

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА КУЗОВА ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ КОСОФРОНТАЛЬНОМ УДАРЕ

В.Н. Зузов, И.В. Зузов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: zuzvalery@rambler.ru

Представлен разработанный метод совершенствования конструкции корпуса кузова автомобиля при кософронтальном ударе. Описаны смоделированные составляющие конечно-элементной модели: кузов, манекен, рулевой механизм с подушкой безопасности и деформируемое препятствие. Обоснованы принципы моделирования каждой из составляющих модели. Выполнена оценка результатов расчета на пассивную безопасность исходного кузова по основным характеристикам в соответствии с правилами ЕЭК ООН № 94. На основе метода с использованием программного комплекса ANSYS LS-Dуна разработан усовершенствованный кузов, и проведена сравнительная оценка поведения элементов конструкции исходного и доработанного кузовов. В результате применения метода была увеличена энергоемкость передней части кузова и снижена травмируемость манекена.

Ключевые слова: легковой автомобиль, кузов, пассивная безопасность, фронтальный удар, энергоемкость, жесткость.

IMPROVEMENT OF CONSTRUCTION OF MOTOR CAR BODY AT THE DESIGNING STAGE TO SATISFY PASSIVE SAFETY REQUIREMENTS AT OFFSET FRONTAL IMPACT

V.N. Zuzov, I.V. Zuzov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: zuzvalery@rambler.ru

The developed method for improvement of the car body design for “offset frontal impact” mode is presented. The finite-element model (FEM) components are described: car body, dummy, steering system including an airbag, and deformable barrier. The principles of modeling each FEM component are substantiated. The results of passive safety simulation of the original body have been evaluated in accordance with UNECE Regulations no. 94. Using the method (based on ANSYS LS-Dyna software), the modified body was developed and the comparison of behavior of structural elements of the original and modified bodies was performed. As a result of application of the method, the energy-absorbing capacity of the body’s front-end structure has been increased and the damage of the crash-test dummy has been reduced.

Keywords: motor car, car body, passive safety, frontal impact, energy-absorbing capacity, rigidity.

В настоящее время проблема пассивной безопасности колесных машин — одна из наиболее сложных и трудоемких задач, которую приходится решать при проектировании новых транспортных средств. В мире внедряются все более жесткие правила, по которым оценивается степень защиты водителя и пассажиров автомобиля, в связи с чем

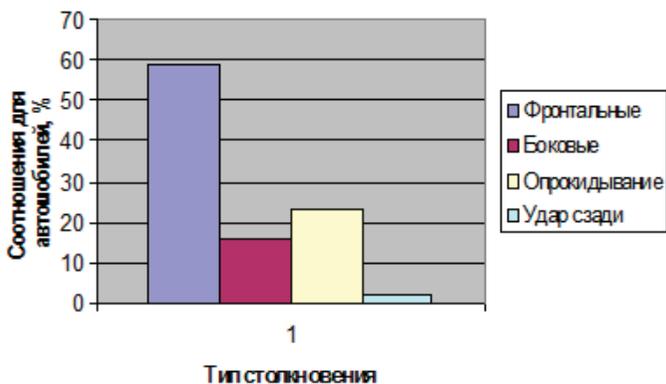


Рис. 1. Диаграмма ДТП для легковых автомобилей

возникает необходимость в теоретической оценке пассивной безопасности кузовов на стадии проектирования, позволяющей снизить время и стоимость разработки, сократить до минимума число испытательных образцов.

На рис. 1 приведена классификация ДТП по данным зарубежных источников [1] для легковых автомобилей. Видно, что преобладающим видом ДТП является фронтальное столкновение.

Кроме того, согласно тем же источникам, данный вид столкновения по статистике является также наиболее травмоопасным для водителя и пассажиров.

На основе подобных статистических данных в РФ и за рубежом были разработаны требования, регламентирующие пассивную безопасность транспортных средств. В настоящее время каждый вновь разрабатываемый автомобиль должен соответствовать целому ряду стандартов пассивной безопасности, основными из которых являются правила единой экономической комиссии (ЕЭК) при ООН. На основе этих документов также разработаны отечественные стандарты, действующие на территории РФ.

