



МЕХАНИКА МОБИЛЬНЫХ МАШИН

УДК 620.3

А.В. ОМЕЛЮСИК

младший научный сотрудник отдела моделирования и виртуальных испытаний Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля¹

E-mail: alexlifting@mail.ru

А.В. ШМЕЛЁВ, канд. техн. наук

заместитель генерального директора по научной работе¹

E-mail: shmeliov.alexei@gmail.com

А.О. ШУКЮРОВ

младший научный сотрудник отдела моделирования и виртуальных испытаний Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля¹

П.С. ЛИТВИНЮК

младший научный сотрудник отдела моделирования и виртуальных испытаний Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля¹

E-mail: pavel1993by@mail.ru

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 05.07.2019.

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОБУСОВ ПРИ ОПРОКИДЫВАНИИ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрены существующие подходы отечественных и зарубежных исследователей в области моделирования нагружения каркасов автобусов при расчетной оценке силовой структуры на соответствие требованиям пассивной безопасности при опрокидывании. Определены критерии и основные способы повышения качества компьютерных моделей, сокращения длительности расчетов. Изложены и описаны основы методики выполнения компьютерного моделирования испытаний автобусов на соответствие требованиям Правил ООН № 66. Приведен пример использования предложенных методических рекомендаций при подготовке компьютерной модели пригородного автобуса для проведения расчетной оценки силовой структуры с помощью программного комплекса конечно-элементного анализа ANSYS LS-DYNA. Подготовка модели выполнена в программе Ls-PrePost.

Ключевые слова: силовая структура, автобус, пассивная безопасность, компьютерная модель, конечно-элементный анализ, угол опрокидывания, опрокидывающая платформа, момент инерции, начальная угловая скорость, потенциальная энергия удара, Правила ООН № 66

Введение. Одними из ключевых требований, предъявляемых к силовым конструкциям кузовов автобусов, являются требования к их безопасности. Данные требования заключаются в способности конструкции сохранять необходимое жизненное пространство в салоне для минимизации травмирования водителя и пассажиров в ходе ве-

роятного дорожно-транспортного происшествия (ДТП). В странах, присоединившихся к Женевскому соглашению 1958 года, в отношении требований к безопасности конструкций кузовов автобусов действуют Правила ООН № 66 [1]. Документ регламентирует процедуру проведения и анализа результатов испытаний по исследованию жестко-

сти и прочности кузова. На данный момент в отношении кузовов пассажирских транспортных средств в Республике Беларусь действуют Правила № 66(02)/Пересмотр 1.

Современные достижения в области численных методов решения задач механики деформируемого твердого тела, реализованные в виде расчетных программных комплексов с одной стороны, а с другой — наличие высокопроизводительных многопроцессорных рабочих станций, возможности объединения вычислительных ресурсов в рамках сети в виде кластеров в комплексе позволяют в сжатые сроки решать задачи по анализу быстропротекающих динамических процессов с учетом реальной геометрии объекта исследования, подробного описания контактного взаимодействия, нелинейных свойств материала, критериев разрушения, уравнений состояния материалов и т. д.

Важным аспектом актуальности развития расчетных методов оценки соответствия конструкций кузовов требованиям безопасности является то, что приложение 9 Правил ООН №66(02) / Пересмотр 1 уже сегодня позволяет производить замену натуральных испытаний виртуальными при наличии достаточного объема обоснований достоверности расчетов.

Для решения задач компьютерного моделирования динамического нагружения конструкций машин на практике наиболее широкое применение получил метод конечных элементов в явной постановке. Однако для высокопроизводительных вычислительных средств и программного обеспечения необходимо иметь методическое обеспечение по подготовке расчетной модели. Таким образом, актуальной является задача по выработке методических рекомендаций и подходов к оценке силовой структуры транспортного средства (ТС) численными методами, обеспечивающих минимизацию времени данного процесса и достоверность результатов расчетов при выполнении требований Приложения 9 Правил ООН № 66 [1].

Анализ известных подходов в области подготовки компьютерной модели силовой структуры автобуса при расчете на опрокидывание. В процессе выполнения расчетных исследований можно выделить две части: первая — подготовка расчетной модели; вторая — непосредственно расчет. При этом первый этап характеризуется наиболее длительным временем выполнения. Это связано с преобразованием исходной геометрической модели, настройкой и заданием исходных данных, проведением дополнительных верификационных исследований. В связи с этим перед исследователями и расчетчиками ставится задача подготовки адекватных и достоверных компьютерных моделей, позволяющих в минимальные сроки и с достаточным уровнем достоверности получить оценку исследуемых показателей прочности конструкции. Авторами работы [2] при виртуальных

испытаниях на опрокидывание кузова автобуса ГолАЗ-5290 и его отдельных секций в целях сокращения машинного времени счета материал конструкции каркаса сначала задавался как абсолютно жесткий и в момент начала столкновения с опорной поверхностью «переключался» на деформируемый.

Одной из актуальных и наиболее комплексных работ, посвященных оценке пассивной безопасности автобусов, является диссертационная работа П.С. Рогова [3]. Автором анализировались и рассчитывались модели автобуса с учетом обшивки кузова, сидений и поручней. Показано, что наличие данных элементов может уменьшить расчетную величину деформации стоек кузова до 20 %. Моделирование нагружения проводилось путем предварительного поворота автобуса к опорной поверхности с приданием ему угловой скорости, соответствующей моменту столкновения с опорной поверхностью. При этом для определения угловой скорости в момент удара автобус рассматривался как материальная точка, а его момент инерции определялся путем произведения массы на квадрат расстояния до оси опрокидывания.

В работе [4] исследовалось нагружение балочных и оболочечных моделей секций каркаса по квазистатическому принципу. Результаты расчетов показали, что упрощенная (балочная) конечно-элементная модель имеет более высокую несущую способность (на 10–30 %), чем аналогичная подробная модель, состоящая из оболочечных элементов. Это вызвано невозможностью описания балочными элементами потери формы сечения в результате больших пластических деформаций.

Одним из используемых способов имитации процесса опрокидывания является моделирование ударного нагружения кузова автобуса поворотной плитой [5]. Авторы отмечают, что такой режим нагружения является более жестким и повреждающим в сравнении с реальным опрокидыванием автобуса, поскольку он не учитывает возможность его соскальзывания с буртика опрокидывающей платформы и соударения с опорной поверхностью по всей площади боковины.

Сопоставление результатов натурального и виртуального опрокидывания секции каркаса проводилось в работе [6]. Расчеты выполнялись с использованием программного обеспечения ANSYS LS-DYNA. Поворотная площадка и ящик с балластом моделировались как абсолютно жесткие тела. При соединении ящика с балластом, подставки и секции между собой применялась опция `CONSTRAINED_EXTRA_NODES_SET`. Все конструктивные элементы модели состояли из оболочечных элементов. Материал секции с заданной кривой пластического упрочнения в ходе расчета до момента контакта секции с опорной

поверхностью задавался как абсолютно жесткий, а затем «переключался» на деформируемый. При этом материал конструкции задавался с помощью билинейной модели материала MAT_PLASTIC_KINEMATIC. Отмечено, что при «переключении» свойств материала время счета может быть уменьшено в 10 и более раз.

