

# Моделирование процесса раскрытия подушек безопасности в SIMULIA Abaqus

Артем Кисловский, Дмитрий Нуштаев

Система пассивной безопасности защищает пассажиров транспортного средства от получения травм в результате аварии. Разработка новых поколений подушек безопасности неразрывно связана с проведением вычислительных экспериментов, которые используются для тестирования на всех этапах разработки изделия. Метод постоянного давления (UPM) и связанный метод Эйлера — Лагранжа (CEL) применяются для двух основных типов анализа: In position (IP) и Out of Position (OoP). Первый тип анализа рассматривает ситуации, в которых пассажир взаимодействует с полностью раскрытой подушкой безопасности, а второй — с находящейся в стадии раскрытия. В отличие от UPM-метода, где значения термодинамических параметров приняты постоянными во всей области, CEL-метод использует традиционный эйлеров подход к описанию движения сплошной среды, в котором параметры вещества определяются для каждой ячейки расчетной сетки. Деформация лагранжевой оболочки зависит от приложенной к ней силы, которая вычисляется с использованием алгоритма общего контакта. Результаты CEL-подхода лучше согласуются с экспериментальными данными на всех стадиях раскрытия подушки безопасности, однако его применение для полностью раскрытой подушки безопасности (IP-анализ) нецелесообразно из-за высоких вычислительных требований алгоритма и незначительного влияния структуры внутреннего течения на результаты моделирования конечного этапа. На поздних стадиях раскрытия (IP-анализ) традиционно используется UPM-метод. Функционал программного комплекса SIMULIA Abaqus позволяет с высокой точностью моделировать задачи раскрытия сложных надувных конструкций с применением как CEL- и UPM-подходов, так и их комбинации.



Артем Кисловский,  
стажер, ООО «ТЕСИС»



Дмитрий Нуштаев,  
к.т.н, инженер, ООО «ТЕСИС»

## Введение

Стремительное развитие технологий приводит к улучшению комплексной безопасности автомобилей и пассажиров, которое достигается усовершенствованием как программных средств (например, использование искусственного интеллекта для

предотвращения аварийных ситуаций), так и элементов конструкции автомобиля. Развитие беспилотных транспортных средств выдвигает особые требования к системе пассивной безопасности пассажира, основными элементами которой считаются ремни и подушки безопасности. В настоящее время безопас-

ность является приоритетным направлением для автопроизводителей, выполняющих условия регулирующих норм и стандартов. Существующие требования технического регламента, действующего на территории Российской Федерации, согласуются с требованиями Правил Европейской экономической комис-

сии ООН. Одним из основных критериев оценки автомобиля, согласно принятой в ЕС программе (Euro NCAP), является обеспечение безопасности пассажиров. Впервые подушки безопасности были установлены в 1970-х годах на автомобилях компании Ford и в настоящее время относятся к обязательным элементам системы пассивной безопасности транспортных средств [1]. Современный автомобиль может быть укомплектован различными типами подушек безопасности (рис. 1), активация конкретного типа которых происходит в зависимости от положения области удара.

