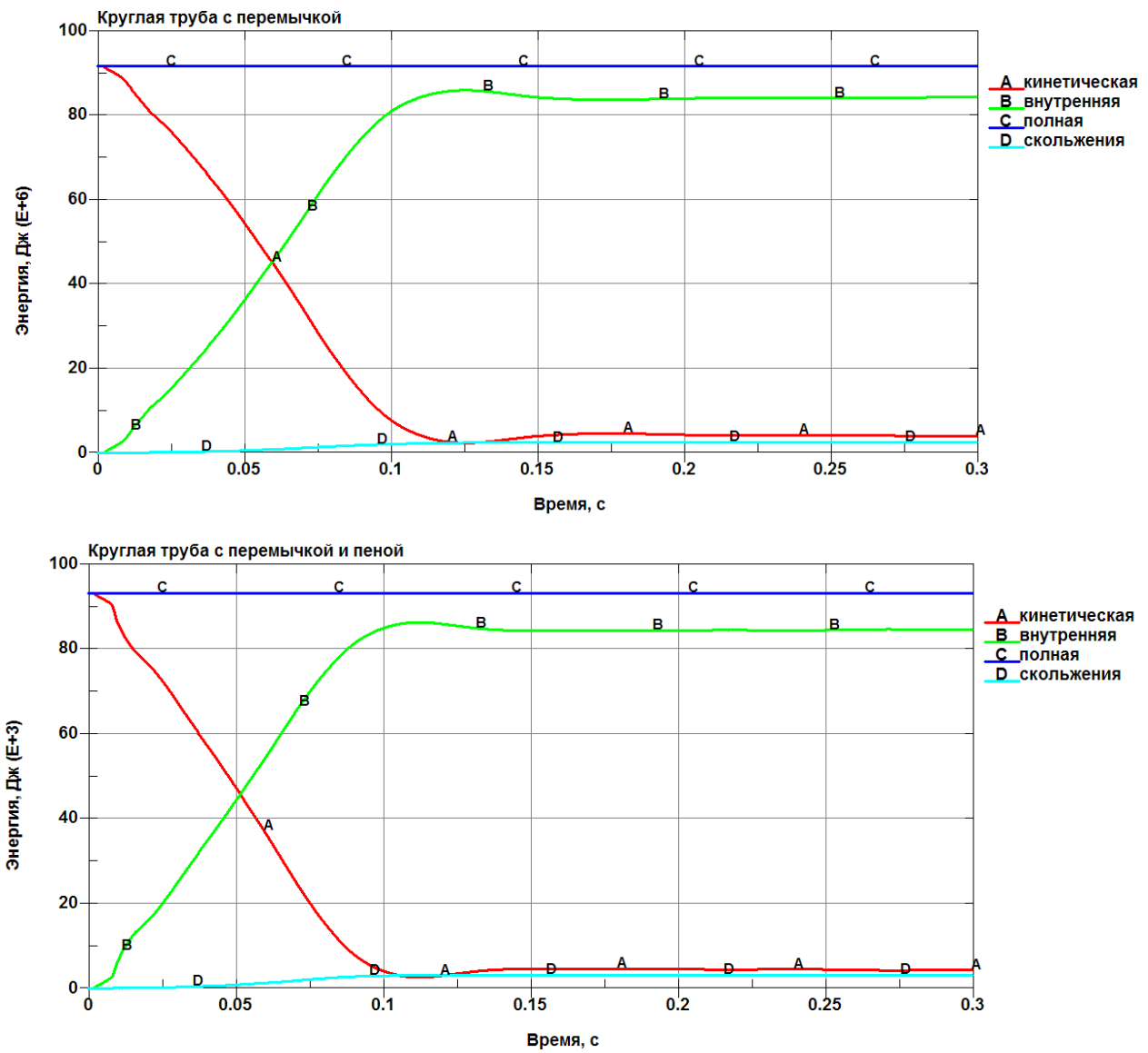


Рис. 10. Графики изменения энергий (для вариантов С и G)

