

## НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.113

Л.Н. Орлов, П.С. Рогов, А.В. Тумасов

### ВЫБОР БЕЗОПАСНОЙ СИЛОВОЙ СХЕМЫ КУЗОВА НА НАЧАЛЬНЫХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОБУСА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приводятся алгоритм и программа расчета силовых сечений кузова по разрушающим нагрузкам в условиях опрокидывания автобуса. Дано обоснование применения стержневых конечно элементных моделей на ранних этапах оценки пассивной безопасности автобусов. На примере секций типового кузова автобуса выполнена сравнительная оценка значений энергоемкостей при динамическом и эквивалентном квазистатическом нагружении.

*Ключевые слова:* пассивная безопасность, конечно-элементный анализ, опрокидывание, квазистатическая нагрузка, проектирование автобуса.

Повышению безопасности дорожного движения и уменьшению тяжести последствий дорожно-транспортных происшествий (ДТП) всегда уделяется большое внимание. Из возможных типов дорожных происшествий с участием автобусов, последствия их опрокидывания оказываются самыми тяжелыми. Это подтверждают и проведенные ранее исследования [1-2]. Поэтому оценка пассивной безопасности автобусов при опрокидывании с уступа высотой 0,8 м, в соответствии с требованиями Правил ЕЭК ООН №66, является основным регламентирующим требованием на данный момент (рис. 1, а). При этом в Правилах ЕЭК ООН №66 предусмотрена возможность проведения оценки посредством квазистатического нагружения кузова (рис. 1, б), а также по результатам расчетов и компьютерного моделирования.

В данной работе рассматривается процесс оценки несущей способности каркасов кузовов автобусов на ранней стадии проектирования с применением инженерного метода расчета по предельному состоянию [3], и метода конечных элементов в динамической и квазистатической нелинейных постановках.



Рис. 1. Экспериментальные методы оценки пассивной безопасности автобусов:  
а – опрокидывание с уступа; б – квазистатическое нагружение

С помощью инженерного метода можно воспроизвести условия квазистатического нагружения сосредоточенной силой секции или силового сечения кузова. В качестве уравнения равновесия этот метод использует принцип равенства работ внешних и внутренних усилий на возможных вариациях перемещений, который в случае действия одной аварийной нагрузки может быть представлен в следующем виде

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

где  $S$  - перемещение (деформация) конструкции по направлению действия внешней силы  $F_p$ ;  $M_{пл}$  - предельный пластический изгибающий момент;  $\theta_i$  - угол относительного поворота силовых элементов в  $i$ -м пластическом шарнире;  $n$  - степень статической неопределимости схемы (рис. 2).

Всю конструкцию каркаса автобуса можно разбить на отдельные силовые сечения, на каждое из которых будет действовать сосредоточенная сила. Суммарная разрушающая нагрузка на кузов в этом случае складывается из разрушающих нагрузок, полученных для отдельных плоских схем силовых сечений.

