УДК 629.113

ПОВЫШЕНИЕ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КУЗОВОВ АВТОБУСОВ

Орлов Л.Н., Рогов П.С., Тумасов А.В., Вашурин А.С.

ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева», г.Нижний Новгород, Россия (603950, ГСП-41, Н.Новгород, ул. Минина, д.24), e-mail: dr_verhovtcev@mail.ru

Рассмотрены мероприятия по повышению пассивной безопасности кузовов автобусов на протяжении всего процесса проектирования. При этом на начальном этапе проектирования выполняется выбор безопасной силовой схемы конструкции на основе результатов расчета по предельному состоянию инженерным методом. Затем по мере разработки конструкторской документации дается оценка пассивной безопасности кузова автобуса. В случае его несоответствия существующим требованиям разрабатываются рекомендации по повышению его пассивной безопасности и обеспечению определенного запаса по несущей способности. Приведены общие рекомендации по усилению кузовов автобусов с целью повышения их безопасности. Они разработаны на основании выполненных многочисленных расчетных и экспериментальных исследований работоспособности кузовов автобусов. Приведенные рекомендации и методы расчета имеют теоретическое и практическое значение.

Ключевые слова: кузова автобусов, повышение безопасности, расчеты, эксперименты, рекомендации.

INCREASING OF THE PASSIVE SAFETY OF THE BUS BODIES CONSTRUCTIONS

Orlov L.N., Rogov P.S., Tumasov A.V., Vashurin A.S.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E.Alekseyev, Nizhny Novgorod, Russia (603950, Nizhny Novgorod, 24 Minin st.) e-mail: dr_verhovtcev@mail.ru

Activities for passive safety increasing of buses bodies throughout the design process is considered in the study. At the initial design stage the selection of the safe framework scheme is performed on the basis of calculation results of the simplified engineering method. Then in process of design documentation development an assessment of bus body passive safety is given. In the case of its discrepancy with existing requirements, recommendations for its passive safety increasing and ensuring of certain reserve of the bearing capacity are developed. In order to increase of passive safety of bus bodies, common recommendations for their strengthening are given. Recommendations are designed on the basis of performed numerous calculative and experimental investigations of bus bodies strength. Given information has theoretical and practical significance.

Keywords: bus bodies, safety increasing, calculations, experiments, recommendations.

Пассивная безопасность автобуса во многом определяется несущей способностью по разрушающим нагрузкам и энергоёмкостью его кузова, которые регламентируются Правилами ЕЭК ООН №66. Указанные свойства и соответствующие им параметры должны формироваться уже на первых этапах проектирования кузова и выбора его силовой схемы. При этом сначала следует определять размеры сечений силовых элементов и их соотношения между собой. Для оценки безопасности силовой схемы, когда отсутствует геометрическая модель кузова и чертежи поверхностей, целесообразно применять инженерный метод расчёта по предельному состоянию [6], включающий следующие основные этапы:

1. Выбор силовой схемы и её стержневой расчётной модели (рис. 1) на основе структурного анализа несущей системы кузова. При этом:

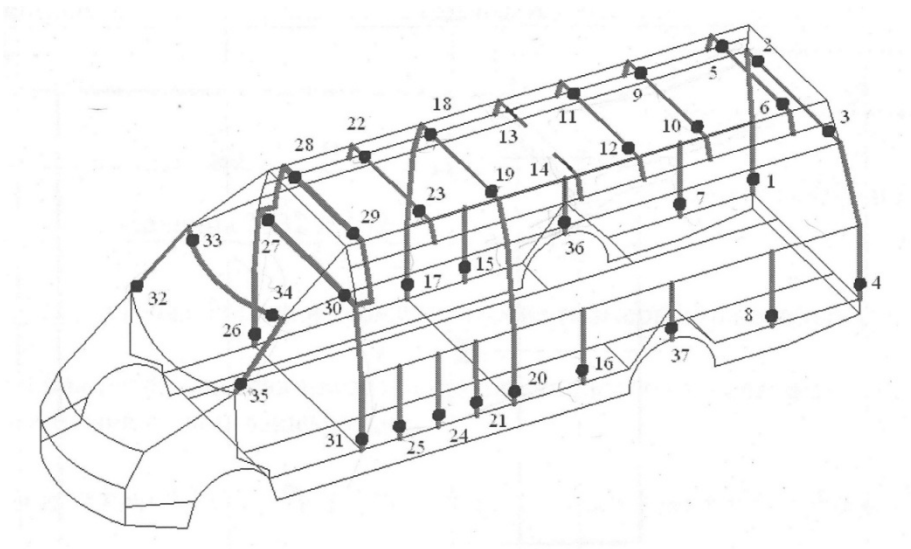

Рис. 1. Силовая схема кузова с характерными зонами расположения пластических шарниров

– стержневые элементы модели должны представлять основные силовые элементы конструкции как по форме, так и по физическим характеристикам;

– внешние опоры модели выбираются шарнирными в местах крепления кузова на подвеске;

– единичная аварийная нагрузка, имитирующая действие реакции опорной поверхности на кузов, прикладывается к боковому силовому поясу крыши в виде сосредоточенных сил, действующих на каждое силовое сечение кузова;

– исходная информация для расчета на безопасность включает в себя координаты узлов модели, длины элементов, моменты сопротивления их сечений, предел текучести материала.

