

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.113

С.А. Багичев, Л.Н. Орлов, А.В. Тумасов, В.А. Колтунов

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ВНЕСЕННЫМИ В ЕГО КОНСТРУКЦИЮ ИЗМЕНЕНИЯМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Исследование безопасности наземного транспортного средства проведено расчетным путем на основе метода конечных элементов с применением современных программных комплексов. Использованы специально разработанная подробная конечно-элементная модель автобуса и трехмерный манекен. Анализ выполнен с целью оценки влияния на пассивную безопасность внесенных в конструкцию изменений. Определены картины напряженно-деформированного состояния, выявлены наиболее нагруженные места конструкции, даны контуры остаточного жизненного пространства в виде объемного манекена в положении, соответствующем конечному деформированному состоянию в момент полного поглощения приложенной энергии удара. Представлены графики изменения ударной нагрузки; дана оценка пассивной безопасности.

Ключевые слова: пассивная безопасность, наземные транспортные средства, Правила №29 ООН, Правила №66 ООН, метод конечных элементов, ударные нагрузки, манекен, оценка, напряженно-деформированное состояние.

Введение

Расчетная оценка пассивной безопасности кузовных конструкций особенно актуальна при разработке их модификаций и внесении конструктивных изменений. При этом одним из условий является использование ранее разработанных в процессе проектирования расчетных моделей, адекватно отражающих реальные конструкции. Возможность применения таких моделей предусмотрена и существующими Правилами ЕЭК ООН №66 [1]. Неоспоримым преимуществом расчетов является возможность неоднократного их применения при проведении сравнительных оценок влияния конструктивных изменений на безопасность транспортного средства.

Условия проведения расчетной оценки

Проведем сравнительную оценку влияния изменений с использованием конечно-элементной модели на примере несущей конструкции кузова автобуса, переделанного под лабораторию. В данном случае к нему предъявляются требования Правил ООН №29, соответствующие грузовым автомобилям [2]. Измененная конструкция автобуса должна выдерживать ударные нагрузки маятником в переднюю часть и в стойку лобового окна. Для обеспечения соответствия этим требованиям были выполнены необходимые изменения (усиления) конструкции. Их эффективность влияния на безопасность оценивалась по результатам компьютерного моделирования с использованием современных программных продуктов Nupur Mesh и LSDyna. Расчетная оценка проводилась с использованием ранее разработанной конечно-элементной модели автобуса (рис. 1), использованной для оценки пассивной без-

опасности автобуса при боковом опрокидывании с уступа. Модель была верифицирована в соответствии с методикой, представленной в работах [3-8].

В случае отсутствия модели базовой конструкции необходима ее разработка, обеспечивающая максимальное приближение к реальной конструкции. Затем следует провести ее верификацию в тестовом режиме нагружения, сравнив результаты расчетов с данными натурных испытаний. При этом можно ограничиться расчетом и испытанием отдельной ее секции, в соответствии с требованиями приложения 6 Правил № 66 ООН.

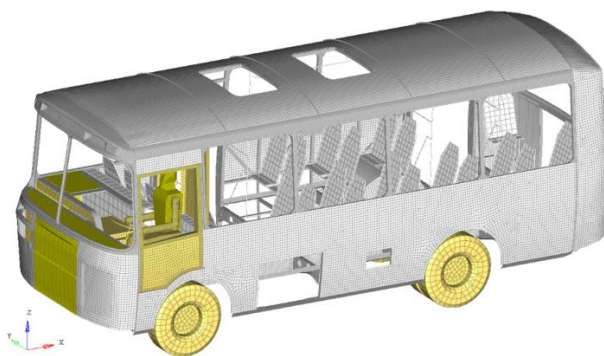


Рис. 1. Конечно-элементная модель транспортного средства

Отлаженная расчетная модель в дальнейшем может использоваться для проведения уточненных расчетов и реализации поставленной цели – оценки пассивной безопасности конструкции с внесенными в нее изменениями. В модель базового автобуса были внесены изменения, соответствующие тем, которые сделаны в рассматриваемой конструкции кузова. На рис. 2 показана модель в исходном состоянии с манекеном при ударе маятником в переднюю часть. В соответствии с требованиями трехмерный пятидесятипроцентный манекен водителя установлен в среднем положении с учетом высоты точки Н. Доработанная модель включает в себя 556311 оболочечных (типа shell) элементов. Из них 550 255 прямоугольных и 6 056 треугольных. Кроме того, она содержит 25 868 элемента сварки (rigids) и 1 989 балочных элемента (beam). Соединения труб каркаса между собой и панелей кузова с трубами представлены в модели элементами сварки по узлам сетки. Сварочные соединения моделируются жесткими элементами. Таким образом, модель отражает реальную конструкцию и включает в себя все силовые элементы кузова, каркасы сидений, поручни, их стойки, воздухопровод, перегородку за водителем и их связи с боковинами. В данной модели воспроизведены все геометрические и физические свойства кузова, что позволяет проводить оценку пассивной безопасности транспортного средства. Расчетная модель транспортного средства имеет внешнее закрепление (опоры). В ней дополнительно учтены элементы, усиливающие переднюю часть кузова в продольном направлении, связи опор двигателя с лонжеронами основания и лонжероны в передней части.

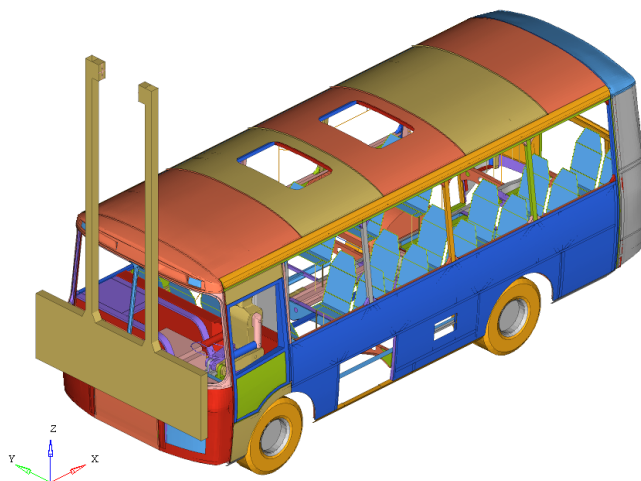


Рис. 2. Условия нагружения конечно-элементной модели транспортного средства ударом маятника в переднюю часть

Анализ результатов компьютерного моделирования аварийных ситуаций

Анализ результатов показал, что модель кузова транспортного средства имеет деформации в допустимых пределах. При этом ни один из деформированных элементов конструкции транспортного средства, в том числе, и рулевое колесо, не входит в зону размещения манекена. На рис. 3 показан деформированный вид транспортного средства.

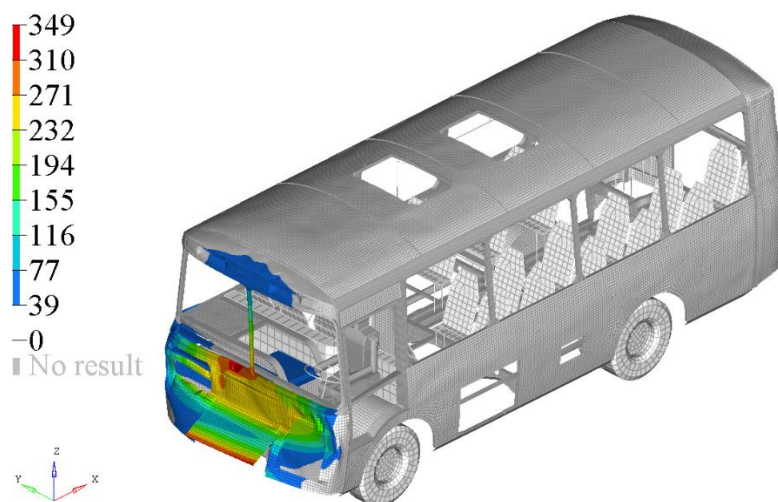


Рис. 3. Деформированное состояние модели с манекеном, деформации в мм

По деформированному виду можно определить характер и места наибольших деформаций, оценить сохраняемость остаточного жизненного пространства для водителя и пассажиров, а, следовательно, и безопасность транспортного средства. Картина напряженно-деформированного состояния всего кузова приведена на рис. 4.



Рис. 4. Напряженно-деформированный вид транспортного средства (вид сбоку), напряжения в МПа

Напряженно-деформированное состояние модели показывает уровень и характер распределения максимальных напряжений, зоны пластических деформаций и относительно слабые места конструкции. Получаемые графические зависимости изменения энергии удара и поглощаемой энергии дают возможность контролировать время протекания процесса и корректность решения.

Важной характеристикой является зависимость силы удара от деформации, получаемая из двух зависимостей – силы (рис. 5) и деформируемости от времени. По этой зависимости можно судить о поглощаемой энергии (энергоёмкости конструкции), темпе нарастания ударной нагрузки и максимальном ее значении, которое сравнивается с регламентируемым значением. Данные параметры важны при проведении сравнительных оценок.

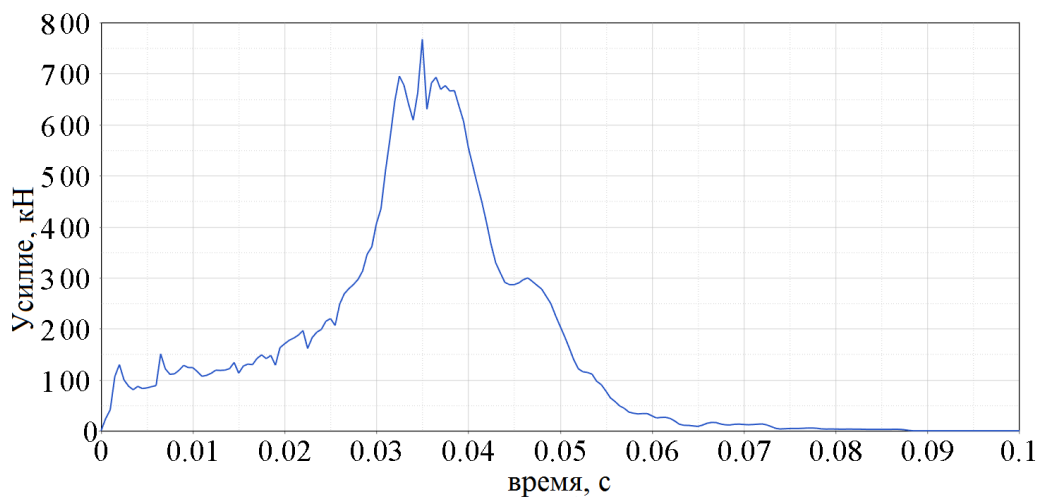


Рис. 5. График изменения ударной нагрузки

По приведенному графику можно определить момент времени ($t = 0,035$ с) соприкосновения маятника с двигателем, нагружения его опор и прилегающих элементов основания. По этой зависимости также можно определить характер разрушения конструкции: момент разрыва сварных точек, «выхода» отдельных силовых элементов из строя или наоборот включения их в работу («пик» на графике изменения силы удара, характеризующийся ударом маятника в двигатель). Падение силы на графике вызвано отскоком маятника после жесткого удара в двигатель. Все это необходимо для проведения полноценного анали-

за результатов, осуществления окончательной оценки поведения кузовной конструкции и ее пассивной безопасности.

Полученные результаты говорят о том, что внесенные в конструкцию изменения способствуют обеспечению ее безопасности при данном виде нагружения, имитирующем аварийную нагрузку при столкновении транспортного средства с плоским препятствием.

Условия нагружения транспортного средства при компьютерном моделировании [5] воспроизведены в соответствии с требованиями Правил № 29-03 ООН (рис. 6), ударом маятника в среднюю часть стоек лобового окна. Модель закреплена неподвижно и подвергается удару жесткого цилиндра, которому сообщается соответствующая энергия. Принимаемое значение энергии удара согласно требованиям Правил составляет 29,4 кДж.

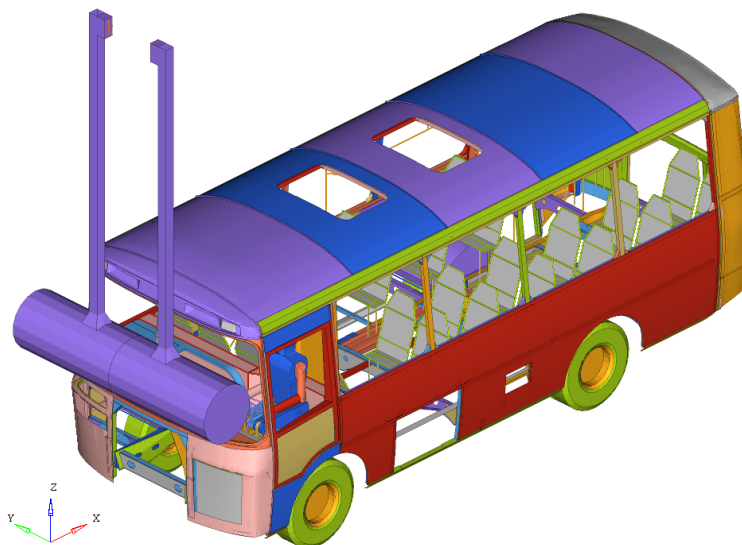


Рис. 6. Условия нагружения конечно-элементной модели транспортного средства в стойки лобового окна

На рис. 7 показан деформированный вид модели. При этом ни один из элементов конструкции не входит в зону расположения манекена, что отвечает требованиям пассивной безопасности. Напряженно-деформированный вид показан на рис. 8.

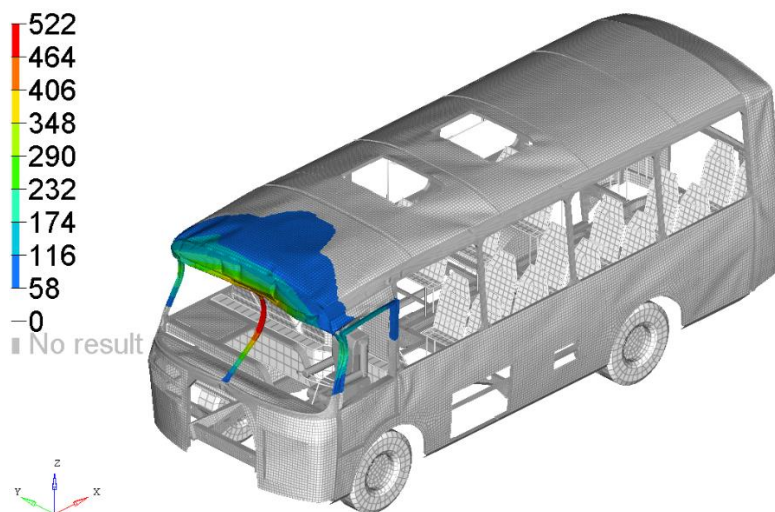


Рис. 7. Деформированный вид транспортного средства, деформации в мм

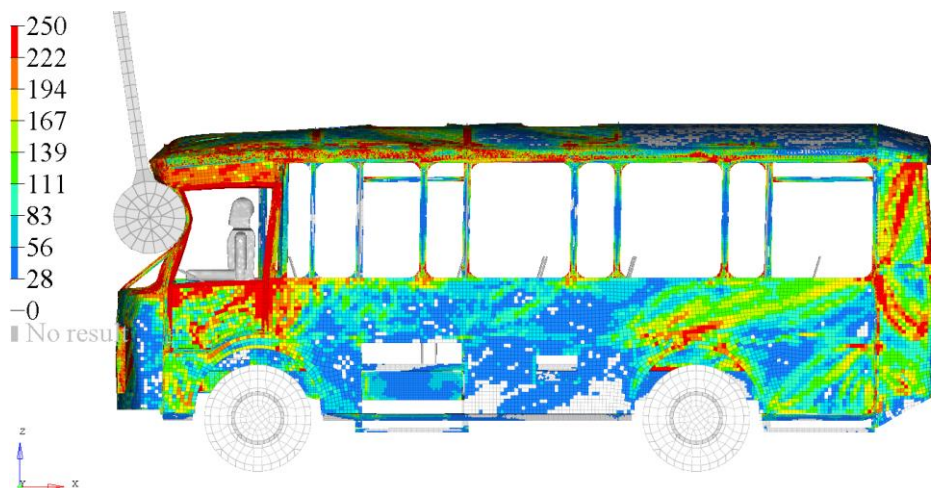


Рис. 8. Напряженно-деформированный вид транспортного средства (вид сбоку), напряжения в МПа

Наибольшие напряжения и зоны пластических деформаций сосредоточены в кабиной части транспортного средства в зонах, расположенных выше подоконного пояса. При этом незначительная энергия распространяется на оставшуюся часть кузова.

График изменения нагрузки во времени показан на рис. 9. Максимальное значение нагрузки достигается при $t = 0,082$ с, т.е., за более длительный период в сравнении с ударом маятника в переднюю часть. При этом сохраняется необходимое жизненное пространство для водителя и сидящего рядом пассажира, ни один из элементов конструкции в него не входит.

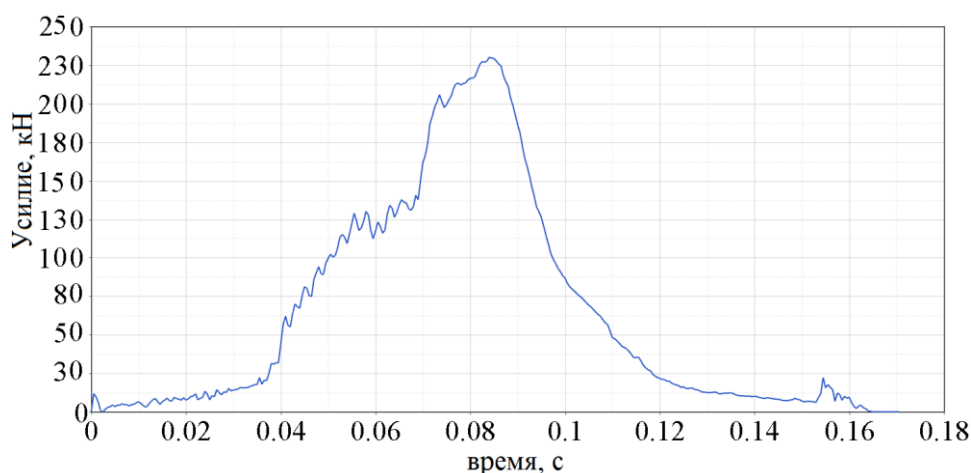


Рис. 9. График изменения ударной нагрузки

Спад нагрузки на графике характеризует отскок маятника.

Оценка пассивной безопасности транспортного средства с внесенными конструктивным изменениями

Полученные результаты свидетельствуют о том, что рассматриваемая конструкция удовлетворяет требованиям пассивной безопасности. Учитывая, что рассматриваемый автобус был переоборудован под транспортное средство категории N, на него дополнительно были установлены передние и задние защитные устройства. Предполагалось также, что роль боковых защитных устройств должны выполнять боковины кузова. Обоснованность внесенных изменений в несущую конструкцию также оценивалась по результатам расчетов их конечно-элементных моделей в соответствии с требованиями Правил №№ 93-00 (ППЗУ), 73-

00 (БЗУ), 58-02 (ЗЗУ) ЕЭК ООН. Полученные результаты подтвердили правильность предложенных конструктивных решений и их соответствие требованиям пассивной безопасности.

Необходимо отметить, что экспресс-оценку защитных бамперов и внесенных в их конструкцию изменений можно проводить с применением метода их расчета по предельному состоянию [9-10]. Когда бампер представляется в виде балки с шарнирными или жесткими креплениями в опорах, в зависимости от его реального крепления. При этом определяются пластические моменты сопротивления $W_{пл}$ его сечений около опор и в месте приложения нагрузки; вводятся туда пластические шарниры и рассматривается пластический механизм его разрушения. Далее составляется уравнение равенства работ, совершаемых разрушающей нагрузкой F_p и в пластических шарнирах (1).

$$\int_L (pr + s)^T t dL = \int_L Q^T(U) H(U) dL, \quad (1)$$

где s – вектор проекции внешней нагрузки; t – вектор, касательный к траектории L ; dL – положительная мера (дифференциал) длины траектории L ; A_L и U_L – работы внешних и внутренних усилий, Q – обобщенные внутренние усилия, p – вектор проекции внешних сил на координатные оси.

Поэтому основное уравнение инженерного метода расчета конструкций по предельному состоянию можно записать в виде равенства работ внешних сил и внутренних усилий на возможных вариациях перемещений (2):

$$\delta A = \delta U; \quad \sum_{j=1}^K F_{p_j} \delta S_j = \sum_{i=1}^M Q_i \delta \theta_i \quad (2)$$

где S_j – деформация конструкции по направлению действия j -й внешней разрушающей силы F_{p_j} ; θ_i – угол относительного поворота силовых элементов в i -м пластическом шарнире.

В общем случае под обобщенными внутренними усилиями Q_i , возникающими в пластических зонах (шарнирах), подразумевается действие пластических изгибающих и крутящих моментов, нормальных сил, вызывающих появление этих шарниров. При рассмотрении жестко-пластического характера разрушения конструкции, как уже отмечалось, влиянием упругих деформаций можно пренебречь. В расчетах кузовных конструкций на безопасность это допустимо, так как при их разрушении упругая составляющая деформаций не превышает 10 % от общих значений. Поэтому в случае учета действия в пластических шарнирах только изгибающих моментов при воздействии одной аварийной нагрузки, уравнение (1) можно записать в виде (3):

$$P_p \delta S = \sum_{i=1}^{n+1} M_{пл_i} \delta \theta_i, \quad (3)$$

где n – степень статической неопределимости конструкции.

Предельный пластический момент $M_{пл}$ вычисляется по формулам (4-5):

$$M_{пл} = \int_F \sigma y dF; \quad M_{пл} = \sum_{i=1}^m F_i |y_i + \Delta| \sigma_T, \quad (4)$$

где F_i – элементарная площадка (стенка) тонкостенного сечения; y_i – расстояние от центра тяжести i -й площадки до нейтральной оси сечения; Δ – смещение линии равных площадей сечения относительно нейтральной оси.

Во второй формуле (4) первый множитель представляет собой пластический момент сопротивления $W_{пл_i}$ сечения (5):

$$W_{пл_i} = \sum_{i=1}^m F_i |y_i \pm \Delta|. \quad (5)$$

Зависимость разрушающей нагрузки F_p от параметров конструкции выводится из уравнения (3). После этого в нее подставляются конкретные значения параметров конструк-

ции (l_i – длины участков бампера, $W_{пл}$, σ_T – предел текучести материала). Полученные значения разрушающей нагрузки сравнивается с регламентируемым, после чего оценивается безопасность конструкции.

Выводы

Представленные процедуры компьютерного моделирования аварийных ситуаций и инженерного расчета позволяют проводить качественную и количественную оценку пассивной безопасности наземных транспортных средств, получать подробные наглядные картины напряжённо-деформированного состояния несущих конструкций, значения разрушающих нагрузок, сравнивать их с регламентированными значениями и оценивать влияние вносимых в конструкцию изменений на пассивную безопасность.

Библиографический список

1. Правила ООН № 66 Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения крупногабаритных пассажирских транспортных средств в отношении прочности их силовой структуры.
2. Правила ООН № 29-03 Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении защиты лиц, находящихся в кабине грузового транспортного средства.
3. **Орлов, Л.Н.** Оценка деформируемости секций и пассивной безопасности кузова в условиях, имитирующих опрокидывание автобуса / Л.Н. Орлов, А.В. Тумасов, П.С. Рогов, А.С. Васьурин, К.С. Ившин // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2013. – № 1. – С. 4-6.
4. **Рогов, П.С.** Влияние особенностей процесса опрокидывания автобуса на деформации кузова / П.С. Рогов, Л.Н. Орлов, М.Ю. Зеленев, Р.Н. Шабров // Современные проблемы науки и образования, 2013, № 6 URL: science-education.ru/113-11603 (дата обращения: 14.01.2014).
5. **Орлов, Л.Н.** Повышение пассивной безопасности автотранспортных средств / Л.Н. Орлов, А.В. Тумасов, С.А. Багичев // Труды НГТУ. – 2014. – №3(105). – С. 163-172.
6. **Орлов, Л.Н.** Calculative estimation of passive safety of vehicles bearing structures which constructions were changed or modified / Л.Н. Орлов, А.М. Грошев, А.В. Тумасов // Труды НГТУ. – 2010. – №2(81). – С. 149-155.
7. **Багичев, С.А.** Теоретические основы выбора безопасной силовой схемы кабины / С.А. Багичев, Л.Н. Орлов, К.С. Ившин // ВЕСТНИК ИЖЕВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. – 2011. – №4. – С. 27-31.
8. **Орлов, Л.Н.** Основы разработки конечно-элементных моделей кузовных конструкции автотранспортных средств: учеб. пособие / Л.Н. Орлов, А.В. Тумасов, Е.В. Кочанов, С.А. Багичев, Е.А. Наумов: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2009. – 153 с.
9. **Орлов, Л.Н.** Пассивная безопасность и прочность кузовов кабин автотранспортных средств / Л.Н. Орлов. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2005. – 230 с.
10. **Орлов, Л.Н.** Оценка пассивной безопасности, прочности кузовных конструкций автомобилей и автобусов: монография / Л.Н. Орлов; НГТУ. – Н. Новгород, 2005. – 230 с.

*Дата поступления
в редакцию: 17.01.2020*

S.A. Bagichev, L.N. Orlov, A.V. Tumasov, V.A. Koltunov

**CALCULATIVE ASSESSMENT OF PASSIVE SAFETY
OF A GROUND VEHICLE WITH CHANGES TO ITS DESIGN**

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

Purpose: finite element analysis of changes to the design of ground vehicle, express analysis of protective devices and estimation of its passive safety according to the UN Regulations.

Design/methodology/approach: the construction of a mathematical model based on finite elements and the results of experimental studies and engineering analysis.

Findings: the possibility of crash simulations on the base of stress-strain analysis and breaking load values

Research limitations/implications: the carried out researches allow to apply the developed model for design and calculation of passive safety properties of ground vehicle, evaluate the impact of design changes

Originality/value: the study conducted the comparison between buses and track UN Regulations. An assessment of the bus passive safety under the load conditions regulated by the UNECE Regulations for trucks.

Key words: passive safety, ground vehicle, UN Regulation No. 29, UN Regulation No. 66, finite element method, crash loads, dummy, assessment, design changes, stress-strain state.