

УДК 629.341

В.И. Песков, О.В. Воронков

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ
АВТОБУСНЫХ КУЗОВОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проводится сравнительный анализ двух прототипов кузовов автобусов I класса в соответствии с Правилами № 107 ЕЭК ООН, один из которых выполнен по традиционной каркасной схеме, а другой – как кузов типа «монокок» с основанием и крышей в виде трехслойных панелей. Сравнительный анализ данных конструкций основывается на результатах расчетов соответствующих подробных конечно-элементных моделей и результатах испытаний масштабных макетов указанных кузовов.

Ключевые слова: кузов автобуса, монокок, каркас, масштабная модель, изгиб, кручение.

Сравнительный анализ показателей жесткости двух конструкций автобусных кузов, одна из которых типа «монокок» с основанием и крышей в виде трехслойных панелей, а другая выполнена по каркасной схеме, в данной работе основывается на результатах расчетов соответствующих конечно-элементных моделей (КЭМ) и испытаний масштабных макетов этих кузовов. Внешний вид рассматриваемых конструкций показан на рис. 1. Для облегчения анализа результатов при сравнении характеристик кузовов им была задана максимально схожая компоновка при наличии у каждого всех характерных функциональных элементов автобусного кузова (оконные и дверные проемы, колесные ниши и т.п.).

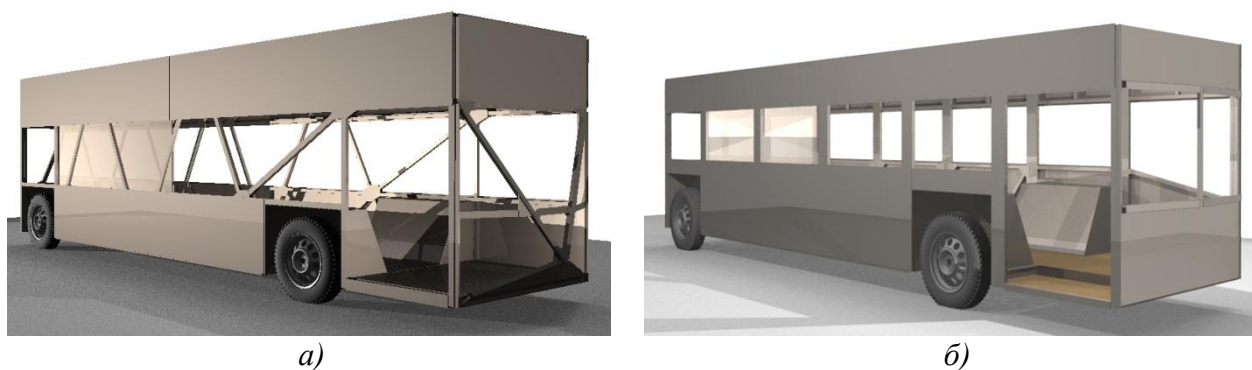


Рис.1. Внешний вид автобусных кузовов:
а - типа «монокок»; б - выполненный по каркасной схеме

Особенностью данных автобусов является гибридная силовая установка, что во многом объясняет выбранную планировку и развесовку по осям 50:50. Показанная на рис. 1, а инновационная структура боковин и передка кузова типа «монокок» является оригинальной разработкой авторов статьи, причем этот кузов будет немного выше кузова традиционной каркасной конструкции (в рассматриваемом случае на 345 мм). Материал силовых элементов обоих кузовов – сталь 10пс ГОСТ 16523-97 ($E = 203$ ГПа; $\mu = 0,29$; $\rho = 7846$ кг/м³). Собственные массы рассматриваемых несущих конструкций достаточно близки (2772 кг и 2674 кг), поэтому можно считать, что сравнение производится при одинаковой массе.

Следует отметить, что данные прототипы кузовов проектировались с учетом последующего достаточно легкого изготовления их масштабных макетов из доступного материала. По этой причине для силовых элементов кузовов использовался только один материал – малоуглеродистая сталь толщиной 1 мм и 2,4 мм. В конструкции кузова

каркасного типа обычно применяемый фанерный настил пола был заменен стальным листом, примерно равным ему по своей массе. Несколько большая масса у кузова типа «монокок» получилась за счет его большей габаритной высоты. Этому также способствуют его основание и крыша, выполненные в виде трехслойных панелей, которые переутяжелены из-за ограничений, накладываемых необходимостью макетирования: при изготовлении макетов кузовов (рис. 2 и 3) применена техническая бумага только двух толщин, правомерность использования которой обоснована в одной из предыдущих работ авторов [1]. В этой работе обосновываются и масштабные коэффициенты линейных размеров, нагрузки, упругих свойств и др.



Рис. 2. Масштабный макет автобусного кузова типа «монокок»: а – вид снаружи; б – вид внутри



Рис. 3. Масштабный макет автобусного кузова каркасной конструкции: а – вид снаружи; б – вид внутри

При изготовлении масштабных макетов основным способом соединения кузовных элементов являлось их склеивание, для чего использовался канцелярский клей ПВА-М и твердый клей-карандаш. Также в процессе склеивания могли применяться дополнительные соединительные косынки из того же материала, что и соединяемые детали. Оценить степень соответствия изготовленных масштабных макетов их *CAD*-моделям можно по массе. Так, масса изготовленного макета для кузова типа «монокок» составила 355 г, для каркасного кузова – 343 г. Соответствующие значения для их *CAD*-моделей равны 321 г и 323 г, т.е. отличие не превысило 10,6%. Отличие массы масштабных макетов от значений по *CAD*-моделям зависит от массы клея, использованного при сборке, и массы дополнительных соединительных косынок. В масштабном макете кузова типа «монокок» основная масса клея концентрируется в местах соединения обшивок трехслойных панелей со средним слоем в виде гофрированного листа.

Для расчетов рассматриваемых кузовных конструкций по методу конечных элементов (КЭ) применялись подробные расчетные модели (более миллиона расчетных точек), фрагмент одной из которых показан на рис. 4, а основные параметры использованных КЭМ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры конечно-элементных моделей

Тип кузова	Тип КЭ	Колич. узлов, млн	Колич. КЭ, млн	КТИТЭ*
монокок	S4	1,566	1,632	5
каркасный	S4	1,350	1,359	5

*КТИТЭ – количество точек интегрирования по толщине элемента

Для кузова типа «монокок» при моделировании трехслойных панелей параметр «количество КЭ по ширине стенки конструктивного элемента» принимал значение шесть и более, чтобы в процессе расчета можно было зафиксировать возникновение локальной потери устойчивости тонкостенных деталей конструкции. Трубчатые профили каркасов боковин, передка, задка и стенки моторного отделения в кузове типа «монокок» работают в основном на растяжение-сжатие, поэтому для них данный параметр был уменьшен до четырех. В кузове традиционной конструкции большинство труб каркаса работают на изгиб, однако, локальной потери устойчивости стенками прямоугольных труб не ожидается, вследствие чего значение параметра было взято равным пяти. Для листовых обшивок рассматриваемых кузовов данный параметр принимал значение 20 и более, так как для них поперечная релаксация в результате локальной потери устойчивости наиболее характерна и ожидаема. Соединение конструктивных элементов в рассматриваемых конечно-элементных моделях в пределах отдельной структурной единицы (боковина, крыша и т.п.) производилось по принципу «узел в узел». Соединение структурных единиц между собой производилось с использованием «Tied contact».

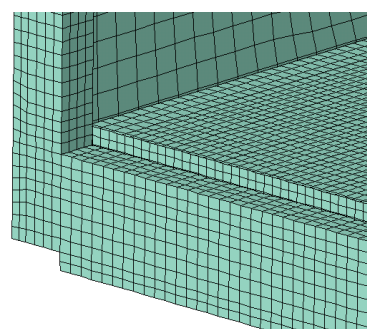


Рис. 4. Фрагмент расчетной конечно-элементной модели

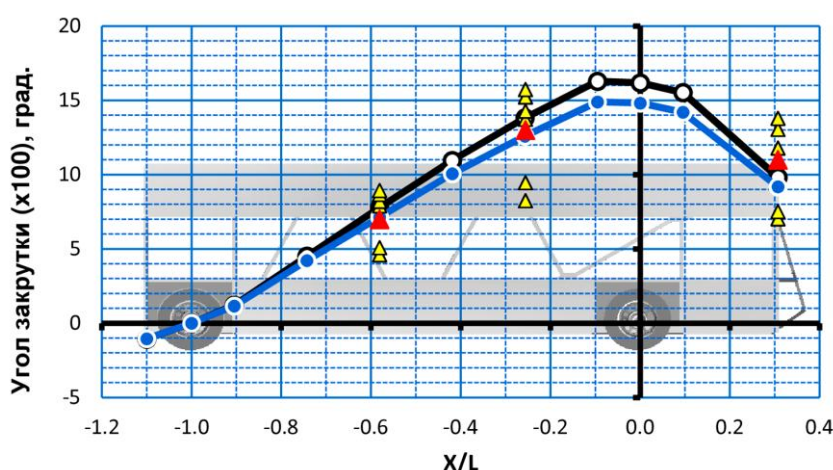


Рис. 5. Деформации кузова «монокок» при его закручивании

Для испытаний масштабных макетов рассматриваемых кузовных конструкций был создан специальный испытательный стенд, который имеет возможность перенастройки, поэтому позволяет производить испытания указанных масштабных макетов и на закручивание, и на изгиб. Предельная нагрузка, прикладываемая при испытании на кручение и при адекватном расчете кузова по методу конечных элементов (закручивающий момент),

соответствует режиму вывешивания одного из колес автобуса. Величина момента, который должен быть приложен к масштабному макету, определяется умножением величины момента для реальной конструкции на соответствующий масштаб [1]. Замеры деформаций масштабных макетов под нагрузкой осуществлялись индикаторами с точностью $\pm 0,01$ мм. На рис. 5 и рис. 6 приведены результаты расчетов моделей реальных кузовов (сплошные линии) и испытаний (треугольники) масштабных макетов обеих конструкций на кручение

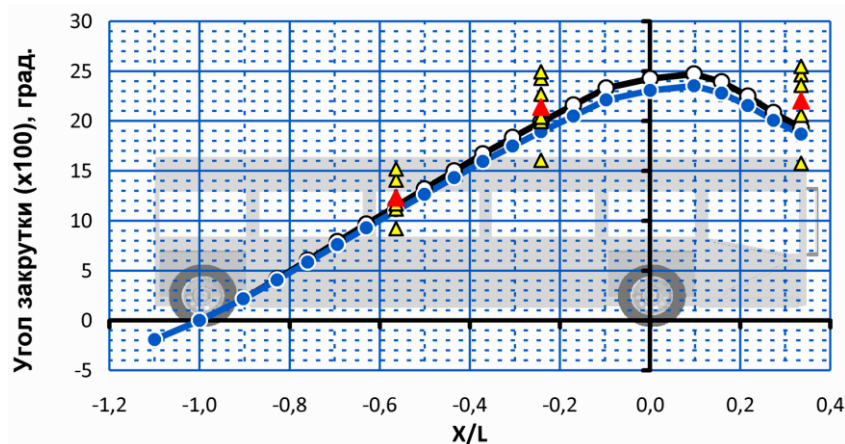


Рис. 6. Деформации каркасного кузова при его закручивании

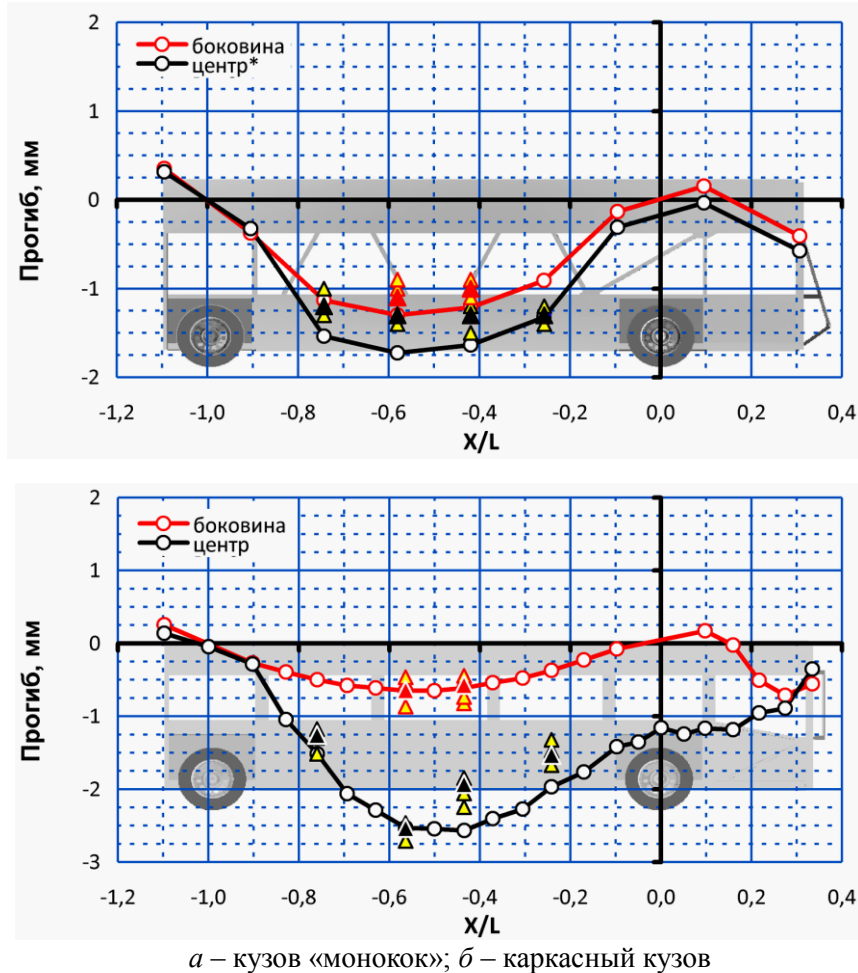
И расчет, и эксперимент показывают, что кузов типа «монокок» имеет почти в полтора раза более высокую жесткость на кручение, чем распространенная каркасная конструкция (для сравниваемых силовых схем это превышение составило 45%). О еще более высоком потенциале монококовых систем говорит сопоставление крутильной жесткости расчетной модели и масштабного макета с реальными конструкциями. Так, если по результатам расчетов и экспериментов жесткость на кручение на длине базы у прототипа кузова типа «монокок» составляет $475000 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{град}$, то для кузова очень популярного в нашей стране автобуса ПАЗ-3205 соответствующая величина жесткости – только $64600 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{град}$ [2,3]. Поскольку база этого реального автобуса приблизительно в 2 раза короче базы рассматриваемого прототипа, удельный показатель крутильной жесткости кузова типа «монокок» получается больше удельного показателя автобуса ПАЗ-3205 в 14,5 раз.

Результаты аналогичных испытаний макетов и расчетов их полноразмерных моделей на действие вертикальной изгибающей нагрузки, приложенной к полу салона, показаны на рис. 7. И при испытаниях, и при расчете нагрузка равномерно распределялась по поверхности пола, имитируя вес пассажиров в соответствии с максимальной вместимостью салона. На рис. 7, а и на рис. 7, б верхняя кривая отображает расчетный прогиб боковины кузова, нижняя – расчетный прогиб пола по линии оси кузова (соответствующие точки эксперимента показаны треугольниками). Сходимость эксперимента и расчета удовлетворительная (отличие не более 25%).

Анализ полученных результатов говорит о том, что кузов типа «монокок» имеет более высокую интегральную жесткость на изгиб, чем кузов каркасного типа. Максимальный прогиб несущей системы при практически одинаковой вертикальной нагрузке в первом случае составил 1,7 мм, во втором – 2,6 мм (больше на 53%). Хорошо видно, что главное преимущество кузова типа «монокок» – более жесткая на изгиб конструкция основания, выполненная в виде трехслойной панели, вертикальная деформация которой составила всего около 0,5 мм, в то время, как соответствующий прогиб основания кузова каркасного типа (листовой настил, подкрепленный лонжеронами и поперечинами) был 1,95-1,98 мм (почти в 4 раза больше). Если учесть тот факт, что боковины прототипа кузова типа «монокок» формировались из наклонных стоек, имеющих в 2,4 раза меньшую толщину стенок (поскольку деформации изгиба в таких конструкциях практически отсутствуют), то у конструкций типа «монокок» еще имеется существенный резерв для повышения жесткости на изгиб этих боковин и доведения суммарного прогиба такого кузова под

статической нагрузкой до величины 1,0-1,2 мм, что будет являться превосходным результатом. Для сравнения: максимальные прогибы под распределенной вертикальной нагрузкой силовых элементов основания реальных автобусных кузовов (например, ПАЗ-3205 [2, 3]) почти на порядок больше.

Рис. 7. Прогибы кузовов под вертикальной нагрузкой:



В плане сравнительной оценки жесткости конструкций определенный интерес представляют также результаты расчета форм и частот собственных колебаний исследуемых кузовов. Известно, что собственные частоты и формы колебаний являются важными показателями, дающими представление о соотношении массовых, инерционных и жесткостных характеристик рассматриваемой конструкции. Анализ собственных форм колебаний является мощным инструментом при рассмотрении механики деформирования конструкции и выявлении ее особенностей и слабых мест.

Для прототипов кузовов, изучаемых в рамках данной работы, расчет собственных частот производился по методу конечных элементов с применением подробных КЭ-моделей. При проведении указанных расчетов полезная нагрузка на основание автобуса со стороны пассажиров преобразовывалась в массу и равномерно распределялась по поверхности верхней обшивки панелей основания. Для кузова традиционной конструкции масса распределялась по поверхностям верхних полок силовых элементов основания. Масса не распределялась по поверхности настила пола кузова этого типа (как могло бы показаться более реалистичным), т.к. множественные низкие частоты колебаний настила пола в данном случае не представляют интереса. Интерес представляют так называемые «фундаментальные» формы колебаний, соответствующие следующим ситуациям: 1) прогиб основания на пролете между боковинами и на длине базы; 2) изгибный прогиб всего кузова; 3) крутильная деформация всего кузова.

Фундаментальная собственная форма изгибных колебаний кузова типа «монокок» (рис. 8) совмещает в себе прогиб основания на пролете между боковинами и изгибную форму кузова в целом. Это обусловлено изгибной деформацией боковин в поперечном направлении, имеющей место при прогибе основания. Указанная особенность может быть названа некоторой слабостью данной конструкции кузова, так как в полной мере не обеспечивается механика оптимальной прочностной работы при изгибе. Влияние данного недостатка может быть снижено путем уменьшения моментной связи между основанием и боковинами, а в идеале – путем перехода к шарнирной связи в этом соединении. Сказанное описывает одно из направлений дальнейшего совершенствования автобусных кузовов типа «монокок», однако в рамках данной работы подробно не рассматривается.

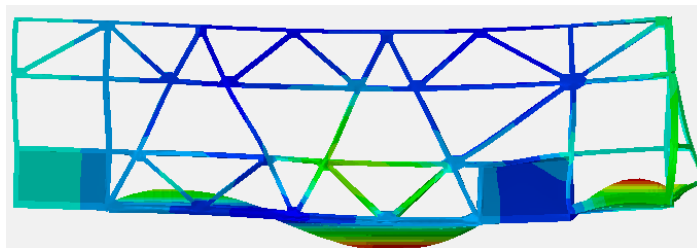


Рис. 8. 1-я гармоника изгибных колебаний кузова

Необходимо отметить, что при проектировании прототипа кузова типа «монокок» закладывалась первая частота колебаний панели основания при изгибе на пролете между боковинами, равная 15 Гц. В результате расчета по методу конечных элементов было получено значение 14,7 Гц. Отличие величин составляет 2%, что подтверждает правильность и высокую точность использованных теоретических зависимостей. Тот факт, что величина, получаемая по аналитической зависимости, несколько выше, объясняется принятой гипотезой о малости деформаций панели основания от сдвиговых внутренних усилий.

Как показали проведенные расчеты, частота 1-й гармоники собственных крутильных колебаний кузова типа «монокок» составляет 32,5 Гц. Для сравнения, частота аналогичных колебаний для кузова традиционной (каркасной) конструкции составила 22,3 Гц. Частоты колебаний некоторых серийных кузовов традиционной конструкции на аналогичном режиме следующие [4]: ПАЗ-3205 \approx 12 Гц; КАМАЗ-5262 \approx 2 Гц. Простое сравнение приведенных величин лишний раз говорит о высоких жесткостных свойствах кузова типа «монокок» на режиме кручения.

Из рассмотрения форм собственных колебаний исследуемых прототипов кузовов в частотном диапазоне до 35 Гц, относящихся к прогибу основания на пролете между боковинами и деформациям кузова в целом, можно заключить, что кузов типа «монокок» по сравнению с кузовом традиционной конструкции не имеет каких-либо частот и форм собственных колебаний, отражающих «слабость» данной конструкции. Напротив, собственные частоты конструкции типа «монокок», как правило, выше частот для аналогичных собственных форм колебаний кузова традиционной конструкции. Особенно явно это проявляется для собственной частоты колебаний, соответствующей режиму закручивания (отличие частоты составляет 46%), что говорит о явном превосходстве по жесткости кузова типа «монокок» на данном режиме.

В ходе расчетов конечно-элементных моделей исследуемых прототипов полноразмерных кузовов на закручивание также было рассмотрено их напряженное состояние (НС). Можно сказать, что в данном случае кузов типа «монокок» на 55-75% (в 1,5-1,75 раз) оказался прочнее кузова традиционной конструкции. На режиме закручивания наиболее нагруженными элементами конструкции кузова типа «монокок» оказались стойки боковин и передка. Распределение напряжений по ним достаточно равномерное, соответствующее нагрузочной ситуации растяжения-сжатия. На стойках боковин, однако, заметно действие поперечного изгиба, возникающего из-за наличия моментных связей

боковина-основание и боковина-крыша. Трехслойные панели основания и крыши на данном режиме являются слабо нагруженными структурными единицами.

Напряженное состояние кузова, выполненного по традиционной схеме, характерно для конструкций данного типа: силовые элементы нагружены изгибом в различных плоскостях. Наиболее нагруженными элементами на рассматриваемом режиме закручивания кузова также являются стойки боковин и передка, причем наблюдается существенная концентрация напряжений в углах проемов. Можно отметить, что у кузова традиционной конструкции сильно вовлечены в процесс восприятия усилий обшивки надоконной секции боковин, крыши, передка и моторной перегородки, а также настил пола. У кузова типа «монокок» нагруженность обшивок боковин и передка значительно ниже. Данная особенность предоставляет дополнительную возможность снижения собственной массы кузова типа «монокок» за счет освобождения указанных обшивок от несущей функции и изготовления их из материалов, имеющих низкую плотность.

Напряженное состояние на режиме изгиба кузова типа «монокок» не выявило каких-либо экстремальных точек у конструкции. Трехслойная панель основания этого кузова на рассматриваемом режиме в основном находится в условиях цилиндрического изгиба. Напряженное состояние кузова, выполненного по традиционной схеме, характерно для конструкций данного типа: силовые элементы нагружены изгибом в различных плоскостях. Наиболее нагруженными элементами на рассматриваемом режиме изгиба кузова являются поперечины и лонжероны основания. Наблюдаются повышенные напряжения в углах проемов, в особенности дверного, как самого большого по размерам. Для кузова типа «монокок» на режиме изгиба заметной концентрации напряжений в углах проемов не наблюдается, что можно причислить к списку его достоинств.

Проведенный комплекс теоретических и экспериментальных исследований подтвердил большую перспективность использования конструкций кузовов автобусов типа «монокок».

Библиографический список

1. **Воронков, О.В.** Методика обоснования параметров масштабных макетов для определения деформаций реальных конструкций / О.В. Воронков, В.И. Песков // Будущее технической науки: тез. докл. X Междунар. молодежн. науч.-технич. конф. / НГТУ. – Н.Новгород, 2011. – С. 137.
2. **Кудрявцев, С.М.** Анализ конструктивных групп кузова автобуса ПА3-3205 с точки зрения прочности и жесткости кузова / С.М. Кудрявцев, Л.Н. Орлов, В.М. Исламов // Автомобильный транспорт в XXI веке: сб. науч. ст. Междунар. науч.-технич. конф. / НГТУ. – Н. Новгород, 2003. С. 163-166.
3. **Кудрявцев, С.М.** Исследование несущей системы кузова автобуса ПА3-3205 / С.М. Кудрявцев, Д.В. Соловьев, В.А. Ермаков // Проектирование, испытания, эксплуатация транспортных машин и транспортно-технологических комплексов: сб. науч. ст. Междунар. науч.-технич. конф. / НГТУ. – Н. Новгород, 2005. С. 57–60.
4. **Орлов, Л.Н.** Оценка пассивной безопасности, прочности кузовных конструкций автомобилей и автобусов: монография / Л.Н. Орлов; НГТУ. – Н. Новгород, 2005 – 130 с.

*Дата поступления
в редакцию 17.10.2013.*

V.I. Peskov, O.V. Voronkov

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL COMPARISON OF STIFFNESS OF BUS BODIES

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

Comparative analysis of body prototypes of two I-class busses according to Regulations No. 107 ECE UN is provided in the article. One of the prototypes has traditional framing structure, another – “monocoque” structure with floor and roof made as sandwich-panels. Comparative analysis of the structures is based on FE-simulations and experimental study of scaled models of the bus bodies.

Key words: bus body, monocoque, framing, scaled model, bending, torsion.