

ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА ОПРОКИДЫВАНИЯ АВТОБУСА НА ДЕФОРМАЦИИ КУЗОВА

Рогов П.С., Орлов Л.Н., Зеленов М.Ю., Шабров Р.Н.

ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия (603950, ГСП-41, г. Н. Новгород, ул. Минина, д. 24), e-mail: dr_verhovtcev@mail.ru

В статье дан обзор используемых методов компьютерного моделирования условий опрокидывания автобуса. В соответствии с требованием приложения 9 Правил ЕЭК ООН № 66 осуществлено компьютерное моделирование опрокидывания секции кузова типового автобуса, выполненного на базе легкого коммерческого автомобиля. В расчетную модель закладывается экспериментально полученная кривая пластического упрочнения стали. С учетом условий приложения 6 данных Правил проведено также натурное опрокидывание этой секции. Путем сопоставления значений остаточных деформаций выполнено сравнение результатов расчета и эксперимента. При компьютерном моделировании детально рассматривается процесс поворота автобуса до удара в опорную поверхность. Анализируется изменение кинетической энергии в процессе опрокидывания. По результатам проведенного анализа дается вывод о влиянии поворота автобуса в процессе опрокидывания на значения деформаций его кузова.

Ключевые слова: Правила ЕЭК ООН № 66, эксперимент, автобус, метод конечных элементов.

INFLUENCE OF THE FEATURES OF THE BUS ROLLOVER PROCESS ON THE BODY STRUCTURE DEFORMATIONS

Rogov P.S., Orlov L.N., Zelenov M.Y., Shabrov R.N.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E.Alekseyev, Nizhny Novgorod, Russia (603950, Nizhny Novgorod, 24 Minin st.) e-mail: dr_verhovtcev@mail.ru

This paper gives the overview of the computer simulation methods of the bus rollover conditions. The rollover computer simulation of the bus section, which is performed on the base of a light commercial vehicle, is implemented according to the ECE R66 Regulation annex 9 requirement. The plastic hardening curve of the steel, obtained from the test, is used in the simulation model. The rollover test of the bus section is conducted considering requirements of the annex 6 of this Regulation. The comparison between the calculative and simulation data is carried out on the basis of the residual deformations values. The bus rotation process before its impact with ground is considered in detail at the computer simulation. Also the change of the kinetic energy during the rollover is analyzed. The results of the analysis allow us to make a conclusion about the bus rotation influence on the bus body deformation.

Keywords: ECE R66, test, bus, finite-element method.

Пассивная безопасность автобусов должна удовлетворять требованиям Правил ЕЭК ООН № 66. Согласно данному регламенту, базовый метод оценки прочности и энергоемкости заключается в проведении натурального опрокидывания автобуса с уступа высотой 0,8 метра. Схема проведения испытания приведена на рис. 1. Транспортное средство, находясь на платформе, постепенно наклоняется. При достижении центром тяжести максимальной высоты (положения 2) автобус начинает свободное падение с высоты 0,8 м. Падение продолжается до первого соприкосновения кузова автобуса с поверхностью земли, которому соответствует положение 3 центра тяжести.

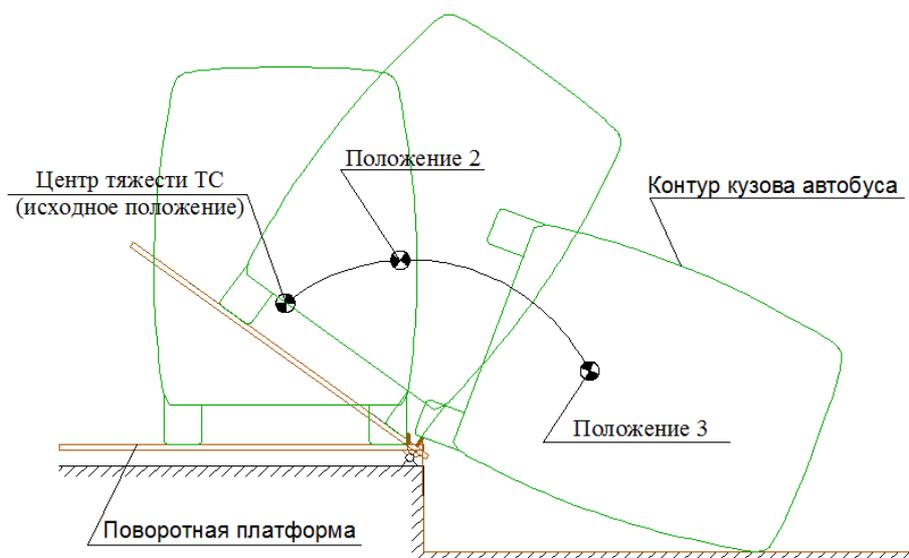


Рис. 1. Схема испытания автобуса на опрокидывание по условиям Правил ЕЭК ООН № 66