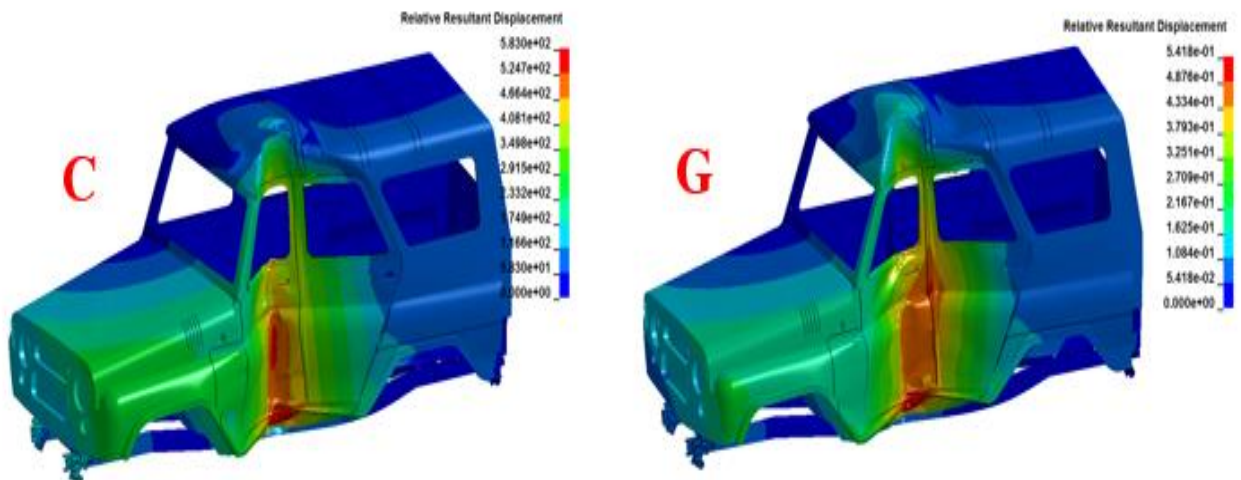


Рис. 11. Перемещения элементов кузова, мм

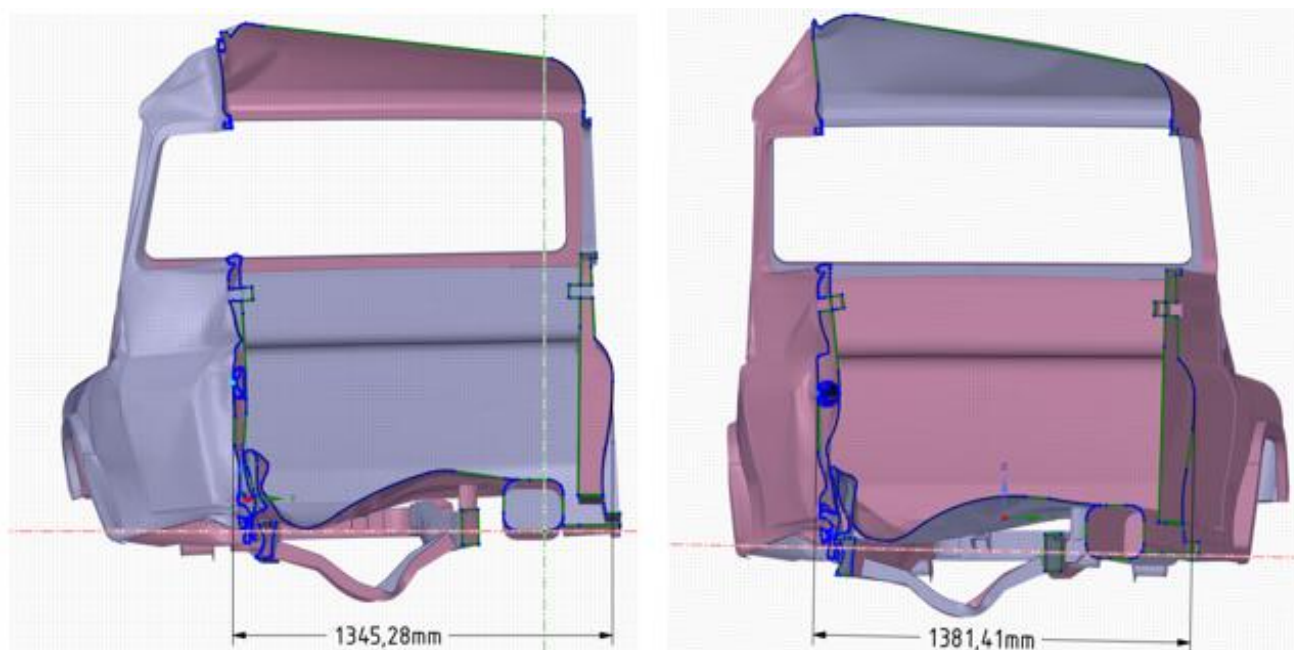


Рис. 12. Поперечный размер деформированного кузова

Результаты сравнения эффективности применения балок по критерию энергоемкости в составе двери приведены в табл. 1 и на рис. 13.

Таблица 1.