2. Нахождение механизмов разрушения силовых сечений, обеспечивающих необходимую их несущую способность по разрушающим нагрузкам:

– расчётная модель кузова разбивается на схемы поперечных силовых сечений, для каждой из которых рассматриваются все возможные механизмы разрушения;

– определение разрушающих нагрузок Fpi для каждой из схем с использованием алгоритма и программ инженерного расчёта;

– поиск действительных механизмов разрушения по наименьшим значениям Fpi для существующей конструкции или нахождение механизмов разрушения, удовлетворяющих требованиям Fpi > Fрегл.i для вновь проектируемого кузова.

3. Определение разрушающих усилий для секций и кузова в целом. Для прогнозирования безопасности кузова, суммарное усилие, которое может воспринимать кузов в условиях опрокидывания автобуса с уступа, должно быть больше регламентированного значения $\sum_{i=1}^{K} F_{pi} > F_{регл.}$, где K – количество силовых сечений.

Инженерный метод наиболее эффективен при выборе безопасной силовой схемы на начальном этапе проектирования кузова, при проведении экспресс-оценки пассивной безопасности кузова, при выполнении сравнительных оценок безопасности разрабатываемых модификаций кузовов автобусов.

Оценку пассивной безопасности конструкции кузова автобуса можно вести по результатам расчётов и испытаний его сечений в следующей последовательности:

1. Расчётная оценка несущей способности силовых сечений (рис. 2) и секций кузова по разрушающим аварийным нагрузкам Fpi.

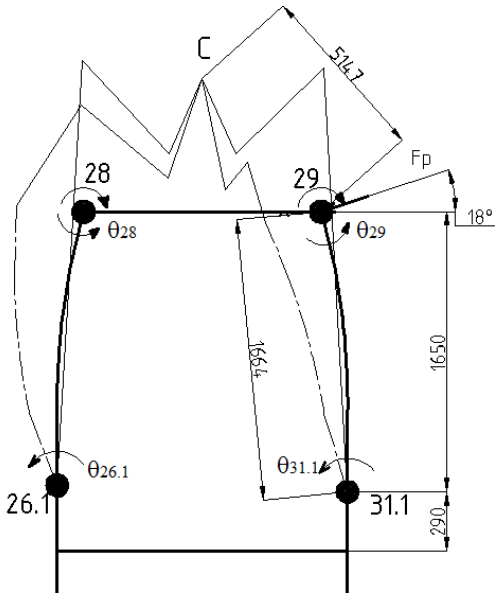

Рис. 2. Возможный механизм разрушения силового сечения

2. Анализ работоспособности на восприятие аварийной нагрузки одной из секций по результатам разрушающих испытаний (рис. 3).

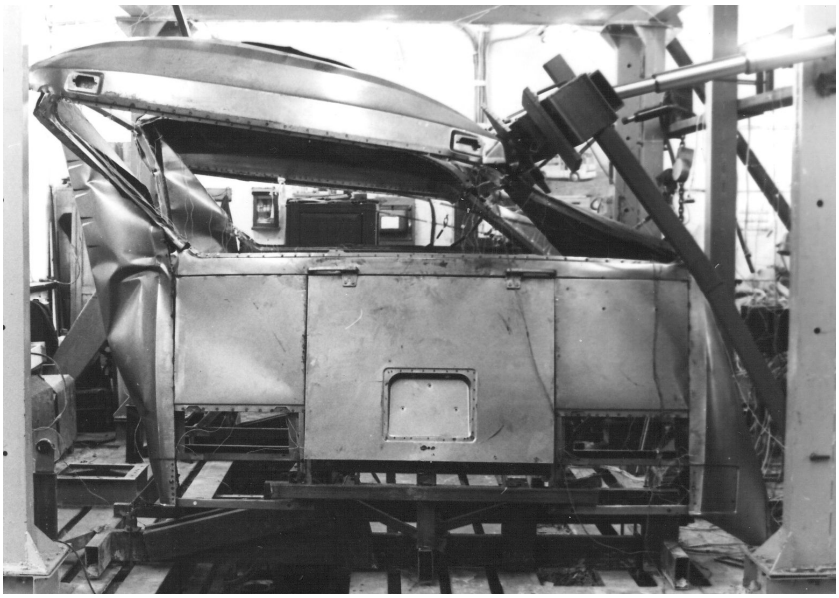

Рис. 3. Фрагмент разрушающих испытаний задней секции кузова

3. Сравнительный анализ результатов расчётов и испытаний с целью установления достоверности получаемых расчётных данных. При необходимости корректировка расчётных моделей.

4. Оценка несущей способности кузова по результатам расчёта его отдельных секций $F_p^{куз} = \sum_{i=1}^{C} F_{pi}$, где с – количество секций.

5. Определение допускаемой деформации (рис. 4.) кузова $S_{доп.} = L_{сал.} - L_{регл.}$, где Lсал. – размеры салона в поперечном сечении кузова, Lрегл. – размеры регламентированного остаточного жизненного пространства для пассажиров и водителя.