В качестве метода оценки пассивной безопасности, эквивалентного базовому, допускается использование компьютерного моделирования. При этом математическая модель должна описывать реальное физическое поведение силовой структуры в процессе опрокидывания. Реализация программы моделирования может начинаться не позднее первого соприкосновения автобуса с поверхностью земли [1]. Это означает, что процесс поворота автобуса с момента его неустойчивого равновесия до удара в опорную поверхность может детально не рассматриваться при компьютерном моделировании. В настоящий момент применяются разные способы компьютерного моделирования условий опрокидывания автобуса [2-5]. В работах [2; 4; 5] нагружение модели осуществляется с заданной кинетической энергией, а процесс поворота конструкции до удара не рассматривается. Положительной стороной этих методов является относительная простота использования. Поэтому важно знать, как процесс поворота автобуса при опрокидывании влияет на значения деформаций его кузова. Эту задачу можно решить путем проведения натурального эксперимента (рис. 2а) и последующего сравнения данных испытаний с результатами соответствующего расчета (рис. 2б).

Объектом исследования является конструкция, контур и расположение силовых элементов которой повторяют соответствующие параметры средней секции каркаса кузова типового автобуса, изготовленного на базе легкого коммерческого автомобиля. При испытаниях секция устанавливалась на подставку, имитирующую шасси транспортного средства. Для того чтобы они имели массовые характеристики (массу, расположение центра тяжести), аналогичные секции кузова автобуса, был введен балласт, жестко прикрепленный к элементам

основания секции и подставке. Общий вид испытательного стенда с секцией, подставкой и балластом показан на рис. 2а.



Рис. 2. Фото испытательного стенда с установленной секцией кузова (а) и вид разработанной конечно-элементной модели секции (б)

Для проведения компьютерного моделирования и задания характеристик материалов предварительно были проведены испытания образцов, извлеченных из тонкостенных труб секции, на одноосное растяжение. Полученная в результате испытаний кривая пластического упрочнения (рис. 3) была присвоена материалу секции при конечно-элементном анализе.

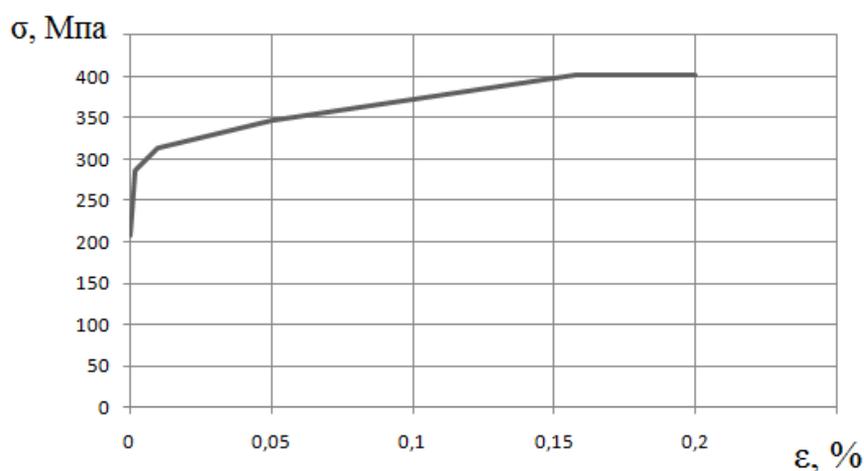


Рис. 3. Кривая пластического упрочнения стали

Численное моделирование процесса опрокидывания было аналогичным подходу, рассмотренному в работе [3]. Конечно-элементный анализ был проведен с использованием программного комплекса LS-Dyna. Процесс моделирования начинался с момента, соответствующего положению неустойчивого равновесия конструкции, а нагружение секции осуществ-