Сравнение эффективности балок по энергоемкости

Вариант	Исполнение	Начальный размер	Прирост массы	Размер после деформации, мм	Энергоемкость, Дж/мм	Прирост, %
A	Дверь с двойной стенкой	1843	-	1302	169	-
B	круглая труба		+3 кг.	1327,5	177	5,06
C	круглая труба с перемычкой		+4,7 кг.	1345,28	184	8,88
D	балка с hat профилем		+3,5 кг.	1349,55	185	9,77
E	круглая труба с ромбом		+5,7 кг.	1358,8	189	11,96
F	круглая с треугольником		+4,6 кг.	1355,7	188	11,2
G	круглая труба с перемычкой и пеной		+8 кг.	1381,41	199	17,54
H	труба с ромбом и пеной		+8,4 кг.	1387,2	201	18,99

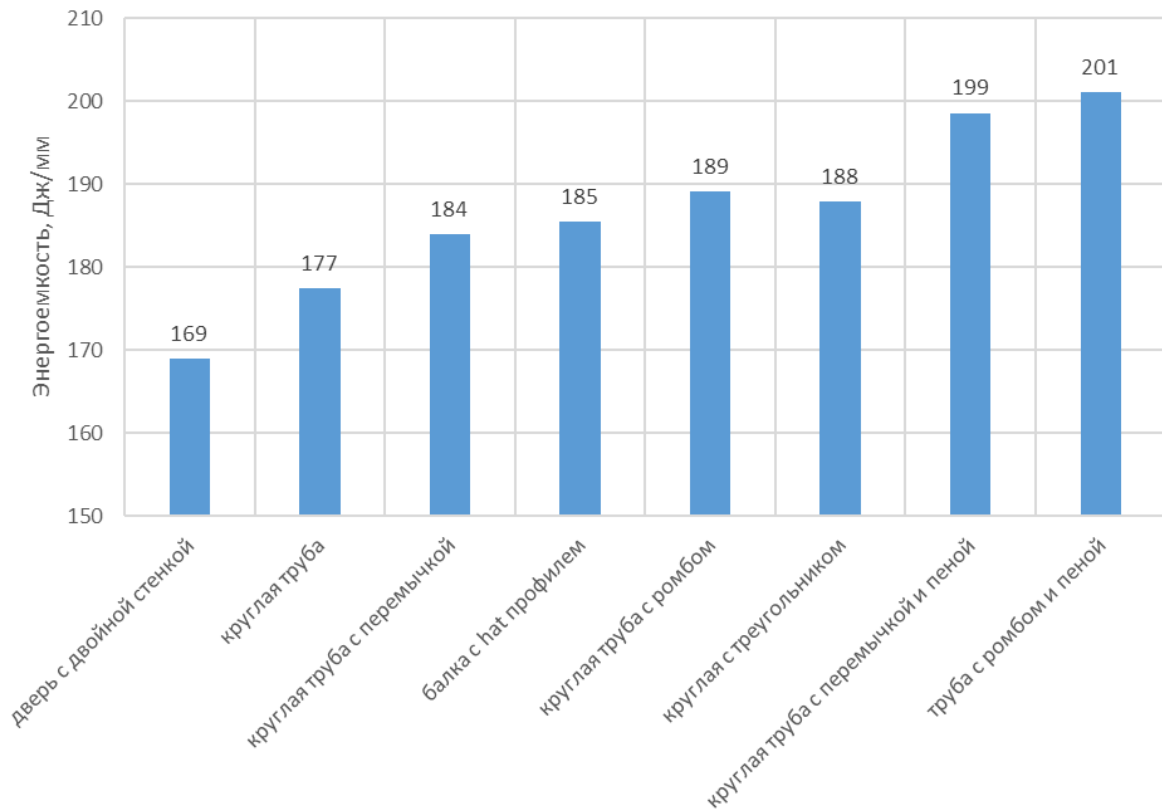


