

УДК 629.113

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

**ПОВЫШЕНИЕ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе отмечается актуальность повышения пассивной безопасности кузовных конструкций, рассмотрены требования пассивной безопасности, предъявляемые к кузовам легковых автомобилей и автобусов, к кабинам грузовых автомобилей. Предложены критерии оценки безопасности конструкций при их проектировании. Рассмотрена новая методика оценки пассивной безопасности конструкций на всех этапах проектирования. Указаны методы расчёта и необходимость проведения отдельных экспериментов для уточнения расчётных моделей и результатов, а также характеристик материалов. Приведены примеры практической реализации методики. Рассмотрены результаты расчётов и испытаний. Даны выводы и рекомендации по повышению пассивной безопасности кузовов и кабин. Представленные материалы могут быть полезны для специалистов, занимающихся расчётной оценкой пассивной безопасности автотранспортных средств.

*Ключевые слова:* кузова, кабины, требования, пассивная безопасность, методика, расчёт, эксперимент, результаты, рекомендации.

Проблема повышения безопасности автотранспортных средств всегда будет актуальной, несмотря на то, что работы в этом направлении постоянно ведутся. В настоящее время все выпускающиеся автомобили отвечают существующим требованиям пассивной безопасности. Однако эти требования постоянно совершенствуются и ужесточаются. Известно, что пассивная безопасность автомобилей и автобусов в большой мере обеспечивается конструкцией их кузовов и кабин. Именно они способствуют поглощению основной части энергии удара, возникающей при дорожно-транспортном происшествии и обеспечивают сохранение внутри салона остаточного жизненного пространства для водителя, пассажиров и уменьшение действующих на них аварийных нагрузок. Поэтому при проектировании продукции автопроизводитель должен предусматривать определённый запас (до 30%) по их несущей способности и безопасности кузовной конструкции. Этот запас должен компенсировать возможное снижение её прочностных и жесткостных характеристик, вызванное возникающими при эксплуатации дефектами, повреждениями и износом.

При проектировании кузовных конструкций важно, с учётом перспективы развития, рассматривать возможность их нагружения в различных аварийных ситуациях, некоторые из которых пока даже не предусмотрены существующими стандартами, но имеют важное значение для снижения травмирования и сохранения жизни человека. Статистика показывает, что дорожно-транспортные происшествия (ДТП) с легковыми автомобилями происходят при столкновениях (фронтальные – 59%, кососимметричные – 35%, боковые – 16%, наезд на автомобиль сзади другого транспортного средства – 10%) и опрокидывании (23%). Грузовые автомобили принимают участие в ДТП [1], [2] при столкновениях (фронтальном с препятствиями – 35%–42%, боковом – 10%) и опрокидывании – 5%–15%. Наибольшая тяжесть последствий ДТП с автобусами наблюдается в случае их опрокидывания, которое составляет около 20% от всех происшествий. На основе материалов статистики разработаны действующие правила и стандарты. Применительно к легковым автомобилям схемы действия на кузов аварийных нагрузок по Правилам ЕЭК ООН приведены на рис. 1.

Кабины грузовых автомобилей должны отвечать требованиям Правил ЕЭК ООН №29. Соответствующие условия их нагружения показаны на рис. 2. На рисунке также рассмотрены критерии и условия оценки пассивной безопасности кабины. Приведён обобщённый график изменения аварийной нагрузки, формулы определения энергоёмкости и разрушающей нагрузки, применяемые в инженерном методе расчёта.

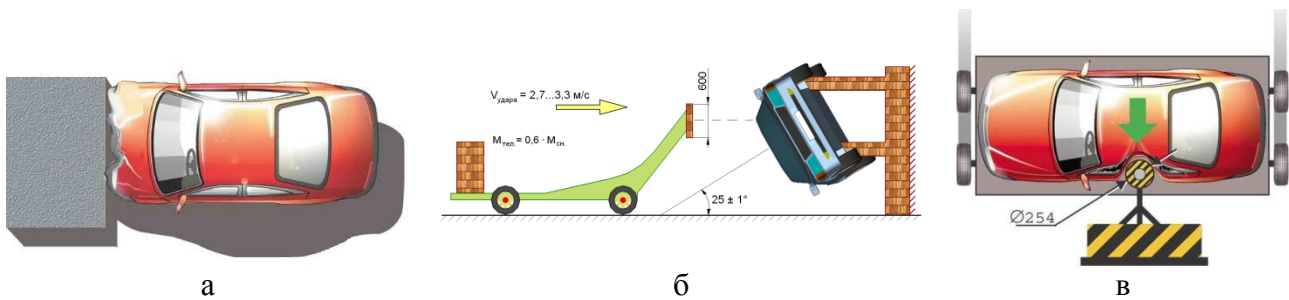


Рис. 1. Схемы нагружения легкового автомобиля при испытаниях с имитацией: а, в – фронтального и бокового столкновений; б – опрокидывания

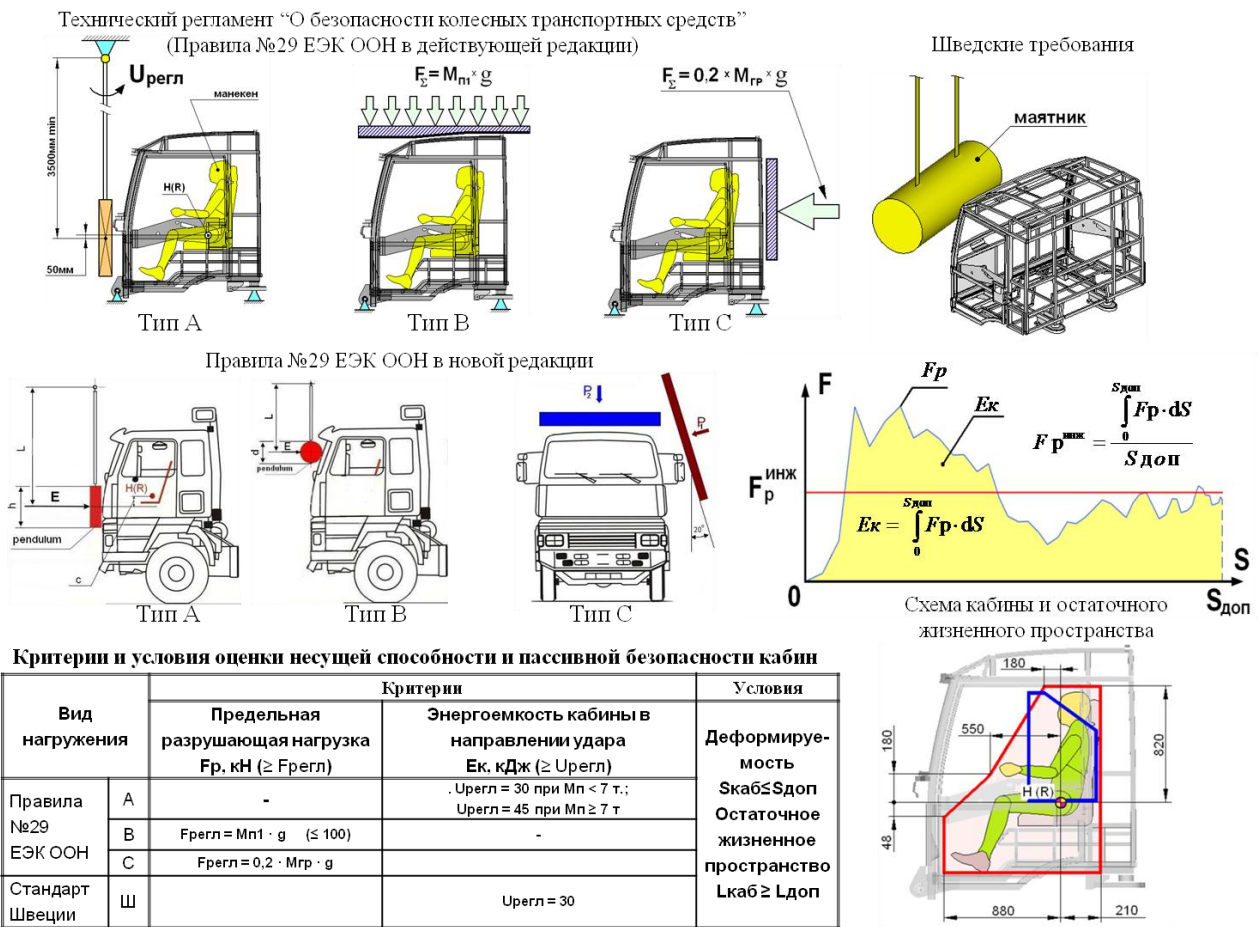


Рис. 2. Схемы нагружения кабины, критерии и условия оценки пассивной безопасности

Для автобусов Правилами ЕЭК ООН №66 оговариваются условия их испытания и расчётов на опрокидывание с уступа высотой 0,8 м (рис. 3).

В соответствии с существующими требованиями и для удобства их применения в процессе проектирования кузовных конструкций на кафедре «Автомобили и тракторы» НГТУ им. Р.Е. Алексеева разработаны критерии оценки пассивной безопасности кузовных конструкций:

1. Энергоемкость конструкции в направлении действия аварийной нагрузки  $E_k$ .
2. Сопrotивляемость конструкции разрушениям, которую характеризуют разрушающая нагрузка  $F_p$ , предельная по текучести нагрузка  $F_T$ .
3. Деформируемость конструкции  $S$  в направлении действия аварийной нагрузки, по допускаемой деформации  $S_{\text{доп}}$ , по сохранению остаточного пространства  $L_{\text{ост}}$ .

4. Перегрузка конструкции по уровню замедления  $j_{\max}$  и скорости нарастания замедления  $V_j$ .

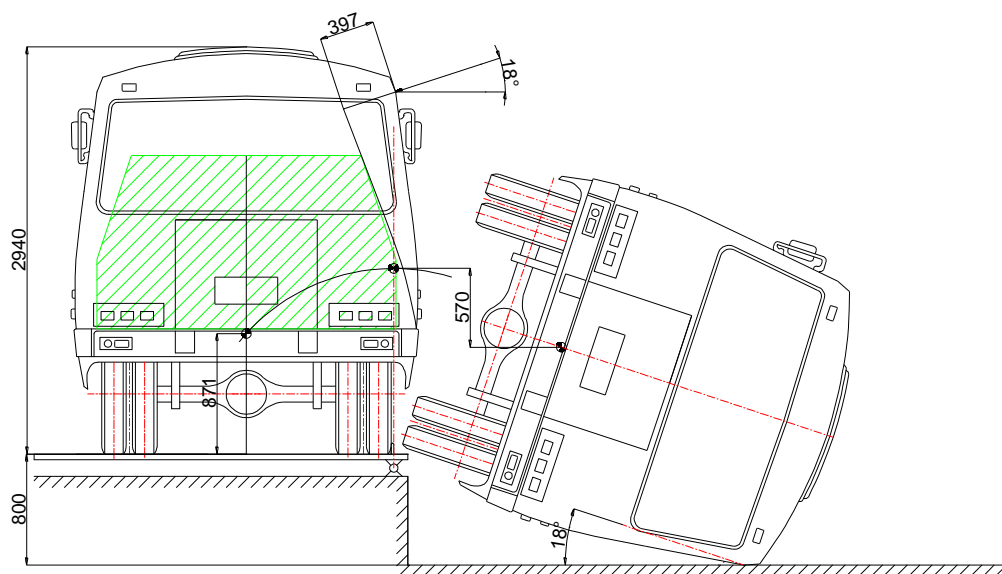


Рис. 3. Схема испытания автобуса на опрокидывание

Предлагаемые критерии согласуются с условиями существующих требований и могут использоваться при проектировании, доводке и сертификации конструкций для проведения расчетно-экспериментальных оценок их безопасности.

Энергоемкость конструкции  $E_k$  (рис. 2) определяется работой, совершаемой разрушающей нагрузкой  $F_p$  на пути деформации конструкции в допустимых пределах  $S_{\text{доп}}$ ,

$$E_k = \int_0^{S_{\text{доп}}} F_p dS . \quad (1)$$

Допускаемая деформация  $S_{\text{доп}}$  определяется как разность между геометрическими размерами салона кузова или кабины и размерами внутреннего остаточного пространства, которое должно сохраняться в салоне при аварии. Фактически  $S_{\text{доп}}$  – это траектория перемещения вектора нагрузки от исходного первоначального контура салона до границы остаточного пространства.

Разрушающая нагрузка  $F_p$  (рис. 2) характеризует стойкость конструкции к разрушению. Этой нагрузке соответствует превращение модели в кинематический пластический механизм.

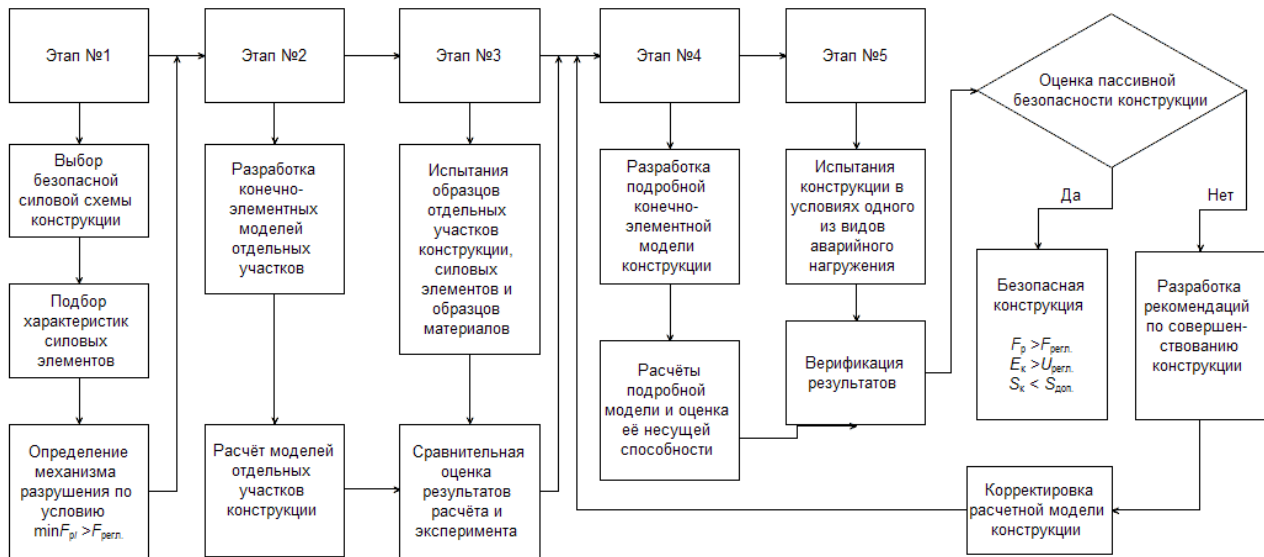
Предельная по текучести нагрузка  $F_T$  – нагрузка, при которой появляется текучесть в крайних волокнах сечения наиболее слабого силового элемента.

Разработанные критерии позволяют оценивать свойства конструкции, определяющие ее безопасность. Оценка безопасности конструкции ведется по рассмотрению, как правило, двух или трех критериев. Один из них взаимосвязан с режимом нагружения, а другие – с измеряемыми параметрами. Конструкция считается безопасной в том случае, если выполняются условия пассивной безопасности

$$E_k \geq E_{\text{регл}} = U_{\text{регл}} ; F_p \geq F_{\text{регл}} ; F_T \geq F_{\text{регл}} ; S \leq S_{\text{доп}} = \Delta_{\text{регл}} ; \\ L_{\text{ост}} \geq L_{\text{регл}} ; j_{\max} \leq j_{\text{доп}} ; V_j \leq V_{j\text{доп}} . \quad (2)$$

Для безопасной конструкции должны выполняться как минимум два условия при рассмотрении статического режима нагружения и три – при ударном воздействии нагрузки. Они позволяют оценивать работоспособность кузовов и кабин на протяжении всего процесса

проектирования – от выбора безопасных силовых схем до завершающих этапов. При этом должны применяться как расчётные, так и экспериментальные (выборочно) методы оценки. Структурная схема разработанной на кафедре методики расчётно-экспериментальной оценки несущей способности по разрушающим нагрузкам и пассивной безопасности приведена на рис. 4.



**Рис. 4. Структурная схема методики расчётно-экспериментальной оценки пассивной безопасности кузовных конструкций при проектировании**

В соответствии с методикой, на начальном этапе проектирования, когда ещё отсутствуют чертежи поверхностей и геометрия кузовной конструкции, должна предварительно выбираться её рациональная силовая схема с учётом требований пассивной безопасности и прочности. При этом должны определяться необходимые размеры конструктивных сечений, их соотношения между силовыми элементами. В этом случае следует применять инженерный метод расчёта конструкций по предельному состоянию, основанный на кинематической теореме [3]. Он позволяет достаточно эффективно рассматривать все возможные механизмы разрушения силовой схемы и её вариантов изменения при разном воздействии квазистатических аварийных нагрузок и выбирать из них наиболее безопасный. Автоматизация этих процедур осуществляется с помощью разработанных на кафедре программ. Например, на рис. 5 приведена блок-схема алгоритма программы [4] выбора безопасных силовых схем кабин грузовых автомобилей.

После предварительного выбора силовой схемы конструкции, разработки поверхностей, панелей и каркаса (если он должен быть) расчётчик может получить необходимую информацию для формирования конечно-элементных моделей (КЭМ) отдельных узлов и участков, силовых сечений и секций. Разработка таких моделей, их расчёт, изготовление опытных образцов и их испытания, сравнительная оценка результатов расчётов и эксперимента, являясь неотъемлемой частью процесса формирования подробной КЭМ всей кузовной конструкции. Такие исследования полезны для проведения верификации результатов; обоснования правомерности используемых принципов, подходов выбора КЭМ и выполнения компьютерного моделирования; уточнения характеристик материалов, коэффициентов трения и других параметров. Это подтверждают проведённые расчётно-экспериментальные исследования узла связи стойки лобового окна кабины с петельной стойкой, результаты которых показаны на рис. 6, а также ранее проведённые расчёты и испытания секций кузова автобуса [5], [6].

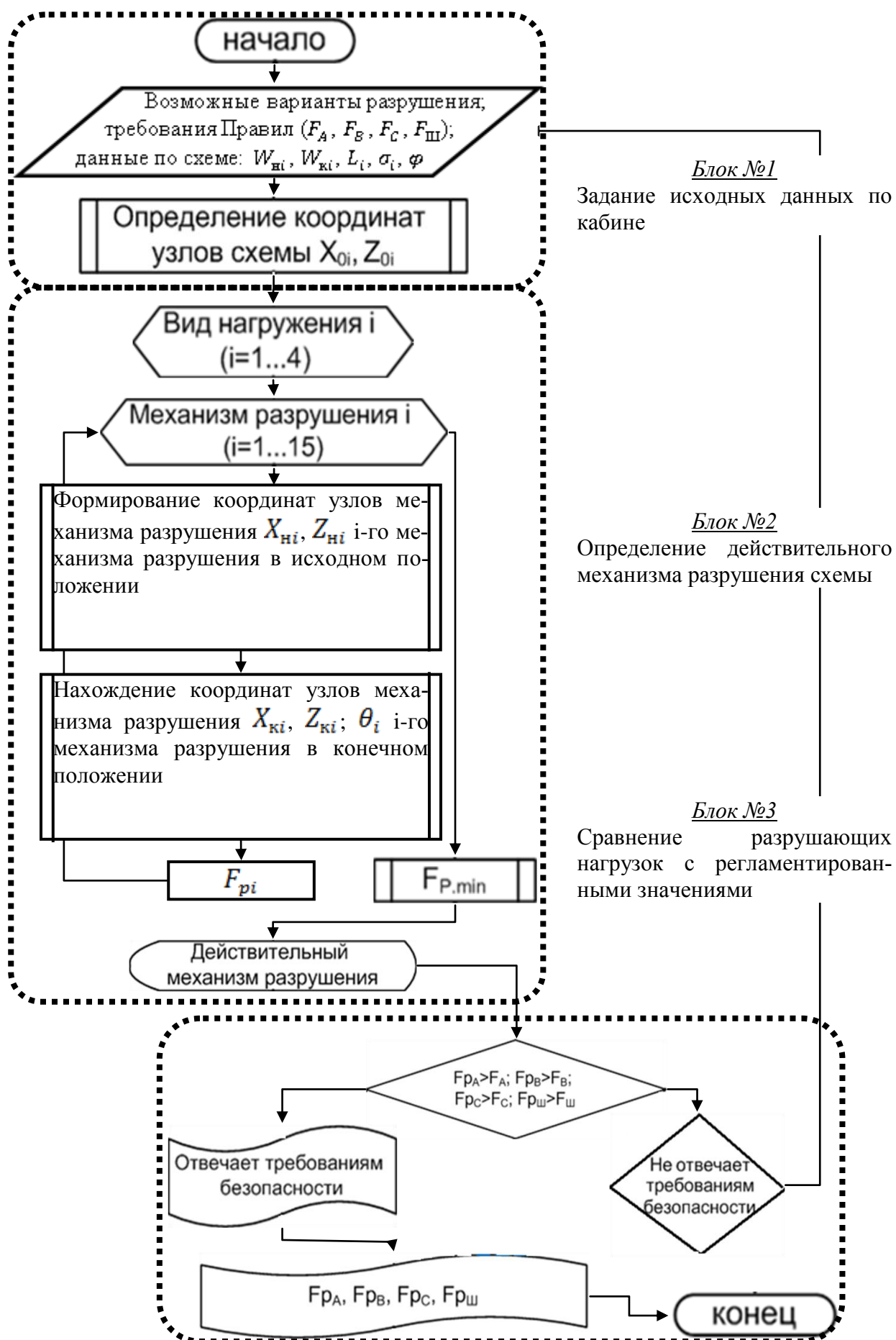


Рис. 5. Блок-схема алгоритма программы



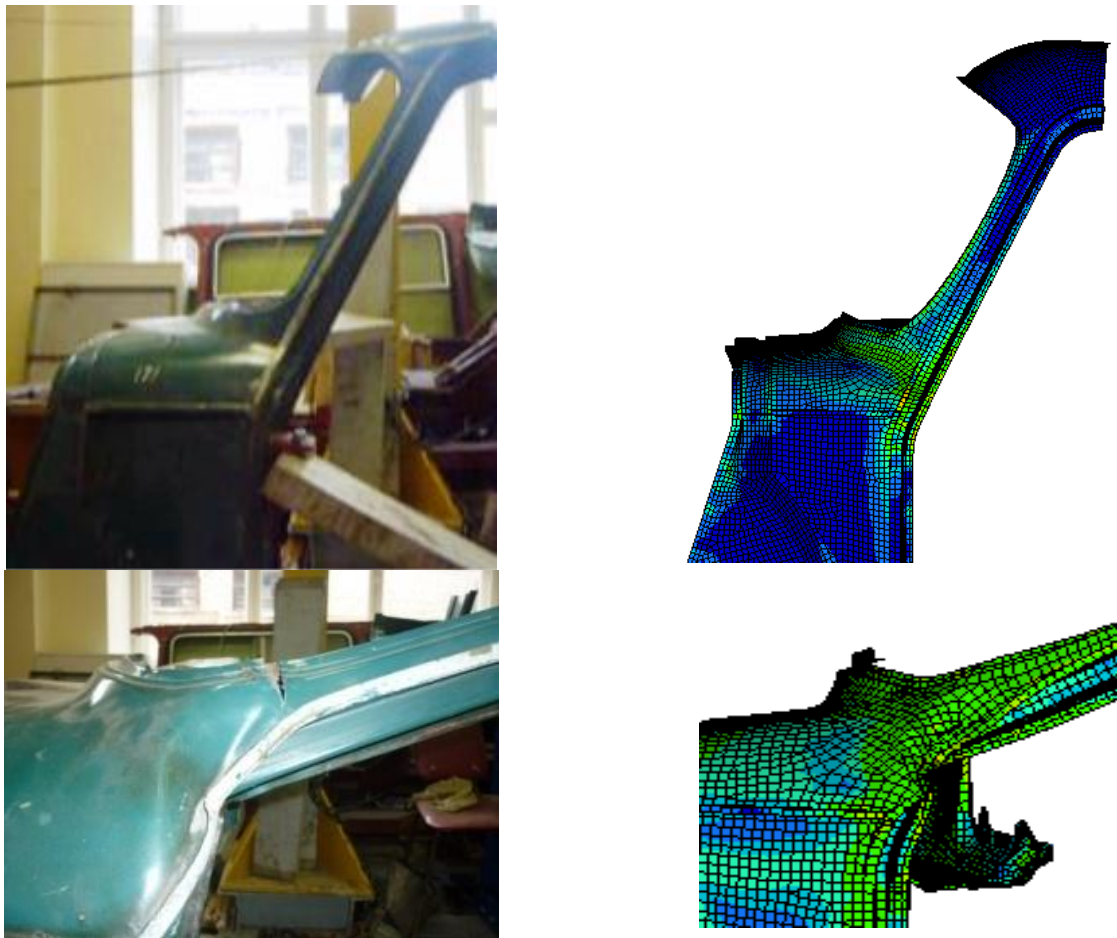


Рис. 6. Результаты расчётно-экспериментальных исследований

Эквивалентные  
напряжения, МПа

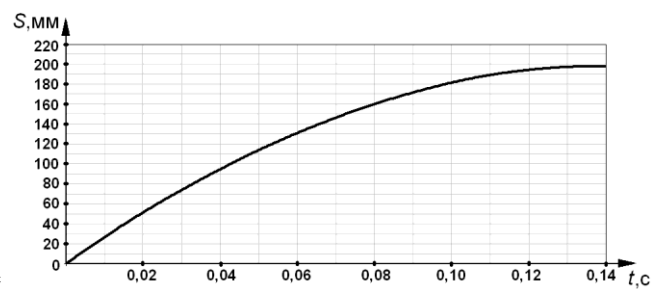
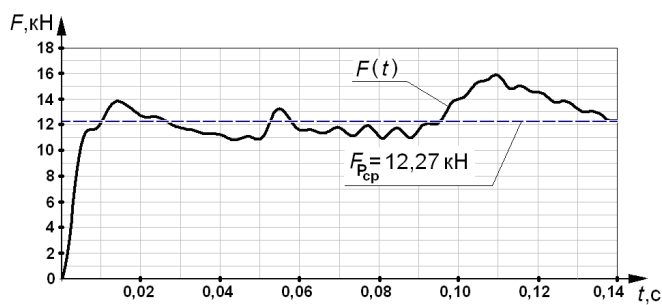
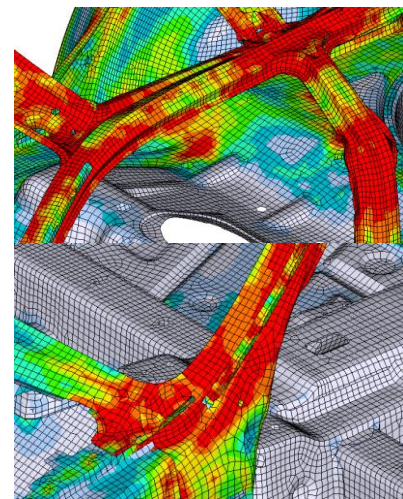
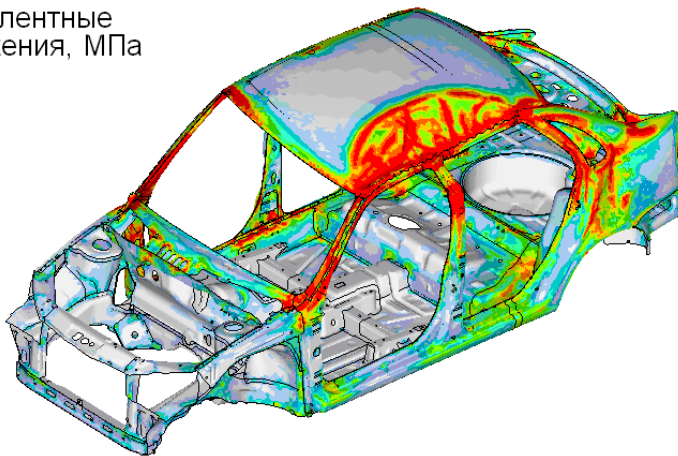
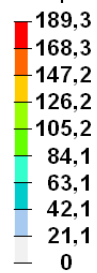


Рис. 7. Деформированный вид модели кузова и графики изменения нагрузки и перемещения

При достижении хорошего совпадения результатов по отдельным узлам можно продолжать разработку КЭМ [7] всей конструкции [8], [9]. Параллельно следует вести подготовку к испытаниям (желательно, динамическим – ударным) хотя бы одного образца конструкции для проведения окончательной верификации результатов. При их хорошей сходимости полученную КЭМ можно использовать для оценки пассивной безопасности конструкции в условиях действия всех регламентированных стандартами видов аварийного нагружения. В этом случае оценку пассивной безопасности изменённых вариантов конструкции (модификаций базовой модели) можно уже осуществлять без проведения экспериментов. Существующие современные пакеты программ, например, LS-Dyna, Abaqus, позволяют это делать на достаточно хорошем уровне.

На рис. 7 показаны результаты расчёта кузова при действии аварийной нагрузки, имитирующей условия, возникающие при опрокидывании легкового автомобиля.

Установлено, что для повышения пассивной безопасности легковых автомобилей необходимо проектировать их энергоёмкие передние и задние части с целью обеспечения поглощения энергии удара. Средняя часть (салон) должна быть относительно прочной, жёсткой и обеспечивать сохранение внутри остаточного жизненного пространства для водителя и пассажиров при всех возможных аварийных ситуациях. Это можно осуществить при наличии прочных порогов, передней, задней и центральной стоек, силовых элементов крыши, расположенных по периметру, надоконных поясов, пояса между центральными стойками и их жёстких связей между собой. Любые конструктивные изменения и мероприятия должны быть направлены на снижение тяжести последствий ДТП и сохранение жизни человека.

На рис. 8 показано испытание бескаркасной кабины грузового автомобиля при вертикальном нагружении, её напряжённо-деформированное состояние, полученное при компьютерном моделировании и пример сравнительной оценки результатов расчёта и эксперимента.

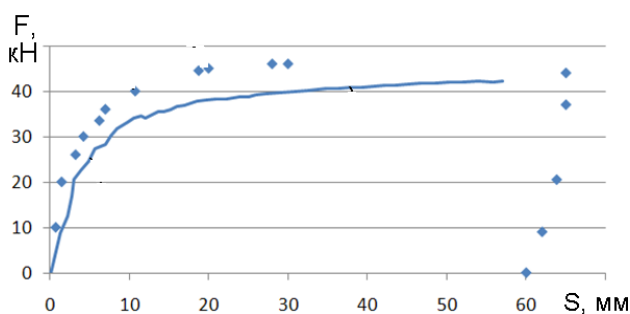
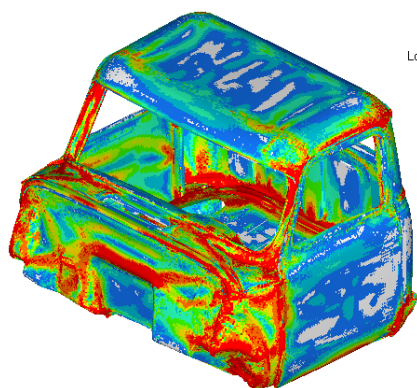


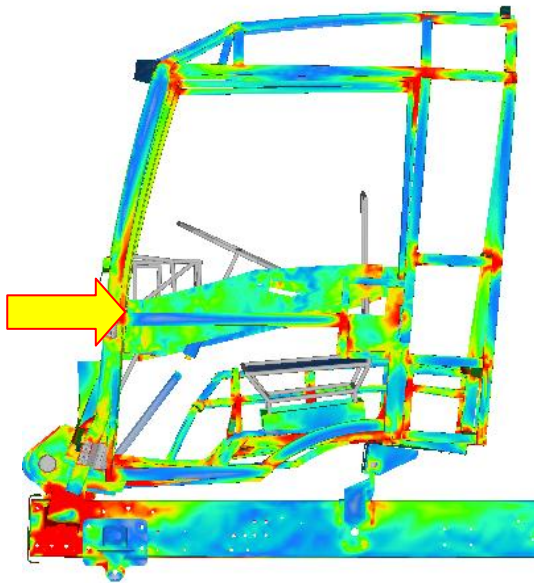
График изменения нагрузки  $F$  в зависимости от деформации  $S$

Точки – эксперимент

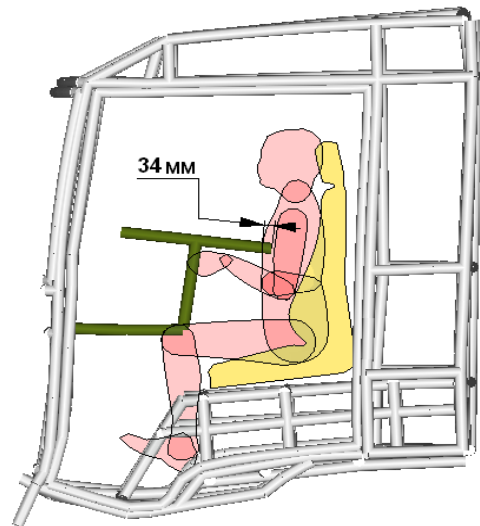
Линия – расчёт

**Рис. 8. Испытание кабины и результаты компьютерного моделирования при вертикальном ее нагружении**

Результаты компьютерного моделирования каркасной кабины показаны на рис. 9. При этом проведены исследования влияния вида модели на результат расчёта – сравнение результатов стержневой модели с подробной. Видно, что при больших пластических деформациях стержневая модель даёт завышенные значения разрушающей нагрузки, поэтому её можно использовать при проведении многовариантных исследований и сравнительных оценок.



Напряженно-деформированное состояние модели кабины при ударном нагружении маятником спереди



Оценка остаточного жизненного пространства в кабине по размещению манекена

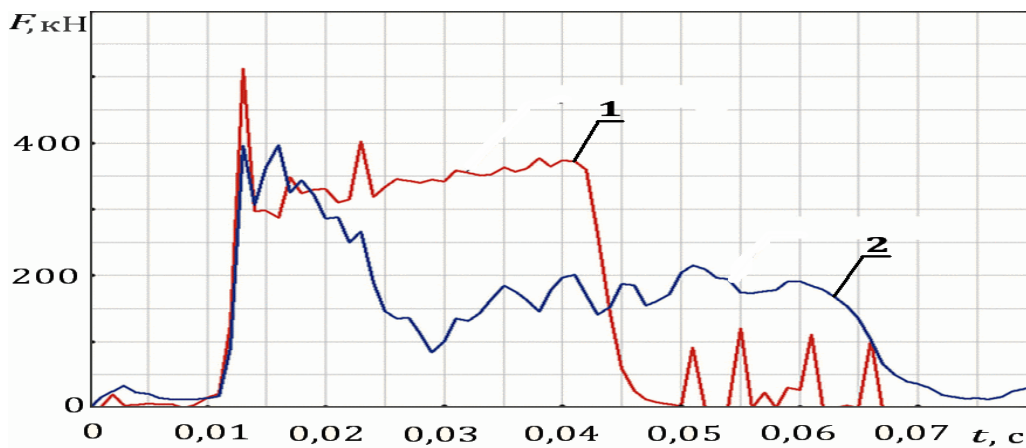


График изменения ударной нагрузки  
1 – стержневая модель; 2 – подробная модель

**Рис. 9. Результаты компьютерного моделирования ударного нагружения каркасной кабины**

Установлено, что повышению безопасности кабин способствуют (рис. 10): усиление нижнего переднего бруса основания (поз. 1); увеличение сечений (не менее 60x40x3) порогов, подоконного пояса и вертикальных стоек передней части (поз. 2 и 3); введение усиливающих раскосов в задних и передних углах основания кабины (поз. 4 и 5) и раскосов в задней стенке кабины (поз. 6); усиление продольных лонжеронов основания (поз. 7); введение брусьев безопасности в дверях (поз. 8).

Деформированные виды кузова автобуса и его задней секции с зонами остаточного жизненного пространства показаны на рис. 11. На основании проведённых исследований подтверждено известное положение о том, что безопасность кузовов автобусов можно оце-



нивать по результатам расчётов и испытаний его отдельных секций, применяя для этого расчётно-экспериментальный метод [3], [5].

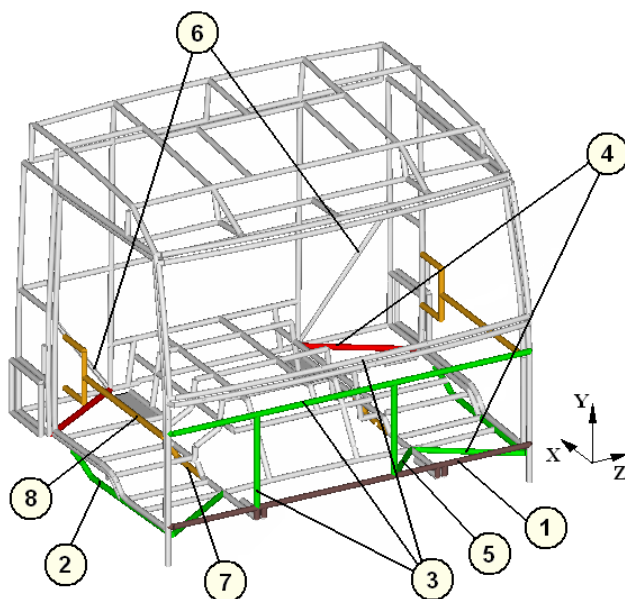


Рис. 10. Элементы, повышающие безопасность кабины

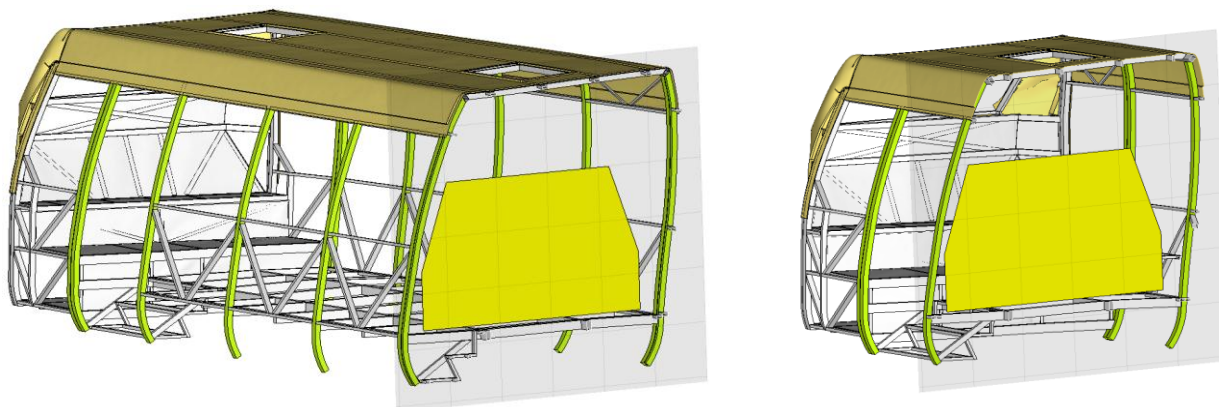


Рис. 11. Деформированные виды моделей каркаса кузова и задней секции автобуса

Установлено, что безопасность кузовов автобусов повышается при наличии внутри салона перегородок и стоек поручней, при жёстком соединении каркасов сидений с боковинами. Повышению безопасности способствует наличие такого каркаса кузова, у которого в случае опрокидывания автобуса зоны пластических деформаций сечений (пластические шарниры) вертикальных силовых элементов боковин возникают как можно выше от основания кузова.

Компьютерное моделирование на основе МКЭ с использованием подробных КЭМ даёт возможность получать уточнённые результаты, необходимые для оценки пассивной безопасности кузовных конструкций на завершающем этапе проектирования.

Рассмотренная последовательность выполнения расчётно-экспериментальных работ позволяет сначала обоснованно прогнозировать безопасность конструкции на основе выбора её силовой схемы, затем проектировать в соответствии с требованиями безопасности и окончательно проверять её на завершающем этапе. Получаемые результаты этой работы должны использоваться соответствующими органами при сертификации автотранспортных средств.

Рассмотренные материалы работы могут быть полезны для специалистов, занимающихся проектированием кузовных конструкций автотранспортных средств и оценкой их пассивной безопасности.

**Библиографический список**

1. **Рябчинский, А.И.** Пассивная безопасность автомобиля / А.И. Рябчинский. – М.: Машиностроение, 1983. – 145 с.
2. European accident research and safety report 2013. Volvo Trucks ([http://www.fahrschule-online.de/fm/3576/European\\_Accident\\_Research\\_and\\_safety\\_report\\_2013.pdf](http://www.fahrschule-online.de/fm/3576/European_Accident_Research_and_safety_report_2013.pdf))
3. **Орлов, Л.Н.** Пассивная безопасность и прочность кузовов, кабин автотранспортных средств. Методы расчёта и оценки / Л.Н. Орлов; НГТУ. – Н. Новгород, 2005. – 130 с.
4. **Багичев, С.А.** Разработка методики расчётно-экспериментальной оценки пассивной безопасности кабин грузовых автомобилей при проектировании. Автореферат дис...к.т.н. / С.А. Багичев; НГТУ. – Н. Новгород, 2013. – 18 с.
5. **Орлов, Л.Н.** Оценка пассивной безопасности, прочности кузовных конструкций автомобилей и автобусов: монография / Л.Н. Орлов; НГТУ. – Н. Новгород, 2005. – 230 с.
6. **Орлов, Л.Н.** Прогнозирование и оценка пассивной безопасности автобусов по результатам расчетов, испытаний кузовов и их отдельных секций / Л.Н. Орлов, Е.В. Кочанов. – Вестник КГТУ. Вып. 39 «Транспорт». – Красноярск, 2005.
7. **Орлов, Л.Н.** Основы разработки конечно-элементных моделей кузовных конструкций автотранспортных средств. Расчеты на безопасность и прочность: учеб. пособие / Л.Н. Орлов, А.В. Тумасов, Е.В. Кочанов [и др.] / под ред. Л.Н. Орлова; Нижегород. гос. техн. ун-т. им. Р.Е. Алексева. Нижний Новгород, 2009. – 153 с.
8. **Годжаев, З.А.** Перспективные методы проектирования несущих систем автотранспортных средств, в том числе по критериям безопасности / З.А. Годжаев, Ф.А. Фараджев, Е.А. Матвеев [и др.] // Журнал ААИ. 2012. №4. С. 34–38.
9. **Зузов, В.Н.** Анализ влияния конструкции автобуса на пассивную безопасность при опрокидывании на основе метода конечных элементов / В.Н. Зузов, Ю.Ю. Карамышев, И.В. Ким // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. С. 145–149.

*Дата поступления  
в редакцию 27.05.2014*

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

**IMPROVING OF PASSIVE SAFETY OF MOTOR VEHICLES**

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

**Purpose:** The paper notes the topicality of improving of passive safety of body structures. The passive safety requirements applicable to the bodies of cars and buses, truck cabs were considered. The criterias for safety estimation of constructions during their designing was also suggested.

**Design/methodology/approach:** A new method of passive safety estimation of construction at all stages of designing was examined. The calculative methods and the need for a separate experiments to refine calculative models and results, as well as the materials characteristics were indicated.

**Findings:** The examples of practical implementation techniques were given. The calculations and tests results were shown.

**Research limitations/implications:** The submitted materials could be useful for the specialists engaged in the calculative estimation of passive safety of vehicles.

**Originality/value:** The conclusions and recommendations for improving of passive safety of the bodies and track cabs were given.

*Key words:* bodies, cabs, requirements, passive safety, method, calculation, experiment, results, recommendations.