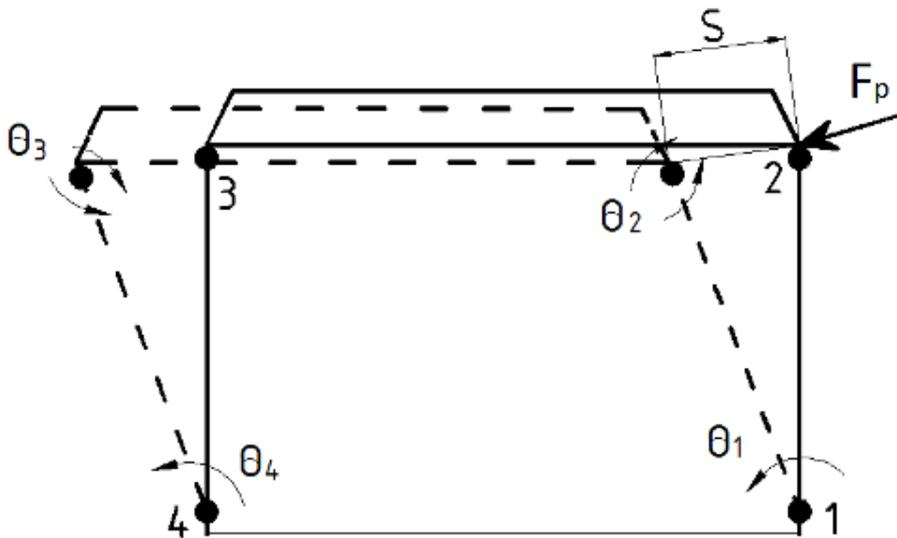


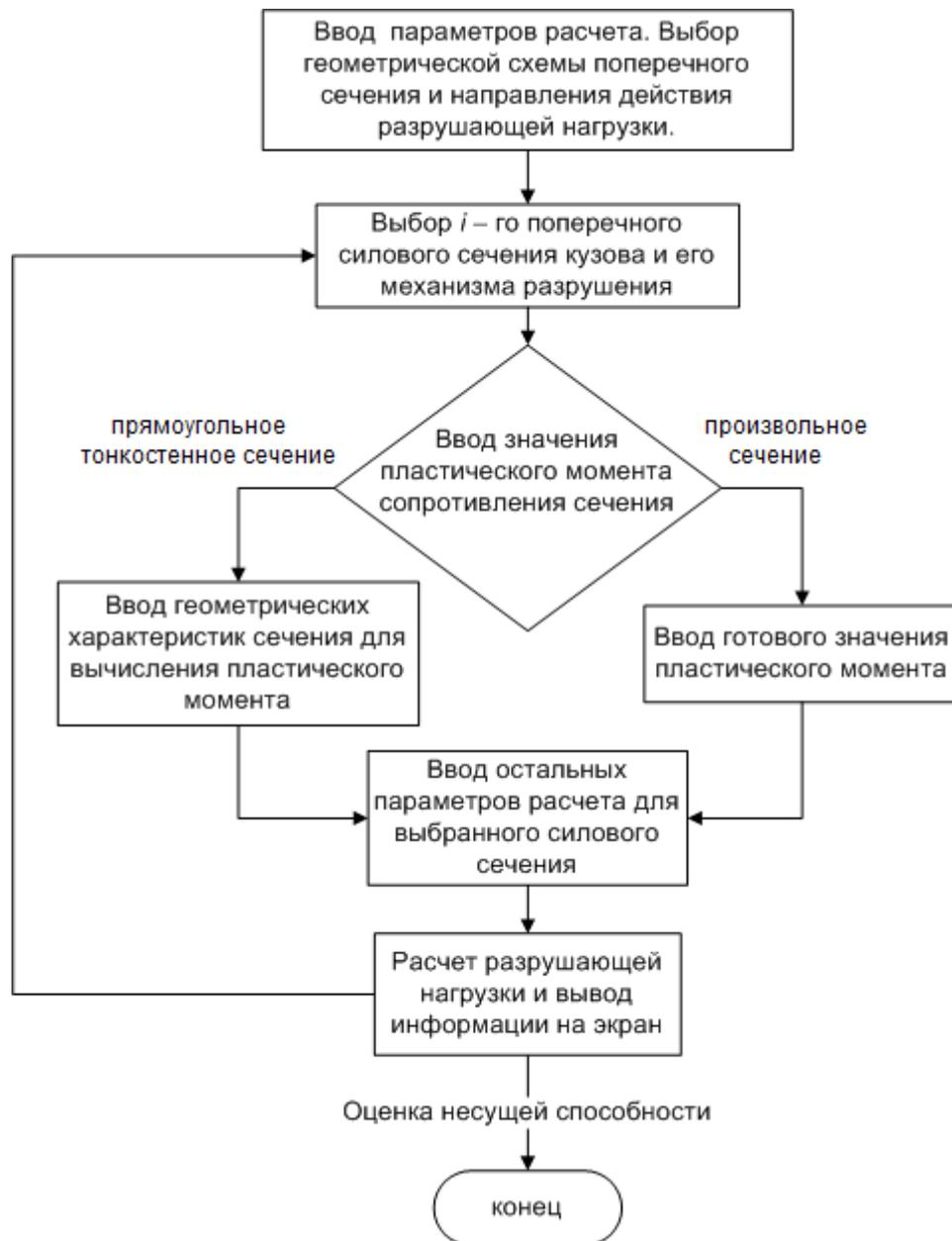
Рис. 2. Пример расчетной схемы силового сечения кузова и ее механизма разрушения; 1...4 - характерные узлы; ● - обозначение пластических шарниров

