

УДК 629.113

Л.Н. Орлов¹, П.С. Рогов¹, А.С. Вашурин¹, А.В. Тумасов¹, Н.Ф. Феокистов²**ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КАРКАСА КУЗОВА АВТОБУСА
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «Инновационные технологии»²

Показаны результаты расчётной оценки пассивной безопасности автобусов. Выполнены расчётные исследования секций типового кузова автобуса в условиях опрокидывания. Представлены различные варианты моделирования условий нагружения. Показаны преимущества и недостатки различных вариантов представления моделей кузовов автобусов.

Ключевые слова: безопасность автобуса, конечно-элементный анализ, опрокидывание, несущая способность.

Проблема предотвращения дорожно-транспортных происшествий (ДТП) является весьма актуальной для каждой страны мирового сообщества. ДТП с участием автобусов характеризуются серьёзными травмами и ранениями, получаемыми пассажирами во время аварии. Хорошо известно, что опрокидывание – один из наиболее опасных видов ДТП, хотя происходят они не так часто, как лобовое или боковое столкновения. Тем не менее, в соответствии со статистикой, процент погибших и тяжело раненых людей больше в случаях опрокидывания, чем в других видах аварийных ситуаций. Повышение пассивной безопасности автобусов возможно и может быть достигнуто за счет применения прочных и безопасных кузовных конструкций.



Рис. 1. ДТП с опрокидыванием автобусов

Хорошо известно, что любая автобусная конструкция должна поглощать энергию удара и сохранять необходимое жизненное пространство для пассажиров в процессе опрокидывания. Все эти требования регламентированы Правилами ЕЭК ООН №66, которые допускают как экспериментальное исследование поведения конструкции автобуса, так и компьютерное моделирование условий опрокидывания. За последние 10 лет был приобретен достаточный опыт в испытании и расчете кузовных конструкций автобусов [1–4]. В то же время следует отметить несколько ключевых проблем, с которыми может столкнуться инженер в процессе проектирования кузова и оценки его пассивной безопасности:

- достоверное моделирование процесса опрокидывания автобуса с минимальными затратами времени для качественной оценки механизма разрушения кузова автобуса;

- анализ прочности и безопасности различных вариантов конструкций и выбор наиболее рационального варианта.

Эти проблемы могут быть решены способами конечно-элементного анализа и соответствующего программного обеспечения, которые дают возможность анализировать возможное поведение конструкции под нагрузкой на основе результатов расчетов моделей, имеющих различную степень проработки и детализации:

- упрощенная конечно-элементная модель кузова автобуса (преимущественно используются стержневые элементы), которая может быть использована на начальных этапах проектирования для проведения оценки влияния отдельных силовых элементов конструкции на ее пассивную безопасность;
- детальная (полная) конечно-элементная модель кузова автобуса (преимущественно используются тонкостенные оболочечные элементы), которая описывает все особенности конструкции и может быть использована для сертификации автобуса на соответствие требованиям Правил ЕЭК ООН №66.

Процесс опрокидывания может быть смоделирован различными способами:

- нагружение угла крыши неподвижной модели статической или динамической эквивалентной нагрузкой, создаваемой жесткой плитой, совершающей поступательное движение;
- динамическое нагружение угла крыши неподвижной модели жесткой плитой, совершающей вращательное движение;
- имитация опрокидывания модели под действием силы тяжести.

Очевидно, что использование различных типов моделей и вариантов имитации опрокидывания может привести к различным результатам, но все они могут быть использованы инженерами на различных стадиях проектирования, доводки и сертификации автобуса. В данной работе показаны преимущества и недостатки различных методов моделирования, которые могут быть использованы для расчётной оценки пассивной безопасности автобусов.

Объектами расчетных исследований были типовые конструкции секций кузова автобуса (рис. 2, 3). Каркас каждой секции состоит из стальных труб, которые имеют прямоугольное тонкостенное сечение. Были разработаны два варианта конечно-элементных моделей (КЭМ) секции: упрощённые КЭМ (используются только стержневые элементы) и подробные (используются оболочечные элементы). Для каждой модели назначались одинаковые механические характеристики стали с упругопластической кривой деформация-напряжение.

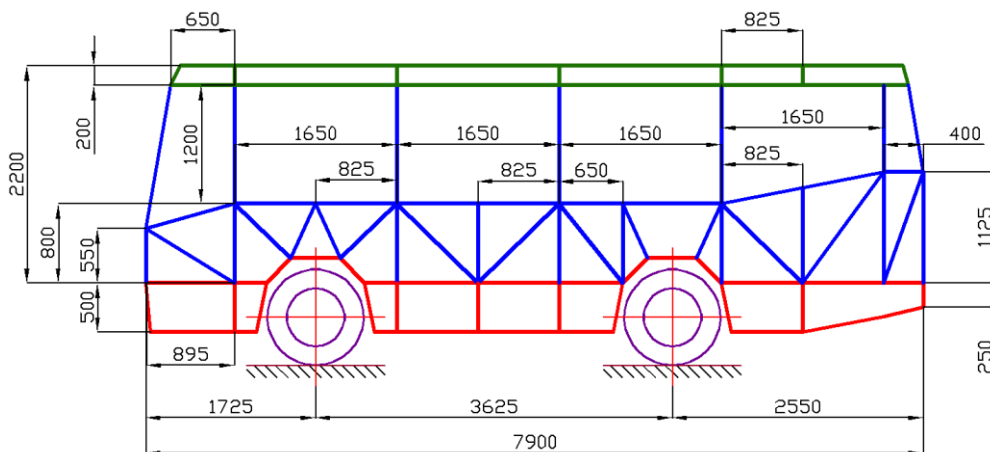


Рис. 2. Типовая схема каркаса автобуса

Условия нагружения для рассматриваемых моделей были идентичными: КЭМ нагружались параллельно движущейся жёсткой плитой. Каждая КЭМ была закреплена у основания в нескольких зонах. Угол α между жёсткой плитой и секцией был рассчитан в соответ-

ствии с методикой опрокидывания автобусов по требованиям Правилами ЕЭК ООН №66 и соответствует углу контакта кузова с жёсткой поверхностью при опрокидывании с уступа высотой 800 мм. Движение жёсткой плиты было определено зависимостью перемещения $S(t)$ (рис. 4), таким образом, что скорость плиты монотонно возрастает с постоянным ускорением. Данный способ нагружения не позволяет достоверно симитировать процесс опрокидывания, но такие условия можно считать приемлемыми для сравнительного анализа результатов.

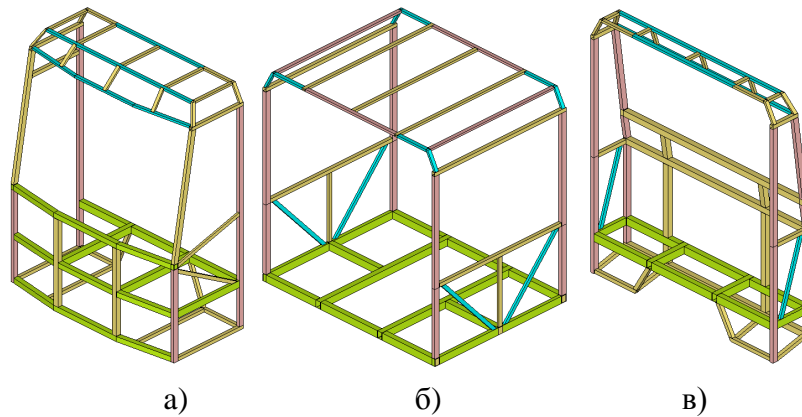


Рис. 3. Секции кузова автобуса:
а – передняя; б – средняя; в – задняя

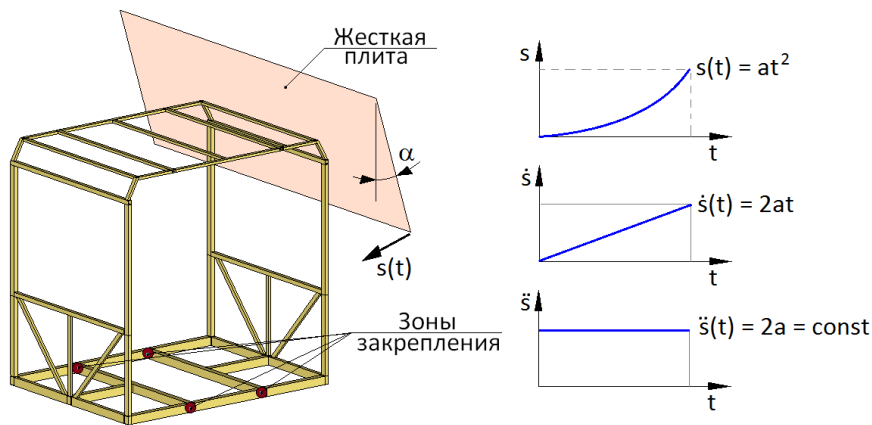


Рис. 4. Схема нагружения расчетной модели

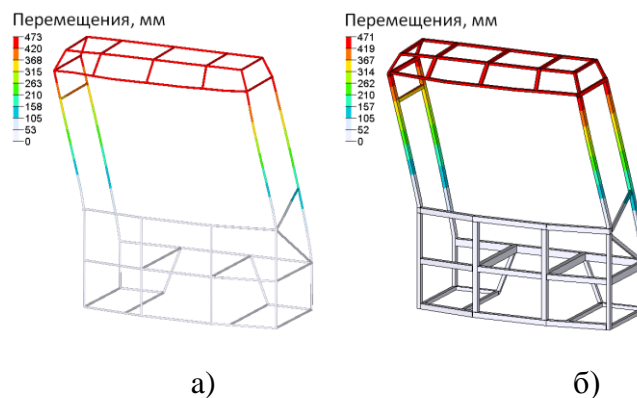


Рис. 5. Перемещения упрощенной (а) и подробной (б) КЭМ

Очевидно, что суммарные перемещения для упрощённой и подробной моделей оказываются схожими (рис. 5). Это можно объяснить характером приложенной нагрузки. В то же время усилия в зоне контакта плиты с элементами КЭМ для различных вариантов моделей отличаются (рис. 6). Из графиков видно, что упрощённая (стержневая) КЭМ имеет более высокую несущую способность (на 10–30%), чем аналогичная подробная КЭМ, состоящая из оболочечных элементов.

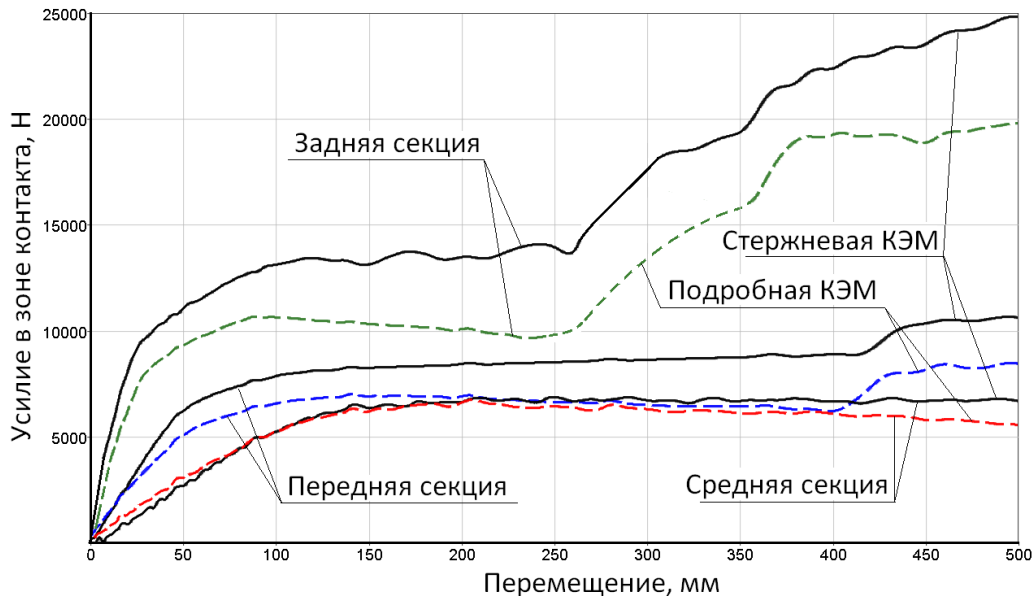


Рис. 6. Графики изменения усилия в зоне контакта в зависимости от перемещения жёсткой плиты

Разница в несущей способности различных КЭМ объясняется особенностью деформирования различных типов элементов. Стержневые элементы не позволяют имитировать пластические деформации тонкостенных стенок поперечных сечений, которые отчетливо видны при расчете подробной КЭМ (рис. 7).

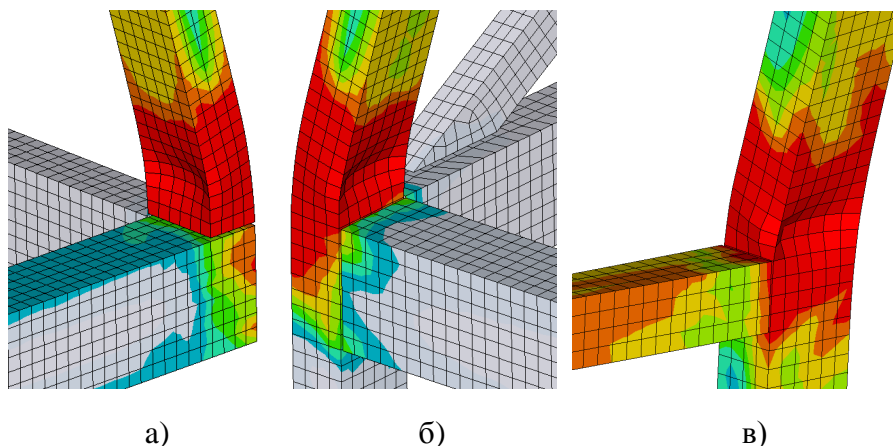


Рис. 7. Локальные пластические деформации фрагментов подробной модели:
а – передняя секция; б – средняя; в – задняя секция

Особый интерес представляет сравнительный анализ поведения упрощенной и подробной конечно-элементных моделей всего кузова автобуса в условиях, имитирующих опрокидывание. На рис. 8 показана схема опрокидывания автобуса в соответствии с Правилами ЕЭК ООН №66. Центр масс автобуса S_{bus} перед контактом с жёсткой плитой совершает вращательное движение. Предположив, что центр масс автобуса будет двигаться по круговой

траектории радиуса R как до удара, так и после него, была предложена эквивалентная схема нагружения, имитирующая опрокидывание автобуса. В этом случае модель каркаса автобуса деформируется под действием энергии жесткой стенки, совершающей вращательное движение. В этом случае центр масс нагружающей плиты C_{RW} должен повторять траекторию дуги, радиусом R . Необходимое положение C_{RW} может быть достигнуто изменением геометрических и физических свойств жесткой плиты, в частности за счет варьирования массы участков DE и EF .

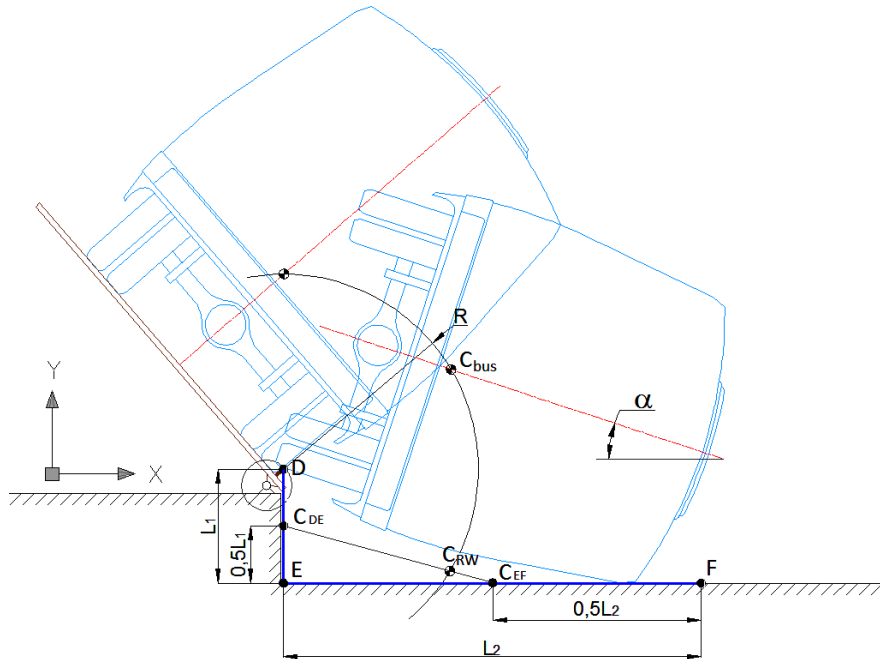


Рис. 8. Схема опрокидывания автобуса
(в соответствии с требованиями Правил ЕЭК ООН №66)

На основе данных по моменту инерции жесткой плиты и энергии удара при опрокидывании возможно оценить начальное значение угловой скорости ω жесткой плиты (рис. 9, а). В этом случае каркас автобуса должен быть закреплён в основании, а жесткая плита в центре вращения. Результаты расчета по такому упрощенному варианту моделирования условий опрокидывания показаны на рис. 9, б).

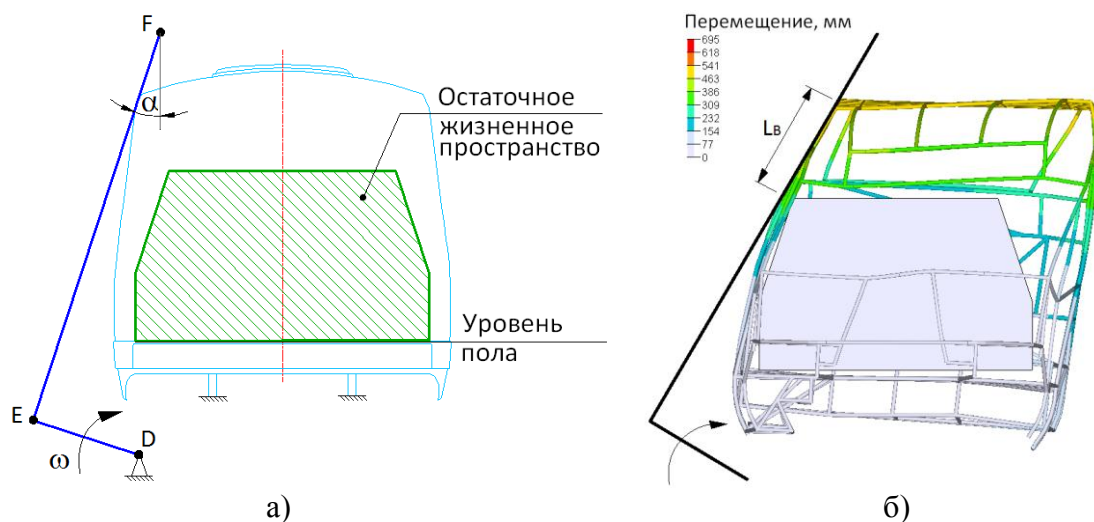


Рис. 9. Эквивалентная схема динамического нагружения автобуса:
а - имитация вращательного движения кузова при опрокидывании автобуса;

б – результаты конечно-элементного анализа

На рис. 10 показаны результаты моделирования, полученные для двух вариантов расчета, в которых кузов автобуса был представлен стержневыми элементами (упрощенная модель) и оболочечными элементами (подробная модель). Анализ результатов подтверждает выводы: упрощенная модель имеет более высокую несущую способность (на 10–30%) по сравнению с аналогичной подробной моделью.

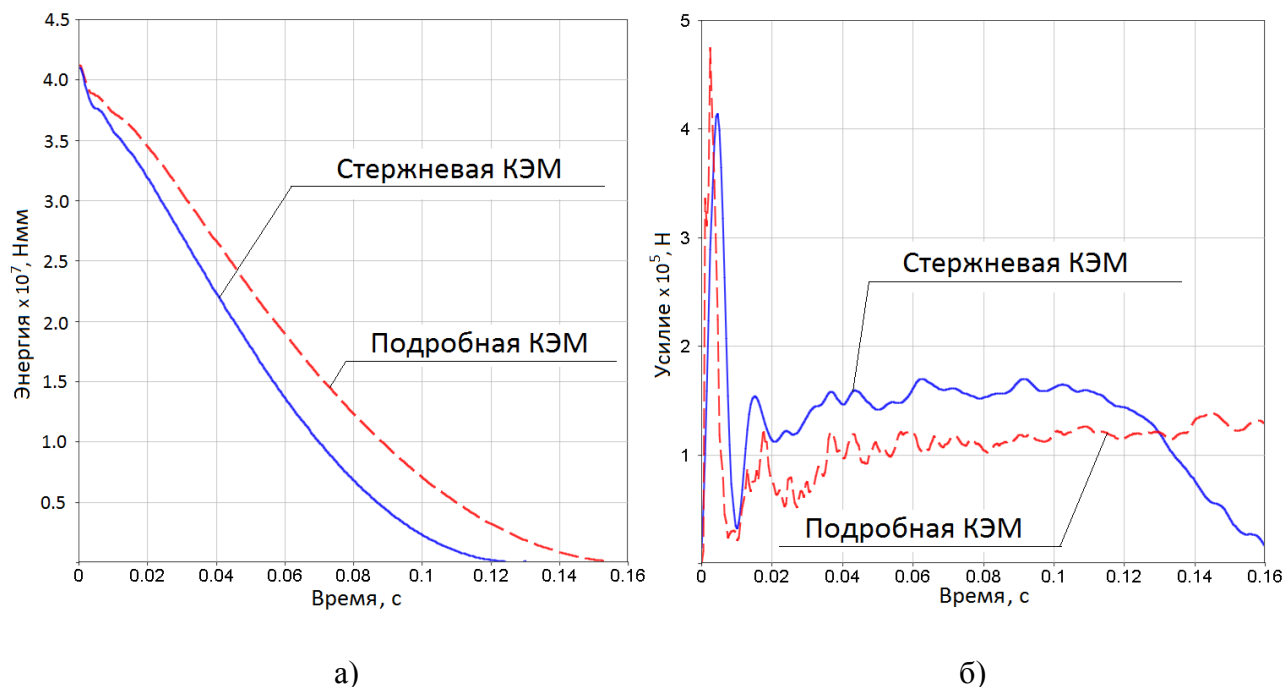


Рис. 10. Графики изменения энергии удара и разрушающей нагрузки:

a – график изменения энергии удара; *б* – диаграмма контактной силы

По результатам расчетов можно сделать вывод о том, что упрощенную конечно-элементную модель рационально использовать на начальной стадии проектирования, когда инженер должен анализировать несколько вариантов конструкции и оценивать влияние различных конструктивных изменений на несущую способность автобуса. Это позволяет минимизировать временные затраты на разработку и расчет модели. Тем не менее, завышенная несущая способность стержневых моделей не позволяет использовать их для окончательной оценки безопасности автобуса, поэтому результаты моделирования, полученные с использованием упрощенной конечно-элементной модели, должны быть уточнены в дальнейшем при расчете подробной модели.

Библиографический список

1. **Ganesh, B.** Rollover Strength Prediction of Bus Structure Using LS-DYNA 3D / B. Ganesh, Gadekar, S. Kshirsagar, C. Anilkumar // Altair CAE Users Conference, Aug. 2005, Taj Westend, Bangalore.
2. **Elitok, K.** An Investigation on the Rollover Crashworthiness of an Intercity Coach, Influence of Seat Structure and Passenger Weight / K. Elitok, M A. Guler, B. Byram // 9th International LS-DYNA User Conference. USA. Dearborn, Michigan. 2006.
3. **Csiszár, A.** Rollover Safety Increase and Adequacy for Buses due to Laboratory Tests and Simulations / A. Csiszár, S. Vincze-Pap // Automobile for the Future: 11th European Automotive Congress. – Budapest: Eötvös University Congress Centre, 2007.

4. **Hashemi, S.M.R.** Strength of Super-Structure UN-ECE R66 Rollover Approval of Coaches based on Thin-Walled Framework Structures / S.M.R. Hashemi, A.C. Walton, K. Kayvantash // Int. J. Vehicle Structures & Systems, 2009. №1(4). P. 78-84.

*Дата поступления
в редакцию 06.07.2012*

L.N. Orlov¹, P.S. Rogov¹, A.S. Vashurin¹, A.V. Tumasov¹, N.F. Feokistov²

**THE ESTIMATION OF BUS STRUCTURE BEARING CAPACITY
ON BASIS OF SIMULATION RESULTS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev¹,
Ltd. "Innovative Technology"²

Purpose: The developing of computational methods of estimating of bus bearing capacity at the different stages of the design process.

Design/methodology/approach: The computational research based on finite element method with using of different types of simulation models: simplified that is based on beam type elements and complicated that is based on shell type elements.

Findings: It is possible to apply the research results for estimation of passive safety of buses structures in rollover conditions.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the field of bus design and estimation of bus passive safety.

Originality/value: The main peculiarity of the study is executing of comparative analysis between simulation results that were received for simplified and detailed models.

Key words: bus passive safety, finite element simulation, rollover, bearing capacity.