лялось приложением ускорения свободного падения. Подставка секции, ящик с балластом, поворотная площадка с упорами и опорная поверхность представлялись в общей модели абсолютно жесткими. Материал секции с заданной кривой пластического упрочнения переключался в процессе свободного падения на абсолютно жесткий, до момента контакта секции с опорной поверхностью. Весь процесс опрокидывания занимал 2,2 с, поэтому без переключения материала данный анализ потребовал бы значительного времени счета. В то время как при переключении свойств материала шаг приращения может быть увеличен в 10 и более раз, в результате чего время счета может быть значительно уменьшено. Необходимо отметить, что значение ускорения свободного падения на временном отрезке расчета с $t=2$ с до $t=2,2$ с преднамеренно уменьшается до 0, что позволяет измерять остаточные деформации модели.

Все конструктивные элементы модели представлялись shell-элементами. Средний размер элемента в модели секции равен 10 мм. В предполагаемых местах образования пластических шарниров размер элемента уменьшен до 6 мм, а у упоров платформы до 2,5 мм, для обеспечения точности контактного взаимодействия последних с подставкой секции. Общее количество элементов shell составило 230567. Вид разработанной всей модели показан на рисунке 2б.

В эксперименте и расчете определялось расстояние между контрольными точками до удара и после. После удара измерялась остаточная деформация после снятия нагрузки. По изменению данного расстояния происходило сравнение результатов расчета и эксперимента. Расположение контрольных точек показано на рис. 4. Результаты измерений занесены в таблицу 1.

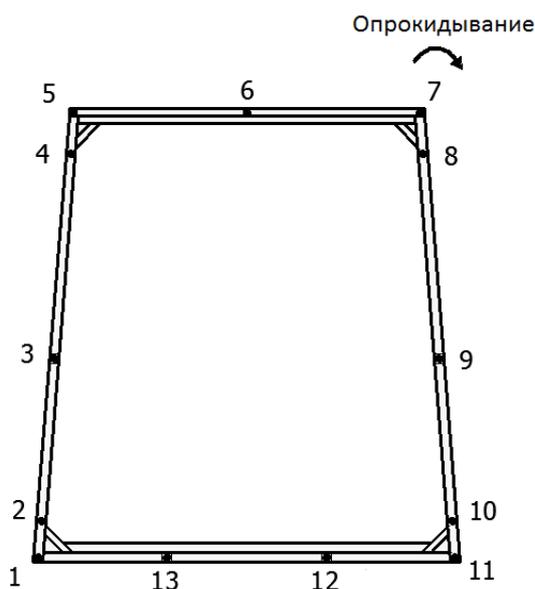


Рис. 4. Расположение контрольных точек секции

Таблица 1. Результаты эксперимента и расчета

Участок	Эксперимент			Расчет			Расхождение результатов, %
	Длина участка правой стороны		Изменение длины участка, мм	Длина участка правой стороны		Изменение длины участка, мм	
	Исходное состояние	Деформированное состояние		Исходное состояние	Деформированное состояние		
1-7	2480	1840	640	2488	1838	650	1,56
1-8	2329	1660	669	2344	1658	686	2,54
6-2	1925	1525	400	1944	1541	403	0,75
3-13	967	1120	-153	969	1131	-162	5,88
4-12	1981	2365	-384	2008	2420	-412	7,29
3-12	1410	1657	-247	1427	1686	-259	4,86
5-11	2463	2890	-427	2488	2937	-449	5,15
11-4	2322	2800	-478	2344	2848	-504	5,44
6-10	1914	2175	-261	1944	2217	-273	4,60
8-13	1990	1440	550	2008	1456	552	0,36
9-13	1410	1098	312	1427	1093	334	7,05

Как видно из таблицы 1, расхождение между результатами расчета и эксперимента находится в пределах от 0,36 до 7,29%. Это говорит о том, что данный метод компьютерного моделирования позволяет получить достоверный результат. Хорошая сходимость результатов подтверждается также сравнением картин деформированного состояния секции, показанных на рис. 5. Заметно, что в эксперименте ящик с балластом касается вертикальных стоек секции. Данная ситуация повторяется и в расчете. Заметно также, что расположение зон большой пластической деформации в расчете полностью совпадает с полученным экспериментально.