Рис. 13. Сравнение эффективности балок по энергоёмкости

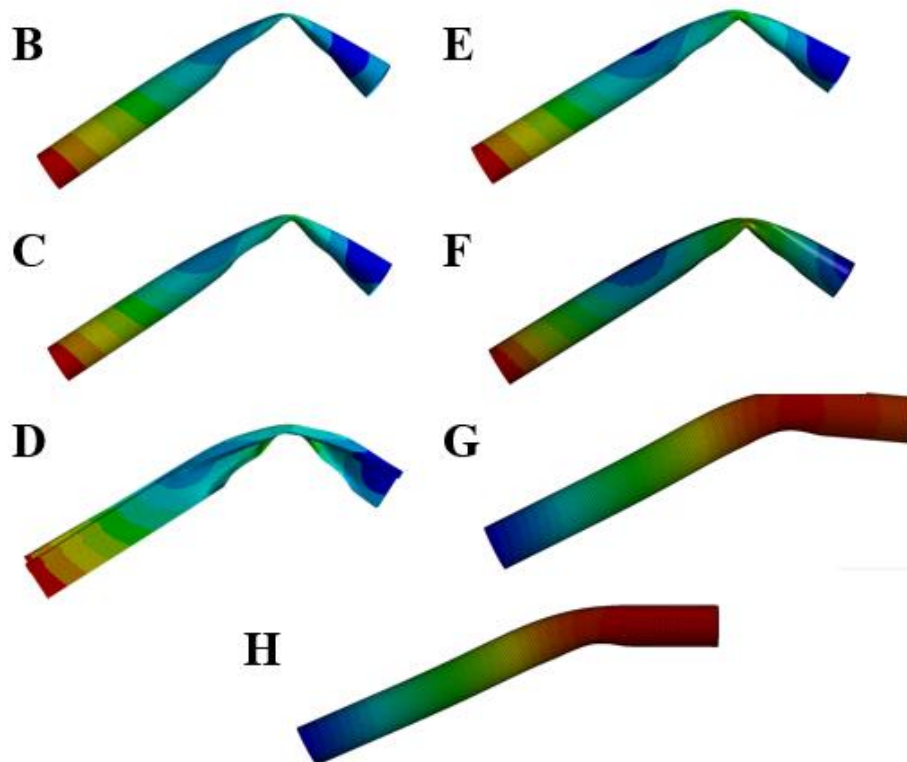


Рис. 14. Деформированные усилители

Характер деформирования усилителей без пеноалюминия (варианты В-Е) – изгиб со смятием, с пеноалюминием (варианты F-G) – изгиб.



Рис. 15. Деформированные двери

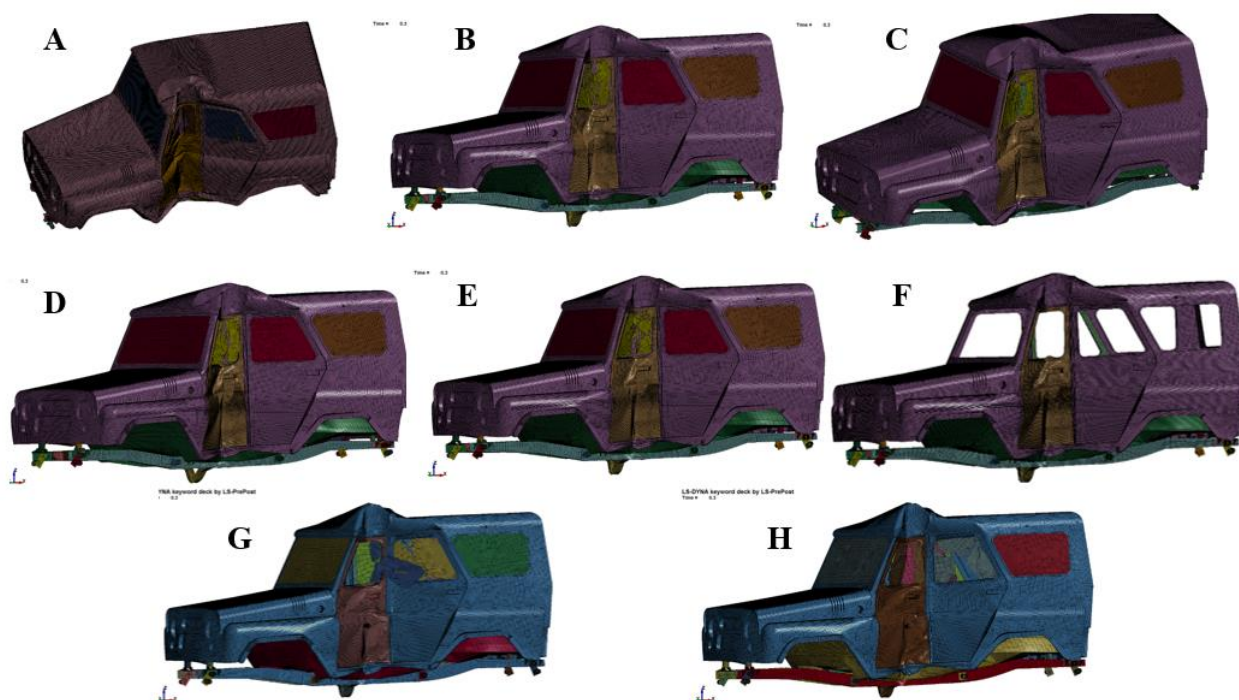


Рис. 16. Деформированные кузова

Заключение

1. Рассмотренные варианты усиления двери имеют разную эффективность, повышая энергоёмкость системы от 5 до 19 %. Выявлено существенное влияние формы поперечного сечения балок и запенивания.