С целью автоматизации расчета несущей способности по разрушающим нагрузкам силовых сечений кузова автобуса, разработана программа на языке программирования VBA, блок схема которой приведена на рис. 3. С помощью этой программы автоматизируется определение выражений углов поворота в пластических шарнирах  $\theta_i$  и подстановка их в основное уравнение (1), а также определение значений разрушающих нагрузок путем подстановки в это уравнение числовых данных параметров конструкции для каждого силового сечения. В первом диалоговом окне происходит задание предела текучести ( $\sigma_T$ ) и угла наклона вектора силы ( $\alpha$ ) (рис. 4, а). Далее нужно выбрать направление приложения силы (горизонтальное под углом или вертикальное) и тип геометрической схемы силового сечения автобуса (рис. 4, б). Затем выбирается механизм разрушения. На рис. 4, в приведено диалоговое окно, в котором осуществляется выбор механизма разрушения. На примере двух рассматриваемых геометрических схем, которые являются наиболее характерными, рассмотрены все возможные варианты механизмов разрушения для средней, передней и задней секций кузова. Они учитывают также восприятие нагрузки раскосами боковин. Рассмотрен вариант конструкции передней секции с наличием вертикальной стойки в проеме лобового окна.

Далее для выбранного механизма необходимо ввести основные параметры расчета

(рис. 4, з). В этом диалоговом окне приведено итоговое выражение предельной разрушающей нагрузки, отображающее её зависимость от вводимых параметров конструкции. Более наглядно зависимость для схемы показана в следующем выражении:

$$F_p l_{1-2} \theta \cos \alpha = \sigma_T [W_I + W_{II} (1 + \frac{l_{1-2}}{l_{c-2}}) + W_{III} (\frac{l_{1-2}}{l_{c-2}}) (1 + \frac{l_{3-c}}{l_{3-4}}) + W_{IV} (\frac{l_{1-2}}{l_{c-2}}) (\frac{l_{3-c}}{l_{3-4}})]. \quad (2)$$



**Рис. 3. Блок - схема программы расчета несущей способности силовых сечений кузова автобуса по разрушающим нагрузкам**

Подобные зависимости получены для всех возможных схем поперечных сечений кузовов автобусов и механизмов их разрушения. Они являются основой алгоритма расчета разрушающих нагрузок и выбора безопасных силовых схем кузовов, заложенного в разработанную программу. При выборе безопасной силовой схемы кузова необходимо ориентироваться на поиск такого механизма его разрушения, при соответствующем распределении размеров сечений элементов, который обеспечивал бы разрушающую нагрузку, превышающую регламентированное значение. В том случае, если выполняется

оценка пассивной безопасности уже спроектированной конструкции, следует определить действительный механизм ее разрушения по минимальному значению разрушающей нагрузки из всех полученных  $A_i$  для возможных механизмов разрушения:

$$F_p = \min F_{pi} \{A_1 \dots A_n\} \quad (3)$$

Если это значение меньше регламентированного, то можно с уверенностью говорить, что данная конструкция не отвечает требованиям пассивной безопасности. А если больше, то окончательную оценку можно сделать только после уточненного расчета с использованием подробной конечно-элементной модели кузова. Инженерный метод целесообразно применять на начальном этапе проектирования, когда выбирается безопасная силовая схема кузова. После этого, по мере разработки его каркаса и панелей, формируется геометрическая модель кузова, на основе которой создаются комбинированная и подробная конечно-элементные модели [4].