На рис. 6 приведен график изменения кинетической энергии модели в процессе опрокидывания. На графике наблюдается два резких перепада. Первый ($t=1.69$ с) обусловлен падением подставки секции с поворотной платформы. Интенсивное поглощение кинетической энергии при $t=1.81$ с объясняется контактом нижних углов конструкции с опорной поверхностью. Аналогичное изменение энергии детально описано в работе М. Matolcsy и С. Molnar [6], в которой анализируется энергетический баланс в процессе опрокидывания автобуса. Необходимо отметить, что столкновение нижней части конструкции с опорной поверхностью практически не оказывает влияния на деформацию верхней части секции. Наиболее очевидным фактором, влияющим на момент падения подставки (шасси автобуса) с упоров поворотной платформы, является скольжение конструкции по опорной поверхности. Поэтому чем выше коэффициент трения в зоне контакта кузова с опорной поверхностью, тем меньшим будет скольжение и выше деформация его верхней части.



Рис. 5. Картины деформированного состояния конечно-элементной модели и конструкции

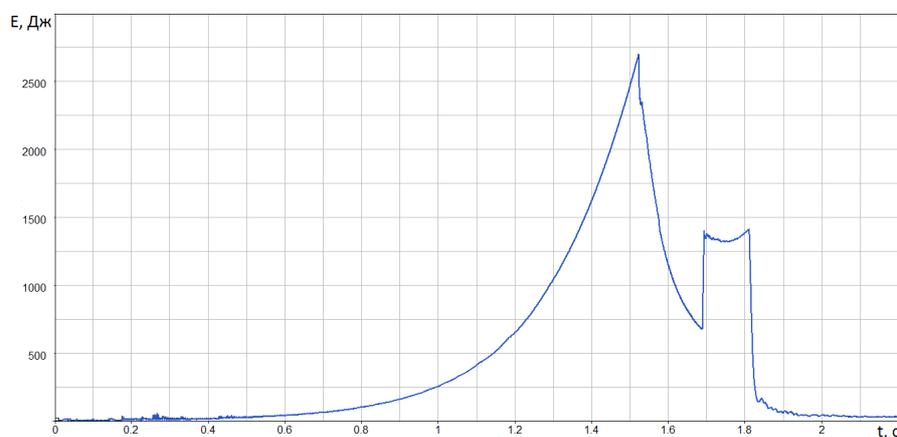


Рис. 6. Изменение кинетической энергии удара

В процессе опрокидывания секции (кузова) меняется ось его вращения. Это наглядно показано на рис. 7, где приведено взаимное положение подставки и упоров поворотной платформы в процессе опрокидывания. Изменение оси вращения влияет на момент инерции вращающегося тела, а значит и на величину кинетической энергии удара. Кроме того, расстояние S от нижнего края подставки до оси вращения определяет момент падения шасси с упоров поворотной платформы, т.е. в конечном счете влияет на величину деформаций кузова.