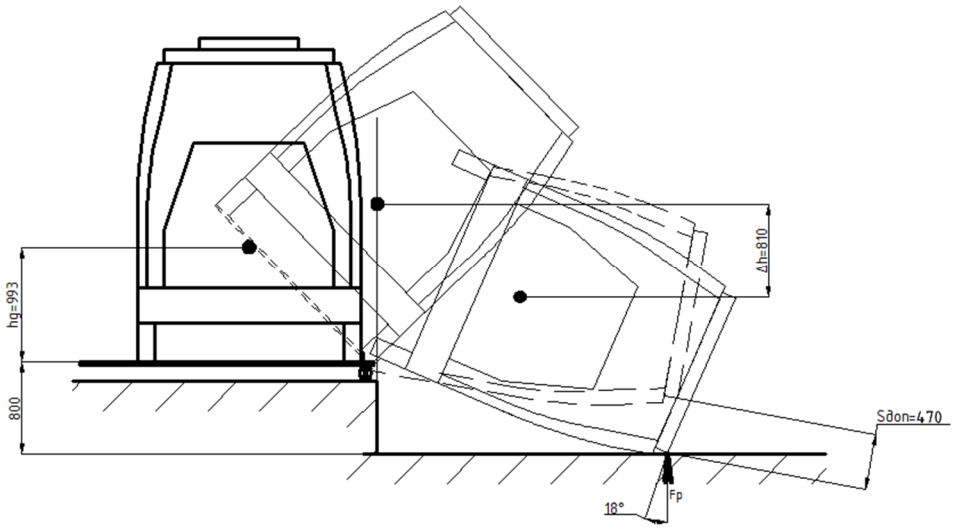

Рисунок 4. Схема опрокидывания модели автобуса

6. Определение энергоёмкости кузова $E_{куз.} = \sum_{i=1}^{K} F_{pi} S_{доп.i}$

7. Оценка безопасности кузова автобуса на основе результатов инженерного расчёта по условиям $E_к > E_{регл.}$, $F_p^{куз.} > F_{регл.}$, $S < S_{доп.}$

По результатам сравнения расчётных значений указанных критериев с регламентируемыми, делается предварительное заключение о соответствии конструкции требованиям безопасности.

На начальных этапах проектирования при выборе силовой схемы повышение безопасности кузова можно осуществлять изменением материала, размеров сечений, толщины стенок; введением дополнительных усилителей; изменением способа соединения элементов и др. Влияние всех этих изменений на пассивную безопасность кузова можно оперативно проверить с использованием инженерного метода расчёта.

После выбора безопасной силовой схемы кузова должна выполняться предварительная оценка её прочности в условиях действия эксплуатационных нагрузок.

Далее разрабатывается конструкторская документация: геометрическая модель, чертежи поверхностей и деталей, на основании которых формируется конечно-элементная модель кузова. Конечно-элементный анализ пассивной безопасности и прочности является неотъемлемой частью современного процесса его проектирования и доводки. Известные существующие программные комплексы LS DYNA, MSC Nastran, Simulia Abaqus, и другие позволяют формировать и рассчитывать подробные модели, максимально отражающие геометрические и физические свойства реальных конструкций. Многолетний опыт проводимых на кафедре «Автомобили и тракторы» НГТУ им. Р.Е. Алексеева работ подтверждает правомерность применяемых принципов компьютерного моделирования, условий нагружения кузова, имитирующих опрокидывание автобуса. С этой целью также были проведены специальные расчётно-экспериментальные исследования на примере характерной конструкции секции каркаса кузова автобуса. Испытание секции проводилось на стенде-опрокидывателе (рис. 5), защищённом патентом на полезную модель [12].

Рис. 5. Исходное и деформированное состояние секции при испытании на опрокидывание

Компьютерное моделирование этого процесса (рис. 6) осуществлено с использованием лицензионных пакетов программ LS DYNA и HyperMesh.