2. Из балок без пены наиболее эффективным является комбинированное сечение, представляющее собой трубу с внутренним ромбом (вариант Е), повышающее энергоёмкость почти на 12 %.

3. Эффективность труб с перемычками повышается практически в два раза при заполнении их полостей пеноалюминием (варианты G и H).

4. Наиболее энергоёмким вариантом усиления двери является вариант круглой трубы с внутренним ромбом, заполненной пеноалюминием (вариант H), повышающий энергоёмкость системы почти на 19 %.

Библиографический список

1. **Guang, D.** Side structure sensitivity to passenger car crashworthiness during pole side impact analysis of passenger car side / D. Guang, W. Dazhi, Z. Jinhuan, H. Shilin // *Tsinghua Sci Technol*, 2007; 12:290–5.
2. The Application of Energy Absorbing Structures on Side Impact Protection Systems by James Njuguna. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 2011.
3. Investigation of anti-intrusion beams in vehicle side doors' by E. Cerniauskas, A. Kersys, V. Lukosevicius, J. Sapragonas. *Mechanika*, 2010.
4. Modelling, Analysis and Comparative Study of Side Impact Beam" by HarijonoDjojodihardjo, Soo Lin Khai. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, November, 2013.
5. Crashworthiness evaluation of side-door beam of vehicle' by T. L. Teng K. C. Chang, T.H. Nguyen. *Technische Mechanik*, October, 2007.
6. Правила ЕЭК ООН № 95 (документ E/ECE/324/Rev.1/Add.94/Rev.2 – E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.94/Rev.2). Единообразные требования, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении защиты водителя и пассажиров в случае бокового столкновения. ООН, 2011. – 99 с.
7. Правила ЕЭК ООН № 135 (документ E/ECE/324/Rev.2/Add.134/Rev.1–E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.134/Rev.1). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении их характеристик при боковом ударе о столб (БУС). ООН, 2016. – 48 с.
8. **Зузов, В.Н.** Исследование влияния на энергоёмкость основных силовых элементов кузова автомобиля в зоне бокового удара / В.Н. Зузов, Д.А. Сулегин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 20–34. DOI: 10.14529/engin200403.
9. **Гончаров, Р.Б.** Определение критериев выбора параметров материала наполнителя в несущих тонкостенных конструкциях каркасного типа применительно к задачам пассивной безопасности автомобилей / Р.Б. Гончаров, В.Н. Зузов // *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-4-1865>
10. **Ghadianlou, Ali** Crashworthiness design of vehicle side door beams under low-speed pole side impacts / Ali Ghadianlou, Shahrir Bin Abdullah // *Thin-Walled Structures*. – 2013. – №6, 7. – С. 23-33.
11. **Long, C.R.** Analysis of a car door subjected to side pole impact / C.R. Long, S. Yuen, Kim Chung, G.N. Nurick // *Latin American Journal of Solids and Structures*. – 2019. – vol.16. – №.8.

*Дата поступления
в редакцию: 11.01.2021*

D.A. Sulegin, V.N. Zuzov

**AN INVESTIGATION OF THE EFFECT OF A CAR DOOR REINFORCEMENTS
ON PASSIVE SAFETY IN A SIDE IMPACT**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

The urgent problem today is to ensure passive vehicle safety in a side impact. The paper presents the developed rational finite element models (FEM) of the body and pillar, on which the results are obtained with acceptable accuracy. The article discusses increasing the energy intensity of the car body with the help of additional reinforcing elements in the door cavity. Review of decisions were carried out using computer simulation in the LS-DYNA software product. The pole side impact regulated by UNECE Regulation № 135 was considered as the loading mode. The choice of sections of the door reinforcements was carried out by analyzing publications, and three own options were proposed, of which two more efficient ones were selected and tested as part of the body. The efficiency criterion was the energy intensity, which determines the penetration of the inner surface of the cabin door. All of the considered options for door reinforcements have different efficiency, increasing the energy consumption of the system from 5 to 19 %. The most effective option for reinforcing the door is a round pipe with an inner rhombus filled with foam aluminum.

Key words: a body, a pillar, passive safety, a door, foam aluminum, a finite element model, energy intensity, a side impact.