Процесс испытаний состоит из двух стадий: опрокидывание, в процессе которого конструкция набирает энергию, и непосредственно удар. В связи с этим для расчета первой стадии испытаний широкое распространение среди отечественных и зарубежных исследователей получило применение программных комплексов для исследования кинематики и динамики многокомпонентных механических систем (MultiBody System или MBS), в частности программного комплекса MSC.ADAMS. Конструкция силовой структуры автобуса рассчитывается как система, состоящая из жестких тел и кинематических соединений/пар с заданными характеристиками жесткости и ориентацией осей вращения в пространстве. Авторы работы [7] провели сравнение MBS и конечно-элементного моделирования на примере динамического нагружения консольно-закрепленной трубы. Получено хорошее соответствие результатов. Однако при использовании MBS необходимо иметь координаты положения, характеристики жесткости и ориентацию осей вращения в пространстве кинематических пар.

Совместное использование программных комплексов для динамико-кинематических исследований и МКЭ для расчета каркасов автобусов на безопасность применялось в работе [8]. Программный комплекс MSC.ADAMS применялся с целью определения кинематических и динамических параметров падения автобуса. Автобус был смоделирован в виде параллелепипеда. Полученные значения скорости падения задавались в расчетной конечно-элементной модели в пакете LS-DYNA, где автобус предварительно поворачивался к опорной поверхности в положение, соответствующее моменту удара. Совместное использование программных комплексов позволило с высокой достоверностью описать процесс опрокидывания.

Оценка пассивной безопасности туристического автобуса с применением программы LS-DYNA продемонстрирована в работе [9]. Характеристики материала каркаса задавались с помощью полилинейной модели MAT_24 PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_MODEL, агрегатам автобуса придавались свойства абсолютно жестких тел. При моделировании нагружения автобус предварительно поворачивался к ударной поверхности до момента контакта с ней.

Энергию удара определяли по формуле:

$$E = 0,75 \cdot M \cdot g \cdot h,$$

где M — масса автобуса; g — ускорение свободного падения; h — вертикальное перемещение центра тяжести ТС при опрокидывании.

После вычисления энергии удара определялась угловая скорость в момент начала контакта автобуса с опорной поверхностью.

Похожая методика изложена в работе [10]. Особенностью данной работы является то, что при расчете параметров кинематики и динамики падения автобуса с помощью программных средств многокомпонентного моделирования учитывались кручение кузова при помощи коэффициентов жесткости, характеристики подвески и жесткость шин.

В работе [11] моделирование опрокидываемой секции выполнялось комбинированным методом. Стойки смоделированы в виде стержневых элементов, а крыша, пол и обшивка — в виде оболочек. Данный подход направлен на снижение машинного времени вычисления.

Свой способ сокращения времени расчета изложили авторы в работе [12]. Секция кузова была смоделирована в виде балочного каркаса с упругими элементами, имеющими нелинейные характеристики. Характеристики упругих элементов задавались на основании осевых, изгибных и крутильных разрушающих нагрузок элементов конструкции каркаса.

Оценка пассивной безопасности автобусов с помощью программного обеспечения RADIOSS отражена в работе [13]. Моделирование нагружения автобуса выполнялось путем поворота его к ударной поверхности с соответствующим заданием центра вращения и угловой скорости. В данной работе используется подробная конечно-элементная модель автобуса, включая стекла, панели, фары, подробные модели колес.

Таким образом, из приведенных работ следует, что основными критериями оценки качества расчетных моделей являются достоверность и общая длительность расчетов. В свою очередь, общая длительность расчетов состоит из времени, затраченного на подготовку модели, и машинного времени расчета. При этом наиболее длительной является именно первая составляющая. Она зависит в первую очередь от методики подготовки расчетной модели, возможностей организации подготовки, а также программного обеспечения, позволяющего реализовать необходимые функции подготовки модели.

Для уменьшения машинного времени счета проводят испытания отдельных секций каркаса, используют балочные и комбинированные модели, применяют переключение материала с абсолютно жесткого на деформируемый, перед расчетом поворачивают автобус к ударной поверхности либо имитируют нагружение ударом поворотной платформы.

Критерием достоверности компьютерной модели силовой структуры автобуса, как правило,

является соответствие расчетных и экспериментальных значений показателей, контролируемых в ходе физических испытаний — перемещений боковых стоек автобуса после его опрокидывания. Повышение достоверности результатов расчета обеспечивается моделированием обшивки каркаса, поручней, сидений, установкой точного расположения центра тяжести, проведением исследований кинематики падения автобуса с помощью многокомпонентных систем моделирования.

По результатам выполненного анализа работ предлагается применять следующие рекомендации, направленные на сокращение времени расчета при обеспечении высоких требований к достоверности результатов:

- обеспечение высокого уровня точности идентификации параметров моделей материалов;
- учет неравномерного распределения прочностных свойств в элементах конструкции;
- при исследовании кинематики падения автобуса использовать модель с распределенными массами;
- методические рекомендации по подготовке модели;
- определение параметров опрокидывания автобуса в программных средствах, в которых непосредственно выполняется подготовка модели;
- использование способа предварительного поворота силовой структуры автобуса к ударной поверхности перед нагружением.

Методические рекомендации по подготовке компьютерной модели автобуса при компьютерном моделировании испытаний силовой структуры по требованиям пассивной безопасности. С учетом опыта ранее выполненных работ по моделированию испытаний силовых структур автобусов, а также работ отечественных и зарубежных исследователей в Республиканском компьютерном центре машиностроительного профиля Объединенного института машиностроения НАН Беларуси разработаны и применяются методические подходы к подготовке модели автобусов при проведении компьютерного моделирования испытаний силовых структур согласно требованиям Правил ООН № 66. Основные этапы подготовки модели силовой структуры автобуса приведены ниже:

- сбор и подготовка исходных данных для расчетных исследований:
 - а) свойства материалов, элементов конструкции, валидация свойств [14];
 - б) конструкторская САД-модель (силовая структура, рама, передняя ось, задний мост, двигатель, трансмиссия, система охлаждения, топливный бак);
 - в) техническое описание (координаты положения центра тяжести, значение снаряженной и полной массы автобуса, количество мест для сидений);
 - г) массовые характеристики узлов и агрегатов;
- подготовка геометрической модели;

- создание конечно-элементных моделей;
- проверка качества и корректировка конечно-элементной сетки;
- дополнение симметричных частей конструкций до первоначального состава (операция «зеркало»);
- задание свойств и настроек конечно-элементным моделям сборочных единиц;
- создание необходимых соединений и связей между конструкциями;
- сборка общей конечно-элементной модели автобуса;
- создание соединений и связей между моделями сборочных единиц;
- добавление моделей и расположение контактных поверхностей;
- задание начальных, граничных и контактных условий;
- задание параметров вывода информации и подготовка исходного файла модели к запуску решения;
- расчет;
- анализ результатов расчета;
- детализация расчетной модели (при необходимости):
 - а) моделирование панелей, поручней, сидений;
 - б) моделирование стекол;
- расчет;
- анализ результатов расчета.

Согласно представленным этапам, исходными данными для начала выполнения работ является конструкторская геометрическая твердотельная 3D-модель силовой структуры и конструкций автобуса, в которую входят: каркас, панели обшивки, стекла, сиденья, шасси (если рамная конструкция), узлы и агрегаты. В техническом описании должны быть указаны координаты положения центра тяжести, соответствующие снаряженному состоянию автобуса. В документе о массовых характеристиках узлов и агрегатов должна быть информация о значениях масс основных компонентов автобуса. САД-модель автобуса представляется в файле, содержащем общую сборку деталей и конструкций автобуса. В зависимости от лицензионных настроек программного обеспечения это может быть файл специализированного САД-пакета, либо файл данных в нейтральном формате parasolid, iges, step и т. д., поддерживаемом интерфейсом программы графического пре-процессора конечно-элементного анализа.

С целью минимизации трудоемкости в рассматриваемом процессе подготовки расчетной модели предусмотрено использование ранее разработанных моделей узлов и конструкций, применяемых в исследуемом автобусе. Поэтому на данном этапе определяются и исключаются из рассмотрения сборочные единицы или конструкции, модели которых уже имеются в наличии по результатам предшествующих исследований, если таковые имели место.

На втором этапе работы CAD-модель автобуса делится на сборочные единицы, состоящие как из отдельных конструкций, так и групп конструкций (сборок). Это важный и принципиальный момент работы. Начиная с этого этапа наиболее трудоемкая как по времени, так и по ресурсам работа может выполняться параллельно различными специалистами. При этом руководитель проекта имеет возможность распределить выполнение задач по сложности и согласно квалификации работников. Это позволяет существенно сократить время подготовки расчетных геометрических моделей.

Разделение CAD-модели на сборочные единицы осуществляется исходя из компоновочных и технологических решений автобуса, позволяющих минимизировать трудоемкость сборки и задания свойств общей расчетной модели. Формируются сборочные единицы, состоящие как из отдельных конструкций, так и групп конструкций, объединяемых по функциональным, либо технологическим признакам. Необходимо отметить, что количество сборок или отдельно выделенных конструкций не зависит от числа исполнителей. Положительный эффект разделения достигается упрощением организации и выполнения работы, а также контроля всего процесса ее выполнения.

Как было сказано выше, так как общая модель представляется сборочными единицами, то часть конструкций или сборочных единиц, соответственно и их конечно-элементные модели, переходящие без изменений от предшествующих вариантов автобусов, может использоваться из ранее выполненных работ либо, наоборот, — в последующих работах. Это существенно ускоряет процесс исследований и поиска нового решения и выводит процесс проектирования на более высокий, системный уровень.

На следующем этапе выполняется подготовка расчетных геометрических 3D-моделей. Как было сказано выше, работа ведется параллельно по CAD-моделям отдельных конструкций или сформированным сборочным единицам конструкций. Учитывая особую трудоемкость данной стадии, приведем основные выполняемые операции:

- удаление из модели избыточных геометрических объектов, не оказывающих влияния на исследуемые процессы;
- выделение конструкций и деталей, имеющих плоскости симметрии и их разделение («резка») по этим плоскостям с удалением избыточной информации для дальнейшей работы с уменьшенным объемом данных;
- преобразование конструкций, изготавливаемых из тонколистового материала, представленных объемной твердотельной геометрией, в поверхности (выделение срединных поверхностей);
- упрощение геометрии (удаление геометрических элементов с относительно малыми геометрическими размерами, например отверстия, скру-

- гления, фаски, технологические элементы и т. д.);
- разделение («разрезка») геометрически сложных деталей и конструкций на более простые с целью обеспечения контроля создания расчетной сетки;
- проверка и обеспечение соединений составных частей единого элемента конструкции между собой;
- исключение взаимных пересечений конструкций и деталей модели;
- создание упрощенных геометрических моделей крепежных элементов (болты, заклепки и т. п.);
- задание мест расположения точечной и шовой сварки (если не присутствуют в исходной CAD-модели).

На следующей стадии на основе упрощенных и преобразованных геометрических 3D-моделей выполняется создание конечно-элементных моделей конструкций автобуса. При создании сетки рекомендуется использование четырехузловых оболочечных и восьмиузловых объемных элементов не вырожденной формы. Применение элементов вырожденной формы в сочетании с сокращенными схемами интегрирования при расчете может негативно повлиять на точность результатов.

Генерация сетки ведется с жесткими требованиями к минимальным размерам элементов. Это обусловлено тем, что при явной схеме интегрирования время шага расчета описывается условием Куранта—Фридрикса—Леви и заключается в том, что этот шаг должен быть меньше времени прохождения волны деформации через элемент [15]:

$$\Delta t \leq \frac{l_c}{c},$$

где Δt — шаг по времени; l_c — характерный размер элемента; c — скорость звука в среде (материале).

Из зависимости следует, что уменьшение размеров элемента ведет к пропорциональному увеличению длительности процесса вычислений (без изменения других параметров). С противоположной стороны, крупная сетка некорректно описывает форму конструкции, а, следовательно, ее деформации и напряжения в рассматриваемых зонах. Учитывая это, рекомендуемый размер оболочечного элемента при моделировании наиболее нагруженных элементов автобуса может составлять 8–10 мм. В этом случае шаг по времени для стальных конструкций составит порядка 0,6–1 мкс. Таким образом, на данном этапе, стоит задача получения для конструкций модели равномерной регулярной сетки заданного размера.

Проверка качества конечно-элементной сетки выполняется, как написано выше, во-первых, по критерию размера элемента, и, во-вторых, по комплексу таких критериев, как аспектного соотношения сторон элемента, якобиана, конусности, скошенности, коробления, наличия или соотношения элементов вырожденной формы к общему числу элементов и т. д. При нахождении элемен-

тов, не соответствующих требованиям, выполняется корректировка модели по устранению найденных отклонений.

После получения конечно-элементных моделей, соответствующих заданным требованиям, выполняется общее задание свойств и настроек всех составных частей модели, заключающихся в выполнении следующих операций:

- описание и присвоение свойств материалов;
- задание толщин оболочек;
- выбор формулировок описания и особенностей интегрирования используемых элементов;
- задание свойств, описывающих точечную, шовную сварку и другие виды соединений;
- описание упругих и демпфирующих свойств элементов подвески.

Описание свойств материалов рекомендуется выполнять с использованием моделей материалов, описывающих нелинейные свойства и позволяющих задавать критерии разрушения. При этом предпочтение дается параметрам моделей, полученным по результатам натурных испытаний образцов материалов или исследований элементов конструкций.

На следующем этапе подготовки модели выполняется ряд операций по дополнению и объединению симметричных частей конструкций до их полного состава. Таким образом, все работы по совершенствованию геометрии и конечно-элементной сетки, выполненные на предыдущих этапах, проводятся с существенно сокращенным объемом, что позволяет до двух раз сократить длительность выполнения этих стадий процесса подготовки моделей.

Далее создаются необходимые соединения и связи между конструкциями, содержащимися в отдельных группах. Таким образом создаются и описываются сварные, болтовые, заклепочные и другие соединения; контактные пары; кинематические связи и т. д.

С целью проверки адекватности и работоспособности (верификации) созданных моделей и связей проводятся расчеты по упрощенным схемам нагружения. Задача таких вычислений — выявить возможные неточности и проблемы созданных моделей, что позволяет существенно упростить и минимизировать трудоемкость более сложного этапа доработки, поиска и исправления ошибок общей модели автобуса. Примером таких расчетов является модальный анализ, позволяющий выявить плохо закрепленные части модели.

По мере готовности моделей сборочных единиц выполняется их объединение в общей конечно-элементной модели автобуса. Аналогично работе со сборочными единицами на этой стадии выполняется создание необходимых соединений и связей, только уже между данными группами конструкций.

После подготовки общей модели автобуса выполняется добавление моделей ударной поверхности, опрокидывающей платформы, остаточного пространства и пассажиров, с последующим их позиционированием в пространстве согласно требованиям Правил ООН № 66. Задаются начальные и граничные условия, обеспечивающие необходимые значения энергии силового воздействия и кинематику движения автобуса, а также условия его контактного взаимодействия с ударной и опорной поверхностями.

С целью сохранения на жестком диске в ходе расчета необходимой для последующего анализа информации, содержащей процессы изменения интересующих показателей в заданном объеме и с определенной периодичностью, задается длительность выполнения расчета, параметры вывода информации. Выполняется запись исходного файла модели со всеми настройками и готового к запуску решения.

Далее выполняется серия пробных (верификационных), коротких по длительности расчетов, по результатам которых проверяется правильность задания связей, начальных и граничных условий, настроек взаимодействия сборочных единиц модели и контактирующих поверхностей, выявляются возможные неточности и делаются соответствующие корректировки.

После получения подтверждения адекватности поведения модели запускается моделирование испытаний. При наличии возможности, в ходе расчета ведется анализ результатов с целью определения момента завершения погашения автобусом начальной кинетической энергии удара и принудительной остановки расчета.

На завершающей стадии исследования выполняется постпроцессорная обработка и анализ результатов расчета. По деформированной после ударного воздействия силовой структуре автобуса проводится анализ остаточного пространства. Также на данной стадии определяются наиболее нагруженные детали и элементы силовой структуры автобуса, исследуются зоны локализации пластических деформаций, места разрушений (при наличии).

В зависимости от задачи моделирования дается заключение о соответствии силовой структуры автобуса требованиям Правил ООН № 66, либо делаются рекомендации по совершенствованию конструкций и технологий с последующей расчетной оценкой их эффективности.

Апробация предложенных методических рекомендаций на примере пригородного автобуса. Предлагаемые методические рекомендации по подготовке моделей автобусов для проведения виртуальных испытаний по требованиям Правил ООН № 66 продемонстрируем на примере силовой структуры пригородного автобуса.

Процесс подготовки компьютерных моделей, расчет и анализ результатов выполнены в про-

граммах ANSYS LS-DYNA (интегрированная версия программы-решателя LS-DYNA в программный комплекс ANSYS Workbench) и LS-PrePost. В описании приведены основные используемые опции и настройки.

Конструкторская твердотельная CAD-модель исследуемого автобуса была разделена на основные сборочные единицы: каркас, рама (при наличии), колеса, узлы и агрегаты. Поскольку каркас автобуса в целом изготавливается из балок, имеющих определенные размеры поперечного сечения и толщину стенок, то для создания конечно-элементной модели проводилось преобразование имеющейся объемной конструкторской геометрической модели каркаса в оболочечную. В зонах сварных соединений имеется возможность задавать свойства материала сварки и толщину сварного шва, критерии его разрушения. Оболочечные элементы позволяют уменьшить суммарное число степеней свободы, сохранив достоверность получаемого результата и уменьшить время расчета. Фрагмент твердотельной модели конструкции и разработанной на ее основе оболочечной модели показаны на рисунке 1.

Модели узлов и агрегатов, воспроизводящих массо-инерционные характеристики, создавались объемными телами, а пассажиры моделировались твердотельными балластами.

Создание конечно-элементных моделей выполнялось в программном комплексе ANSYS Workbench. На начальной стадии для конструкций, имеющих геометрию, состоящую из сложных комбинаций поверхностей, использовался инструмент Virtual Topology, позволяющий объединить их и тем самым обеспечить более высокое

качество создаваемой сетки за счет исключения генерации элементов с малыми линейными размерами.

Оболочечные конечно-элементные модели создавались с преобладанием четырехгранных элементов. Для этого применялся метод Quadrilateral dominant. При описании требований к размерам генерируемых элементов задавались жесткие (значение опции Behavior — Hard) требования к соблюдению задаваемых значений. Размеры граней элементов устанавливались от 8 до 10 мм в зависимости от нагруженности и величины прогнозируемых пластических деформаций, а также особенностей геометрии конструкции. Более нагруженным и сложным по форме деталям соответствовали меньшие размеры и наоборот.

Для сокращения расчетного времени модель автобуса устанавливалась в положение, соответствующее началу соприкосновения с ударной поверхностью, а затем задавались соответствующие кинематические характеристики. Поворот модели автобуса осуществляется в два этапа. На первом этапе определяется угол поворота опорной поверхности α , при котором автобус достигает положения неустойчивого равновесия. На втором этапе определяется угол β , при котором автобус касается ударной поверхности. На рисунке 2 показана схема определения данных углов геометрическим способом в программном комплексе ANSYS.

Созданные конечно-элементные модели для проверки качества и возможной корректировки передавались в программу LS-PrePost. Для этого генерировался текстовый структурированный файл модели (k-файл), используемый для после-

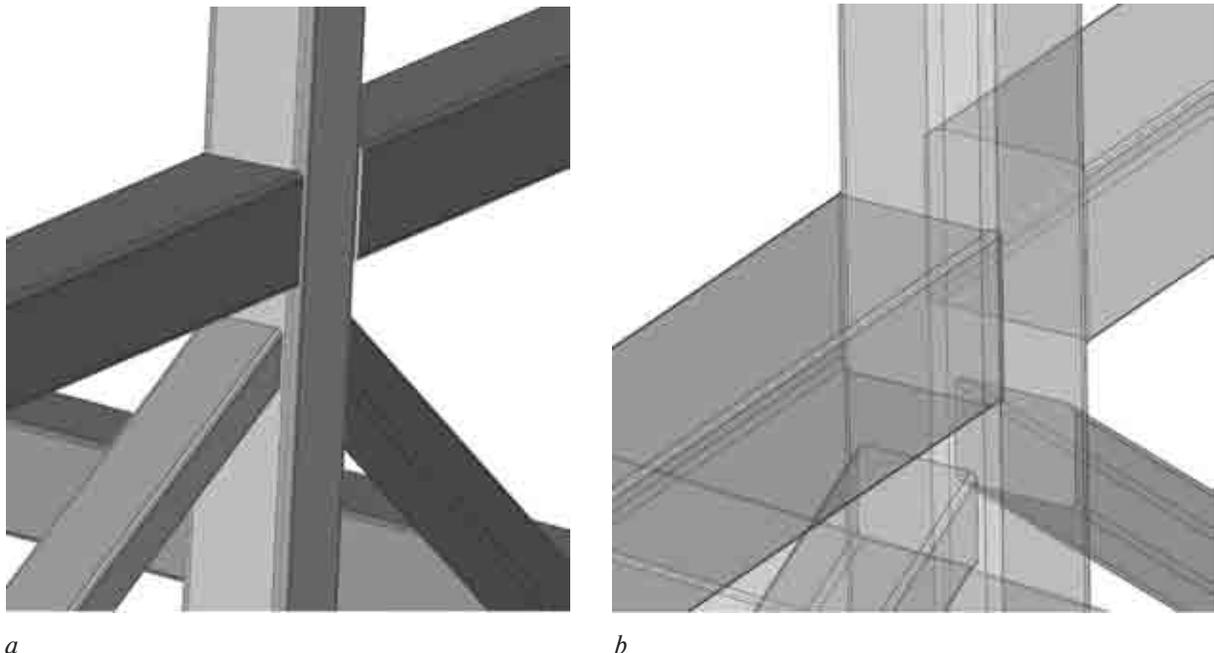


Рисунок 1 — Варианты трехмерных геометрических моделей фрагмента каркаса автобуса: *a* — объемная; *b* — оболочечная
Figure 1 — Variants of three-dimensional geometric models of bus frame fragment: *a* — solid model; *b* — shell model

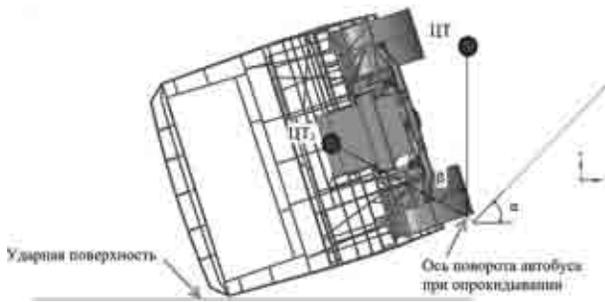


Рисунок 2 — Схема определения углов опрокидывания и положения неустойчивого равновесия автобуса
Figure 2 — Scheme for determining angles of rollover and unstable equilibrium position of the bus

дующей инициализации решения программой LS-DYNA.

Пре- и постпроцессор LS-PrePost обладает эффективными средствами анализа сетки конечно-элементных моделей и последующей ее корректировки. В ходе анализа сетки средствами LS-PrePost, несмотря на заданные при ее создании требования, обнаруживались элементы неудовлетворительного качества. При наличии большого числа таких элементов совершенствование сетки выполнялось в программном комплексе ANSYS Workbench путем изменения топологии геометрической модели. Локальные корректировки расчетной сетки непосредственным перемещением отдельных узлов либо удалением и генерацией новых элементов выполнялись непосредственно в LS-PrePost.

После достижения заданных требований к конечно-элементной сетке моделей для конструкций, обладающих симметрией, выполнялось дополнение их до полной геометрии путем применения зеркального отображения и объединения совпадающих узлов в плоскости симметрии.

Описание свойств материалов конструкций, подверженных пластическому деформированию, выполнялось с использованием билинейной модели материала с кинематическим упрочнением *MAT_PLASTIC_KINEMATIC, а также полилинейной модели *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY. Твердотельным моделям узлов и агрегатов присваивались свойства абсолютной жесткости материала MAT_RIGID. Ударная поверхность и опрокидывающая платформа аналогично моделировались как жесткие тела с заданием дополнительной опции ограничения перемещения во всех направлениях. Так как автобус оборудован ремнями безопасности, то в расчетной модели учитывалась масса пассажиров [1]. Пассажиры моделировались твердотельными балластами. В связи с тем, что между моделями пассажиров и каркасом имеется жесткая связь, масса каждого пассажира принимается равной половине регламентированной массы и составляет 34 кг, как описано в действующих Правилах.

Дополнительная масса, в которую входит масса отсутствующих в модели элементов кузова автобуса, распределялась по высоте каркаса исходя из обеспечения соответствия расчетного значения указанному в техническом описании положения центра тяжести. Распределение осуществлялось путем пропорционального изменения плотности материала в трех составляющих каркаса частях: нижняя часть (пол, багажные отделения), средняя часть (боковины и оконные проемы) и крыша.

Значение угловой скорости в момент удара определялось на основании баланса кинетической и потенциальной энергии по формуле:

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot E_n}{J}},$$

где E_n — потенциальная энергия автобуса; J — момент инерции автобуса относительно оси опрокидывания, расположенной на верхней части удерживающего буртика.

Потенциальная энергия E_n определяется по формуле:

$$E_n = M \cdot g \cdot \Delta h,$$

где M — масса ТС; g — ускорение свободного падения; Δh — вертикальное перемещение центра тяжести ТС в процессе испытания на опрокидывание.

При подготовке модели автобуса значение положения центра тяжести устанавливалось исходя из технического описания для снаряженного состояния. При добавлении регламентируемой массы пассажиров положение центра тяжести пересчитывалось.

Величина Δh определялась геометрическим методом с помощью графического редактора программного комплекса ANSYS. На рисунке 3 показана схема определения данной величины.

Момент инерции автобуса относительно оси опрокидывания определялся по формуле:

$$J = J_{Ox} + M \cdot r^2,$$

где J_{Ox} — момент инерции автобуса относительно центра масс; M — масса автобуса; r — расстояние от центра масс автобуса до оси опрокидывания.



Рисунок 3 — Расчетная схема для определения перемещения центра тяжести автобуса
Figure 3 — Design scheme for determining movement of center of gravity of the bus

Момент инерции автобуса относительно центра масс J_{Ox} определялся с использованием конечно-элементной модели каркаса и агрегатов с помощью пре/пост-процессора LS-PrePost программного комплекса ANSYS LS-DYNA. Значение величины r определялось геометрическим способом в графическом редакторе программы ANSYS.

На основании полученных значений определялась угловая скорость автобуса в момент соприкосновения с ударной поверхностью.

Свойства балочных конструкций задавались с использованием балочных конечных элементов с формулировкой Хьюса–Лю, учитывающей искривление открытых поперечных сечений (переменная $ELFORM = 1$). Оболочечные элементы применялись с формулировкой Беличко–Цая (переменная $ELFORM = 2$), а также в полностью интегрируемой постановке ($ELFORM = 16$). Число точек интегрирования по толщине элемента (NIP) для конструкций с невысокой интенсивностью деформаций принималось равным 3, для конструкций с высокой — 5.

Связи между элементами конструкций определялись при помощи контактных опций *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE и *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE, а также связей, непосредственно моделирующих точечную сварку — *CONSTRAINED_SPOTWELD.

При подготовке моделей отдельных сборочных единиц проводились верификационные расчеты для оценки их работоспособности и адекватности поведения. Для оценки целостности соединений всех элементов силовой структуры автобуса проводился статический расчет. При наличии незакрепленных элементов нагрузка на них не распределялась и они оказывались в свободном положении. После чего данные элементы подвергались корректировке и проводился повторный расчет.

Сборка общей конечно-элементной модели автобуса выполнялась с применением опций и настроек, описанных выше при подготовке сборочных единиц.

По мере готовности моделей сборочных единиц и их включения в общую модель автобуса к ней добавлялись и ориентировались в пространстве согласно требованиям Правил ООН № 66 модели остаточного пространства и контактных поверхностей (ударная поверхность и опрокидывающая платформа). Могут использоваться разработанные ранее модели контактных поверхностей, которые применялись при исследовании других моделей автобусов. Задание начальной угловой скорости автобуса относительно оси опрокидывания выполнялось с использованием опции *INITIAL_VELOCITY_GENERATION. При этом автобус в процессе нагружения должен

подвергаться не только действию начальной кинетической энергии, но и действию силы тяжести, которая задавалась опцией LOAD_BODY_Z.

Настройка вывода результатов расчетов во внешние файлы выполнялась для всех видов данных, включающих графическую 3D-информацию (опция *DATABASE_BINARY_D3PLOT), изменение во времени данных для элементов и узлов модели (*DATABASE_BINARY_D3THDT), а также информации об изменении энергии модели (*DATABASE_MATSUM) с одинаковым интервалом времени, равным 1 мс.

После серии настроечных и верификационных расчетов была получена модель, готовая к проведению исследований, с учетом требований Правил ООН № 66. Верифицированная модель автобуса с контактными поверхностями в исходном состоянии приведена на рисунке 4.

Результаты виртуального моделирования испытаний каркаса автобуса при опрокидывании на соответствие требованиям Правил ООН № 66. Сопоставление с натурным экспериментом. Расчет силовой структуры автобуса при опрокидывании проведен согласно Правилам ООН № 66 [1] в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS LS-DYNA PC. Критерием завершенности расчета является поглощение конструкцией автобуса 95–97 % кинетической энергии удара, которая соответствует потенциальной энергии. Дальнейшее продолжение расчета нецелесообразно ввиду незначительности изменений, но высокой длительности расчета. Остаточная кинетическая энергия вызвана, как правило, перемещением конструкции автобуса в пространстве и не оказывает влияние на деформированное состояние силовой структуры.

На рисунке 5 представлен график зависимости кинетической и внутренней энергии автобуса от времени протекания процесса.

Увеличение конечной внутренней энергии автобуса по сравнению с начальной кинетической вызвано большей величиной перемещения центра

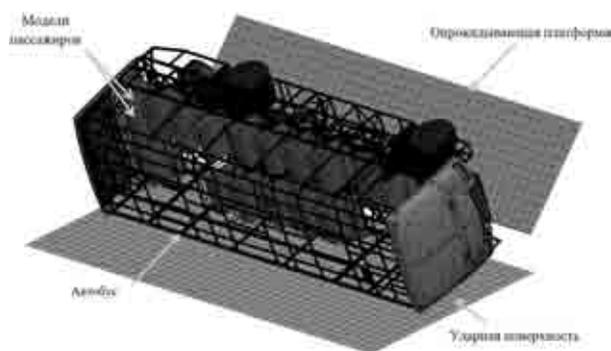


Рисунок 4 — Компьютерная модель расчетной оценки силовой структуры автобуса при испытаниях на пассивную безопасность при опрокидывании по требованиям Правил ООН № 66
Figure 4 — Computer model of calculated assessment of superstructure of the bus during tests for passive safety during rollover according to requirements of UN Regulation No. 66

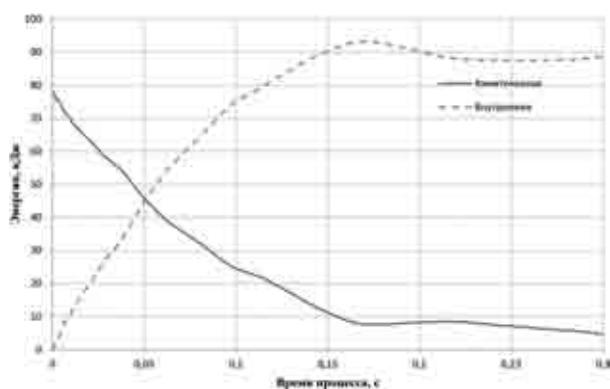


Рисунок 5 — График зависимости кинетической и внутренней энергии автобуса в процессе столкновения с ударной поверхностью

Figure 5 — Graph of dependence of kinetic and internal energy of the bus in collision with impact surface

масс в результате деформации элементов каркаса. При определении внутренней энергии учтены потери кинетической энергии на скольжение каркаса автобуса об ударную поверхность.

В научно-исследовательском центре по испытаниям и доводке автотехники (НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ», Российская Федерация, г. Дмитров) были проведены натурные испытания рассматриваемого автобуса МАЗ 257S30 (автобус для перевозки детей) в отношении прочности силовой структуры на соответствие предписаниям Правил ООН № 66-02.

Испытания проводились методом опрокидывания с уступа в соответствии с методикой, изложенной в Приложении 5 Правил ООН № 66-02: высота уступа — 800 мм; транспортное средство опрокидывалось на правую сторону; на сиденьях водителя и всех пассажирских, оборудованных

ремнями безопасности, были установлены наливные антропоморфические манекены массой 68 кг каждый; ось вращения транспортного средства при опрокидывании была параллельна продольной оси транспортного средства; ось вращения находилась на расстоянии 100 мм от боковин шин задней оси; ось вращения находилась на расстоянии 50 мм по вертикали от горизонтальной исходной плоскости, на которую опирались шины; угловая скорость опрокидывания составила порядка 5° в секунду ($0,087$ рад/с). Для измерения динамических деформаций стоек № 3 и № 7 боковин кузова использовались специальные телескопические линейки.

На рисунке 6 представлен общий вид автобуса, включая элементы его структуры, после натуральных и виртуальных испытаний.

Замер перемещений боковых стоек каркаса проводился согласно рекомендациям Правил на уровне наивысшей точки остаточного жизненного пространства. На рисунке 7 представлены наиболее деформированные элементы каркаса.

Согласно Правилам ООН № 66 максимально допустимые динамические перемещения стоек на уровне высоты остаточного жизненного пространства относительно внутренней стенки каркаса, расположенной на уровне точки S_R , не должны превышать 400 мм. По результатам натурных испытаний динамические перемещения составили, для стойки № 3 — 173 мм, для стойки № 7 — 60 мм. Результаты определения максимальных динамических перемещений стоек каркаса на уровне высоты остаточного жизненного пространства по результатам виртуальных испытаний получены следующие: для стойки № 3 — 195 мм, № 7 — 73 мм. Погрешность по сравнению с натур-



a



b

Рисунок 6 — Вид спереди деформированного каркаса автобуса. Испытания: a — натурные; b — виртуальные

Figure 6 — Front view of deformed frame of the bus. Tests: a — full-scale; b — virtual

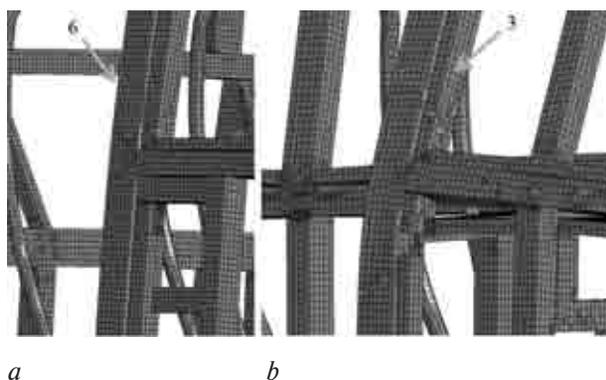


Рисунок 7 — Наиболее деформированные элементы каркаса.
Стойки №: *a* — 6; *b* — 3
Figure 7 — The most deformed elements of frame.
Studs No.: *a* — 6; *b* — 3

ными испытаниями составила: для стойки № 3 — 12,7 %, для стойки № 7 — 21,7 %.

Максимальные динамические перемещения стоек каркаса наблюдаются в передней части, что обусловлено первоначальным столкновением автобуса с ударной поверхностью передней части крыши.

Заключение. Компьютерное моделирование испытаний силовых структур автобусов на соответствие требованиям Правил ООН № 66 позволяет заменить натурные испытания виртуальными в целях сертификации продукции и в достаточной степени соответствия отразить поведение реальной конструкции в случае проведения натурных испытаний, с учетом свойств материалов, соединений и технологических особенностей элементов конструкции. При этом появляется возможность получения НДС конструкции, выявления зон пластических деформаций в любой области и как следствие возможность совершенствования силовой структуры автобуса еще на стадии проектирования без больших материальных и временных затрат.

Разработаны методические основы и подходы к проведению расчетных исследований модели автобуса при опрокидывании, основанные на преобразовании твердотельной геометрической модели силовой структуры автобуса в оболочечную модель, на основании которой определяются кинематические, динамические и энергетические параметры опрокидывания. Предложенные методические основы и подходы позволяют сократить время подготовки модели как наиболее ответственного, трудоемкого и наукоемкого этапа исследований. Сокращение времени достигается за счет определения параметров опрокидывания автобуса непосредственно в программных пакетах, в которых выполняется подготовка силовой структуры и настройка граничных условий модели. Часть параметров определяются аналитически.

Погрешность динамических перемещений стоек по результатам расчетных и натурных исследований составила 12,7 % и 21,7 % для стоек № 3

и № 7 соответственно. Величина погрешности направлена в запас прочности конструкции. Значение погрешности обусловлено отсутствием в расчетной модели боковых панелей обшивки, стекол, дверных поручней, полок для грузов. Данные элементы могут быть добавлены в расчетную модель. При этом силовая структура данного автобуса соответствует требованиям без этих элементов, т. е. требования нормативов выполняются с запасом. Дополнительные элементы кузова могут быть учтены в модели автобуса в том случае, если при их отсутствии силовая структура автобуса не проходит (либо на граничных значениях) испытания на соответствие требованиям Правил ООН № 66. При прохождении испытаний силовой структуры без дополнительных элементов считается, что автобус имеет запас прочности и проведение дополнительных расчетов не требуется.

Список литературы

1. Правила ЕЭК ООН № 66(02) / Пересмотр 1. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения крупногабаритных пассажирских транспортных средств в отношении прочности их силовой структуры. Комитет по внутреннему транспорту ЕЭК ООН. — Введ. 03.09.97., посл. измен. 09.11.05. — Минск: Госстандарт: БелГИСС, 2006. — 74 с.
2. LS-DYNA конечно-элементный анализ [Электронный ресурс] / Компьютерное моделирование опрокидывания автобуса в соответствии с требованиями Правил ЕЭК ООН №66. Москва, 2014. — Режим доступа: <http://lsdyna.ru/video/bus-capsizing/cruise.pdf>. — Дата доступа: 10.08.2015.
3. Рогов, П.С. Разработка методики обеспечения пассивной безопасности кузовов автобусов в условиях опрокидывания при проектировании: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.05.03 / П.С. Рогов. — Н. Новгород, 2015. — 189 с.
4. Оценка несущей способности каркаса кузова автобуса по результатам компьютерного моделирования / Л.Н. Орлов [и др.] // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. — Н. Новгород. — 2012. — № 3 (96). — С. 150–156.
5. Оценка пассивной безопасности автобуса по результатам компьютерного моделирования / Л.Н. Орлов [и др.] // Современные проблемы науки и образования. — 2013. — № 3. — Режим доступа: <http://www.science-education.ru/109-9423>.
6. Рогов, П.С. Влияние особенностей процесса опрокидывания автобуса на деформации кузова / П.С. Рогов [и др.] // Современные проблемы науки и образования. — 2013. — № 6. — Режим доступа: www.science-education.ru/113-11603.
7. Gugliotta, A. Structural crash analysis with ADAMS: a comparison between multibody and FEM approaches / A. Gugliotta [et al.] // 12th European ADAMS Users Conference, Paris, Nov. 18–19th, 1997.
8. Pankaj, S. Deshmukh. Rollover and roof crush analysis of low-floor mass transit bus: dis. ... Master of Science / S. Deshmukh Pankaj. — USA, 2006. — 104 p.
9. Elitok, K. An Investigation on the Roll-Over Crashworthiness of an Intercity Coach, Influence of Seat Structure and Passenger Weight / K. Elitok, M.A. Guler, B. Bayram, U. Stelzmann // 9th International LS-DYNA Conference, Dearborn, Michigan USA, 2006. — Pp. 17–30.
10. Pavlata, P. Virtual Simulations of Bus Approval Tests according to European Standards/ P. Pavlata // MSC. Software 2005 Virtual Product Development Conference-2005.
11. European Commission [Электронный ресурс] / Enhance Coach and Bus Occupant Safety. — Мадрид, 1999. — Mode of access: https://ec.europa.eu/transport/road_safety/sites/roadsafety/files/pdf/projects_sources/ecbos_final_report.pdf. — Date of access: 12.02.2016.
12. Park, S.J. Rollover Analysis of a Bus Using Beam and Nonlinear Spring Elements / S.J. Park, W.S. Yoo, Y.J. Kwon // Proceedings

- of the 9th WSEAS International Conference on Applied Mathematics, Istanbul, Turkey, May 27–29, 2006. — Pp 128–133.
13. Kaptanoğlu, M. Rollover crashworthiness of a multipurpose coach / M. Kaptanoğlu, O. Kucuk // 7 Otomotiv Teknolojileri Kongresi, OTEKON 2014, 26–27 May 2014, BURSA. — Mode of access: https://www.hexagonstudio.com.tr/wp-content/uploads/2019/03/rollover_crashworthiness_of_a_multipurpose_coach.pdf
 14. Определение параметров полилинейной модели материала и моделирование пластического деформирования балочных конструкций машин // А.В. Омелюсик [и др.] / Механика машин, механизмов и материалов. — 2017. — № 2 (39). — С. 19–27.
 15. John, O. LS-DYNA THEORY MANUAL (2006). — Mode of access: http://www.lstc.com/pdf/ls-dyna_theory_manual_2006.pdf. — Date of access: 10.08.2018.

OMELUSIK Aleksey V.

Junior Researcher of the Department of Computer Modeling and Virtual Testing of the Republican Computer Center of Mechanical Engineering¹

E-mail: alexlifting@mail.ru

SHMIALIOU Aliaksei V., Ph.D. in Eng.

Deputy Director General for Research¹

E-mail: shmeliov.alexei@gmail.com

SHUKUROV Alexander O.

Junior Researcher of the Department of Computer Modeling and Virtual Testing of the Republican Computer Center of Mechanical Engineering¹

LITVINUK Pavel S.

Junior Researcher of the Department of Computer Modeling and Virtual Testing of the Republican Computer Center of Mechanical Engineering¹

E-mail: pavel1993by@mail.ru

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 05 July 2019.

ASSESSMENT OF PASSIVE SAFETY INDICATORS OF BUSES DURING ROLL-OVER BASED ON COMPUTER SIMULATION

The existing approaches of domestic and foreign researchers are considered in the field of simulation of the loading of bus frames with the calculation evaluation of the power structure for compliance with the requirements of passive safety during rollover. The criteria and the main ways to improve the quality of computer models, to reduce the duration of calculations are determined. The fundamentals of the methodology for computer simulation of bus tests are presented and described for compliance with the requirements of UN Regulation No. 66. An example of the use of the proposed guidelines is given in the preparation of a computer model of a suburban bus to conduct a calculation evaluation of the superstructure using the ANSYS LS-DYNA finite element analysis software system. Preparation of the model is performed using the Ls-PrePost program.

Keywords: superstructure, bus, passive safety, computer model, finite element analysis, dumping angle, dumping platform, moment of inertia, initial angular velocity, potential impact energy, UN Regulation No. 66

References

1. UNECE Regulation No. 66(02). *Peresmotr 1. Edinoobraznye predpisaniya, kasayushchiesya ofitsialnogo utverzhdeniya krupnogabaritnykh passazhirskikh transportnykh sredstv v otnoshenii prochnosti ikh silovoy struktury* [Revision 1. Uniform provisions concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure]. Minsk, Gostandart Publ., Belorusskiy gosudarstvennyy institut standartizatsii i sertifikatsii Publ., 2006. 74 p.
2. *Kompyuternoe modelirovanie oprokidyvaniya avtobusa v sootvetstvi s trebovaniyami Pravil EEK OON No. 66* [Computer simulation of bus roll-over in accordance with the requirements of the UNECE Regulation No. 66]. Moscow, 2014. 14 p. Available at: <http://lsdyna.ru/video/bus-capsizing/cruise.pdf> (accessed 08 October 2015).
3. Rogov P.S. *Razrabotka metodiki obespecheniya passivnoy bezopasnosti kuzovov avtobusov v usloviyakh oprokidyvaniya pri proektirovanii*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of a technique for ensuring passive safety of coach bodies under roll-over conditions in the design. Ph.D. Thesis]. Nizhny Novgorod, 2015. 189 p.
4. Orlov L.N., Rogov P.S., Vashurin A.S., Tumasov A.V., Feokistov N.F. *Otsenka nesushchey sposobnosti karkasa kuzova avtobusa po rezul'tatam kompyuternogo modelirovaniya* [The estimation of bus structure bearing capacity on basis of simulation results the results of computer simulation]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Transactions of Nizhni Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev], 2012, no. 3(96), pp. 150–156.

5. Orlov L.N., Tumasov A.V., Rogov P.S., Vashurin A.S. Otsenka passivnoy bezopasnosti avtobusa po rezul'tatam kompyuternogo modelirovaniya [Bus passive safety estimation by the results of computer simulation]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2013, no. 3. Available at: <http://www.science-education.ru/109-9423>.
6. Rogov P.S., Orlov L.N., Zelenov M.Y., Shabrov R.N. Vliyaniye osobennostey protsessa oprokidyvaniya avtobusa na deformatsii kuzova [Influence of the features of the bus rollover process on the body structure deformations]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2013, no. 6. Available at: www.science-education.ru/113-11603 (accessed 08 October 2015).
7. Gugliotta A., Vadori R., Montanini R., Bertorelli N. Structural crash analysis with ADAMS: a comparison between multibody and FEM approaches. *Proc. 12th European ADAMS Users Conference*. Paris, 1997.
8. Pankaj S.D. *Rollover and roof crush analysis of low-floor mass transit bus*. M.Sc. Thesis. Wichita, KS, 2006. 104 p.
9. Elitok K., Guler M.A., Bayram B., Stelzmann U. An Investigation on the Roll-Over Crashworthiness of an Intercity Coach, Influence of Seat Structure and Passenger Weight. *Proc. 9th International LS-DYNA Conference*. Dearborn, MI, 2006, pp. 17–30.
10. Pavlata P. Virtual Simulations of Bus Approval Tests according to European Standards. *Proc. MSC.Software 2005 Virtual Product Development Conference*. 2005.
11. *ECBOS – Enhance Coach and Bus Occupant Safety*. Madrid, 1999. 66 p. Available at: https://ec.europa.eu/transport/road_safety/sites/roadsafety/files/pdf/projects_sources/ecbos_final_report.pdf (accessed 02 December 2016).
12. Park S.J., Yoo W.S., Kwon Y.J. Rollover Analysis of a Bus Using Beam and Nonlinear Spring Elements. *Proc. 9th WSEAS International Conference on Applied Mathematics*. Istanbul, 2006, pp. 128–133.
13. Kaptanoğlu M., Kucuk O. Rollover crashworthiness of a multipurpose coach. *Proc. 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, OTEKON 2014*. Bursa, 2014, p. 48.
14. Omelusik A.V., Shmeliov A.V., Kononov A.G., Rubcov A.V. Opredeleniye parametrov polilineynoy modeli materiala i modelirovaniye plasticheskogo deformirovaniya balochnykh konstruksiy mashin [Determining the parameters of a multilinear material model and modeling the plastic deformation of beam structures of machines]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2017, no. 2(39), pp. 19–27.
15. John O.H. *LS-DYNA THEORY MANUAL*. Livermore, Livermore Software Technology Corporation, 2006. 680 p. Available at: http://www.lstc.com/pdf/ls-dyna_theory_manual_2006.pdf (accessed 10 August 2018).