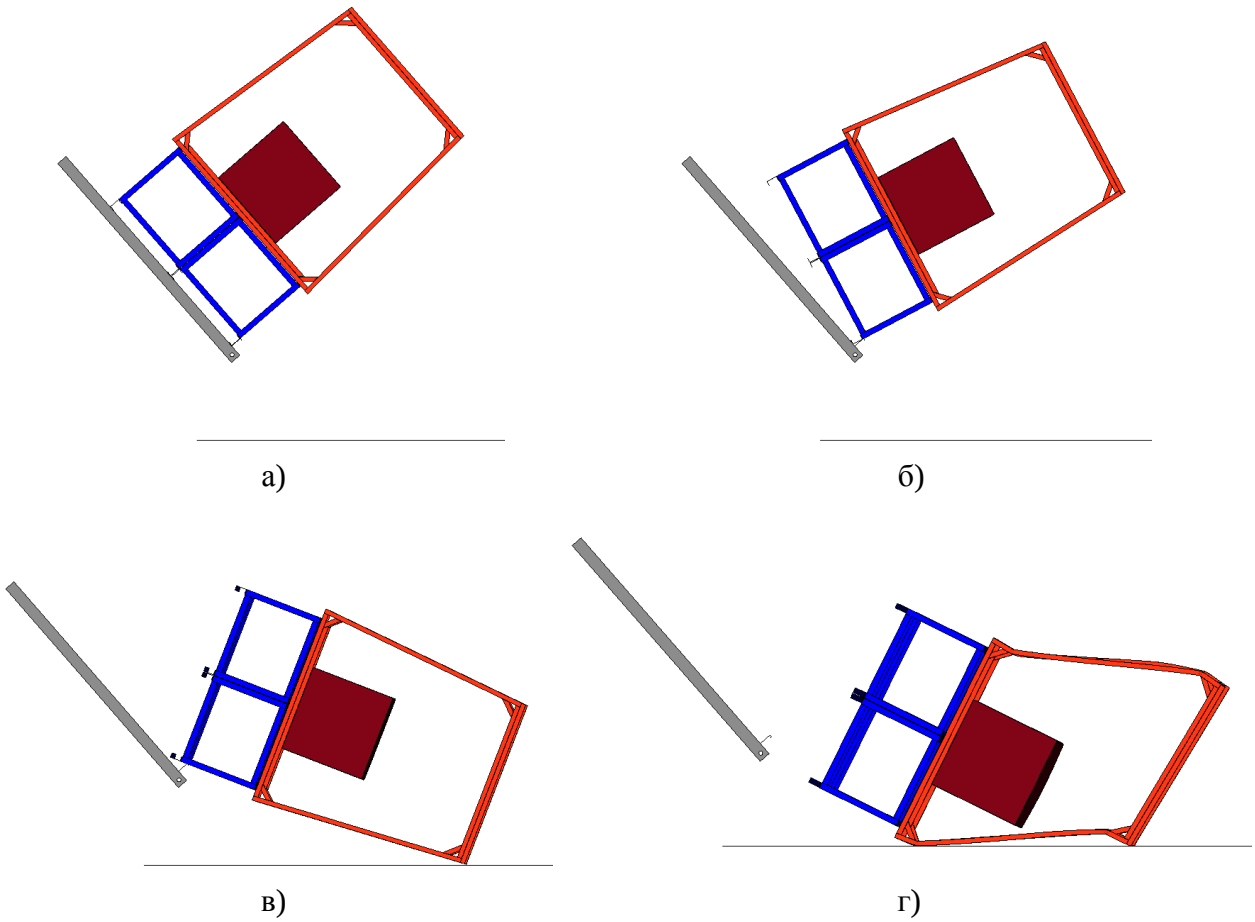

Рис. 6 – Процесс опрокидывания секции по времени t при компьютерном моделировании. а) t=0, б) t=1 с, в) t=1,6 с, г) t=2

На рис. 7 для сравнения показаны деформированные виды секций по результатам расчёта (рис. 7а) и эксперимента (рис. 7б). Более детально сравнение по отдельным характерным зонам показано на рис. 8.

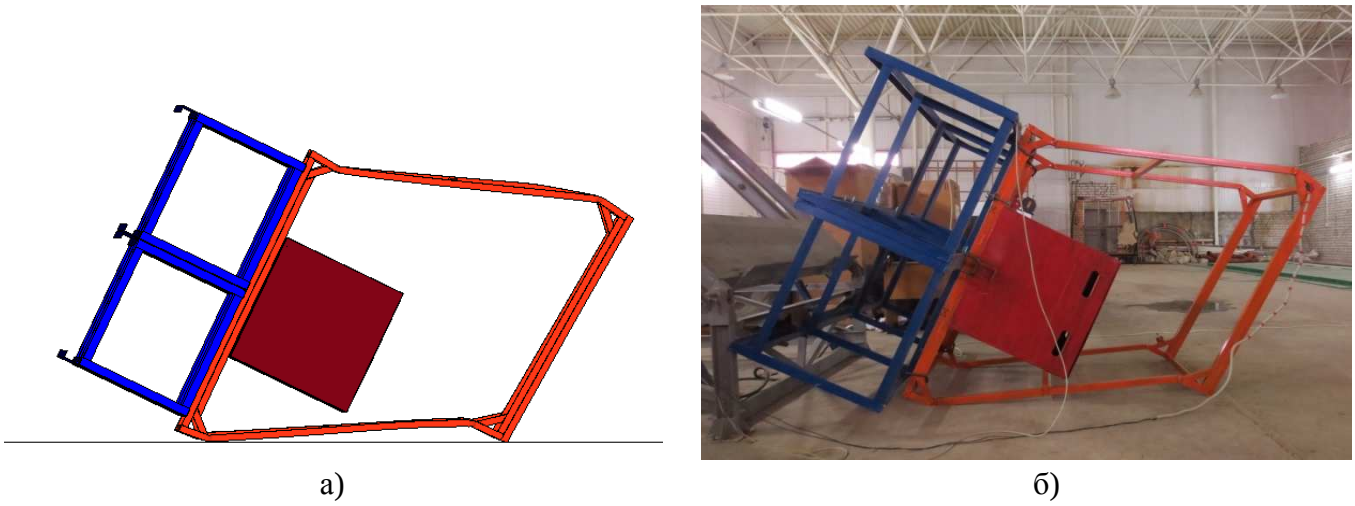

Рис. 7. Деформирование секции при компьютерном моделировании (а) и испытании (б) при опрокидывании

Рис. 8. Увеличенные фрагменты пластических деформаций и полученных зазоров между стойками и углом контейнера с балластом при расчете и эксперименте

Из сравнения картин деформированных состояний расчётной модели и реальной конструкции видно, что они имеют хорошее совпадение по характеру и форме. Это подтверждается и количественным сравнением результатов деформирования секции: изменением геометрических размеров длин отдельных участков, рассмотренным в табл. 1.

Таблица 1 - Изменение геометрических размеров секции

Участок	Эксперимент			Расчет			Расхождение результатов, %
	Длина участка		Изменение длины участка, мм	Длина участка		Изменение длины участка, мм	
	Исход., мм	Деформ., мм		Исход., мм	Деформ., мм		
1-7	2475	1970	505	2488	1982	506	-0,20
1-8	2330	1795	535	2342	1806	536	-0,19
6-2	1920	1602	318	1941	1620	321	-0,94
6-3	1315	1053	262	1331	1062	269	-2,67
3-13	965	1090	-125	969	1102	-133	-6,40
4-13	1720	1880	-160	1737	1909	-172	-7,50
4-12	1990	2313	-323	2007	2345	-338	-4,64
3-12	1410	1623	-213	1427	1638	-211	0,94
5-11	2475	2833	-358	2488	2863	-375	-4,75
11-4	2332	2730	-398	2343	2759	-416	-4,52
6-10	1920	2144	-224	1941	2171	-230	-2,68
6-9	1320	1500	-180	1331	1513	-182	-1,11
9-12	960	780	180	969	786	183	-1,67
8-12	1720	1500	220	1737	1523	214	2,73
8-13	1990	1557	433	2006	1574	432	0,23
9-13	1420	1155	265	1427	1150	277	-4,53

Приведенные в первом столбце таблицы обозначения длин участков соответствуют схеме их расположения на рис. 9. Первая цифра обозначает начало участка, а вторая – его конец.

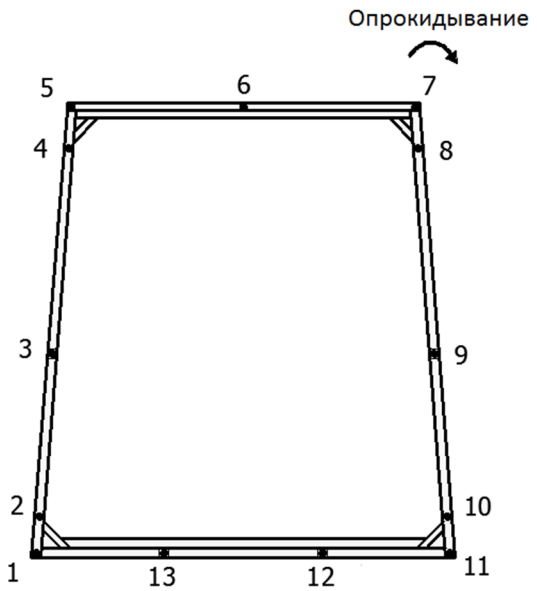

Рис. 9. Обозначение контрольных точек

Из таблицы видно, что максимальное расхождение результатов расчёта и эксперимента составило 7,5%. Следует сказать, что при компьютерном моделировании опрокидывания секции были введены коэффициенты трения между резиновыми прокладками на подставке, секции и упорами, равные 0,6, а между секцией и бетонной опорной поверхностью – 0,9. Значение второго коэффициента выбрано с учётом того, что при испытаниях секция верхними углами врезалась в бетон. Выполненные исследования подтвердили достоверность полученных результатов компьютерного моделирования, что доказывает обоснованность его применения при оценке пассивной безопасности кузовных конструкций автотранспортных средств.

В этой области известны работы В.Н. Зузова, Кима [4],[5], З.А. Годжаева, Ф.А. Фараджаева, Е.А. Матвеева и В.С. Надеждина [2], [3], в которых отдельные поверхности конструкций кузовов автобусов в конечно-элементных моделях представлены регулярными сетками из прямоугольных элементов с относительно большим шагом разбиения. При исследовании прочности конструкций и, тем более, при проведении их оптимизации это является вполне оправданным. Однако, при расчётной оценке их пассивной безопасности этого бывает не достаточно, учитывая то, что реальные конструкции в местах стыковки силовых элементов и особенно обшивки имеют сложные формы, требующие более детального представления в модели. Кроме того, при формировании моделей требуется учитывать шаг расположения сварных точек швов, ширину стенок тонкостенных труб каркаса. При моделировании труб каркаса рекомендуется разбивать каждую стенку не менее, чем на четыре элемента. Исследования показали, что наиболее рациональным в этом отношении является шаг сетки в пределах 10 мм. Для примера, на рис. 10, рис.11, показана модель, в которой сварные соединения представлены жёсткими элементами. Всем элементам модели присвоены характеристики материала с упрочнением, полученные экспериментально [7].

Рис. 10. Конечно-элементная модель кузова автобуса

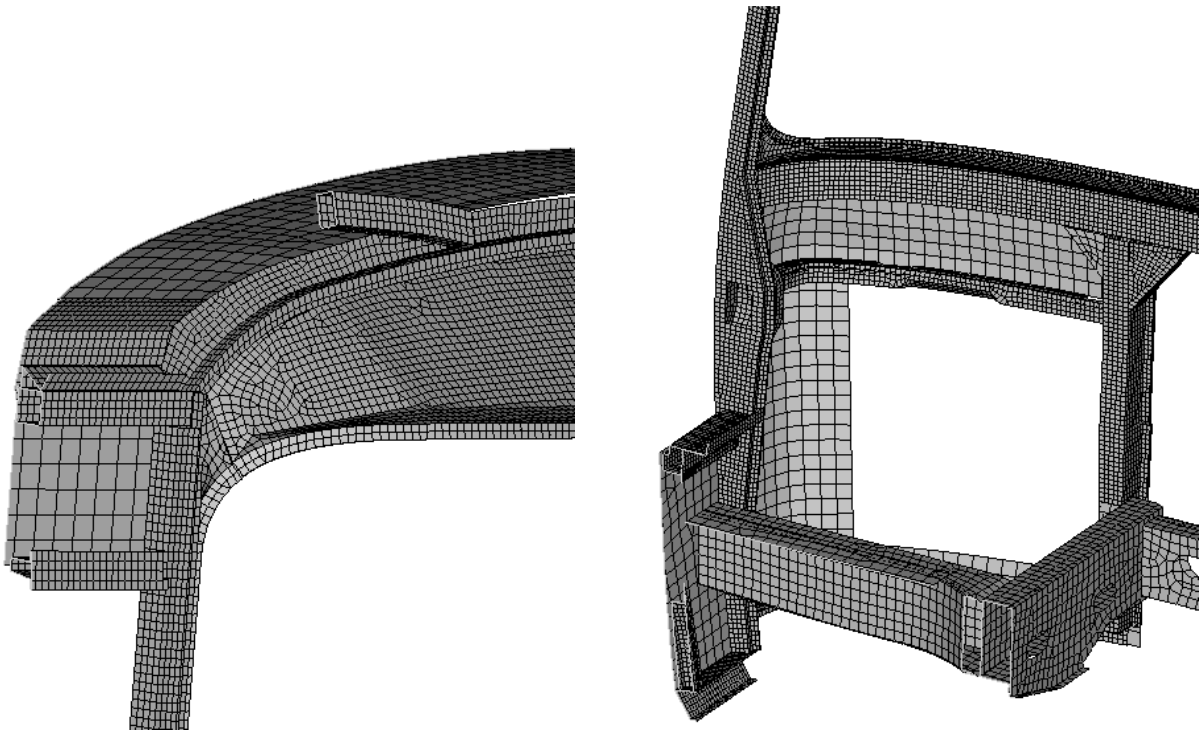

Рис. 11. Отдельные фрагменты передней части конечно-элементной модели

Такая модель достаточно подробно представляет реальную конструкцию, даёт возможность оценивать пассивную безопасность автобуса по результатам деформируемости кузова (рис. 12), изменения энергии удара и её поглощения (рис. 13), изменения ударной нагрузки (рис. 14). Если энергия удара полностью поглощается и при этом деформации кузова не превышают допустимых (внутри салона сохраняется остаточное жизненное пространство, в которое не внедряются его элементы), то считается, что автобус удовлетворяет требованиям безопасности Правил ЕЭК ООН №66. На рис. 12а показано исходное состояние модели с зоной остаточного жизненного пространства.

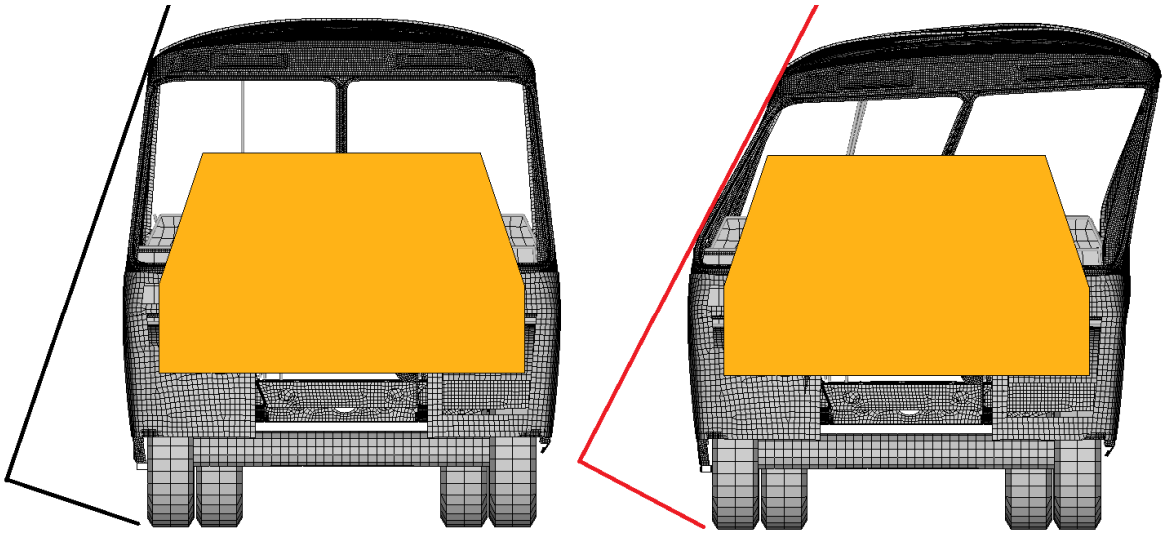

Рис. 12. Исходное (а) и деформированное (б) состояние конечно-элементной модели автобуса

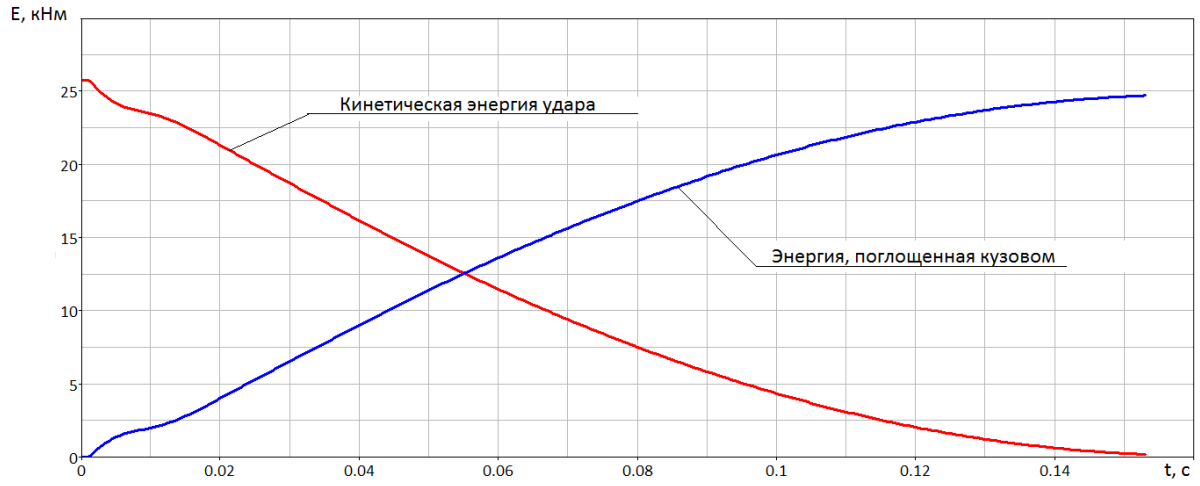

Рис. 13. Изменения энергий по времени

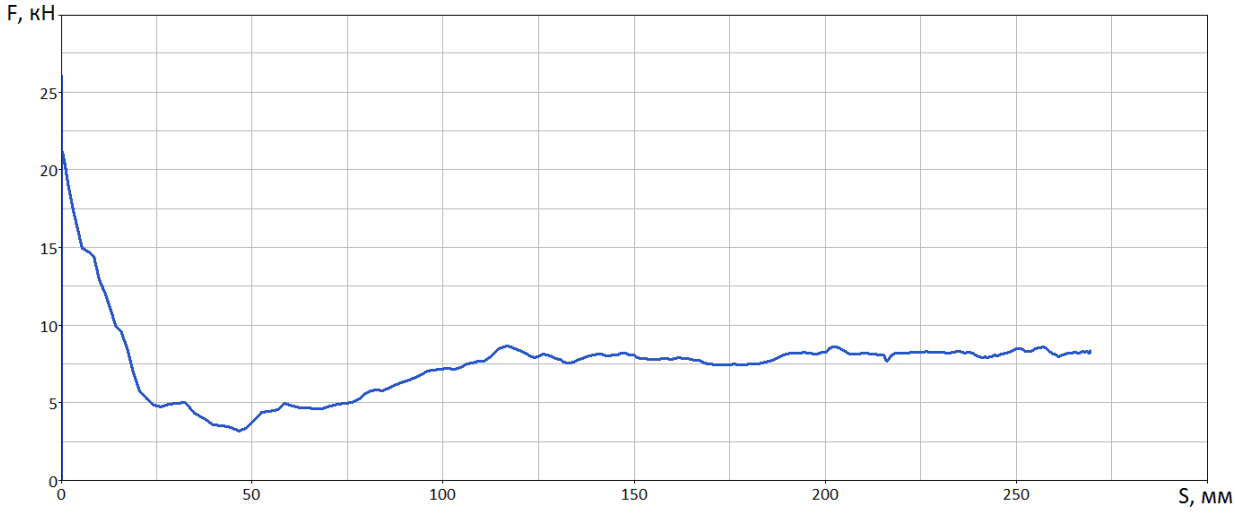

Рис. 14. Изменение ударной нагрузки в зависимости от деформации модели

Слева от модели виден контур поворотной плиты, с помощью которой воспроизводится ударная нагрузка, имитирующая условия (энергию удара и кинематику падения) опрокидывания автобуса с уступа. На рис. 12б приведена картина максимального деформированного состояния модели кузова. Как видно из рисунка, между элементами кузова и регламентируемой зоной остаточного пространства сохраняется достаточный зазор. Полученные результаты компьютерного моделирования подтверждают, что кузов отвечает требованиям пассивной безопасности.

Исследования показали, что при проектировании автобусов необходимо закладывать в конструкцию запас по несущей способности до 30%. Он необходим для компенсации возможного снижения пассивной безопасности в процессе эксплуатации за счёт возможного возникновения дефектов (коррозии металла, трещин, вмятин и др.).

На основании проведённых на кафедре исследований работоспособности кузовов автобусов в условиях опрокидывания, установлено, что повышению их пассивной безопасности способствуют:

– выбор силовой схемы и проектирование каркаса таким образом, чтобы разрушение кузова происходило выше подоконных поясов. В этом случае достигаются наибольшие значения разрушающей нагрузки и энергоёмкости. Они увеличиваются в 2 и более раз в сравнении с тем, когда зоны пластических деформаций находятся у основания кузова;

– включение в силовую схему кузова конструкций каркасов сидений путём их соединения с боковинами, что может повышать запас по безопасности на 15…20%;

– наличие в салоне перегородок, жёстко соединённых с боковинами и основанием кузова, что увеличивает несущую способность кузова в пределах до 30%;

– наличие стоек поручней, надстройки пола и элементов, подкрепляющих связи боковин с основанием на высоте до подоконных поясов;

– включение в силовую схему кузова дверей, которые в зависимости от конструкции и способов их фиксации в проёмах могут повышать пассивную безопасность автобуса до 25%;

Разработанные методики [1], [6]…[11], позволяют оценивать пассивную безопасность кузовов и прогнозировать её повышение на протяжении всего процесса проектирования автобусов. Поэтому они могут быть рекомендованы для практического применения.

Данные исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта по договору № 02.G25.31.0006 от 12.02.2013 г. (постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года №218).

Список литературы

1. Вашурин А.С. Разработка методики и оценка пассивной безопасности кузовов из многослойных панелей вахтовых автобусов. Автореферат дисс…к.т.н. – Н. Новгород, НГТУ: 2014. – 19 с.

2. Годжаев З.А., Фараджев Ф.А., Матвеев Е.А., Надеждин В.С. Особенности расчёта напряжённо-деформированного состояния несущей системы пассажирского автобуса // Журнал ААИ. – 2012. – №4. – С. 20-23.

3. Годжаев З.А., Фараджев Ф.А., Матвеев Е.А., Надеждин В.С. Перспективные методы проектирования несущих систем автотранспортных средств, в том числе по критериям безопасности // Журнал ААИ. – 2012. – №4. – С. 34-38.

4. Ким И.В., Зузов В.Н. Оценка прочности силовой структуры кузовов автобусов методами математического моделирования (часть 1) // Журнал ААИ. – 2008. – №5. – С. 30-31.

5. Ким И.В., Зузов В.Н. Оценка прочности силовой структуры кузовов автобусов методами математического моделирования (часть 2) // Журнал ААИ. – 2008. – №6. – С. 40-41.

6. Орлов, Л.Н. Пассивная безопасность и прочность кузовов, кабин, автотранспортных средств. Методы расчета и оценки: учеб. пособ. / Л.Н. Орлов // НГТУ.- Н. Новгород, 2005 г. – 230 с.

7. Орлов Л.Н., Вашурин А.С., Тумасов А.В., Ившин К.С. Расчетная оценка пассивной безопасности перспективного автобуса // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2013. – №1. – С. 6-11.

8. Орлов Л.Н. Рогов П.С., Зеленов М.Ю., Шабров Р.Н. Влияние особенностей процесса опрокидывания автобуса на деформации кузова / Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6; URL: http://www.science-education.ru/113-11603

9. Орлов Л.Н., Тумасов А.В., Багичев С.А., Феоктистов Н.Ф. Расчётный анализ прочности и деформируемости кузова автобуса / Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 4; URL: http://www.science-education.ru/110-9503

10. Орлов Л.Н., Тумасов А.В., Рогов П.С., Вашурин А.С. Оценка пассивной безопасности автобуса по результатам компьютерного моделирования / Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3; URL: http://www.science-education.ru/109-9423

11. Орлов Л.Н., Тумасов А.В., Рогов П.С., Вашурин А.С., Ившин К.С. Оценка деформируемости секций и пассивной безопасности кузова в условиях, имитирующих опрокидывание автобуса / Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2013. – №1. – С. 4-6.

12. Свидетельство на полезную модель РФ 134870 Стенд-опрокидыватель для оценки пассивной безопасности кузовов автотранспортных средств / Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Орлов Л.Н., Тумасов А.В., Вашурин А.С., Рогов П.С., Герасин А.В. – 27.11.2013 г.

Рецензенты:

Аникин А.А., д.т.н., директор НИЛ ТМ ТТК, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород.

Вахидов У.Ш., д.т.н., заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород.