

УДК 629.113

EDN: QLSXPP

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КУЗОВА АВТОМОБИЛЯ ПО ТРЕБОВАНИЯМ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЛОБОВОМ СТОЛКНОВЕНИИ

И.А. ФилинORCID: 0009-0000-0201-3196 e-mail: filin.ilya152@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Л.Н. Орлов**ORCID: 0000-0003-4852-1174 e-mail: lev.n.orlov@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***В.Н. Наумов**ORCID: 0000-0001-5172-0364 e-mail: vn.naumov1941@yandex.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***В.Ф. Кулепов**ORCID: 0000-0002-8319-3973 e-mail: kulepov@dpingtu.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***С.Е. Манянин**ORCID: 0009-0003-0245-0638 e-mail: sergmanian@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Усовершенствована конструкция автомобильного кузова с учетом современных требований пассивной безопасности. Основным методом исследований стали виртуальные расчеты с применением передовых программных продуктов, на примере разработки подробной модели автомобиля. Впервые проведено исследование на фронтальное столкновение с барьером при 40%-м перекрытии автомобиля, кузов которого выполнен по каркасно-панельной технологии. Даны рекомендации по разработке деформируемого барьера согласно Правилам № 94 в отношении фронтального удара. Результаты работы могут быть применены при проектировании кузовных конструкций автомобилей, соответствующих современным стандартам пассивной безопасности. На основе предварительных исследований выявлены уязвимые точки конструкции, обоснована необходимость расчетных исследований на ранних этапах проектирования. В результате составлен перечень предлагаемых изменений, направленных на улучшение силового каркаса с целью повышения несущей способности кузова в условиях действия разрушающих нагрузок. Данные изменения сыграли ключевую роль в достижении приемлемых показателей деформирования кузова и в повышении общей безопасности автомобиля. Полученные расчетные данные могут быть использованы при проектировании и доводке кузовов автомобилей с каркасно-панельной конструкцией.

Ключевые слова: кузов автомобиля, проектирование, несущая способность, деформирование, расчетная модель, оценка пассивной безопасности.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Филин, И.А. Совершенствование кузова автомобиля по требованиям пассивной безопасности при лобовом столкновении / И.А. Филин, Л.Н. Орлов, В.Н. Наумов, В.Ф. Кулепов, С.Е. Манянин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 3. С. 120-127. EDN: QLSXPP

CAR BODY IMPROVEMENT ACCORDING TO REQUIREMENTS OF PASSIVE SAFETY IN HEAD-ON COLLISION

I.A. Filin

ORCID: **0009-0000-0201-3196** e-mail: **filin.ilya152@yandex.ru**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

L.N. Orlov

ORCID: **0000-0003-4852-1174** e-mail: **lev.n.orlov@mail.ru**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

V.N. Naumov

ORCID: **0000-0001-5172-0364** e-mail: **vn.naumov1941@yandex.ru**

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

V.F. Kulepov

ORCID: **0000-0002-8319-3973** e-mail: **kulepov@dpingtu.ru**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

S.E. Manyanin

ORCID: **0009-0003-0245-0638** e-mail: **sergmanian@yandex.ru**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The study focuses on optimizing the construction of a car body in line with modern passive safety requirements. Virtual simulations in cutting-edge software tools are used as the main research method, for example, a detailed model of a vehicle has been developed. The research novelty lies in the exploration of a frontal impact test against barrier with 40% overlapping for a car body constructed using frame-panel technology. Additionally, recommendations are provided for the development of a deformable barrier in accordance with Regulation No. 94 concerning frontal collision. The results of the study can be applied in the design of car body structures that meet modern passive safety standards. Preliminary investigations revealed vulnerable points in the construction, emphasizing the necessity for computational studies in the early stages of design. Consequently, a list of proposed modifications aimed at enhancing the structural framework to improve the load-bearing capacity of the body was compiled. These modifications played a pivotal role in achieving acceptable deformation metrics for the body, thereby enhancing the overall safety of the vehicle. The obtained computational data and research results can be used in the design and refinement of car bodies with frame-panel construction.

Key words: car body, car design, load-bearing capacity, deformability, design model, passive safety value.

FOR CITATION: I.A. Filin, L.N. Orlov, V.N. Naumov, V.F. Kulepov, S.E. Manyanin. Car body improvement according to requirements of passive safety in head-on collision. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 3. Pp. 120-127. EDN: QLSXPP

Введение

В связи с ростом числа дорожно-транспортных происшествий (ДТП) и количества пострадавших все более жесткими становятся требования к пассивной безопасности (ПБ) автомобилей. Статистические данные по ДТП показывают, что наиболее частыми для легковых машин являются лобовые столкновения с препятствием; наиболее тяжелым считается косо-симметричное столкновение. Известно, что ПБ автомобиля в основном обеспечивается кон-

струкцией кузова. Поэтому его несущую способность действию разрушающих нагрузок необходимо прогнозировать на всех этапах проектирования и создания автомобиля до проведения натурных испытаний опытных образцов. При этом, безусловно, важное значение имеет компьютерное моделирование аварийных ситуаций при ДТП в соответствии с требованиями технического регламента.

Описание исследований

В настоящей работе приведены результаты расчетной оценки безопасности каркасно-панельной конструкции кузова на примере разработки эскизного проекта автомобиля категории М1. Рассмотрен случай столкновения автомобиля с деформируемым неподвижным препятствием (барьером) и 40 %-м перекрытием передней части автомобиля, в соответствии с требованиями Правил ООН № 94 (рис. 1). Деформируемый барьер условно имитирует переднюю часть встречного автомобиля.

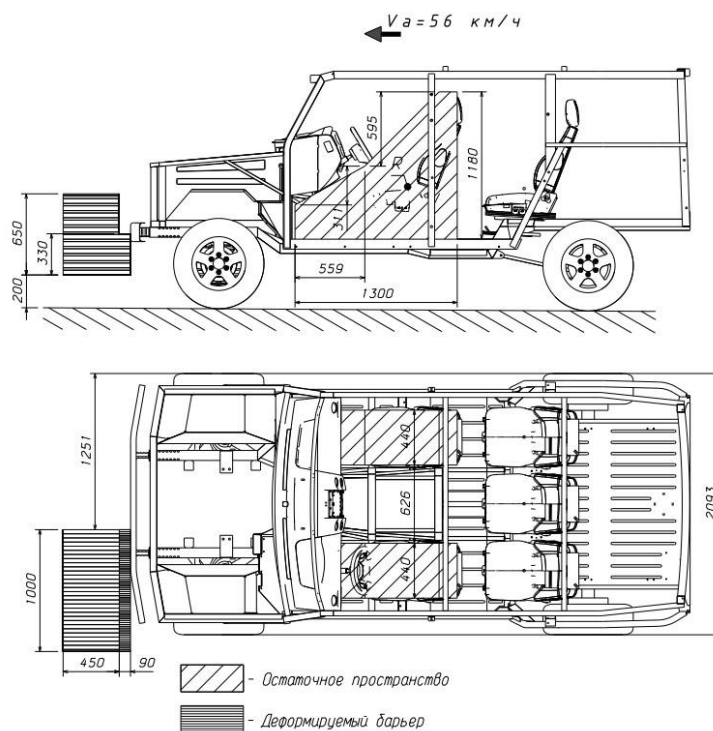


Рис. 1. Схемы столкновения модели с барьером (вид сбоку и сверху)

Fig. 1. Diagrams of the collision of the model with the barrier (side view and top view)

При испытаниях внутри салона должно оставаться остаточное жизненное пространство, необходимое для размещения манекена 50 %-го перцентиля (рис. 1). При столкновении автомобиля с препятствием его двери не должны самопроизвольно открываться или быть заблокированными. После ДТП должна обеспечиваться возможность эвакуации через них пассажиров и водителя. В процессе столкновения уровень перегрузок участников ДТП не должен превышать значения 80 g.