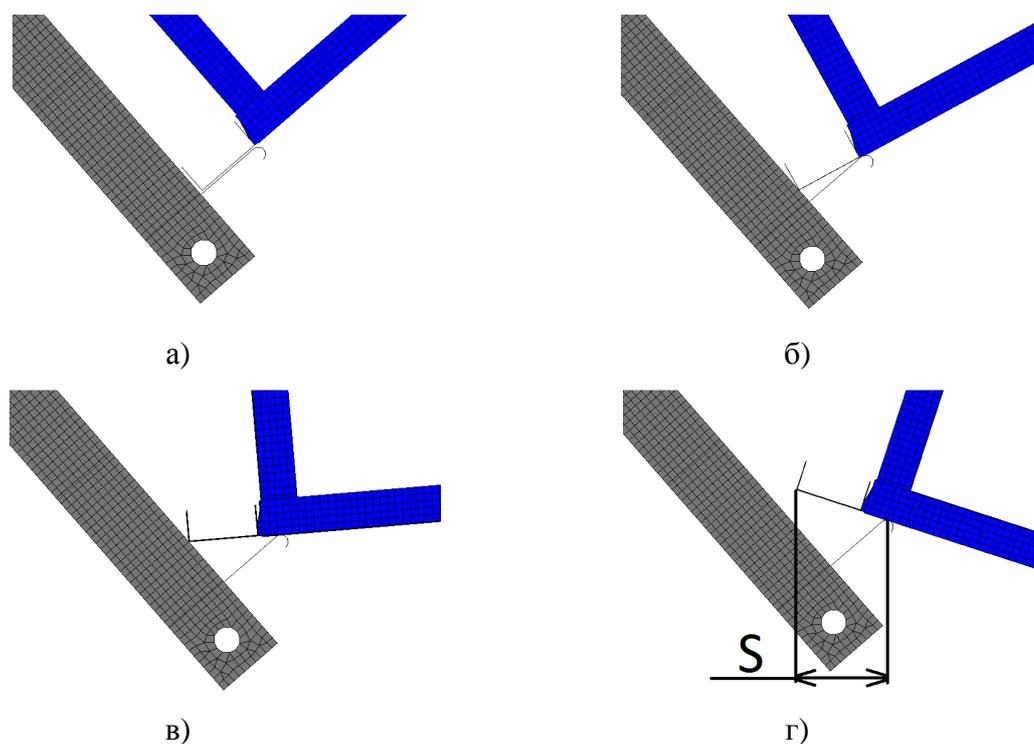


Рис. 7. Взаимное расположение подставки и упоров секции в момент времени:
 а) $t=0$; б) $t=0,9$ с; в) $t=1,3$ с; г) $t=1,5$ с

Основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод о том, что компьютерное моделирование опрокидывания автобуса, с учетом его поворота до удара, обеспечивает хорошую сходимость результатов расчета и эксперимента. Методы компьютерного моделирования, в которых неподвижно закрепленная конструкция ударяется жестким телом [2] (маятником, жесткой плитой с поступательным или вращательным движением), не учитывают падения шасси с поворотной платформы, изменения оси вращения конструкции в процессе опрокидывания, распределения массы конструкции по длине кузова. Однако процедура подготовки расчетной модели для использования указанных методов является менее трудоемкой. Это позволяет использовать их в процессе проектирования автобуса, когда информация о расположении узлов и агрегатов, а также пассажирских сидений отсутствует. Известен метод, в котором начало реализации моделирования соответствует первоначальному контакту автобуса с опорной поверхностью, и всем узлам модели сообщается угловая скорость [4; 5]. Он также не учитывает изменения оси вращения конструкции в процессе опрокидывания. Поэтому падение автобуса с упоров поворотной платформы будет происходить при уровне поглощенной энергии, не соответствующем реальному. Есть еще один недостаток всех вышеупомянутых упрощенных методов моделирования. Он заключается в отсутствии в расчетной модели дополнительных компонент вращения, обусловленных разным значением высот центров тяжести отдельных секций автобуса. Поэтому в реальных условиях опрокидывания первоначальный удар кузова в опорную поверхность может происходить одним из крайних углов крыши (передним или задним). Количественное значение влияния этого явления мож-

но получить при рассмотрении в эксперименте более сложной несимметричной конструкции с неравномерным распределением массы, что предполагается сделать в дальнейшем.

Таким образом, при оценке пассивной безопасности автобуса по результатам компьютерного моделирования важно учитывать процесс его поворота до момента удара в опорную поверхность, для получения более точного результата.

Данные исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта по договору № 02.G25.31.0006 от 12.02.2013 г. (постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года № 218).

Список литературы

1. Правила ЕЭК ООН № 66 «Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения крупногабаритных пассажирских транспортных средств в отношении прочности их силовой структуры», Пересмотр 1.
2. Тумасов А.В. Оценка несущей способности каркаса кузова автобуса по результатам компьютерного моделирования / А.В. Тумасов, Л.Н. Орлов, П.С. Рогов и др. // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. - 2012. - № 3 (96). - С. 150-156.
3. Niii N., Nakagawa K. Rollover analysis method of a large-sized bus // 15th International technical conference on the enhanced safety of vehicles. Melbourne, Australia, 1996.
4. Castejon L., Miravete A., Larrode E. Intercity bus rollover simulation // Int. j. of vehicle design. - 2001. - Vol. 26. - P. 204-217.
5. Kumar S. Rollover analysis of bus body structure as per AIS 031/ECE R66 // HyperWorks technology conference. Bangalore, India, 2012.
6. Matolcsy M., Molnar C. Bus rollover test as a process and its energy balance // 30th Meeting of bus and coach experts. Győr, Hungary, 1999.

Рецензенты:

Аникин А.А., д.т.н., директор НИЛ ТМ ТТК, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород.

Вахидов У.Ш., д.т.н., заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород.