



# КОМПЬЮТЕРНАЯ МЕХАНИКА

УДК 624.042

**А.В. ШМЕЛЕВ**, канд. техн. наук

директор Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля<sup>1</sup>

E-mail: shmeliov.alexei@gmail.com

**Э.В. ЛISOVСКИЙ**

младший научный сотрудник<sup>1</sup>

**В.С. КОРОТКИЙ**

научный сотрудник<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Статья поступила 20.07.2015.

## ОСНОВЫ МЕТОДИКИ ВИРТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИСПЫТАНИЙ КАБИН ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ ПО ТРЕБОВАНИЯМ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

*Рассмотрены и описаны основы методики выполнения компьютерного моделирования испытаний кабины грузового автомобиля на соответствие требованиям безопасности международного Правила ЕЭК ООН № 29. Проанализированы особенности проведения испытаний согласно Пересмотру 2 Правила. Приведен пример компьютерного моделирования испытаний для кабины грузового автомобиля с применением программного комплекса ANSYS LS-DYNA. Настройка модели и анализ результатов моделирования с оценкой остаточного пространства в кабине после нагружения выполнены в программе LS-PrePost.*

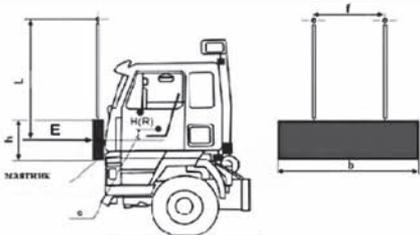
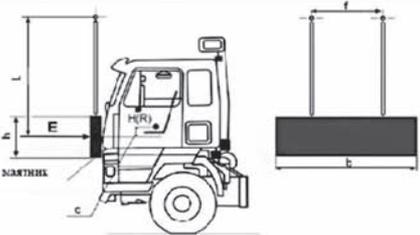
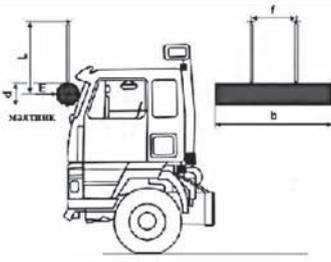
**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, виртуальные испытания, метод конечных элементов, кабина грузового автомобиля, краш-тест, пассивная безопасность, ANSYS, LS-DYNA, LS-PrePost, Правила ЕЭК ООН № 29

**Введение.** Одними из ключевых требований, предъявляемым к силовым конструкциям кабин грузовых автомобилей, являются требования к их безопасности. Данные требования заключаются в способности конструкции сохранять необходимое жизненное пространство в кабине для минимизации травмирования водителя и пассажиров в ходе вероятного дорожно-транспортного происшествия (ДТП). В странах, присоединившихся к Женевскому соглашению 1958 года, в отношении требований к безопасности конструкций кабин грузовых автомобилей, действуют Правила ЕЭК ООН № 29. Документ регламентирует процедуру проведения и анализа результатов испытаний по исследованию свойств жесткости и прочности кабины.

На текущий момент в отношении кабин грузовых транспортных средств в Республике Беларусь действуют Правила № 29(02)/Пересмотр 1 [1]. Учитывая необходимость минимизации тяжести негатив-

ных последствий ДТП, подкомитетом по автомобильному транспорту Европейской экономической комиссии, на основе изучения статистических данных по происходящим ДТП и накопленного опыта проведения испытаний по действующим правилам, периодически вносятся изменения в процедуры испытаний. В отношении транспортных средств категории N подкомитетом подготовлена новая редакция Правила — Пересмотр 2 — Поправка 2 к поправкам серии 03, которая вступила в силу 30 января 2011 года [2]. Учитывая переходный период длительностью 72 месяца, позволяющий проводить одобрение типа транспортных средств как по результатам испытаний по требованиям Пересмотра 1 Правила, так и Пересмотра 2, окончательное вступление в силу Пересмотра 2 произойдет 30 января 2017 года. Для отражения основных вносимых изменений в таблице представлено сопоставление условий проведения испытаний согласно Пересмотрам Правила 1 и 2.

Таблица — Сравнение основных условий проведения испытаний кабин грузовых автомобилей по требованиям Правила ЕЭК ООН № 29(02)/Пересмотр 1 и Пересмотр 2

Обозначение испытаний	Пересмотр 1	Пересмотр 2
	Характер нагрузки и место ее приложения	
A	 <p>Удар маятником по кабине спереди. Энергия удара 44,2 кДж для АТС массой &gt;7 т</p>	 <p>Удар маятником по кабине спереди. Энергия удара 55 кДж для АТС массой &gt;7,5 т</p>
B	 <p>Статическое нагружение крыши сверху</p>	 <p>Удар маятником по стойкам кабины</p>
C	 <p>Статическое нагружение задней стенки</p>	 <p>Статическое нагружение крыши сверху и сбоку</p>

Как видно из приведенной в таблице информации, требования к жесткости силовых конструкций кабины существенно повышаются для всех видов испытаний. Первоначальная схема проведения испытаний сохранилась только для испытания A, но при этом энергия удара для автомобилей с полной массой более 7,5 т увеличилась на 24,4 %. Испытания B и C планируется проводить согласно более комплексным схемам, соответствующим более жесткому нагружению силовых конструкций. Особенно это касается испытания B, при котором воздействию ударной динамической нагрузке подвергаются передние стойки автомобиля. При этом размер сечений стоек вступает в противоречие при решении задачи обеспечения жесткости конструкций и обзорности с места водителя.

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 многопроцес-

сорных 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.

Другим важным аспектом актуальности развития расчетных методов оценки соответствия конструкций кабин требованиям безопасности является то, что Правила ЕЭК ООН № 29 уже сегодня позволяют производить замену натурных испытаний виртуальными при наличии достаточного объема обоснований достоверности расчетов, пункт 5.1.6 правил ЕЭК ООН № 29(02)/ Пересмотр 2.

Для решения задач компьютерного моделирования динамического нагружения конструкций машин на практике наиболее широкое применение получил метод конечных элементов в явной постановке [3], реализованный в таких программных ком-

плексах как LS-DYNA, ABAQUS, MSC.Dytran, AUTODIN, Pam-Crash, RADIOSS и др.

Планируемые изменения условий проведения испытаний требуют уже сегодня определения новых решений конструкций кабин перспективной техники, соответствующих новым требованиям безопасности. Учитывая, что применение экспериментальных методов исследований характеризуется высокими затратами материальных средств и времени, то наиболее актуальной задачей является развитие применения методов и методик расчетного исследования и обоснования конструктивных и технологических решений.

Компьютерное моделирование испытаний кабин грузовых автомобилей согласно требованиям Правила ЕЭК ООН № 29 представляет собой комплексный процесс, включающий серию этапов различной степени сложности и трудоемкости. Поэтому для систематизации проводимых действий и вычислений необходимо методическое обеспечение структурирующее процесс моделирования, описывающее требования к исходным данным, применяемые методы, модели, описание граничных и начальных условий, способы представления результатов расчетов и т. д. Важной задачей также является разработка рекомендаций по ускорению проведения исследований при обеспечении исходных требований к процедуре проведения расчетов и достоверности результатов.

**Основы методики компьютерного моделирования испытаний кабин грузовых автомобилей по требованиям пассивной безопасности.** С учетом опыта ранее выполненных собственных работ по моделированию испытаний кабин [4], а также работ других авторов [5–7] в Республиканском компьютерном центре машиностроительного профиля Объединенного института машиностроения НАН Беларуси разработана и применяется методика проведения компьютерного моделирования испытаний кабин грузовых автомобилей согласно требованиям Правила ЕЭК ООН № 29. Основные этапы методики в виде блок-схемы приведены на рисунке 1.

Согласно представленной на рисунке блок-схеме методики, исходными данными для начала выполнения работ является конструкторская геометрическая твердотельная 3D-модель кабины. Данная модель представляется в файле, содержащем общую сборку деталей и конструкций кабины с конструкциями крепления и установки на раме автомобиля. В зависимости от лицензионных настроек программного обеспечения это может быть файл специализированного CAD-пакета, либо файл данных в нейтральном формате parasolid, iges, step и т. д., поддерживаемом программой препроцессором конечно-элементного анализа.

С целью минимизации трудоемкости в рассматриваемом процессе подготовки расчетной модели предусмотрено использование ранее разработанных моделей узлов и конструкций, при-

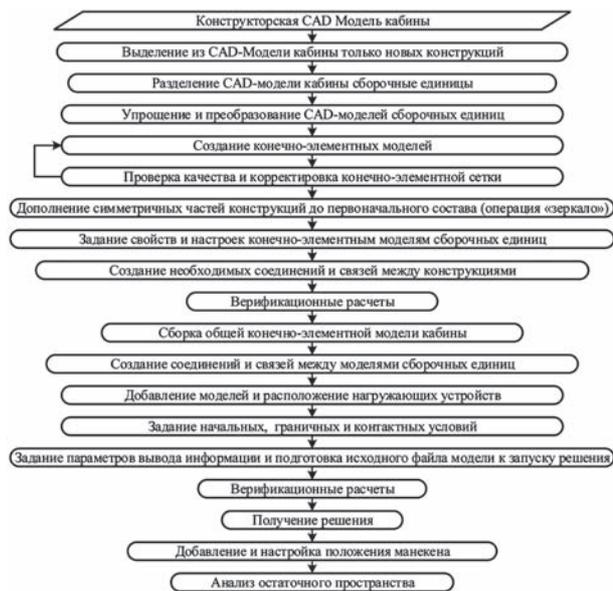


Рисунок 1 — Блок-схема методики проведения виртуальных испытаний кабин грузовых автомобилей по требованиям пассивной безопасности

меняемых в исследуемой кабине. Поэтому на данном этапе определяются и исключаются из рассмотрения сборочные единицы или конструкции, модели которых уже имеются в наличии по результатам предшествующих исследований.

На втором этапе работы CAD-модель кабины 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 выполняется параллельно различными специалистами. При этом руководитель проекта имеет возможность распределить выполнение задач по сложности и согласно квалификации работников.

Разделение CAD-модели на сборочные единицы осуществляется исходя из компоновочных и технологических решений кабины, позволяющих минимизировать трудоемкость сборки и задания свойств общей расчетной модели. Формируются сборочные единицы, состоящие как из отдельных конструкций, так и групп конструкций, объединяемых по функциональному, 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 контролем 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 кабин, могут использоваться из ранее выполненных работ, либо, наоборот — в последующих работах. Это существенно ускоряет процесс исследований и по-

иска нового решения и выводит процесс проектирования на более высокий, системный уровень.

На следующем этапе выполняется подготовка расчетных геометрических 3D-моделей. Работа ведется параллельно по САД-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, скругления, 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 шовной сварки (если не присутствуют в исходной САД-модели).

На следующей стадии по упрощенным и преобразованным геометрическим 3D-моделям выполняется создание конечно-элементных моделей конструкций кабины. При создании сетки рекомендуется использование 4-х узловых оболочечных и 8-ми узловых 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 [3]:

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

где  $\Delta t$  — 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 кабин может составлять 3–5 мм. В этом случае шаг по времени 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 элементов 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 данных, 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 кабины.

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

После подготовки общей модели кабины выполняется добавление моделей нагружающих устройств и их позиционирование в пространстве согласно требованиям Правила ЕЭК ООН № 29. Задаются начальные и граничные условия, обеспечивающие необходимые значения энергии силового воздействия и кинематику движения нагружающих устройств, а также условия их кантатного взаимодействия с конструкциями кабины.

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 нагружающих устройств, 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 воздействия ударного элемента на кабину и принудительной остановки расчета.

На завершающей стадии исследования выполняется постпроцессорная обработка и анализ результатов расчета. В деформированную после воздействия ударного элемента модель кабины помещается модель мужского манекена Hybrid II или III пятидесятого процента [2]. Манекен позиционируется в пространстве кабины согласно регулировкам предусмотренным конструкцией сидения. После чего проводится анализ остаточного пространства. Также на данной стадии определяются наиболее нагруженные детали и элементы конструкций кабины, исследуются зоны

локализации пластических деформаций, места разрушений (при наличии).

В зависимости от задачи моделирования дается заключение о соответствии конструкции кабины требованиям Правила ЕЭК ООН № 29, либо делаются рекомендации по совершенствованию конструкций и технологий с последующей расчетной оценкой их эффективности.

**Апробация предложенной методики на примере кабины грузового автомобиля.** Предлагаемую методику подготовки моделей и проведения виртуальных испытаний кабин транспортных средств категории N по требованиям Правила ЕЭК ООН № 29 продемонстрируем на примере моделирования испытания B кабины грузового автомобиля.

Процесс подготовки компьютерных моделей, расчет и анализ результатов выполнены в программах 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 исследуемой кабины с элементами крепления к раме автомобиля приведена на рисунке 2. Модель разработана в программе 3D-проектирования Siemens NX.

В данной CAD-модели отсутствуют такие конструкции как двери, панель приборов и рулевая стойка с органами управления. Идентичные по конструкции сборочные единицы входили в состав исследованных ранее вариантов кабин. Поэтому разработка соответствующих конечно-элементных моделей не требуется. Они добавлялись в состав общей модели кабины на стадии ее сборки.

Исходная CAD-модель была разделена на 22 основные сборочные единицы: крышу, усилители крыши, рамку лобового стекла, сборку передних стоек, переднюю стенку с усилителями, боковую обшивку, заднюю стенку, боковые стойки, задние стойки, пол, усилители пола и т. д.

Этап упрощения и преобразования твердотельных CAD-моделей сборочных единиц выполнялся с использованием как программы Siemens NX, так и модуля Designmodeler программного комплекса ANSYS Workbench. На рисунке 3 приведены примеры исходной твердотельной CAD-модели конструкции и оболочечной модели, подготовленной для дальнейшего построения конечно-элементной сетки.

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

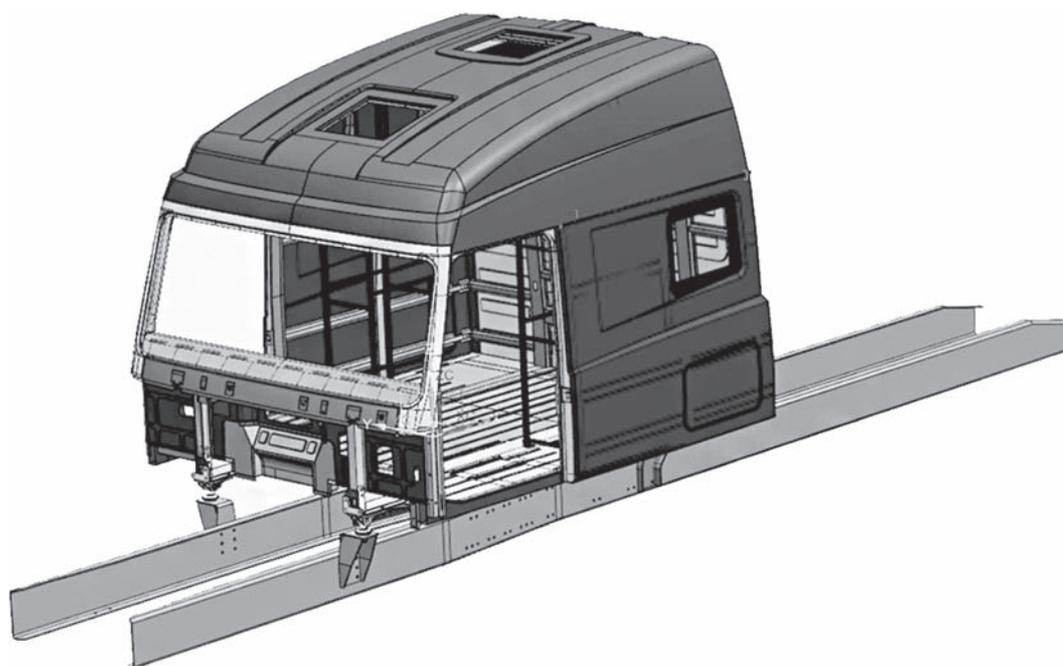


Рисунок 2 — Общий вид твердотельной CAD-модели кабины

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 грани элементов устанавливались от 3 до 25 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.

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 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 узлов, либо удалением и генерацией новых элементов выполнялись непосредственно в LS-PrePost. На рисунке 4 приведен пример анализа сетки для конструкции усилителя крыши и результатов доработки средствами LS-PrePost.

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

Описание свойств материалов конструкций, подверженных пластическому деформированию, выполнялось с использованием билинейной модели материала с кинематическим упрочнением \*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC, а также полили-

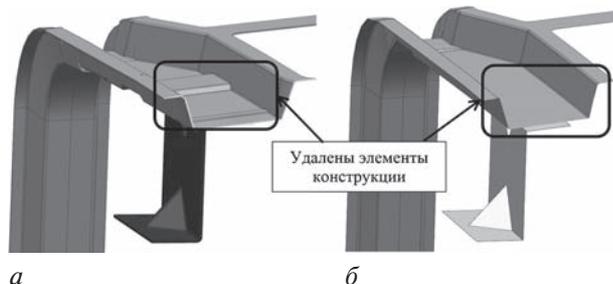


Рисунок 3 — CAD-модели усилителя крыши кабины: *a* — исходная твердотельная модель; *б* — упрощенная оболочечная модель

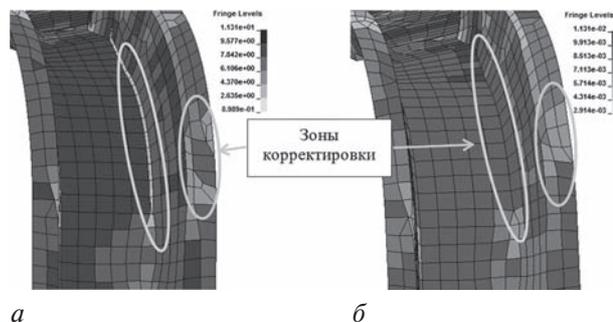


Рисунок 4 — Анализ конечно-элементной сетки модели усилителя крыши по критерию размера элементов (цветовая шкала отображает размер грани элемента в мм): *a* — сетка создана в ANSYS Workbench; *б* — после коррекции в LS-PrePost

нейной модели \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY. При моделировании элементов деталей, испытывающих упругие деформации, применялись модели материалов \*MAT\_ELASTIC. Свойства ударного элемента (маятника) выполнены с использованием модели абсолютно жесткого материала \*MAT\_RIGID.

Свойства балочных конструкций задавались с использованием 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\_TIED\_NODES\_TO\_SURFACE\_OFFSET и \*CONTACT\_TIED\_SHELL\_EDGE\_TO\_SURFACE\_OFFSET, 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. Так на рисунке 5 приведен пример качественной проверки работоспособности модели крыши кабины путем моделирования удара твердым телом цилиндрической формы массой 100 кг, движущимся со скоростью 5 м/с в вертикальном направлении сверху вниз.

Как видно из графика на рисунке 6 в момент времени 0,078 с вектор скорости меняет направ-

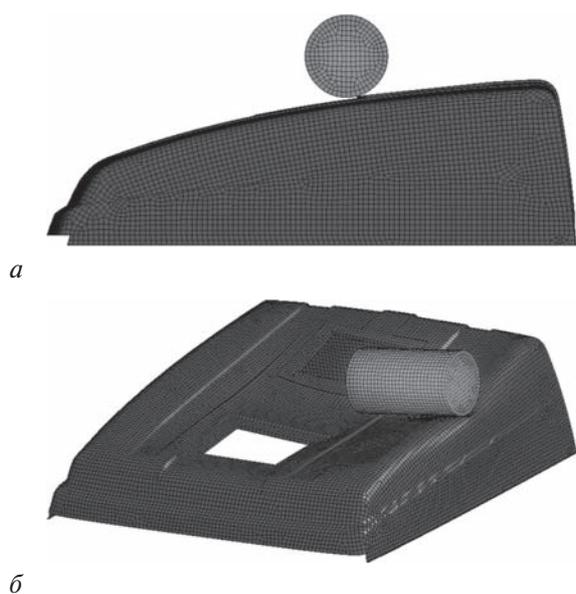


Рисунок 5 — Верификация модели крыши кабины: а — до удара; б — после удара

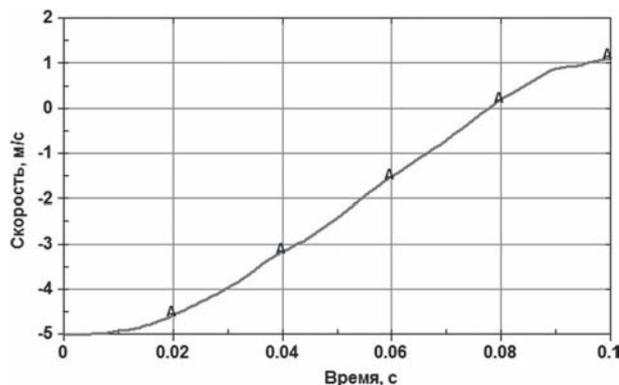


Рисунок 6 — График изменения скорости ударяющего тела при столкновении с крышей кабины

ление и объект начинает обратное движение в результате реакционного воздействия со стороны конструкции крыши. Полученные результаты свидетельствуют о качественном соответствии отклика конструкции на заданные условия нагружения.

Сборка общей конечно-элементной модели кабины выполнялась с применением опций и настроек, описанных выше при подготовке сборочных единиц. Контактные свойства для всей модели задавались опцией \*CONTACT\_AUTOMATIC\_GENERAL.

По мере готовности моделей сборочных единиц и их включения в общую модель кабины к ней добавлялась и ориентировалась в пространстве согласно требованиям Правила ЕЭК ООН № 29 модель нагружающего устройства (маятник с подвесом). Использовалась модель, разработанная ранее при исследовании других вариантов кабин. Задание начальной угловой скорости движения маятника и его подвеса относительно оси вращения выполнялось с использованием опции \*INITIAL\_VELOCITY\_GENERATION.

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), узловых реакций

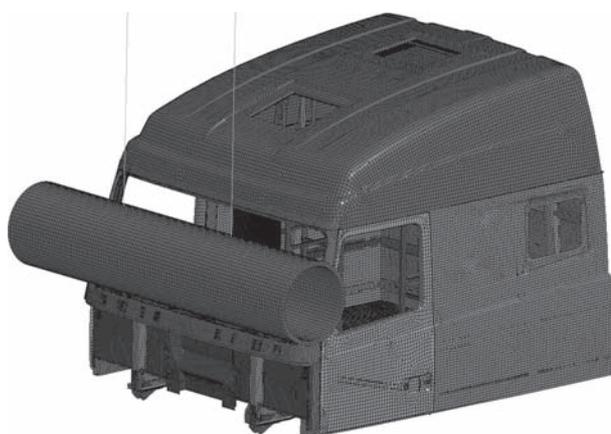


Рисунок 7 — Модель кабины с нагружающим устройством для испытаний В

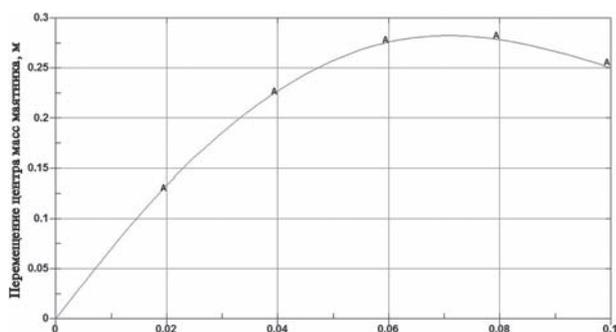


Рисунок 8 — График перемещения центра масс ударного элемента

в местах ограничения степеней свободы (\*DATABASE\_SPCFORC), 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 Правила ЕЭК ООН № 29. Верифицированная модель кабины с нагружающим устройством в исходном состоянии приведена на рисунке 7.

#### Результаты моделирования испытаний кабины.

График перемещения центра масс ударного элемента за время моделирования испытаний приведен на рисунке 8. Максимальная величина перемещения составила 283 мм на 0,072 мс с начала моделирования, в продольной плоскости кабины. Общий вид деформированного состояния кабины для данного момента времени, приведен на рисунке 9.

С целью анализа соответствия конструкции кабины требованиям безопасности в кабине на месте сиденья водителя устанавливалась модель манекена взрослого человека Hybrid III, специально разработанного фирмой LSTC (США) для компьютерного моделирования краш-тестов автомобилей. Настройку положения манекена и его конечностей осуществлялся с использованием специального модуля Dummy Positioning (программа LS-PrePost). Манекен располагался согласно установке сиденья автомобиля таким образом, чтобы положение туловища, рук и ног



Рисунок 9 — Деформированное состояние кабины

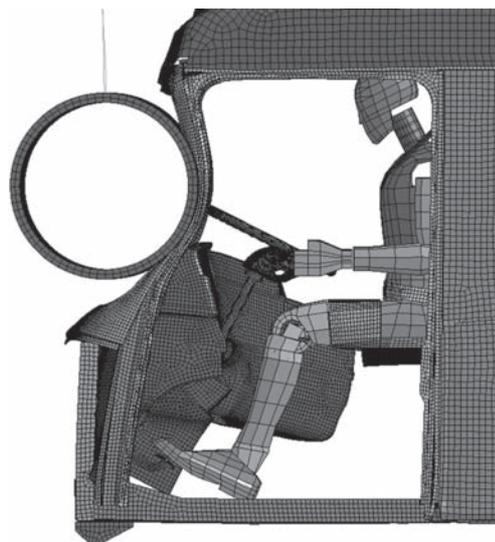


Рисунок 10 — Анализ результатов моделирования испытания В

соответствовало требованиям Правила ЕЭК ООН № 29. На рисунке 10 показан результат установки модели манекена в кабине при анализе результатов виртуальных испытаний. Как показал анализ полученных данных касание элементов кабины с манекеном отсутствует, что соответствует выполнению требований пассивной безопасности согласно Правилу ЕЭК ООН № 29.

**Заключение.** Современные требования к пассивной безопасности конструкций кабин грузовых автомобилей характеризуются устойчивой тенденцией к ужесточению условий их подтверждения. Анализ последних изменений Правил ЕЭК ООН № 29 показывает, что в особенной мере это касается испытания В, согласно которому конструкция кабины теперь должна быть испытана ударом цилиндрического маятника по передним стойкам.

Применение методов компьютерного моделирования процессов позволяет достаточно детально и всесторонне изучить процессы динамического нагружения сложных конструкций и определить наиболее эффективные решения, позволяющие обеспечить заданные требования. При этом Правила ЕЭК ООН № 29 уже сегодня позволяют производить замену натурных испытаний виртуальными.

С целью сокращения длительности и повышения эффективности процесса проектирования новых конструкций кабин разработана методика компьютерного моделирования испытаний по требованиям пассивной безопасности регламентированных Правил ЕЭК ООН № 29. Особенности предложенной методики заключаются в достижении ускорения процесса исследований путем распараллеливания выполнения наиболее ресурсоемких его стадий подготовки моделей, позволяющего распределить работы согласно опыту специалистов, использовать при создании общей модели кабины конечно-элементных моделей сборочных единиц разработанных в предыдущих исследованиях, а также применять вновь разработанные модели в последующих исследованиях.

Систематизация и разделение общей задачи на локальные позволила существенно упростить организацию и выполнение работ, а также обеспечение контроля всего процесса.

Приведенный пример практической реализации предложенной методики моделирования испытаний выполнен в программах ANSYS LS-DYNA (интегрированная версия программы-решателя LS-DYNA в программный комплекс ANSYS Workbench) и LS-PrePost. Анализ времени затраченного на выполнение данной задачи показал сокращение длительности исследований не менее двух раз. Эффект достигается путем сокращения наиболее длительной стадии — подготовки расчетной модели.

#### Список литературы

1. Правила ЕЭК ООН № 29(02). Пересмотр 1. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении защиты лиц, находящихся в кабине грузового транспортного средства / Комитет по внутреннему транспорту ЕЭК ООН: введ. 28.06.96; посл. измен. 01.01.15. — Минск: Госстандарт: БелГИСС, 2015.
2. Правила ЕЭК ООН № 29(02). Пересмотр 2. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении защиты лиц, находящихся в кабине грузового транспортного средства / Комитет по внутреннему транспорту ЕЭК ООН. — 2012.
3. John O., LS-DYNA THEORY MANUAL [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.lstc.com. — Дата доступа: 10.07.2015.
4. Виртуальные испытания — инструмент оценки безопасности конструкций АТС / М.С. Высоккий [и др.] // Автомобил. пром-сть. — 2011. — № 2. — С. 38–40.
5. Зузов, В.Н. Совершенствование кабин грузовых автомобилей на стадии проектирования для удовлетворения требованиям пассивной безопасности [Электронный ресурс] / В.Н. Зузов, Б. Шабан // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2013. — № 12. — Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/1130.html>. — Дата доступа: 01.06.2014.
6. Joseph, P. Correlation of Test Results for ECE R 29 Load Cases with CAE Simulation / P. Joseph, M. Sujit // Altair Technology Conference. — India, 2013.
7. Mirzaamiri, R. Crash Test Simulation and Structure Improvement of IKCO 2624 Truck According to ECE-R29 Regulation / R. Mirzaamiri, M. Esfahanian, S. Ziaei-Rad // International Journal of Automotive Engineering. — July 2012. — Vol. 2, No 3.

SHMELEV Aleksei V., Cand. Techn. Sc.

Director of the Republican Computer Center of Mechanical Engineering<sup>1</sup>

E-mail: shmeliov.alexei@gmail.com

LISOVSKI Eduard V.

Junior Researcher<sup>1</sup>

KOROTKI Viacheslav S.

Researcher<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 20 July 2015.

## BASICS OF THE COMPUTER SIMULATION PROCEDURE FOR COMMERCIAL VEHICLE CAB PASSIVE SAFETY TESTING

*Studied and described the basics of computer modeling technique for truck cab testing in compliance with the international UNECE safety regulation No 29. Analyzed the features of the tests in accordance with Revision 2, 03 series of amendments to the Regulation. Shown an example of truck cab computer test simulation with use of ANSYS LS-DYNA software. Model properties settings and simulation results analysis concerned with estimation of the residual space in the cabin is made using LS-PrePost.*

**Keywords:** computer simulation, virtual testing, finite element method, truck cab, crash test, passive safety, ANSYS, LS-DYNA, LS-PrePost, UNECE Regulation № 29

#### References

1. Pravila EJeK OON No. 29 (02) / Peresmotr 1. Edinoobraznye predpisanija, kasajushhiesja oficial'nogo utverzhdenija transportnyh sredstv v otnoshenii zashhity lic, nahodjashhihsja v kabine gruzovogo transportnogo sredstva. [UNECE Regulation No. 29 (02) / Review 1. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants of the cab of a commercial vehicle]. United Nations, 2010.
2. Pravila EJeK OON No. 29 (02) / Peresmotr 2. Edinoobraznye predpisanija, kasajushhiesja oficial'nogo utverzhdenija transportnyh sredstv v otnoshenii zashhity lic, nahodjashhihsja v kabine gruzovogo transportnogo sredstva. [UNECE Regulation No. 29 (02) / Review 2. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants of the cab of a commercial vehicle]. United Nations, 2012.
3. John O. LS-DYNA THEORY MANUAL (2006). Available at: [www.lstc.com](http://www.lstc.com) (accessed 10 August 2015).
4. Vysockij M.S. Virtual'nye ispytaniya — instrument ocenki bezopasnosti konstrukcij ATS [Virtual testing — Security Assessment Tool designs automotive vehicle]. *Avtomobil'naja promyshlennost'* [Automotive industry], 2011, no. 2, pp. 38–40.
5. Zuzov V.N., Shaban B. Sovershenstvovanie kabin gruzovykh avtomobilej na stadii proektirovaniya dlya udovletvoreniya trebovaniyam passivnoj bezopasnosti [Improving truck cabins at the design stage to meet the requirements of passive safety]. *Journal of Science and Innovation*, 2013, no. 12. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/1130.html> (accessed 1 June 2015).
6. Joseph P. Sujit M. *Correlation of Test Results for ECE R 29 Load Cases with CAE Simulation*. Altair Technology Conference. India, 2013.
7. Mirzaamiri R., Esfahanian M., Ziaei-Rad S. Crash Test Simulation and Structure Improvement of IKCO 2624 Truck According to ECE-R29 Regulation. *International Journal of Automotive Engineering*, July, 2012, vol. 2, no. 3.