На пассивную безопасность автомобиля влияет множество конструктивных и технологических факторов, на базе которых можно сформировать систему обеспечения пассивной безопасности. При наличии достоверной статистической информации о пассивной безопасности автомобиля на стадии эксплуатации возможности управления системой обеспечения пассивной безопасности на этом этапе ограничены и связаны в основном с регламентацией скорости движения. Гораздо более широкие возможности имеются на стадии проектирования отдельных элементов этой системы, когда возможна доводка и оптимизация ее конструктивных параметров.

По данной теме опубликовано большое число работ, но они не содержат в себе общих методов построения имитационных моделей

и совершенствования конструкций при недостаточной энергоемкости и зачастую представляют собой рекламный характер. В настоящей работе описан разработанный метод совершенствования конструкции корпуса кузова для обеспечения пассивной безопасности при кософронтальном ударе в соответствии с правилами ЕЭК ООН № 94 и проиллюстрированы его возможности на примере усовершенствования кузова полноприводного автомобиля ВАЗ.

На рис. 2 представлена блок-схема, отражающая основную суть разработанного метода. На первом этапе создаются конечно-элементные модели (КЭМ): корпуса кузова автомобиля (уточненная на базе оболочечных конечных элементов (КЭ)) и основных агрегатов; готовится математическое описание параметров конструкции (масса, толщины и др.); проводится оптимизация сетки КЭ для достижения наиболее качественного описания геометрии.

На втором этапе осуществляется предварительное решение составленной модели с базовыми параметрами. По результатам расчета оцениваются максимальные перемещения основных элементов конструкции, остаточное жизненное пространство и проводится анализ поведения лонжеронов, стоек, двигателя, агрегатов трансмиссии и др. выявляются наиболее податливые участки конструкции — инициаторы деформаций; предлагается оценить расчетное ускорение центра масс (ЦМ) головы манекена (один из основных оценочных параметров согласно правилам испытаний), которое также косвенно характеризует общую жесткость кузова.

Третий этап — это внесение изменений в конструкцию кузова автомобиля в случае, если энергоемкость конструкции недостаточна либо если не удовлетворяются основные требования правил по оценке пассивной безопасности.

Четвертый этап — расчет доработанной модели и оценка результатов. На ее основе делается вывод об общей жесткости и замкнутости силовой схемы кузова, а также о соответствии всех параметров требованиям правил испытания. В случае достаточной жесткости конструкции и соответствия регламенту, проводится расчет на базе КЭМ высшего уровня, в которой более детально смоделированы особенности конструкции, и делается окончательное заключение.

Результаты теоретических исследований в дальнейшем необходимо подтвердить натурными испытаниями.

Один из важнейших этапов — это разработка моделей для последующих расчетов и исследований. Для имитации кософронтального удара были составлены КЭМ корпуса кузова автомобиля, деформируемого препятствия, манекена HYBRID III и рулевой колонки с подушкой безопасности.

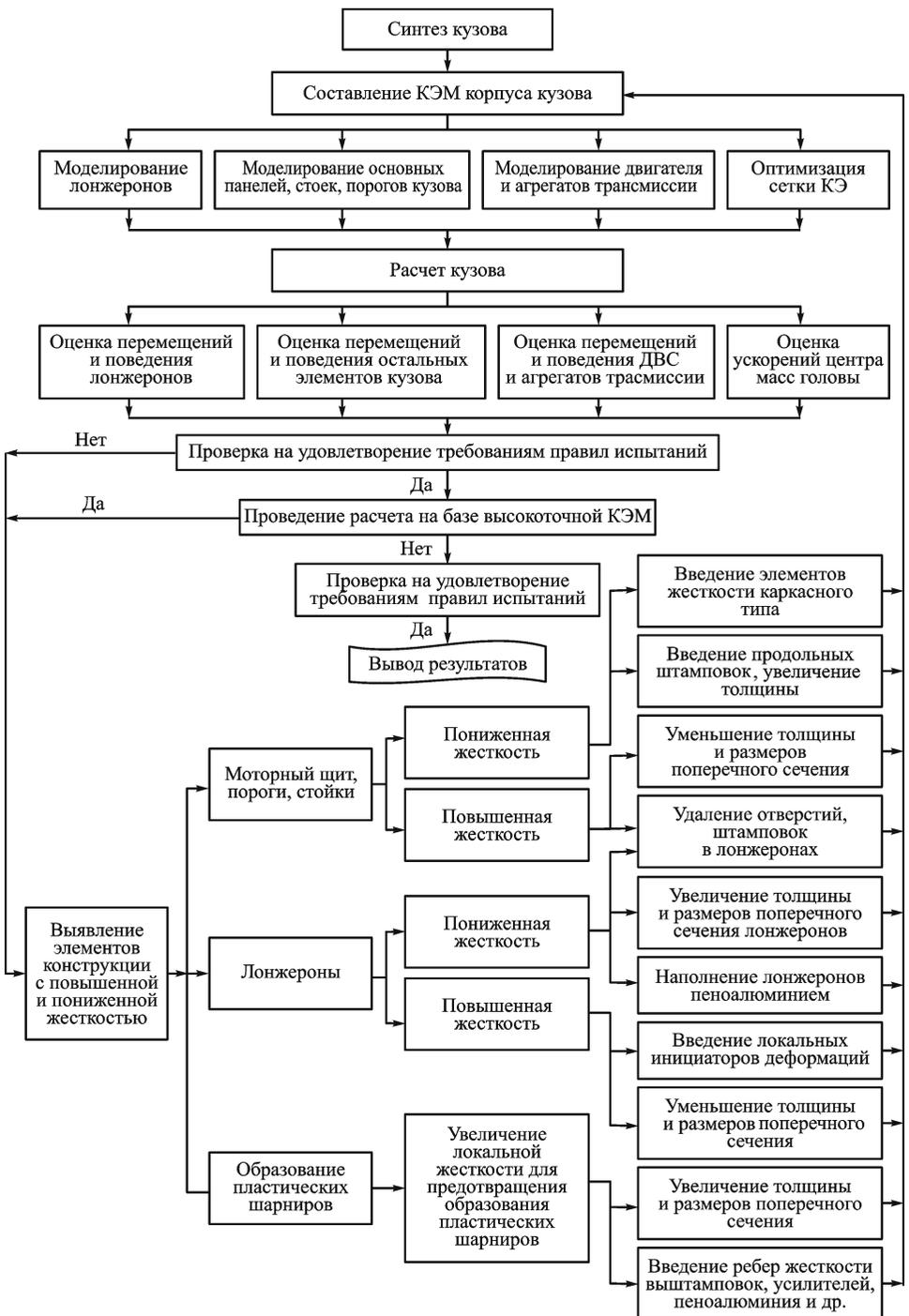
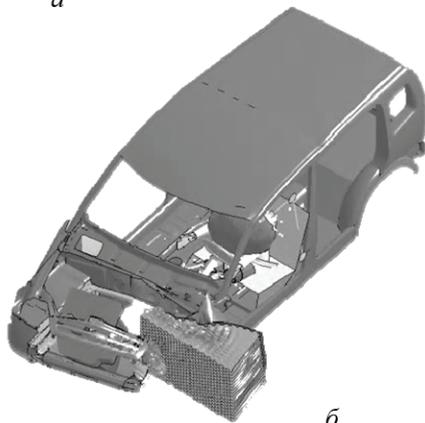


Рис. 2. Блок-схема метода



a



б

Рис. 3. Моделирование удара:

a — имитационная модель до удара; *б* — деформированное состояние модели после удара

Разработанная КЭМ корпуса кузова среднего уровня (рис. 3) состоит из 89 тыс. узлов и элементов. Для составления модели применялись четырехугольные и треугольные оболочечные КЭ, работающие на изгиб, сдвиг и растяжение-сжатие. Характер разбиения кузова и прежде всего лонжеронов (наиболее ответственных элементов при кософронтальном ударе) на КЭ обосновывался на базе ранее проведенных исследований [2, 3], по которым основные размеры КЭ выбраны в диапазоне 5...10 мм, что позволило учесть все особенности конструкции.

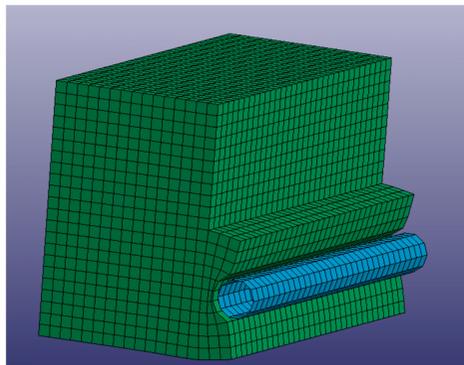
Модель включает в себя двигатель с креплением, поскольку поведение двигателя при ударе передней части автомобиля существенным образом влияет на деформирование элементов кузова и, как следствие, травмирование водителя и пассажиров. Элементы крепления двигателя моделировались с использованием оболочечных и балочных КЭ. Оболочечными КЭ моделируются такие элементы крепления, как кронштейны, опорные пластины и другие элементы, а балочными — штанги, направляющие и др. На данном этапе такая модель является приемлемой, поскольку позволяет существенно сократить ресурсы и время, необходимые для проведения расчета. Тем самым появляется возможность проводить большое число расчетов для отработки основных вариантов конструктивных изменений.

Для создания КЭМ деформируемого препятствия использовалось несколько подходов. В первом приближении создавалась твердотельная модель, которая содержала объемные элементы типа Solid. Для описания сотовой структуры основного и бамперного элементов применялся материал из программного комплекса LS-Dyna MAT_HONEY-COMB. Данный материал очень хорошо подходит для моделирования пористых структур, таких как пена, сотовые конструкции и другие с нелинейными анизотропными свойствами. Однако исследования, проведенные Т. Трайлендом [4], показали, что данная модель имеет ряд недостатков: в частности, увеличивается время расчета (за счет использования объемных элементов), а также поведение данной модели при ударе не совсем точно соответствует поведению реального барьера. К достоинствам можно отнести относительную простоту построения такой модели.

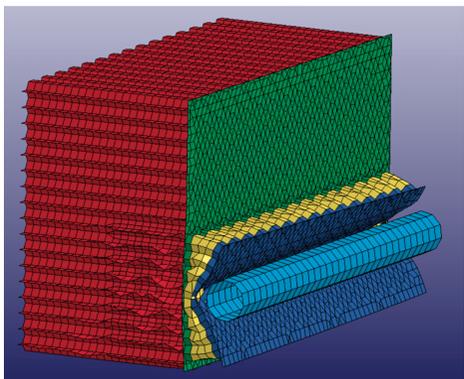
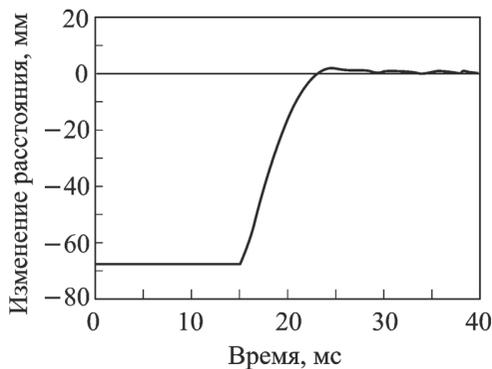
В связи с этим для максимальной достоверности результатов была создана точная модель препятствия с использованием оболочечных элементов типа Shell. Применение данного типа элементов обусловлено тем, что сотовая конструкция препятствия и листов имеет пластинчатую структуру.

Учет всех геометрических особенностей приводит к увеличению размерности КЭМ, что в свою очередь способствует существенному возрастанию времени расчета. В частности, созданная на базе данной геометрии КЭМ состояла из более чем 170 тыс. элементов и узлов, что сопоставимо с размерностью КЭМ корпуса кузова автомобиля. Использовался материал типа MAT_PLASTICITY_WITH_DAMAGE_TITLE — упруговязкопластичный материал с возможностью задания произвольной кривой растяжения. При использовании данной модели время расчета увеличилось в 2,5 раза, что существенно снижает эффективность расчетов в случае внесения изменений в конструкцию кузова и проведения повторных расчетов. Для уменьшения времени, затрачиваемого на расчет при сопоставимой точности полученных результатов, предложена модель деформируемого препятствия среднего уровня с увеличенными размерами ячеек бамперного элемента, но при той же жесткости, что и предыдущая модель (рис. 4).

Данная модель состоит из 19 тыс. элементов и узлов, что существенно уменьшает время расчета (по сравнению с КЭМ высшего уровня), но в то же время имеет достаточно высокую точность. Идентичная жесткость бамперного отсека была подобрана с помощью многочисленных расчетов, в которых абсолютно жесткий маятник ударял в бамперный отсек. В результате были подобраны характеристики материала и толщина сот бамперного элемента.



a



б

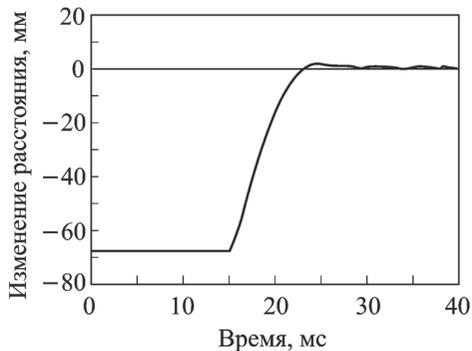


Рис. 4. Результаты расчета препятствий:

a – КЭМ из объемных элементов; *б* – из оболочечных элементов

На рис. 4 приведены результаты сравнительного расчета и графики изменения расстояния между контрольными точками для препятствий, смоделированных с использованием объемных и оболочечных КЭ. Суть расчета состояла в том, что трубка диаметром 100 мм, длиной 1000 мм и толщиной стенки 26 мм ударялась о препятствие со скоростью 13,8 м/с согласно правилам ЕЭК ООН № 94 и проводилось сравнение перемещений между контрольными точками, расположенными в одинаковых местах обеих моделей.

По результатам расчета выявлено, что время расчета при использовании КЭМ препятствия, составленной из объемных элементов, увеличилось на 21 % по сравнению с КЭМ препятствия, смоделированного оболочечными элементами.

Для имитации поведения водителя и пассажиров во время столкновения применяются манекены типа Hybrid III. Первоначально разработанный в компании General Motors, Hybrid III теперь поддерживается и дорабатывается фирмой Humanetics совместно с Обществом автомобильных инженеров (SAE). Достоверность биофизических параметров манекена и схожесть с телом человека подтверждена многочисленными испытаниями. Конечно-элементная модель Hybrid III подробно

описывался в работе [5], где посредством многовариантных расчетов доказана достоверность биофизических параметров манекена.

Имитационная модель представляет собой КЭМ среднего уровня, состоящую из элементов типа Shell (для описания поверхности конечностей), Spring (для описания упругодеформируемых свойств тела), Solid, Beam (для описания костей) и Mass (для описания внутренних органов). Пример КЭМ манекена Hybrid III, усаженного в кресло и пристегнутого ремнями безопасности, показан на рис. 5, а. Сиденье выполнено из двух соединенных между собой жестких оболочек. Манекен нижней частью бедра под действием силы тяжести опирается на горизонтальную часть сиденья. К вертикальной спинке манекен прижат с помощью ремней безопасности. Ремни безопасности выполнены из балочных (нити каркаса) и оболочечных (полотно ремня) КЭ с использованием специально разработанного для этих целей материала MAT_SEATBELT [6].

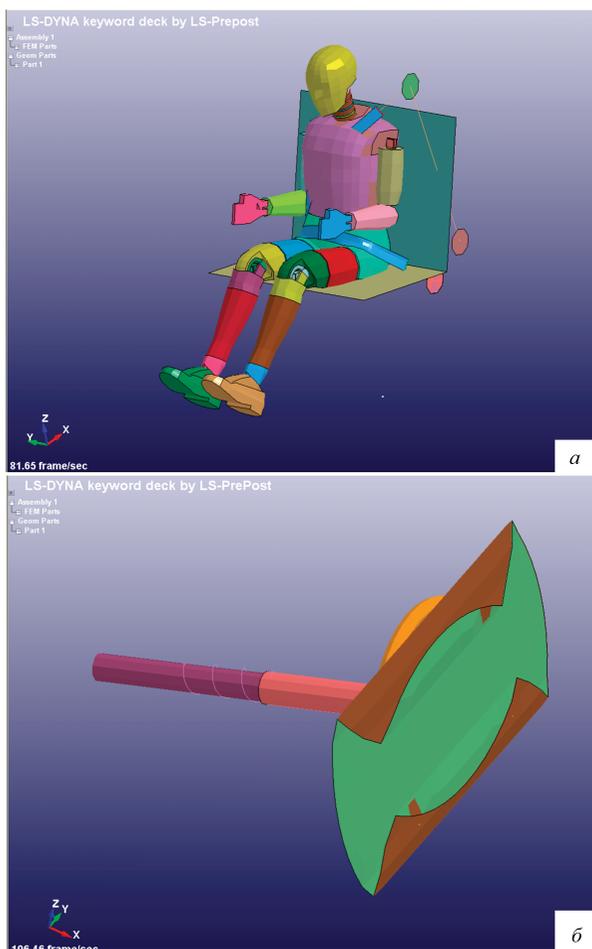


Рис. 5. Конечно-элементные модели:

а — Hybrid III; *б* — рулевой колонки с подушкой безопасности

Для расчета были составлены также КЭМ рулевой колонки и подушки безопасности (рис. 5, б).

Конечно-элементные модели построены на базе элементов типа Shell (для моделирования подушки, корпуса рулевой колонки, рулевого колеса) и Beam (для учета упругих свойств рулевой колонки). В качестве материала для КЭМ подушки был выбран материал MAT_FABRIC, специально предназначенный для описания свойств подушек безопасности. Данный материал представляет собой модель многослойного ортотропного композитного материала и доступен для моделирования трех- и четырехузловыми КЭ. В дополнение к этим важным свойствам модель материала позволяет применять специальную формулировку оболочечных элементов, наиболее подходящих для больших деформаций, которые происходят при надувании подушки безопасности.

В качестве объекта исследования для иллюстрации эффективности предлагаемого метода был выбран полноприводный автомобиль ВАЗ, поскольку он в первоначальном варианте при испытаниях не удовлетворял требованиям правил Euro NCAP, а также является одним из популярных на отечественном рынке автомобилем. Согласно разработанному методу проведены расчет и оценка поведения основных элементов КЭМ кузова в исходном варианте и выполнена общая проверка на удовлетворение требованиям правил ЕЭК ООН. Была выявлена недостаточная жесткость кузова (отмечена травмируемость манекена), что повлекло за собой необходимость доработки кузова (была повышена жесткость зоны моторного щита, локальных зон лонжеронов и применен пеноалюминий в лонжеронах).

Анализ результатов расчета доработанного кузова (см. рис. 3) показал, что лонжерон деформируется в осевом направлении с незначительным изгибом (в то время как в исходном кузове лонжерон изгибался существенно вследствие образования пластического шарнира), и отличается увеличенной энергоемкостью по сравнению с исходной моделью. Максимальное перемещение лонжерона в продольном направлении не превысило 509 мм (табл. 1). Характер деформации основных элементов кузова отличается в лучшую сторону по сравнению с исходной моделью за счет перераспределения усилий между основными силовыми элементами. В нижней части кузова и элементах пола закручивание, имевшее место ранее, практически отсутствует ввиду общего увеличения крутильной жесткости конструкции. Перемещения оконных и дверных стоек не превышают 70 мм, что объясняется отсутствием в модели силовых элементов дверей и лобового стекла. График ускорения центра масс головы манекена представлен на рис. 6.

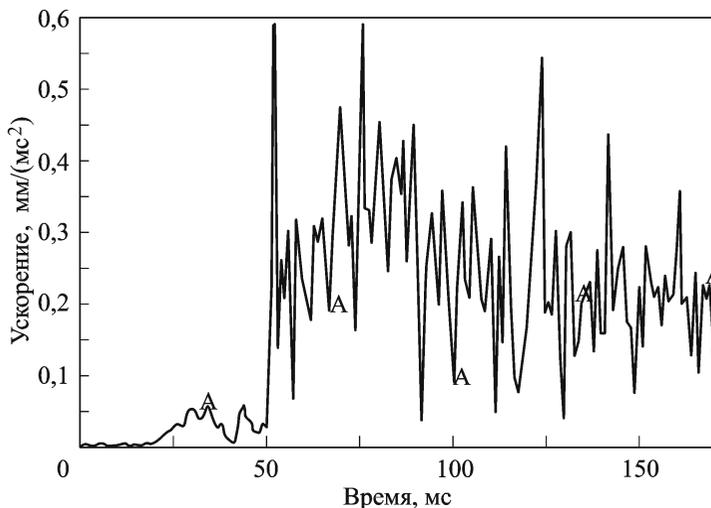


Рис. 6. Ускорение центра масс головы манекена модели с пеноалюминием

Максимальное значение ускорения не превышает 59,7 g в течение 3 мс, что является допустимым значением.

Основные критерии травмирования манекена несколько увеличились из-за общего увеличения жесткости, но не превысили допустимых значений. Например, критерий травмирования головы составил $HPC = 0,162 \text{ кН} < [HPC]$ (допустимое значение $[HPC] = 1 \text{ кН}$).

В данном случае дополнительно проведена оценка по сохранению рекомендуемого жизненного пространства, поскольку в исходной модели происходил удар ступней манекена о моторный щит. После удара жизненное пространство не нарушается, а расстояние от точки Н манекена до моторного щита в продольном направлении увеличилось и составило 1100 мм при рекомендованных 900 мм.

В таблице приведены данные по изменению расстояния между контрольными точками в кузове и увеличению энергоемкости исходной модели.

Результаты расчетов

Модель	Продольное перемещение Δl , мм	Энергоемкость, кДж/м	Увеличение энергоемкости
Исходная	780	44,27	–
Доработанная	509	67,85	+ 35 %

На рис. 7 приведены графики изменения продольных расстояний между контрольными точками (одна из которых — крайняя в лонжероне, другая — крайняя точка на заднем бамперном щите), позволяющие выполнить сравнительный анализ осевой жесткости и особенностей деформации лонжеронов исходной и доработанной моделей.

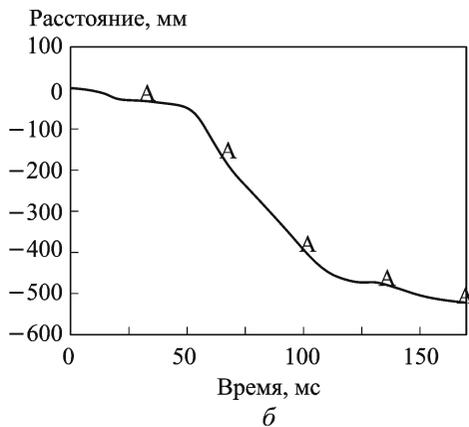
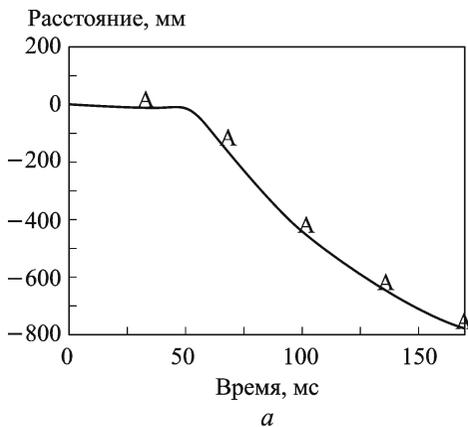


Рис. 7. График изменения продольных расстояний между контрольными точками исходной (а) и доработанной (б) моделей

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Предложенные КЭМ показали удовлетворительный результат. Погрешность расчета ускорения головы манекена по сравнению с экспериментом составила 20 %.

2. Применение разработанного метода к кузову автомобиля ВАЗ позволило увеличить на 35 % энергоемкость передней части кузова в продольном направлении и уменьшить на 271 мм перемещения лонжеронов в осевом направлении. После удара жизненное пространство не нарушается.

3. Применение пеноалюминия позволило существенно увеличить жесткость на сжатие лонжеронов, уменьшить влияние концентраторов напряжений.

4. Предложенная модель удовлетворяет правилам ЕЭК ООН № 94.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bois du P. Vehicle Crashworthiness and Occupant Protection // American iron and steel institute, Southfield (Michigan), 2004. 16 p.
2. Зузов И. В. Моделирование продольного смятия передних лонжеронов кузова легкового автомобиля с учетом инициаторов деформаций // Изв. вузов. Машиностроение. 2011. № 1. С. 34–37.
3. Зузов И. В., Зузов В. Н. Моделирование продольного смятия передних лонжеронов кузова легкового автомобиля с учетом наполнителей и инициаторов деформаций // Изв. вузов. Машиностроение. 2012. № 2. С. 42–45.
4. Trylend T. Alternative models of the offset and side impact deformable barriers // 9th European LS-DYNA user conference. Raufoss (Norway), 2008. P. 24–39.
5. Nilakantan A. T. Computational assessment of occupant injury caused by mine blasts underneath infantry vehicles // International Journal of Vehicle Structures & System. Vol. 2. 2009. P. 145–149.
6. Nilakantan G. Design and development of an energy absorbing seat and ballistic fabric material model to reduce crew injury caused by acceleration from mine / IED Blast. University of Cincinnati. 2006. 12 p.

REFERENCES

1. *Boisdu P.* Vehicle crashworthiness and occupant protection. American iron and steel institute, Southfield (Michigan), 2004, 16 p.
2. *Zuzov I. V.* Modeling of the longitudinal bearing failure of the car body front rails taking into account deformation initiators. *Izvestiya Vuzov. Ser. Mashinostroenie*, 2011, no. 1, pp. 34–37 (in Russian).
3. *Zuzov I. V., Zuzov V. N.* Modeling of the longitudinal bearing failure of the car body front rails taking into account fillers and deformation initiators. *Izvestiya Vuzov. Ser. Mashinostroenie*, 2012, no. 2, pp. 42–45 (in Russian).
4. *Trylend T.* Alternative models of the offset and side impact deformable barriers, 9th European LS-DYNA user conference, Raufoss (Norway), 2008, pp. 24–39.
5. *Nilakantan G., Tabiei A.* Computational assessment of occupant injury caused by mine blasts underneath infantry vehicles. *Int. J. Vehicle Structures & Systems*, 2009, vol. 2, pp. 50–58. doi: 10.4273/ijvss.1.1-3.07
6. *Nilakantan G.* Design and development of an energy absorbing seat and ballistic fabric material model to reduce crew injury caused by acceleration from mine. IED Blast. Master's Thesis, University of Cincinnati, 2006, 12 p.

Статья поступила в редакцию 12.04.2012

Валерий Николаевич Зузов — д-р техн. наук, профессор кафедры “Колесные машины” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области исследования несущих систем колесных машин.

Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

V.N. Zuzov — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Wheeled Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 70 publications in the field of investigation of load bearing systems of wheeled vehicles.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.

И.В. Зузов — аспирант кафедры “Колесные машины” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области динамики и прочности конструкций колесных машин.

Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

I.V. Zuzov — post-graduate of “Wheeled Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of structural dynamics and integrity of wheeled vehicles.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.