Конструктивно подушка безопасности состоит из двух элементов: оболочки, обычно

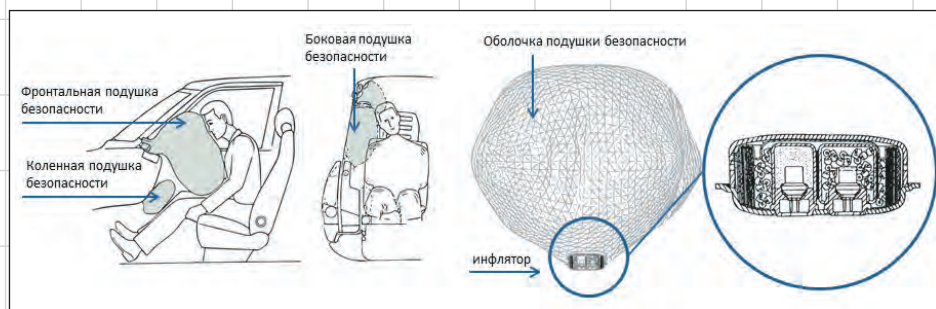


Рис. 1. Основные типы подушек безопасности легкового автомобиля и их устройство

изготавливаемой из тонкой нейлоновой ткани, и пиропатрона (инфлятора), наполняющего ее газом. Идеальным считается сценарий, в котором взаимодействие пассажира происходит с полностью раскрытой оболочкой — in-position (IP) анализ. Потенциально опасная ситуация возникает, если пассажир находится слишком близко к подушке безопасности в момент ее раскрытия — out-of-position (OoP) анализ. В этом случае человек соприкасается с взрывообразно наполняющейся оболочкой. Срабатывание подушки безопасности происходит за относительно небольшой временной промежуток. В зависимости от начальных условий, время столкновения человека с поверхностью подушки происходит меньше чем за 30 миллисекунд. Столь короткий промежуток времени затрудняет сбор экспериментальных данных о процессах, происходящих на ранних стадиях раскрытия. Вычислительный эксперимент проводится с целью изучения физики внутреннего течения, его влияния на замкнутую сложенную оболочку и оценки степени ее воздействия на пассажира.

В настоящее время существует несколько подходов к численному моделированию процессов раскрытия подушек безопасности. Первую группу составляют методы, аппроксимирующие внутреннее течение осредненными по пространству значениями термодинамических параметров, — метод постоянного давления UPM (англ. Uniform Pressure Method). Вторую группу образуют методы, моделирующие внутреннее течение вещества, — связанный метод Эйлера — Лагранжа CEL (англ. Coupled Eulerian Lagrangian), гидродинамика сглаженных частиц SPH (англ. Smoothed Particle Hydrodynamics) [2].

Одним из лидеров решения задач моделирования надувных конструкций является программный комплекс SIMULIA Abaqus. Его инструментарий позволяет успешно моделировать сложные конструкции и сценарии: срабатывание боковой автомобильной подушки безопасности, состоящей из 18 отсеков (рис. 2), раскрытие многокамерной заглушки железнодорожного туннеля (рис. 3) [2]. В настоящей статье рассмотрены подходы к конечно-элементному моделированию процесса раскрытия подушек безопасности, приведено описание реализации UPM- и CEL-методов в SIMULIA Abaqus, и выполнено сравнение результатов

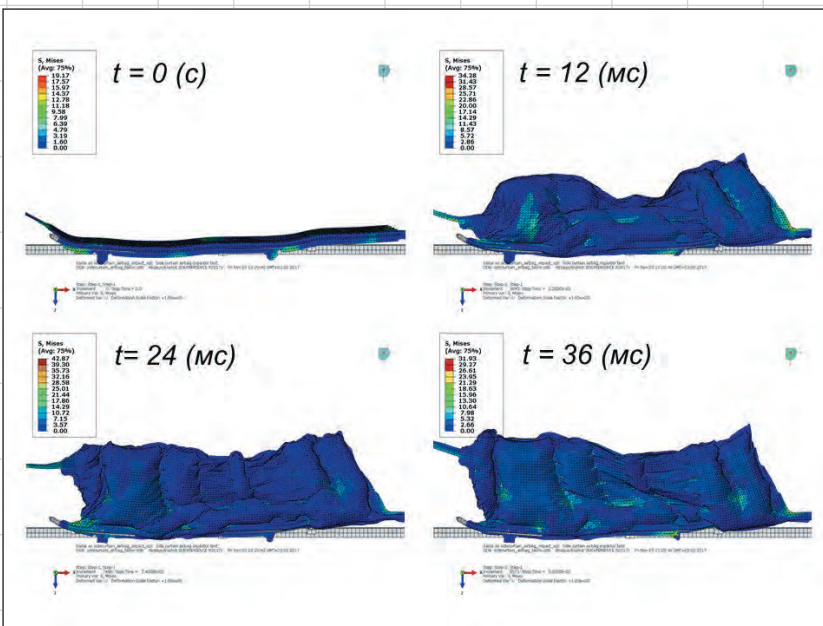


Рис. 2. Результат моделирования боковой подушки безопасности на разных стадиях раскрытия

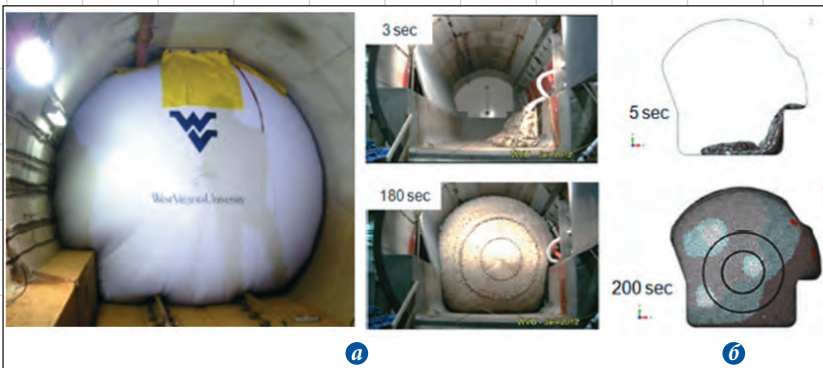


Рис. 3. Полноразмерные модели заглушки железнодорожного туннеля: а — тестовые данные; б — результаты вычислительного эксперимента [2]

моделирования с экспериментальными данными для модели фронтальной однокамерной подушки безопасности.

## Метод постоянного давления (UPM)

Моделирование процесса раскрытия подушек безопасности осуществляется на базе конечно-элементных комплексов, использующих явную схему интегрирования уравнений движения по времени. Явные численные схемы хорошо подходят для решения высокоскоростных динамических задач с учетом множественных контактных взаимодействий и самоконтакта. В конце 1980-х годов была предложена математическая модель аппроксимации внутреннего давления на

базе явной схемы — метод постоянного давления UPM, основанный на решении скалярных уравнений термодинамики [3]. UPM-метод имеет довольно простую численную реализацию и не требует больших вычислительных ресурсов, обладает достаточной точностью для задач, в которых эффектами, связанными с внутренним течением газа, можно пренебречь. Предположение о постоянстве давления и температуры во всей внутренней области ограничивает область применения UPM-метода. Несмотря на это, он нашел широкое применение при проведении IP-анализа вследствие относительно низких вычислительных затрат.

В программном комплексе SIMULIA Abaqus для использования UPM-метода необходимо определить полностью зам-



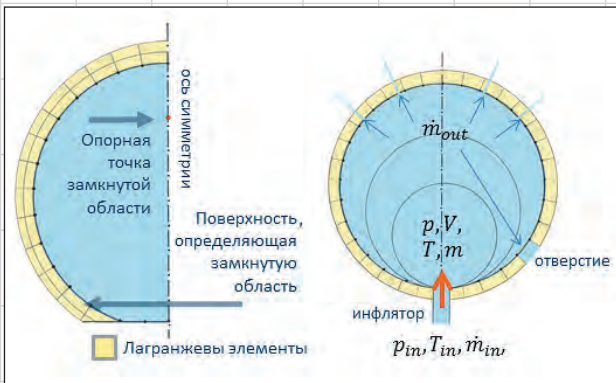


Рис. 4. Схематичное изображение UPM-метода

кнутую область оболочки, аппроксимированную лагранжевыми элементами. Опорная точка, расположенная внутри области, используется для определения свойств наполняющего ее вещества (молярная масса, теплоемкость при постоянном давлении). Кроме того, в ней вычисляются термодинамические параметры газа, задаются характеристики инфлятора (устройства, наполняющего область газом), определяется утечка газа через материал. В задачах моделирования подушек безопасности газ считается идеальным, а процесс наполнения — адиабатическим, так

как теплообмен отсутствует вследствие того, что расширение происходит за малый промежуток времени. На рис. 4 представлена схематичная модель замкнутой области, наполняемая через физический инфлятор. На каждом шаге по времени объем замкнутой области вычисляется методами прямого интегрирования, а масса газа определяется по закону сохранения массы:  $m = m_0 + \dot{m}_{in} \cdot \tau + \dot{m}_{out} \cdot \tau$ , где  $m_0$  — масса газа, изначально находящегося в оболочке,  $\dot{m}_{in}$  и  $\dot{m}_{out}$  — массовый расход втекающего и вытекающего газа,  $\tau$  — шаг интегрирования по времени. Уравнение со-

стояния  $f_1(p, V, T, m) = 0$  совместно с уравнением адиабаты  $f_2(p, V)$  образует замкнутую систему, позволяющую вычислить плотность, давление и температуру газа в замкнутой области на каждом временном шаге интегрирования [3]. В SIMULIA Abaqus существует четыре математические модели инфлятора, определяющие его массовый расход  $\dot{m}_{in}$ . В каждой модели задаются характеристики инфляционного газа, его состав и известные термодинамические параметры. Кроме того, в рамках UPM-метода возможно задать смесь газов, истекающую из инфлятора, отличную от начального состава замкнутой области.

Метод UPM использовался для моделирования боковой подушки безопасности и заглушки железнодорожного туннеля (рис. 2 и 3). Его вычислительная эффективность позволяет рассматривать случаи с очень сложными внутренними структурами. Например, при моделировании боковой подушки безопасности (см. рис. 2) учитывались не только свойства инфлятора,

утечка через материал и специальные отверстия между камерами и окружающей средой, но и возможность закупоривающую вычислить плотность, давление и температуру газа в замкнутой области на каждом временном шаге интегрирования [3]. В SIMULIA Abaqus существует четыре математические модели инфлятора, определяющие его массовый расход  $\dot{m}_{in}$ . В каждой модели задаются характеристики инфляционного газа, его состав и известные термодинамические параметры. Кроме того, в рамках UPM-метода возможно задать смесь газов, истекающую из инфлятора, отличную от начального состава замкнутой области.

### Связный метод Эйлера — Лагранжа (CEL)

В общем случае термодинамические параметры наполняющего газу, влияющие на ее форму, являются функциями не только времени, но и координат, то есть  $p = p(x, y, z, t)$ ,  $\rho = \rho(x, y, z, t)$ . Для однозначного описания движения сплошной среды в программном комплексе SIMULIA Abaqus используется эйлеров подход, в котором скорость и термодинамические параметры свободно перемещающегося наполняющего вещества рассматриваются в фиксированных точках  $(x, y, z, t)$  пространственно-временного объема — ортогональной эйлеровой сетки, охватывающей объект исследования. Материал подушки безопасности аппроксимируется лагранжевыми элементами, жестко связанными с ним.

В связанном методе Эйлера — Лагранжа материал, определенный в ячейках эйлеровой области, взаимодействует с лагранжевыми элементами. Данный тип анализа можно разделить на три функциональных шага. Первый — Volume of fluid method (VOF) позволяет отслеживать форму и положение поверхности материала. Для этого вводится специальная дробная функция  $f$ , принимающая значения от 0 до 1 (рис. 5) в зависимости от состава эйлеровой ячейки: в ячейке, полностью

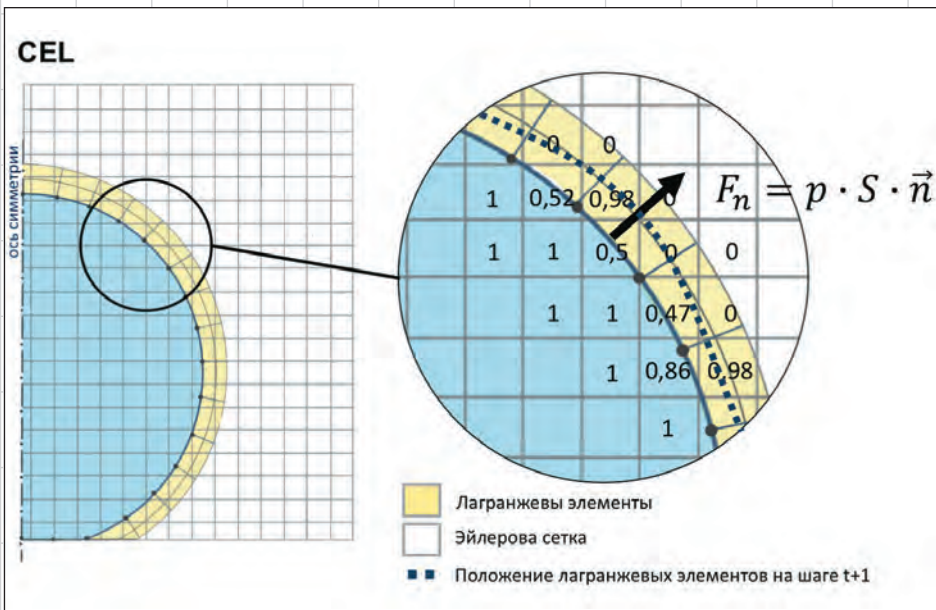


Рис. 5. Схематичное изображение CEL-метода

заполненной веществом  $f = 1$ , а в пустой  $f = 0$ . Лагранжевы элементы разбивают граничные эйлеровы ячейки на две области, граница между которыми определена однозначно. На втором шаге решаются уравнения движения жидкости и газа, определяются скорость и термодинамические параметры потока в ячейках, для которых  $f = 1$ , а значения на границе ( $0 < f < 1$ ), вычисляются в соответствии с выбранной математической моделью контакта. Сила, действующая на лагранжевы элементы, есть произведение давления на площадь границы раздела, вычисленной на первом шаге. Третий этап — определение деформаций и напряжений лагранжевого материала оболочки, вызванных внутренним состоянием вещества (давление в пределах одной ячейки считается постоянным). Лагранжева сетка деформируется, занимая новое положение в расчетной области на новом временном шаге. Далее процесс итеративно замыкается.

Функционал программного комплекса SIMULIA Abaqus позволяет проводить анализ для различных типов жидких и газообразных веществ. В зависимости от физико-математической формулировки задачи задаются свойства жидкости или газа (уравнение состояния, вязкость) и выбирается система уравнений, описывающая движение вещества (уравнения Навье — Стокса, Эйлера). Обычно при автомобильной аварии в инфляторе поджигается смесь азидов натрия ( $\text{NaN}_3$ ), вследствие чего происходит химическая реакция с большим выделением газообразного горячего азота ( $\text{N}_2$ ), который наполняет подушку безопасности. С большой точностью азот можно считать идеальным двухатомным газом с известными свойствами. Его термодинамические параметры определяются путем решения уравнений Эйлера в узлах пространственной сетки.

Использование двух сеток и дополнительных систем уравнений в VOF, динамики движения среды и алгоритма контакта значительно увеличивает размерность CEL-задачи, по сравнению с UPM-методом. Проигрывая в вычислительной эффективности UPM-методу, CEL-метод достаточно точно разрешает задачу на ранних стадиях раскрытия подушек безопасности и используется в OoP-анализе.

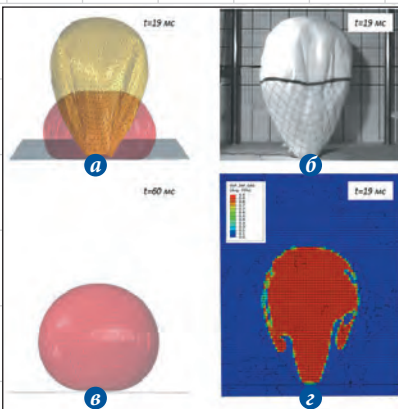


Рис. 6. Сравнение формы фронтальной подушки безопасности: а — CEL (желтый), UPM (красный); б — эксперимент; в — конечное состояние CEL (желтый), UPM (красный); г — состав эйлеровых ячеек

На рис. 6 приведено сравнение расчетов, выполненных методами UPM и CEL, с экспериментальными данными [4]. В двух, вычислительных экспериментах использовалась идентичная конечно-элементная модель. Метод UPM определяет деформированную форму оболочки с относительно большой ошибкой на начальной фазе расширения, в то время как форма подушки безопасности, рассчитанная CEL-методом, соответствует экспериментальным данным. Однако конечная форма оболочки (рис. 6в), когда влияние

структуры внутреннего течения несущей структурой (IP-анализ), в CEL- и UPM-анализе идентична.

## Верификация математической модели

В начале 1990-х немецкие автомобильные производители Volkswagen, DaimlerChrysler, Porsche, BMW и Audi создали рабочую группу для оценки и развития вычислительных методик OoP-экспериментов. Рабочая группа разрабатывала различные численные методы для моделирования эксперимента по раскрытию стандартной 60-литровой подушки безопасности. В работе [4] рассматривались две начальные конфигурации подушки безопасности: плоская и сложенная. Сверху помещался полусферический муляж, с которого проводилась запись экспериментальных данных — ускорений. Схема эксперимента приведена на рис. 7. Численное моделирование проводилось в программном комплексе SIMULIA Abaqus с использованием UPM- и CEL-методов, а его результаты сравнивались с экспериментальными данными.

Поверхность подушки безопасности была разбита на мембранные элемен-

# Тезис

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
— В ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

3D TransVidia — трансляция и проверка качества 3D моделей

SIMULIA Abaqus — прочность

FlowVision — гидродинамика

DEFORM — обработка металлов давлением

AutoForm — листовая штамповка

www.thesis.com.ru    www.flowvision.ru

Тел/Факс: (495) 612 – 4422, 612 – 4262

E-mail: info@thesis.com.ru



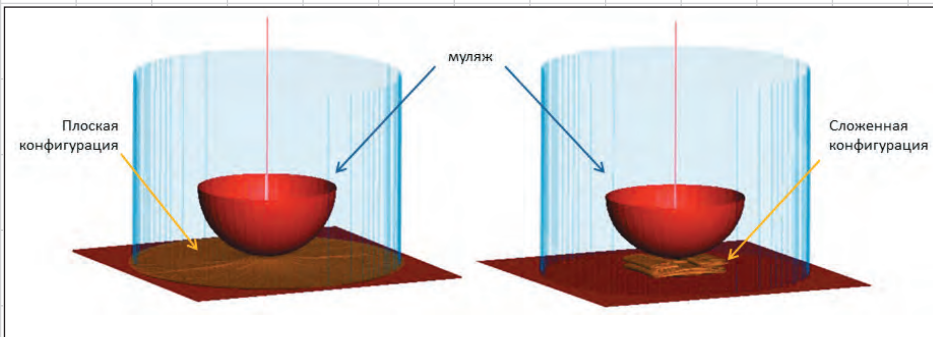


Рис. 7. Постановка физического эксперимента

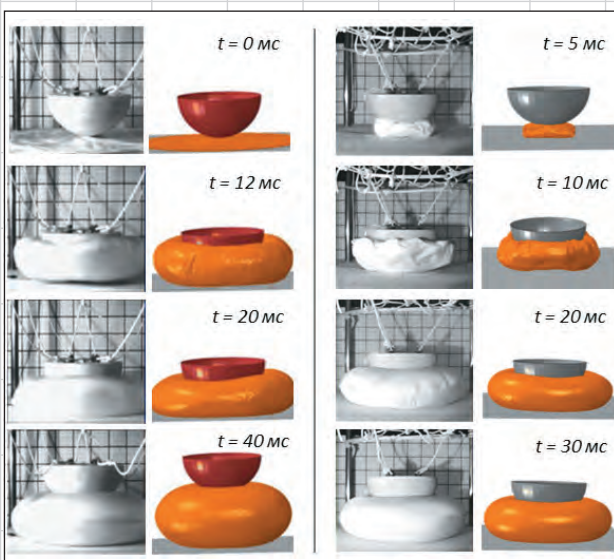


Рис. 8. Результаты физического эксперимента (черно-белое фото) с данными, полученными CEL-методом

Использован нелинейный анизотропный материал оболочки \*fabric. Данная модель является феноменологической моделью тканых ламинатов, которая учитывает влияние ориентации во-

локна на деформирование ткани. Функционал модели обеспечивает возможность моделирования линейно-упругого, нелинейно-упругого и упруго-«пластического» (с остаточной деформацией

после разгрузки) поведения ткани. Согласно модели, локальные напряжения в ткани определяются как функция номинальных деформаций в направлении утка и основы, а также угла между волокнами (сдвиговой деформацией). Предполагается, что растяжение/сжатие вдоль основы/утка и работа материала на сдвиг независимы друг от друга, то есть поведение каждого компонента напряжений ткани зависит только от ее деформации в этом направлении. Эйлера область представляет собой прямоугольную пространственную сетку, вытянутую на достаточно большое расстояние от границ объекта, давая ему возможность свободно перемещаться и деформироваться. Между наполняющим газом и поверхностью подушки безопасности определены контактные взаимодействия.

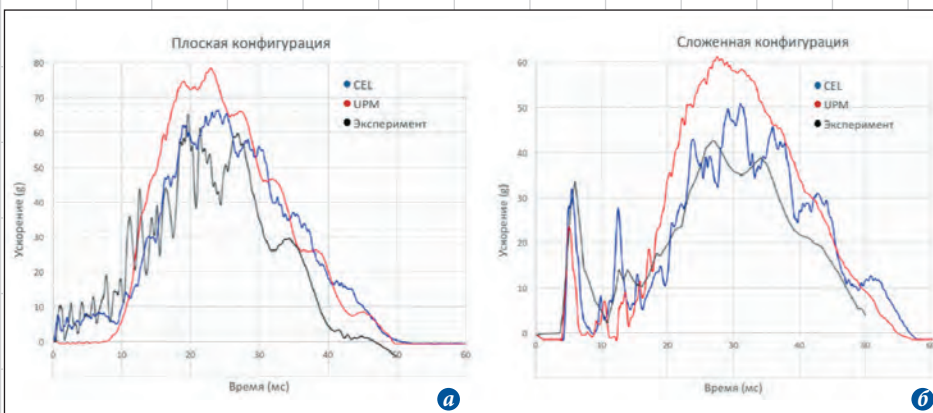


Рис. 9. Зависимость ускорения модели от времени для плоского (а) и сложенного (б) начальных состояний подушек безопасности [4]

На рис. 8 приведены результаты физического эксперимента и численного моделирования методом CEL для двух начальных конфигураций. В эксперименте использовалась эйлера сетка с размером ячейки 5 мм (диаметр модели подушки безопасности — 250 мм). На рис. 9 представлены зависимости ускорения муляжа от времени для двух начальных конфигураций подушки безопасности (плоская — слева, сложенная — справа). Для удобства ускорение выражено в единицах g ( $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ). Согласно программе испытаний Euro NCAP [5], жестким ударом считается удар с величиной ускорения для головы, превышающей 80 g. Результаты, полученные UPM-методом, правильно отражают тенденции изменения ускорений, однако имеют относительно высокую ошибку на ранних стадиях раскрытия, связанную с упрощениями, принятыми в математической модели. В то же время метод CEL верно определяет ускорения, оказываемые оболочкой подушки безопасности на муляж на всей стадии процесса. ➤

## Литература:

1. Khan M.U., Moatamedi M. A review of airbag test and analysis // International journal of crashworthiness. 2008. Т. 13. №. 1. С. 67-76.
2. Sosa E.M., Wong C.S., Barbero E.J. Modeling of Confined Inflatable Structures. — SIMULIA Community Conference 2015.
3. Wang J.T., Nefske D.J. A new CAL3D airbag inflation model // SAE Technical Paper. 1988. № 880654.
4. Abaqus Technology Brief, TB-11-ABCEL-1, June 2011.
5. Euro NCAP Assessment Protocol — AOP, Version 8.0.2, November 2017.