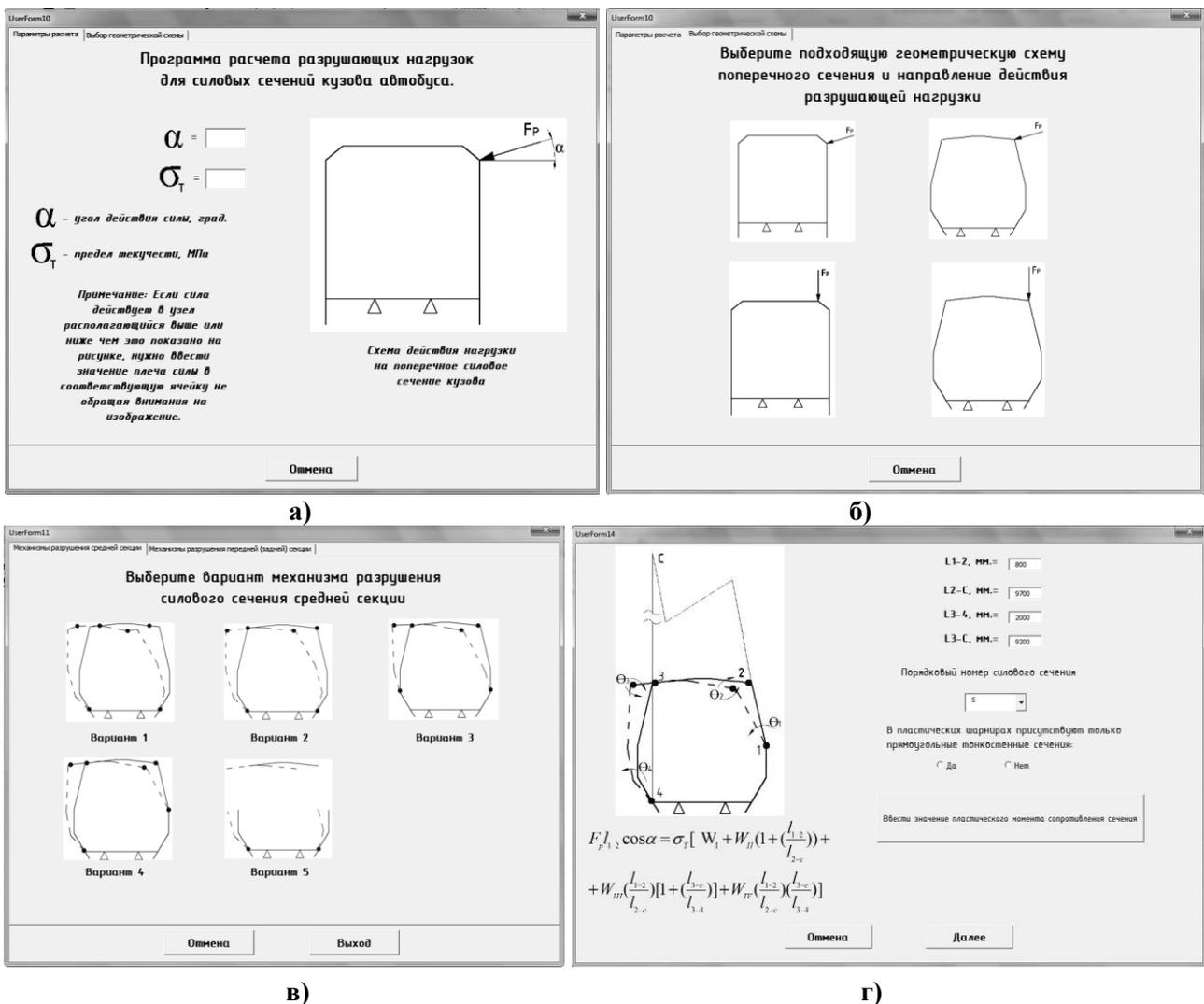
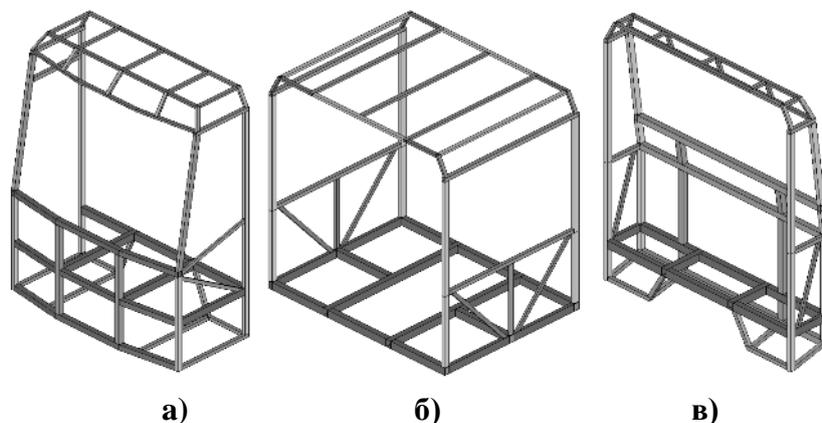