Для успешного проведения натурных испытаний опытного образца автомобиля необходимо уже при проектировании проводить оценку ПБ с применением расчетных методов. Это позволяет определять слабые места конструкции кузова на ранних этапах и дорабатывать ее в процессе создания автомобиля. Применение компьютерного моделирования условий аварийного нагружения и возникающего при этом деформирования несущих элементов конструкции автомобилей дает возможность на ранних этапах выбрать безопасную силовую

схему кузова и прогнозировать его безопасность на всех последующих этапах проектирования. Это также позволяет своевременно и оперативно оценивать влияние отдельных конструктивных элементов и вносимых изменений на обеспечение необходимой его несущей способности по разрушающим нагрузкам. Результаты таких исследований приведены ниже на примере разработанного автомобиля с каркасно-панельной конструкцией кузова. Расчетная конечно-элементная модель (КЭМ) рассматриваемого автомобиля показана на рис. 2.

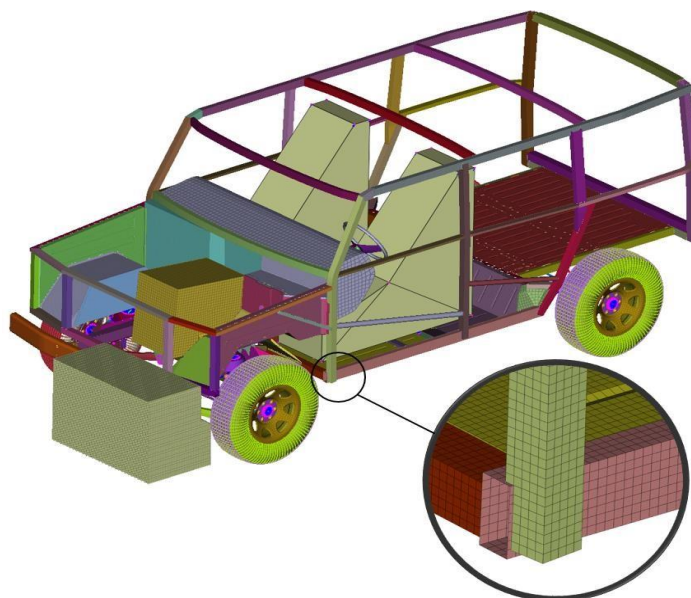


Рис. 2. Конечно-элементная модель автомобиля (вид без панелей боковин и крыши)

Fig. 2. The finite element model of the car (view without side panels and roof)

Модель включает элементы конструкции, которые принимают на себя ударные нагрузки, возникающие при столкновении автомобиля с барьером, а также влияющие на характер деформирования кузова. Это, прежде всего, сам кузов с передним бампером, колеса и подвеска, объемная модель двигателя с коробкой передач, объемный контур остаточного пространства для водителя и рядом сидящего пассажира. КЭМ разработана с учетом особенностей силовых элементов кузова и отмеченных выше агрегатов. Модель кузова построена из пластинчатых элементов. Ее внутренние граничные условия воспроизводят условия соединения реальных элементов и частей конструкции. Каркас кузова состоит из тонкостенных труб с замкнутыми сечениями. Физические свойства кузова и других частей автомобиля воспроизведены их геометрией, толщинами стенок тонкостенных элементов и панелей, характеристиками материалов. Учтены сварные соединения, заданы контакты между элементами.

Колеса и передняя подвеска также играют важную роль в поглощении энергии удара при столкновении автомобиля с барьером. Деформируясь, они принимают на себя часть энергии удара и могут внедряться в салон, деформируя элементы его основания в области расположения ног водителя, что ведет к нарушению остаточного пространства. При моделировании столкновения автомобиля следует учитывать, как минимум, наличие двигателя в его передней части. Положение двигателя и коробки передач в процессе проектирования данного автомобиля было выбрано так, чтобы при фронтальном столкновении автомобиля с препятствием они уходили под его днище, не проникая в салон. В модели они представлены объемными твердыми телами, имеющими реальные массы, закрепленные на соответствующих элементах ее передней части. При проектировании автомобиля оценка его соответствия указанным выше требованиям проводилась по деформируемости кузова, сохранению остаточного пространства и перемещению рулевого колеса.

Разработанная КЭМ автомобиля представляет собой сложную структуру, включающую 317520 элементов, из которых 313470 – прямоугольные, 3486 – треугольные, 564 – элементы сварки. Все стальные элементы модели имеют модуль упругости $E = 210000$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0.3$. Элементы барьера выполнены из алюминиевого сплава АД-31 с модулем упругости $E = 71000$ МПа. Их остальные характеристики представлены в табл. 1, для примера на рис. 3 показана нелинейная характеристика стали 09Г2С, примененная в тонкостенных элементах каркаса кузова. Это дает наглядное представление о свойствах материалов, используемых в разработке и исследовании автомобильного кузова, расширяя базу данных для будущих исследовательских работ в области пассивной безопасности.

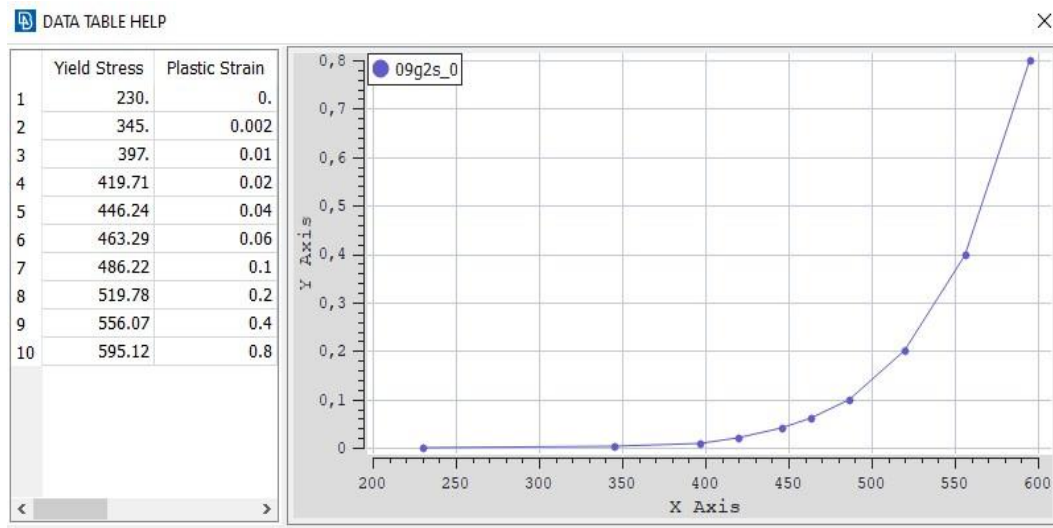


Рис. 3. Нелинейная характеристика стали 09Г2С, используемая в трубах каркаса

Fig. 3. Nonlinear characteristic of 09G2C steel used in frame pipes

Таблица 1.

Пластические характеристики металлов

Table 1.

Plastic characteristics of metals

Наименование материала	Условный предел текучести σ , МПа	Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %
Сталь 08ПС ГОСТ 9045-93	200	280	28
Сталь 09Г2С ГОСТ 9045-93	294	441	18
АД 31Т1 ГОСТ 18475-82	275	315	8

Для проведения расчетов была разработана КЭМ деформируемого барьера (рис. 2). При моделировании были приняты во внимание рекомендации Т. Триленда, создавшего альтернативные модели деформируемых барьеров для фронтальных и боковых столкновений. Сравнение твердотельных и оболочечных моделей показало, что твердотельная модель имеет недостатки. Наличие объемных элементов приводит к увеличению времени расчета и не полностью отражает поведение реального барьера, в то же время данная модель отличается простотой в построении. Поэтому для достижения достоверных результатов рекомендуется использовать оболочечную модель. В соответствии с требованиями правил, моделирование удара выполнено со стороны сиденья водителя. При этом точка Н манекена соответствует среднему положению сиденья. Скорость движения модели автомобиля в момент удара составляет 56 км/ч, что соответствует типичной дорожной ситуации. Зона перекрытия передней части модели составляла 40 % (842 мм) его общей ширины. Модель барьера была уста-

новлена неподвижно, при этом ее нижняя кромка с выступающей частью находилась на высоте 200 мм от опорной поверхности колес автомобиля. Это обуславливается стандартизированными условиями для моделирования лобового столкновения автомобилей и позволяет точно оценить результаты влияния удара на структуру автомобиля. Моделирование столкновения осуществлялось с использованием программного комплекса *Abaqus EXPLICIT*, что гарантирует высокую точность и достоверность полученных результатов. Полученные результаты по напряженно-деформированному состоянию автомобиля показаны на рис. 4 и 5.

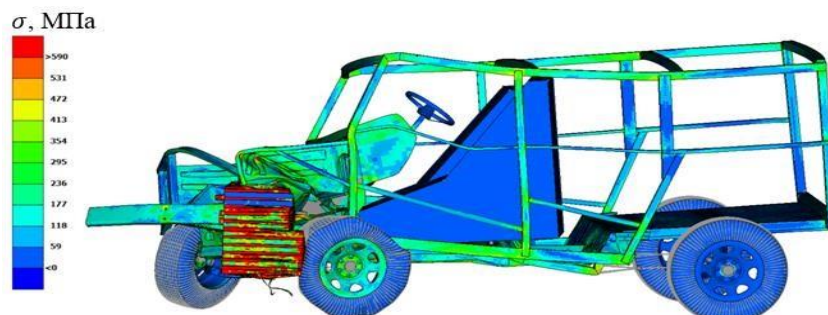


Рис. 4. Конечное состояние расчетной модели, вид сбоку

Fig. 4. The final state of the computational model (side view)

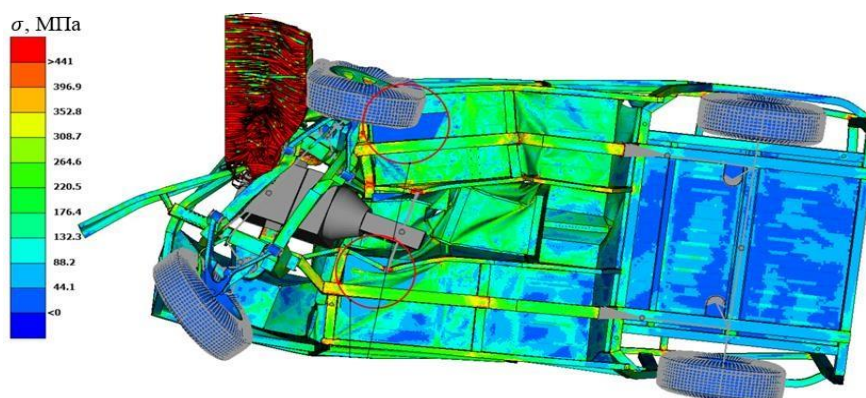


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние кузова, вид снизу

Fig. 5. Stress-strain state of the body (bottom view)

На рис. 6 показаны графики изменения энергии удара (кинетическая энергия) и поглощаемых конструкцией автомобиля энергий во время удара. Анализ полученных результатов показал, что исходная конструкция автомобиля имеет недостаточную энергоемкость и сопротивляемость разрушениям при рассмотрении столкновения с барьером. Большие деформации произошли в зонах действия ударной нагрузки и основания кузова (в зонах центрального тоннеля). Это привело к большому смещению левой боковины кузова по отношению к правой. Сильно деформировался пол в зоне ног водителя. Элементы этой части основания внедрились в зону необходимого остаточного пространства. Специально предусмотренные в конструкции энергопоглощающие зоны приняли на себя основную часть энергии удара и снизили воздействие на элементы каркаса. Однако этого было недостаточно, поэтому были проведены дальнейшие многовариантные исследования по оценке влияния отдельных силовых элементов и их конструктивных изменений на повышение пассивной безопасности. На основе проведенного анализа полученных результатов были разработаны рекомендации по повышению несущей способности кузова к разрушающим ударным нагрузкам и его энергоемкости. Для укрепления тоннеля пола в модель были введены дополнительные раскосы (рис. 7, поз. 1) и X-образные поперечины (поз. 2).

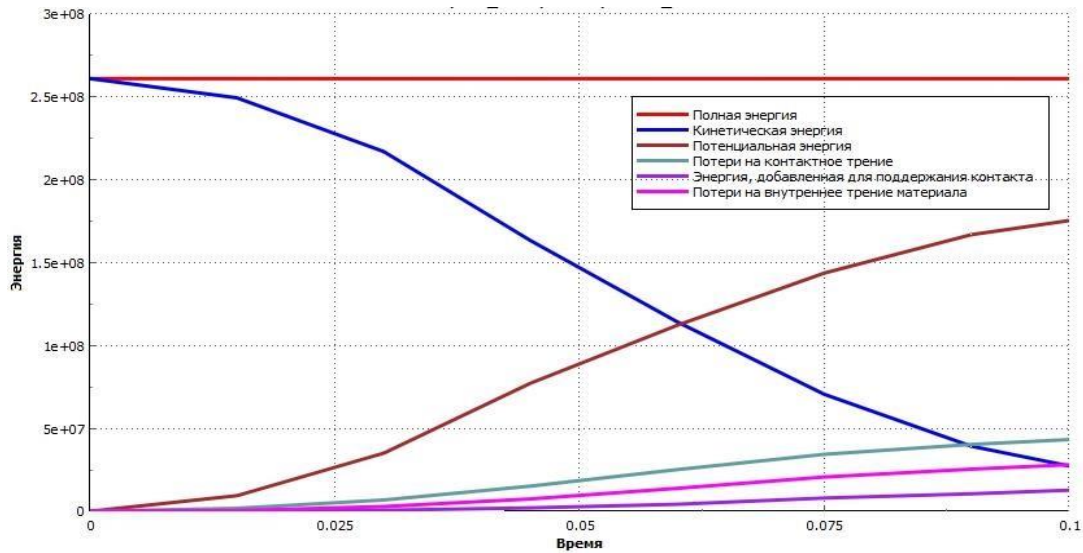


Рис. 6. Графики изменения энергий (Дж)

Fig. 6. Graphs of energy change (J)

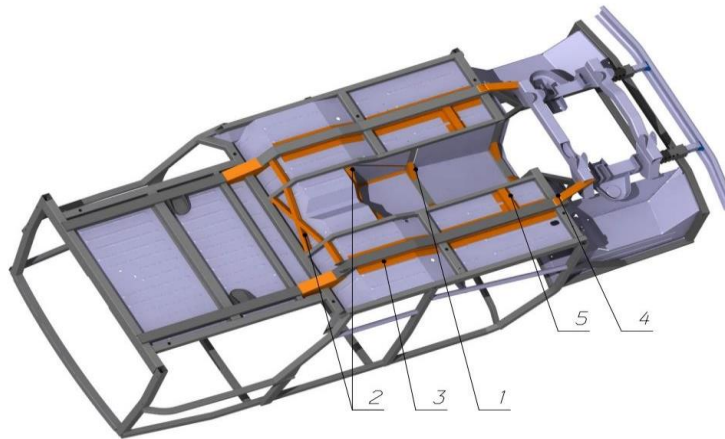


Рис. 7. Конструктивные изменения каркаса кузова

Fig. 7. Structural changes of the body frame

При ударе наблюдалось сильное смещение подрамника передней подвески в сторону салона, что деформировало тоннель пола и делало перемещение рулевой колонки больше допустимого. Для решения данной проблемы были введены дополнительные точки крепления подрамника на лонжеронах (поз. 4), что добавило дополнительную линию распределения энергии удара. Кроме этого, были усилены лонжероны основания (поз. 3), а также введены дополнительные с силовыми элементами тоннеля (поз. 5). Были усилены элементы передней части салона и их связи с несущими элементами основания.

В результате краш-теста остаточное жизненное пространство не было нарушено. Остаточное смещение рулевого колеса в центре уменьшилось на 80,3 % в вертикальном направлении вверх и 81,96 % в горизонтальном направлении назад, находясь в допустимых пределах в соответствии с Правилами № 94. Нарушения формы дверных проемов отмечено не было. Требования, предъявляемые к конструкции кузова на данном этапе проектирования, выполняются.

В результате получена более рациональная и безопасная конструкция кузова, способная выдерживать рассматриваемую ударную нагрузку, деформируясь в допустимых пределах при сохранении регламентируемого пространства в салоне.

Заключение

Внесение изменений в конструкцию каркаса кузова не только привело к достижению приемлемых показателей деформации, но и повысило общую безопасность автомобиля. Также существенно повысилась эффективность защиты пассажиров в случае аварийных ситуаций в результате проведенной работы по доводке кузова на основе инженерных расчетов.

Разработанные рекомендации по повышению пассивной безопасности кузова автомобиля имеют прикладное значение. Их практическое применение может сделать значительно более эффективными меры по обеспечению безопасности транспортных средств в соответствии с современными стандартами.

Применение компьютерного моделирования при рассмотрении аварийных ситуаций, связанных с автомобилем, в соответствии с требованиями технического регламента дает возможность прогнозировать его пассивную безопасность на ранних этапах проектирования. Этот подход позволяет оценить и анализировать безопасность на всех этапах разработки конструкции кузова и ее последующих изменений, что является важным аспектом обеспечения существующих стандартов безопасности транспортных средств.

Библиографический список

1. **Орлов, Л.Н.** Основы разработки конечно-элементных моделей кузовных конструкций автотранспортных средств. Расчеты на безопасность и прочность / Л.Н. Орлов, А.В. Тумасов, Е.В. Кочанов [и др.]. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. – 144 с.
2. **Орлов, Л.Н.** Методы расчета и оценки пассивной безопасности, прочности кузовных конструкций наземных транспортных средств: учебное пособие / Л.Н. Орлов, В.П. Могутнов, Е.В. Кочанов, С.А. Багичев, А.С. Вашурин. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2020. – 260 с.
3. **Орлов, Л.Н.** Расчетная оценка пассивной безопасности наземного транспортного средства с внесенными в его конструкцию изменениями. / С.А. Багичев, А.В. Тумасов, В.А. Колтунов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 1 (128). С. 96-104.
4. **Орлов, Л.Н.** Determination of the most efficient bus rollover computer simulation technique according ECE R66 / Л.Н. Орлов, П.С. Рогов // International Journal of Heavy Vehicle Systems. 2020. Т. 27. № 4. С. 422-440.
5. **Орлов, Л.Н.** Испытания на прочность и компьютерное моделирование локальных участков кузовных конструкций / Л.Н. Орлов, А.В. Герасин, А.В. Тумасов, Ю.П. Трусов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013 № 4 (101). С. 86-90.
6. **Trylend T.** Alternative Models of the Offset and Side Impact Deformable Barriers// 9th European LS-DYNA user conference. Raufoss (Norway), 2008. pp. 24-39.
7. **Правила ООН № 94, Добавление 93, Пересмотр 3** «О принятии единообразных технических предписаний для колесных транспортных средств, предметов оборудования и частей, которые могут быть установлены и/или использованы на колесных транспортных средствах, и об условиях взаимного признания официальных утверждений, выдаваемых на основе этих предписаний». Европейская Экономическая Комиссия, Женева, 2021.
8. **Сулегин, Д.А.** Топологическая оптимизация конструкции крыши легкового автомобиля с целью повышения энергоемкости при боковом ударе / Д.А. Сулегин, В.Н. Зузов // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2021. № 1 (47). С. 2-14.
9. **Лю, И.** Исследование влияния применения клеевого соединения в двери на пассивную безопасность автомобиля при боковом ударе / И. Лю, В.Н. Зузов // Сборник статей XV Международной научно-практической конференции «Перспективные направления автотранспортного комплекса». Пенза, 2021. С. 38-45.

*Дата поступления
в редакцию: 22.02.2024*

*Дата принятия
к публикации: 28.06.2024*