

УДК 629.113

Л.Н Орлов, А.М. Грошев, А.В. Тумасов

**РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НЕСУЩИХ СИСТЕМ  
АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ВНЕСЕННЫМИ  
В ИХ КОНСТРУКЦИЮ ИЗМЕНЕНИЯМИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты расчетной оценки прочности и пассивной безопасности несущих систем автотранспортных средств, в конструкцию которых были внесены изменения. Рассмотрены методы компьютерного моделирования аварийных ситуаций, имитирующих условия сертификационных испытаний, а также инженерный метод расчета кузовов и кабин, позволяющий проводить экспресс оценку их пассивной безопасности.

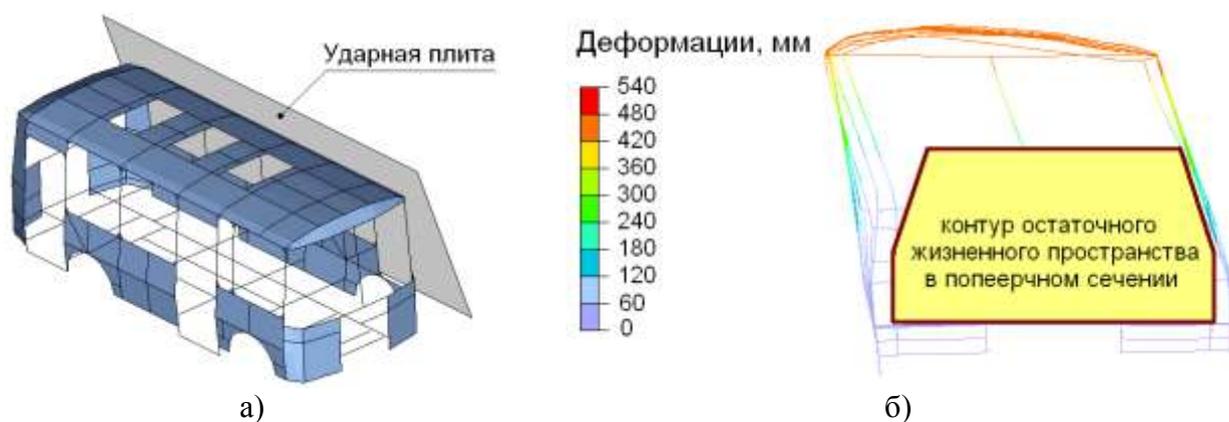
*Ключевые слова:* несущая конструкция, прочность, пассивная безопасность, расчетная оценка

Существующими законодательными документами предусмотрено внесение изменений в конструкцию транспортного средства при условии сохранения или улучшения его эксплуатационных свойств и обеспечения безопасности дорожного движения. Поэтому при изменении несущей системы автотранспортного средства необходимо обеспечить ее прочность, жесткость и пассивную безопасность. В этой связи при выдаче заключения о возможности внесения изменений в конструкцию автомобиля является актуальным проведение экспертной оценки модифицированной несущей системы на соответствие существующим требованиям. Наиболее эффективным в этом случае является применение расчетных методов оценки прочности и пассивной безопасности, которые в настоящее время получили широкое распространение на стадии проектирования и доводки кузовных конструкций автомобилей [1-3]. Они начинают широко внедряться и в процесс экспертной деятельности при проведении сертификации кузовов и кабин. Накопленный опыт работ, существующие возможности математического и программного обеспечений позволяют утверждать, что расчетные методы оценки пассивной безопасности кузовных конструкций автотранспортных средств должны быть неотъемлемой частью их сертификационной оценки.

Как правило, изменения, вносимые владельцами транспортных средств, представляют собой незавершенные решения, и часто требуют доводки или кардинальных изменений. Поэтому важное практическое значение имеют работы, проводимые на кафедре «Автомобили и тракторы» НГТУ им. Р.Е. Алексеева совместно с Центром безопасности дорожного движения и технической экспертизы (ЦБДДТЭ) и Некоммерческого партнерства «Институт сертификации автототехники» (НП ИНСАТ), в области расчетного анализа и компьютерного моделирования поведения измененных конструкций при действии на них аварийных и эксплуатационных нагрузок. Определенный практический интерес представляют результаты работы, выполненной по оценке прочности и пассивной безопасности измененной конструкции кузова автобуса, связанной с заменой заднего аварийного выхода на дополнительную служебную дверь в правой боковине кузова. Оценка пассивной безопасности автобуса была выполнена по результатам компьютерного моделирования динамического нагружения кузова в условиях, имитирующих опрокидывание автобуса с уступа высотой 0,8м, в соответствии с требованиями ГОСТ Р 41.66-99 (Правил ЕЭК ООН №66).

Современные программные комплексы позволяют воспроизвести все условия, возникающие в процессе реального опрокидывания автобуса. Тем не менее, для уменьшения времени на подготовку расчетной модели и ее последующий расчет, допускается рассматривать эквивалентные условия нагружения кузова. Например, ударное воздействие на кузов при оп-

рокидывании автобуса на опорную поверхность можно представить в виде нагружения модели со стороны левой боковины жесткой плитой, имеющей определенные массу и начальную скорость (рис. 1, а). При этом компьютерное моделирование аварийного нагружения позволяет получить полный массив информации о процессе аварийного нагружения: график изменения скорости ударной плиты, график изменения нагрузки, напряженно-деформированное состояние модели. Для примера, на рис. 1, б показан деформированный вид поперечных сечений салона и контуры регламентированной зоны безопасности (остаточного жизненного пространства).



**Рис. 1. Моделирование опрокидывания автобуса:**

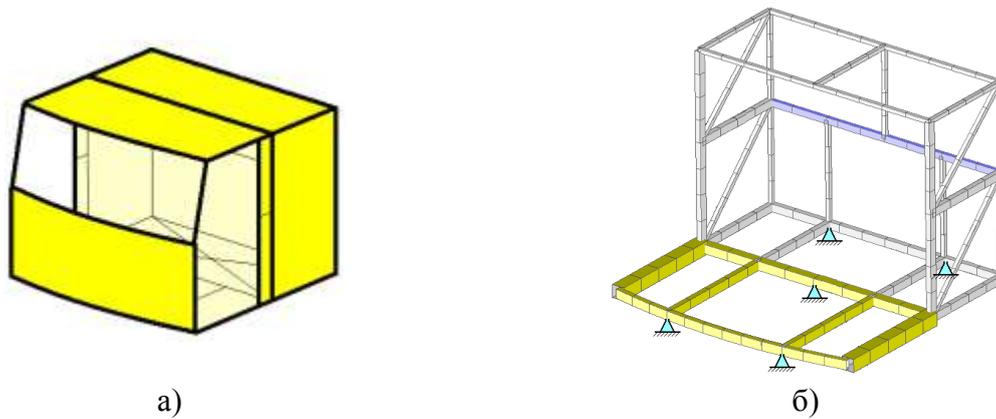
а – схема нагружения модели кузова автобуса;

б – деформации модели кузова и зона безопасности

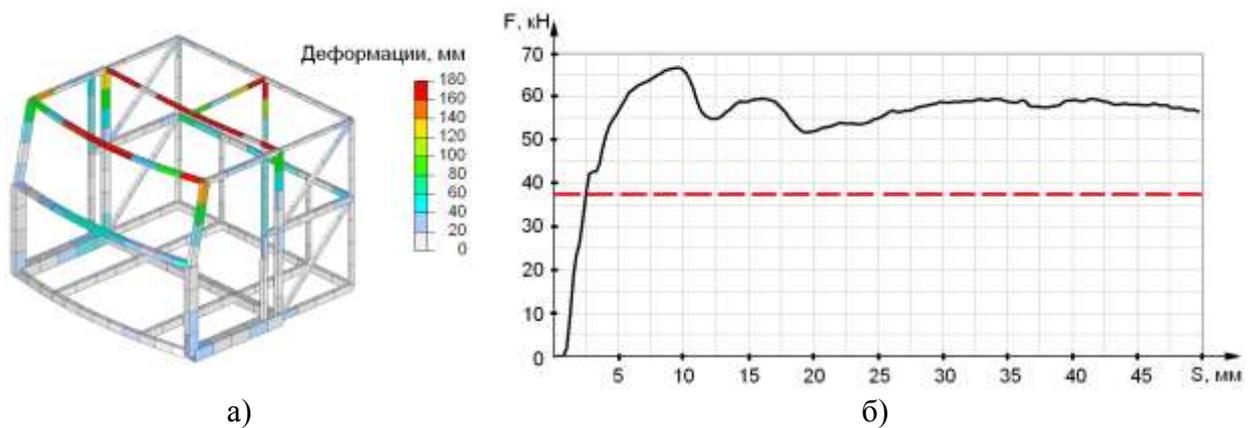
Из рис. 1, б видно, что измененная конструкция кузова автобуса удовлетворяет существующим требованиям нормативных документов, поскольку элементы деформированной боковины не заходят в зону безопасности. Комплексное рассмотрение результатов статических и динамических расчетов позволило установить, что измененная конструкция кузова с дополнительной служебной дверью имеет необходимый уровень прочности и пассивной безопасности.

Не менее интересными являются результаты работы, выполненной по повышению безопасности измененной конструкции кабины грузового автомобиля с введенным спальным отсеком (рис. 2, а). На рис. 2, б показана схема расположения дополнительных силовых элементов каркаса кабины. Согласно ГОСТ Р 41.29-99 (Правилам ЕЭК ООН №29, условиям испытания типа В), крыша кабины должна выдерживать статическую нагрузку, соответствующую максимальной разрешенной массе транспортного средства, приходящейся на переднюю ось. В соответствии с испытаниями типа С, кабина должна выдерживать статическую нагрузку, равную 2кН на тонну разрешенной массы груза, прикладываемую к задней стенке. Расчетная оценка пассивной безопасности была выполнена по результатам анализа напряженно-деформированного состояния модели измененной конструкции кабины грузового автомобиля от действия нагрузок, имитирующих рассматриваемые условия испытаний.

Компьютерное моделирование условий аварийного нагружения кабины позволило получить необходимые для анализа графики изменения нагрузки в зависимости от линейного перемещения нагружающей плиты. Для примера на рис. 3 показаны результаты расчета кабины при вертикальном нагружении (имитация условий испытаний типа В). Из графика изменения нагрузки видно, что предельное значение разрушающей нагрузки превышает регламентируемое значение, показанное штриховой линией. При этом в кабине сохраняется необходимое остаточное пространство безопасности. Результаты расчета также показали, что и при нагружении задней стенки кабины ее конструкция имеет необходимый запас по несущей способности.



**Рис. 2. Силовая схема модифицированной конструкции кабины:**  
*a* – схема измененной конструкции кабины грузового автомобиля;  
*б* – схема расположения дополнительных силовых элементов каркаса кабины



**Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования вертикального нагружения кабины:**  
*a* – деформированное состояние модели;  
*б* – график изменения нагрузки  $F$  в зависимости от вертикального перемещения плиты  $S$

Таким образом, было установлено, что измененная конструкция кабины удовлетворяет требованиям нормативных документов. Полученные результаты явились основанием для выдачи заключения о правомерности внесенных в конструкцию кабины изменений.

Не менее важными являются работы по расчетной оценке прочности и пассивной безопасности кузовов легковых автомобилей. С этой точки зрения интересными представляются результаты выполненной оценки пассивной безопасности трубчатого каркаса кузова легкового автомобиля со съемным верхом (см. рис. 4) в условиях возможного опрокидывания.

Условия испытания кузовов на безопасность при опрокидывании легковых автомобилей с открывающимся или съемным верхом регламентируются ОСТ 37.001.444-86. Условие опрокидывания автомобиля имитируется ударом плиты (рис. 5) в передний левый угол крыши ( $M_{\text{плиты}} = 60\% M_{\text{сн}}$ ,  $V_{\text{плиты}} = 2,4 \dots 2,5$  м/с).

По результатам компьютерного моделирования были выявлены зоны пластических деформаций (см. рис. 6, *a*), определен механизм разрушения каркаса, получен график зависимости перемещения ударной плиты от времени  $t$  (рис. 6, *б*). Анализ результатов показал, что деформации переднего угла крыши находятся в допустимых пределах ( $S_{\text{max}} < 130$  мм). При этом силовые элементы каркаса полностью поглощают энергию удара.



Рис. 4. Общий вид измененной конструкции кузова

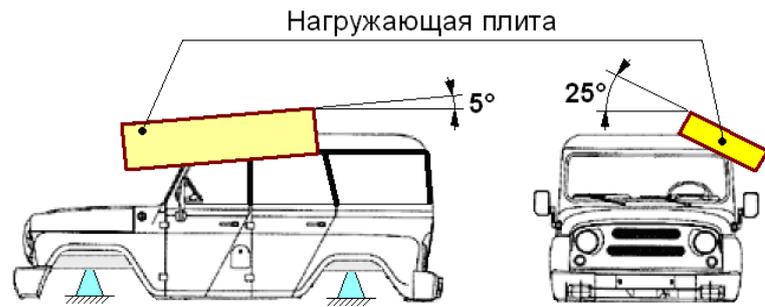


Рис. 5. Схема нагружения кузова автомобиля, имитирующего его опрокидывание

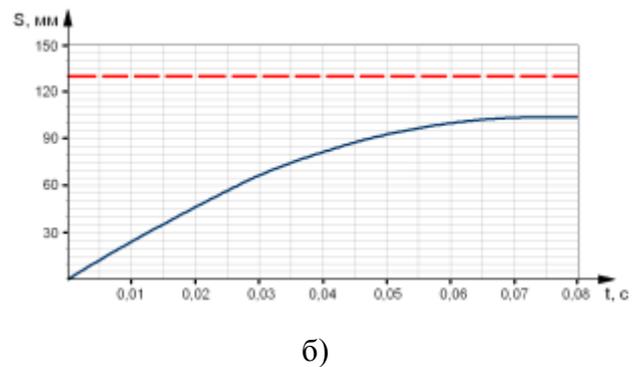
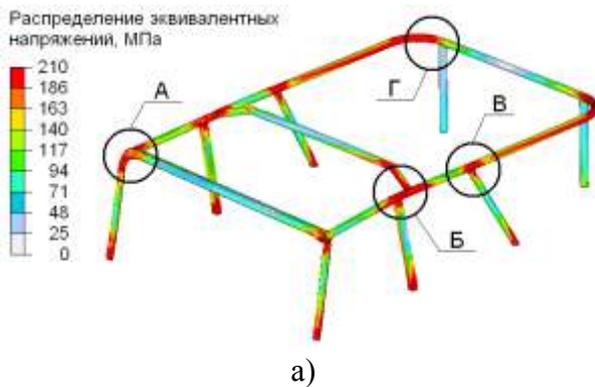


Рис. 6. Результаты компьютерного моделирования условий опрокидывания: а – деформации каркаса; б – зависимость перемещения плиты  $S$  от времени удара  $t$

Полученные результаты расчетов явились основанием для выдачи заключения о возможности внесения соответствующих изменений в конструкцию кузова. Кроме того, были предложены практические рекомендации по надежному соединению каркаса с силовыми элементами кузова, позволяющие существенно усилить конструкцию, обеспечив достаточный запас прочности и пассивной безопасности на весь срок эксплуатации транспортного средства

Оценка пассивной безопасности конструкции может быть также выполнена на основе инженерного метода, разработанного учеными кафедры «Автомобили и тракторы» НГТУ им. Р.Е. Алексеева [4, 5]. Метод используется для расчетов кузовных конструкций за пределами упругости с целью определения их несущей способности по разрушающим нагрузкам и оценки пассивной безопасности.

Основное уравнение инженерного метода расчета конструкций по предельному состоянию можно записать в виде равенства работ внешних сил  $\delta A$  и внутренних усилий  $\delta U$  на возможных вариациях перемещений

$$\delta A = \delta U, \quad \sum_{j=1}^K F_{pj} \delta S_j = \sum_{i=1}^m Q_i \delta \theta_i, \quad (1)$$

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

В случае учета действия в пластических шарнирах только изгибающих моментов при воздействии одной аварийной нагрузки, уравнение (1) запишется в виде

$$\int_0^S F_p dS = \sum_{i=1}^{n+1} M_{ПЛВ} \delta \theta_i, \quad (2)$$

где  $n$  – степень статической неопределимости конструкции.

Предельный пластический момент  $M_{\text{пл}}$  вычисляется по формулам:

$$M_{\text{пл}} = \int_F \sigma y dF; \quad M_{\text{пл}} = \sum_{i=1}^m A_i |y_i + \Delta| \sigma_T, \quad (3)$$

где  $A_i$  – элементарная площадка (стенка) тонкостенного сечения (рис. 7);  $y_i$  – расстояние от центра тяжести  $i$ -й площадки до нейтральной оси сечения н-н;  $\Delta$  – смещение линии равных площадей  $f-f$  сечения относительно нейтральной оси;  $\sigma_T$  – предел текучести материала. Следует отметить, что во второй формуле (3) первый множитель представляет собой пластический момент сопротивления сечения

$$W_{\text{пл}} = \sum_{i=1}^m A_i |y_i + \Delta|. \quad (4)$$

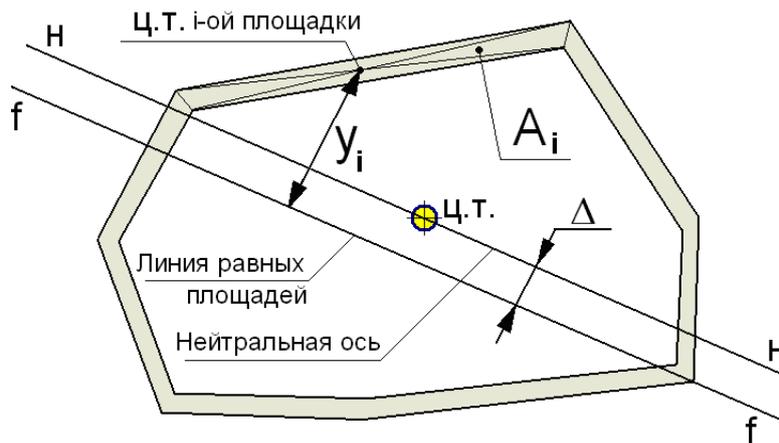


Рис. 7. Схема произвольного тонкостенного сечения

Для примера можно рассмотреть работу, выполненную специалистами кафедры «Автомобили и тракторы» и ЦБДДТЭ, целью которой являлась экспресс оценка пассивной безопасности кузова микроавтобуса в условиях опрокидывания на соответствие требованиям Правил ЕЭК ООН №66. На рис. 8 показаны зоны предполагаемого возникновения пластических шарниров в силовых элементах кузова в результате действия аварийной нагрузки, имитирующей воздействие, возникающее при опрокидывании автомобиля. На рис. 9 показаны механизмы разрушения силовых контуров заднего дверного проема и средней части кузова (рис. 9, а), вертикальных стоек, расположенных над колесными арками (рис. 9, б), и силового контура лобового окна (рис. 9, в).

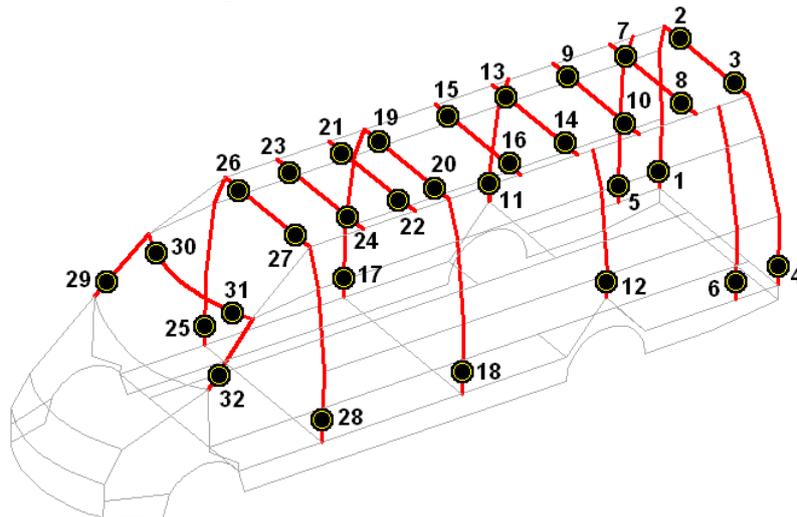


Рис. 8. Зоны предполагаемого возникновения пластических шарниров

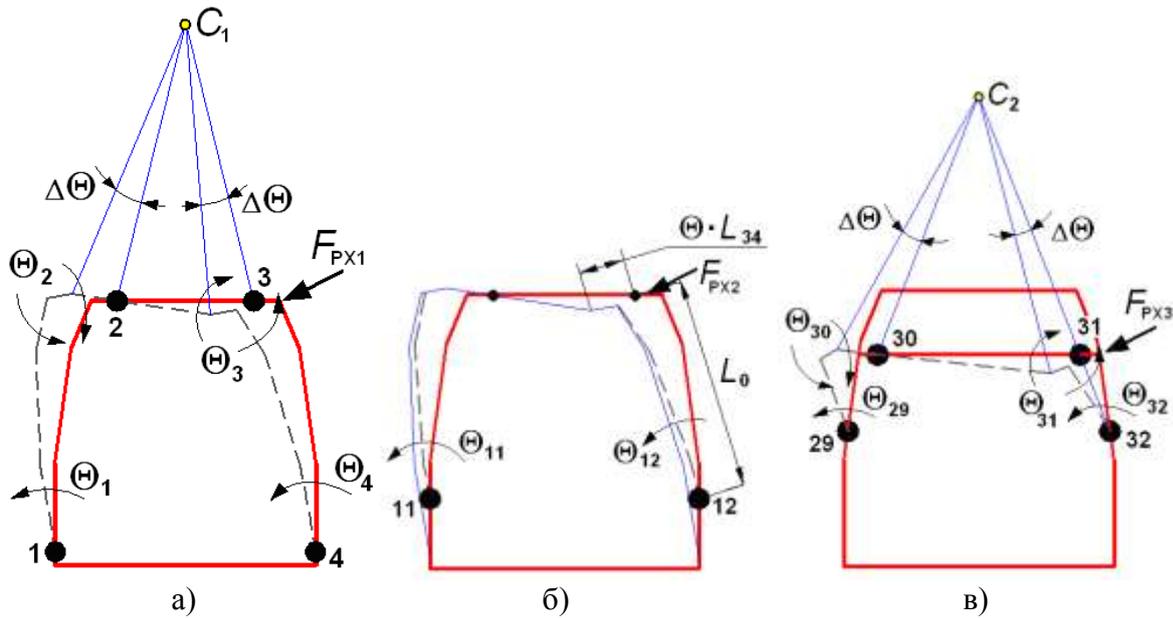


Рис. 9. Механизмы разрушения характерных силовых контуров

Выражение суммарной разрушающей нагрузки для рассматриваемой конструкции имеет следующий вид:

$$F_{PX} = 2 \left( \frac{\sigma_{T1} W_{ПЛ1} + \sigma_{T2} W_{ПЛ2} \left(1 + \frac{L_{3-4}}{L_{C1-3}}\right)}{L_{3-4}} \right) + \frac{8\sigma_{T2} W_{ПЛ7} \left(1 + \frac{L_{3-4}}{L_{C1-3}}\right)}{L_{3-4}} +$$

$$+ 2\sigma_{T1} \frac{W_{ПЛ5} + W_{ПЛ7} + W_{ПЛ1} \frac{L_{3-4}}{L_0}}{L_{3-4}} + 2\sigma_{T2} \left( \frac{W_{ПЛ29} + W_{ПЛ30} \left(1 + \frac{L_{CT} \cdot \cos 45^\circ}{L_{C2-31}}\right)}{L_{CT} \cdot \cos 45^\circ} \right), \quad (5)$$

где  $\sigma_{Ti}$  – предел текучести материала отдельных силовых участков;  $W_{ПЛi}$  – пластические моменты сопротивлений сечений в предполагаемых зонах появления пластических шарниров;  $L_i$  – характерные длины конструкции.

Результаты расчета показали, что рассматриваемая кузовная конструкция имеет 10% запас по несущей способности с точки зрения восприятия аварийной разрушающей нагрузки и энергии удара в условиях опрокидывания. Это позволило сделать вывод о соответствии конструкции микроавтобуса требованиям Правил ЕЭК ООН №66.

Таким образом, выполняемые на кафедре «Автомобили и тракторы» НГТУ, ЦБДДТЭ и НП ИНСАТ расчетные исследования предлагаемых измененных конструкций транспортных средств позволяют давать объективную оценку их работоспособности, повышать их прочность и пассивную безопасность. Правомерность и обоснованность использования результатов расчетов для оценки пассивной безопасности автомобилей подтверждены практикой их применения ведущими автомобильными заводами, фирмами, научно-исследовательскими организациями, учеными и специалистами, занимающимися вопросами исследования работоспособности кузовных конструкций в аварийных ситуациях.

#### Библиографический список

1. Тумасов, А.В. Сравнительная оценка жесткости и прочности удлиненного кузова легкового автомобиля с базовым вариантом / А.В. Тумасов, Л.Н. Орлов, А.М. Грошев [и др.] // Проекти-

- рование, испытания, эксплуатация транспортных машин и транспортно-технологических комплексов: сб. материалов международной научно-технической конференции / НГТУ. – Н.Новгород, 2005. С. 82-85.
2. **Тумасов, А.В.** Расчетная оценка прочности и пассивной безопасности измененной конструкции кабины грузового автомобиля ЗИЛ-43100 / А.В. Тумасов, Е.А. Наумов, Л.Н. Орлов, А.М. Грошев // Проблемы и достижения автотранспортного комплекса: сб. материалов V Всероссийской научно-технической конференции / УГТУ-УПИ. – Екатеринбург, 2006. С. 165-167.
  3. **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. Алексеева. – Н. Новгород, 2009. – 153 с.
  4. **Орлов, Л.Н.** Оценка пассивной безопасности, прочности кузовных конструкций автомобилей и автобусов: монография / Л.Н. Орлов; НГТУ. Н. Новгород, 2005. – 230 с.
  5. **Орлов, Л.Н.** Пассивная безопасность и прочность кузовов, кабин, автотранспортных средств. Методы расчета и оценки: учеб. пособ. / Л.Н. Орлов; НГТУ. – Н. Новгород, 2005. – 230 с.

*Дата поступления  
в редакцию 02.04.2010*

**L.N. Orlov, A.M. Groshev, A.V. Tumasov**

### **CALCULATIVE ESTIMATION OF PASSIVE SAFETY OF VEHICLES BEARING STRUCTURES WHICH CONSTRUCTIONS WERE CHANGED OR MODYFIED**

The article deals with the problem of calculative estimation of stiffness and passive safety of vehicles bearing structures that were changed or modified. Methodology of computer simulation of crash situations that are equal to the certification tests is shown in the paper. The engineering method of rapid estimation of cabs and automobiles body structures passive safety is also described in the article.

*Key words:* bearing structure, stiffness, passive safety, calculative estimation.