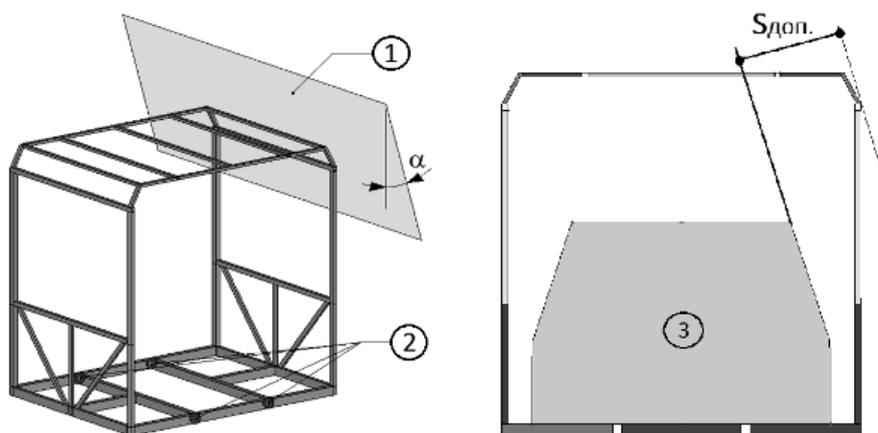
Рис. 4. Диалоговые окна программы расчета

С целью обоснования применения стержневых конечно-элементных моделей, а также оценки влияния скорости нарастания внешней нагрузки на энергоемкость конструкции были проведены специальные расчетные исследования. В качестве объектов исследований взяты передняя, средняя и задняя секции кузова автобуса (рис. 5). Для них разработаны два варианта конечно-элементных моделей: *стержневые* и *подробные*.

Условия нагружения для рассматриваемых моделей выбраны идентичными. Они нагружались движущейся поступательно жёсткой плитой с заданным перемещением на величину допускаемой деформации  $S_{\text{доп.}}$ . Каждая модель закреплялась по основанию в нескольких зонах. Угол  $\alpha$  между жёсткой плитой и секцией выбирается в соответствии с кинематикой опрокидывания автобуса с уступа высотой 0,8 м. Движение жёсткой плиты ограничивалось зоной остаточного пространства (рис. 6).



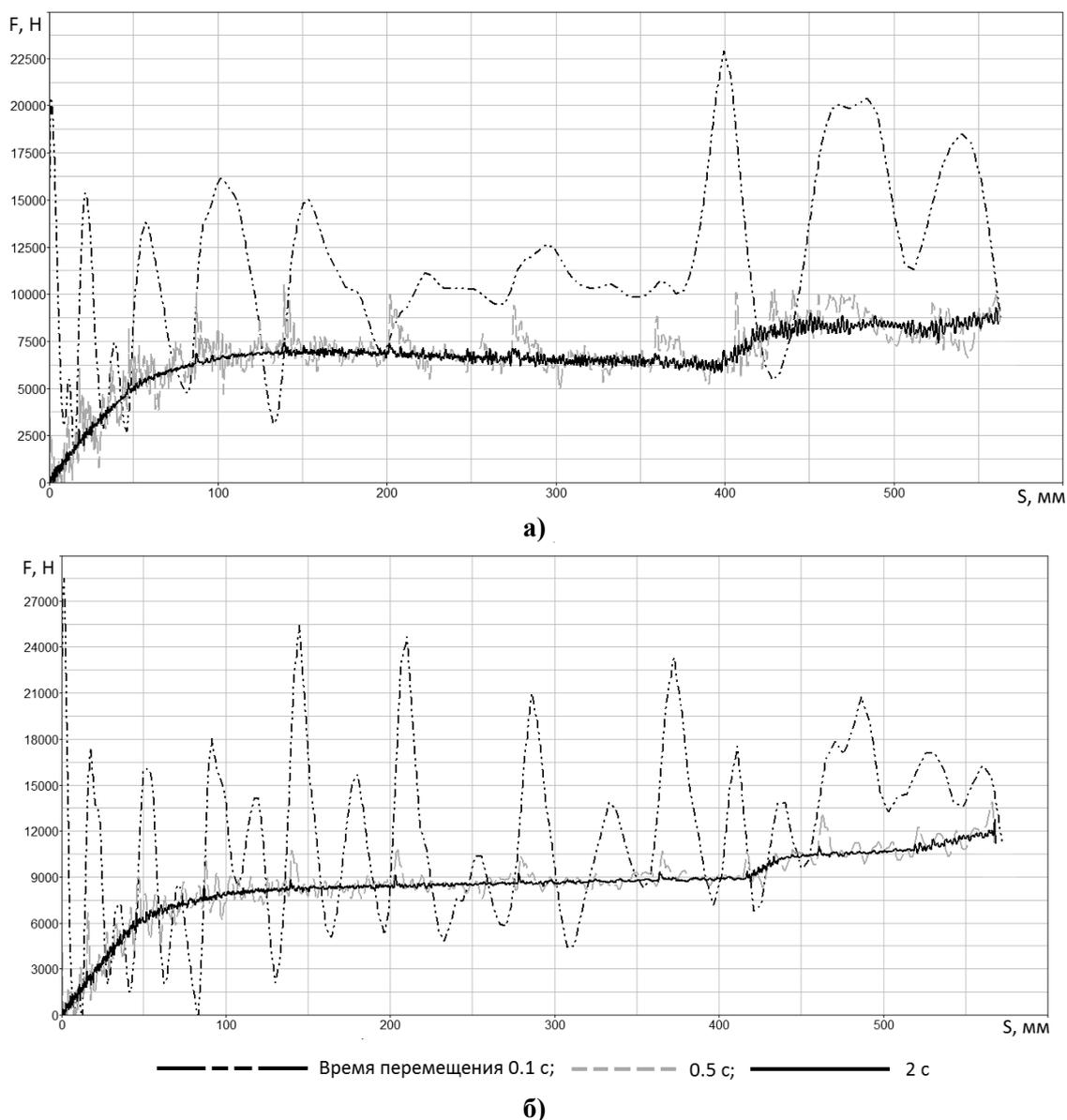
**Рис. 5. Секции каркаса кузова автобуса:**  
а – передняя; б – средняя; в – задняя



**Рис. 6. Схема нагружения расчетной модели:**  
1 - жесткая плита; 2 - расположение внешних опор; 3 - зона остаточного пространства безопасности;  
 $S_{\text{доп.}}$  - допускаемая деформация

Рассмотрено три варианта перемещения жесткой стенки на заданное расстояние, соответственно за время 0,1, 0,5, и 2 с. Возможное различие энергоемкостей моделей при квазистатическом и динамическом нагружениях заметно из сравнения уравнений равновесия для этих постановок. При статическом расчете внешняя нагрузка вызывает только перемещение узлов системы. При динамическом анализе кроме усилий обусловленных перемещениями, в уравнении присутствуют усилия, вызванные демпфированием конструкции и действием инерционных сил. Очевидно, что при ударе конструкции жесткой плитой, различие в энергоемкостях зависят от скорости ее движения, массы конструкции, и параметров вязкости материала. Для того, чтобы оценить порядок различия значений энергоемкости при динамическом и квазистатическом нагружении, имитирующих условия опрокидывания автобуса, был проведен сравнительный анализ. Сравнение выполнено посредством сопоставления графиков изменения разрушающей нагрузки в зоне контакта ударной плиты с конструкцией

(рис. 7). В табл. 1 приведены значения энергоемкостей секций, полученные при различных скоростях перемещения жесткой плиты. Заметно, что скорость нарастания нагрузки влияет также и на расхождение результатов между различными типами моделей - с увеличением времени перемещения расхождение становится более существенным.



**Рис. 7. Графики изменения усилия в зоне контакта в зависимости от перемещения жёсткой плиты, полученные для передней секции:**  
*а* - подробная модель; *б* - стержневая модель

Анализируя количественное значение полученных отклонений, можно сделать вывод, что разница энергоемкостей на 40% между результатами для времени 0,1 и 2 с перемещений плиты подтверждается зависимостью поглощаемой конструкцией энергии от скорости нарастания нагрузки. При опрокидывании автобуса скорость ударного нагружения близка по значению к скорости перемещения плиты на заданное расстояние за время 0,5 с. Энергия, полученная при квазистатическом нагружении, отличается от величины, полученной для времени перемещения 0,5 с в среднем на 3%. Этот результат требует дальнейшего уточнения, так как в рассматриваемых моделях не задавались характеристики демпфирования, и масса секций существенно отличалась от их массы в составе полнокомплектного автобуса.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что при сни-

жении скорости нарастания внешней нагрузки расчетная энергоемкость конструкции снижается. Поэтому использование квазистатических расчетов при проектировании может привести к получению завышенных значений энергоемкости.

С применением программы расчета несущей способности отдельных секций, временные затраты на получение и расчет уравнений разрушающей нагрузки значительно сокращаются. Это делает программу полезной на этапе выбора безопасной силовой схемы кузова, когда за короткие сроки нужно проанализировать несколько вариантов конструкции.

Таблица 1

## Значения энергоемкости стержневых и подробных моделей секций

Время перемещения жесткой стенки, с.	Энергоемкость, Дж								
	Передняя секция			Средняя секция			Задняя секция		
	Подробная	Стержневая	Расхождение, %	Подробная	Стержневая	Расхождение, %	Подробная	Стержневая	Расхождение, %
0,1	3877	4079	5,2	5660	6049	7	3072	3574	16
0,5	2392	2960	23,7	3199	3474	8,58	2381	2976	25
2	2306	2907	26	3081	3366	9,25	2327	2965	27,4

Отклонение результатов, полученных для различных типов моделей, не превышает 28%, что позволяет использовать стержневые модели каркаса кузова автобуса на ранних стадиях проектирования. Сравнительная оценка результатов расчетов разрушающих нагрузок инженерным методом с использованием стержневых моделей с данными испытаний [5], а также с результатами нелинейного конечно-элементного анализа показывает, что они имеют завышенное, примерно на 30%, значение. Это необходимо учитывать при выборе безопасных силовых схем проектируемых конструкций. На этапе доводки кузова отдельные части конструкции могут моделироваться с помощью стержневых элементов, при условии, что потеря формы сечений в этих силовых элементах незначительна и не будет влиять на характер механизма разрушения. На окончательном этапе проектирования целесообразно использовать подробную модель кузова, состоящую из оболочек.

## Библиографический список

1. **Sándor, Vincze-Pap.** Solutions and problems to be solved in bus/coach safety, *10th EAEC European Automotive Congress.* – Paper EAEC05YU-PS02 - Page 11.
2. **Kadir, Elitok.** Guler and Bertan Byram / Elitok Kadir, A. Mehmet //An Investigation on the Rollover Crashworthiness of an Intercity Coach, Influence of Seat Structure and Passenger Weight, *9<sup>th</sup> International LS-DYNA User Conference*, June, Dearborn, Michigan, USA, 2006.
3. **Орлов, Л.Н.** Пассивная безопасность и прочность кузовов, кабин автотранспортных средств. Методы расчета и оценки: учеб. пособие / Л.Н. Орлов; Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2005. – 230 с.
4. **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. – Нижний Новгород, 2009. – 153 с.

5. **Орлов, Л.Н.** Оценка пассивной безопасности, прочности кузовных конструкций автомобилей и автобусов: монография / Л.Н. Орлов; Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2005. – 130 с.

*Дата поступления  
в редакцию 17.01.2013*

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

**CHOICE OF A SAFE BODY STRUCTURE ON THE EARLY STAGES  
OF BUSES DESIGNING**

Nizhny Novgorod state technical university named after R.Y. Alexeev

**Purpose:** Comparative evaluation of dynamic and quasi-static loading, that simulate a rollover condition.

**Design/methodology/approach:** Investigation is based on finite element method with using different element types, and analytical method that includes some simplification and assumption.

**Findings:** During the study, the program for calculation of bearing capacity based on above-mentioned analytical method, was received.

**Research limitations/implications:** The present study provides a starting-point for further research of bus bearing capacity on different stages of it designing.

**Originality/value:** As result of this research, the deviation between the results of dynamic and equivalent by energy quasi-static loading that was applied to the bus body sections, was obtained.

*Key words* :passive safety, finite element simulation, rollover accident, quasi-static loading, bus designing.