

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДУШКИ БЕЗОПАСНОСТИ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ С АНТРОПОМОРФНЫМ МАНЕКЕНОМ

А.В. Гонсалес Астуа

Р.Б. Гончаров

А.В. Петюков

andresastua@yandex.ru

goncharov.roman@bmstu.ru

petyukov\_a@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрена физико-математическая модель взаимодействия подушки безопасности и антропоморфного манекена, реализованная методом конечных элементов, на примере кософронтального удара легкового автомобиля согласно требованиям правил пассивной безопасности ООН № 94. В основе разработанной модели лежит система уравнений законов сохранения массы, импульса и энергии. В качестве контактного алгоритма использован штрафной метод. Исследование проведено для трех вариантов взаимодействия автомобиля с препятствием: 1) столкновение с ремнем и подушкой безопасности; 2) столкновение с ремнем, но без подушки безопасности; 3) столкновение без ремня, но с подушкой безопасности. Подушка безопасности моделировалась с учетом особенностей ее размещения в рулевом колесе и процесса раскрытия. Модель ремня безопасности учитывала в упрощенном виде втягивающее и блокирующее устройства. Результаты расчетов показали, что физико-математическая модель процесса взаимодействия подушки безопасности с антропоморфным манекеном на базе метода конечных элементов позволяет дать оценку травмируемости манекена; установка ремня без подушки безопасности и подушки без ремня безопасности может привести к летальному исходу в результате кософронтального удара; наличие в конструкции только подушки безопасности не позволяет удерживать манекен от столкновения с внутренними элементами легкового автомобиля; наличие в конструкции подушки и ремня безопасности удовлетворяет основным требованиям правил пассивной безопасности ООН № 94

### Ключевые слова

*Подушка безопасности, ремень безопасности, пассивная безопасность, легковой автомобиль, метод конечных элементов*

Поступила 07.04.2022

Принята 11.05.2022

© Автор(ы), 2022

**Введение.** Аварии легковых автомобилей, происходящие вследствие кософронтального лобового удара, являются одними из самых опасных ситуаций при дорожно-транспортных происшествиях, приводящих ежегодно к гибели и травмам людей во всем мире [1, 2]. Статистические данные показывают, что более половины всех аварий с летальным исходом — результат лобового удара автомобиля, чаще всего, вследствие выезда на встречную полосу. В настоящее время наиболее распространенным способом испытания конструкции транспортных средств на пассивную безопасность является натурный эксперимент [3]. Однако у указанного подхода есть существенные недостатки: необходимость проведения испытаний на полномасштабном объекте транспортного средства, что является дорогостоящим и достаточно трудоемким процессом; получение общего представления о деформированном состоянии кузова после проведения испытания. В связи с этим целесообразно максимально использовать возможности современных численных методов анализа на основе компьютерного моделирования для уменьшения затрат времени и средств на разработку конструкции. Задачи такого рода эффективно решаются методом конечных элементов (МКЭ) с использованием явного способа решения дифференциальных уравнений.

*Цель работы* — создание физико-математической модели процесса взаимодействия подушки безопасности и антропоморфного манекена на примере кософронтального удара легкового автомобиля с использованием МКЭ.

**Описание физико-математической модели процесса взаимодействия подушки безопасности и антропоморфного манекена.** В основе физико-математической модели лежит система уравнений законов сохранения массы, импульса и энергии:

$$\begin{aligned} \rho V &= \rho_0 V_0, \\ \sigma_{ij,j} + \rho f_i &= \rho \ddot{x}_i, \\ \dot{E} &= V s_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - (p + q) \dot{V}, \\ s_{ij} &= \sigma_{ij} + (p + q) \delta_{ij}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\rho$ ,  $\rho_0$  — текущая и начальная плотности материала;  $V$ ,  $\dot{V}$  — относительный удельный объем и его полная производная по времени;  $\sigma_{ij,j}$  — компоненты дивергенции тензора напряжений Коши;  $f_i$  — компоненты вектора объемных сил, действующего на тело;  $\ddot{x}_i$  — компоненты ускорения рассматриваемого элемента;  $\dot{E}$  — полная производная по времени

удельной внутренней энергии;  $s_{ij}$  — компоненты девиатора тензора напряжений;  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  — компоненты тензора скоростей деформации;  $p$  — текущее давление;  $q$  — добавка к давлению, обусловленная искусственной вязкостью;  $\delta_{ij}$  — дельта-функция Кронекера. Система уравнений (1) была дополнена необходимыми моделями прочности и уравнениями состояния материалов.

Интегрирование системы уравнений (1) проводилось численно с использованием центрального разностного метода [4]. В рассматриваемом случае дискретным аналогом уравнения движения является соотношение  $Ma^n = P^n - F^n + H^n$ , где  $M$  — диагональная матрица масс;  $P^n$  — внешние и массовые силы;  $F^n$  — вектор дивергенции напряжений;  $H^n$  — матрица, учитывающая сопротивление искажению конечных элементов (эффект «песочных часов»). Верхний индекс  $n$  соответствует величинам на текущем временном слое ( $t^n$ ). Элементы диагональной матрицы масс определяются как

$$m_{kk} = \int_v \rho \varphi_k dv,$$

где  $\varphi_k$  — функция формы конечного элемента.

Расчет параметров на  $t^{n+1}$  временном слое проводился следующим образом:

$$\begin{aligned} a^n &= M^{-1} (P^n - F^n + H^n), \\ v^{n+1/2} &= v^{n-1/2} + a^n \Delta t^n, \\ u^{n+1} &= u^n + v^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2}, \end{aligned}$$

где  $v$ ,  $u$  — векторы скорости и перемещений узлов ячейки;  $t^{n+1/2}$  — полувременной шаг,  $t^{n+1/2} = (t^n + t^{n+1}) / 2$ .

Обновление геометрии происходило за счет добавления вектора перемещений к начальным значениям:  $x^{n+1} = x^0 + u^{n+1}$ . Глобальный шаг интегрирования вычислялся на основе критерия Куранта как наименьшая величина для всех ячеек  $i = 1, \dots, N$ :  $\Delta t^n = \min [L_i / c_i]$ , где  $L_i$  — характерный размер конечного элемента (КЭ);  $c_i$  — скорость звука в КЭ.

Аналогично происходит аппроксимация других уравнений системы (1).

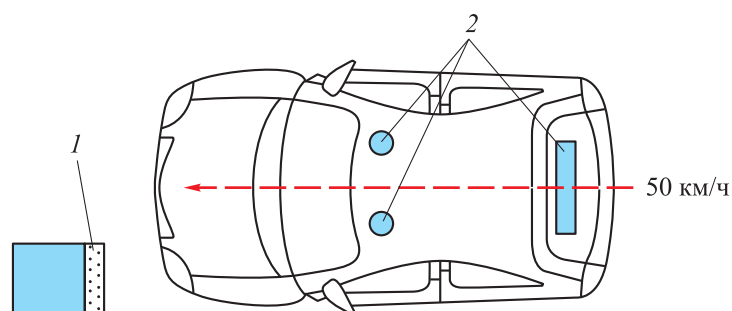
Для задания контактного взаимодействия между антропоморфным манекеном и подушкой безопасности применялся штрафной метод. При использовании такого контактного алгоритма сила отталкивания  $F$

соприкасающихся ячеек материалов прямо пропорциональна глубине их взаимопроникания, а коэффициент пропорциональности определялся как  $K = \rho c A / \Delta t$ , где  $\rho$  — плотность материала;  $c$  — скорость звука;  $A$  — площадь ячейки;  $\Delta t$  — шаг интегрирования по времени.

**Особенности моделирования элементов легкового автомобиля при решении задачи о кософронтальном ударе.** Множество исследований посвящено особенностям моделирования конструктивных элементов транспортных средств, предназначенных для поглощения энергии удара при столкновении [5–7], но, кроме доработки конструкции в легковых автомобилях, для уменьшения травмируемости водителя и пассажиров применяют ремни и подушки безопасности.

На основании статистических данных по ДТП разработаны правила ООН № 94\*, регламентирующие пассивную безопасность автомобилей при кософронтальном ударе.

При испытаниях легковой автомобиль на скорости 50 км/ч с 40%-ным перекрытием ударяется о сминаемый барьер (рис. 1). Кузов легкового автомобиля выдержал все испытания, если выполнены требования, приведенные ниже, а также следующие условия в ходе испытания: ни одна из дверей не должна открываться; не должно происходить блокировки блокировочных систем передних дверей; после удара можно без использования инструментов открыть хотя бы одну дверь для каждого ряда сидений, освободить манекены из удерживающей их системы и извлечь их из транспортного средства без смещения сидений.



**Рис. 1.** Схема испытания легковых автомобилей при кософронтальном ударе: 1 — деформируемый барьер; 2 — положение манекенов

\* ГОСТ Р 41.94–99 (Правила ЕЭК ООН № 94). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении защиты водителя и пассажиров в случае лобового столкновения. М., Изд-во стандартов, 2001.

### Параметры согласно требованиям правил ООН № 94

1. Критерий травмирования головы, ед. .... < 1000
2. Результирующее ускорение центра масс головы ..... > 80g в течение 3 мс
3. Критерий травмирования шеи (NIC) ..... Графики, см. [7]
4. Значение изгибающего момента шеи  
при растяжении по оси Y, Н · м ..... < 57
5. Критерий сжатия грудной клетки (ThCC), мм ..... < 50
6. Критерий нагрузки на бедро (FFC) ..... График, см. [7]
7. Критерий по мягким тканям (VC)  
для грудной клетки, м/с ..... < 1,0
8. Критерий сжатия голени (TCFC), кН ..... < 8
9. Показатель травмирования голени (TI), измеряемый  
в верхней и нижней точке каждой голени, ед. .... < 1,3
10. Смещение подвижных коленных шарниров, мм ..... < 15
11. Остаточное смещение рулевого колеса, измеряемое  
в центре ступицы рулевого колеса, мм ..... < 80 (в вертикаль-  
ном направлении  
вверх)  
< 100 (в горизонталь-  
ном направлении  
назад)

Для анализа эффективности применения подушки безопасности рассмотрены параметры 1–5, поскольку наличие/отсутствие подушки безопасности в первую очередь влияет на удовлетворение этих критериев. Среди рассматриваемых параметров основными являются ускорение центра масс головы манекена и критерий ее травмирования (Head Injury Criterion, NIC):

$$NIC_{36} = \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a_R dt \right]^{2,5} (t_2 - t_1),$$

где  $t_1, t_2$  — любые две временные точки в момент удара, которые отстают друг от друга не более чем на 36 мс,  $t_1 < t_2$ ;  $a_R$  — результирующее ускорение поступательного движения центра масс головы манекена.

*Особенности моделирования кузова автомобиля.* Использована конечно-элементная модель (КЭМ) легкового автомобиля *Toyota Yaris* (2010 г.), свободно предоставляемая Center for Collision Safety and Analysis (CCSA) в качестве базового автомобиля. Конечно-элементная модель кузова преимущественно состоит из оболочечных элементов, которые позволяют наиболее точно описывать характеристики тонкостенных листовых панелей. Существуют различные типы оболочечных элементов. Наиболее рас-

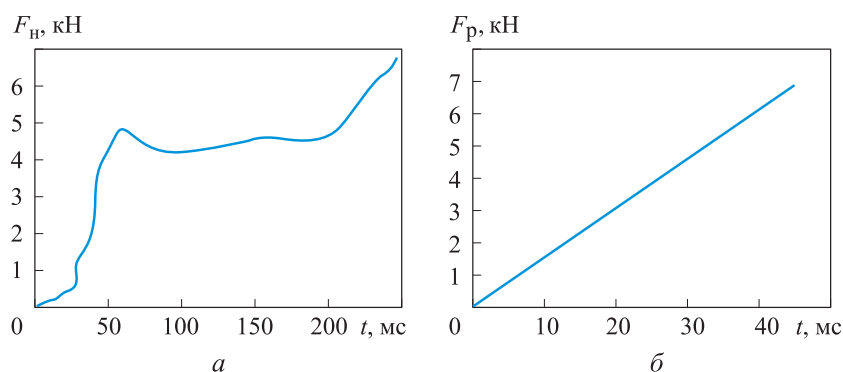
пространены элементы Беличко — Цая с функцией неполного интегрирования. При расчетах эти КЭ требуют меньших затрат машинного времени по сравнению с аналогичными элементами с функциями полного интегрирования [8]. Одним из универсальных требований к КЭ высшего уровня являются средний и минимальный размеры оболочечного КЭ при построении расчетной сетки. В современных моделях кузовов легковых автомобилей минимальный размер оболочечного КЭ принят равным 5 мм. Этот размер выбран исходя из разумных временных затрат на вычисления, связанных с использованием явных методов интегрирования [9–11]. Средний размер КЭ-сетки кузова составляет 10...15 мм. Таким образом, КЭМ кузова легкового автомобиля содержит более 350 тыс. элементов. Как показывают расчеты, двери и стекла вносят существенный вклад в общую жесткость кузова автомобиля, поэтому при моделировании их необходимо учитывать [12, 13].

*Особенности моделирования манекена.* Использована подробная КЭМ манекена «Гибрид III» как наиболее эффективная для решения задач пассивной безопасности при фронтальном ударе. Основная цель применения манекена — определение мест и уровней потенциальных травм. Использование манекена при проведении виртуального краш-теста обеспечивает хорошую повторяемость реальных повреждений и позволяет получить больше информации о том, что может произойти с манекеном во время натурального эксперимента [14, 15]. Бедро, голень и стопа описаны моделью билинейного упругопластического тела. В качестве модели черепа и ребер выбрана вязкоупругая модель [4]. При этом релаксация модуля сдвига подчинялась уравнению  $G(t) = G_{\infty} + (G_0 - G_{\infty})e^{-\beta t}$ , где  $G_{\infty}$  — модуль сдвига при длительном нагружении;  $G_0$  — модуль кратковременного сдвига;  $\beta$  — константа затухания.

*Особенности моделирования ремней безопасности.* Ремень безопасности — эффективное и обязательное устройство безопасности в удерживающей системе транспортного средства, защищающее водителя и пассажиров при аварии. Наиболее часто используемым ремнем безопасности является трехточечная система удержания ремня безопасности (seatbelt), которая состоит из ремня, закрепленного на одном конце, D-образного кольца (D-ring) и стягивающего устройства (retractor).

Моделирование ремня безопасности включало в себя моделирование стягивающего устройства, D-образного кольца и ткани ремня [16]. Модель стягивающего устройства создавалась по упрощенной схеме физического ретрактора путем задания двух кривых (рис. 2): 1) кривой нагрузки

(нагрузка против вытягивания); 2) кривой разгрузки (нагрузка против отдачи). D-образное кольцо моделировалось элементом контактного кольца без геометрического представления физического кольца. Скользящий элемент создавался как узловая точка, прикрепленная к кузову транспортного средства.



**Рис. 2.** Зависимости силы нагрузки (а) и силы разгрузки (б) втягивающего устройства от времени

Материал ремня обычно состоит из переплетенных нитей хлопка и нейлона, поэтому ремень представлен моделью многослойного тканевого ортотропного материала [18]. Для корректного моделирования ремня безопасности использовано устройство предварительного натяжения для устранения провисания в начале моделирования. Если усилие ремня превышало максимальное усилие, определенное для устройства предварительного натяжения, втягивающее устройство срабатывало, а устройство предварительного натяжения отключалось.

*Особенности моделирования подушки безопасности.* Конечно-элементная модель подушки безопасности создана по методикам, описанным в [18–20], и представляла собой контрольную замкнутую поверхность, которая моделировалась набором полноинтегрируемых оболочечных мембранных КЭ Беличко — Цая [21]. В качестве модели механического поведения материала подушки безопасности использована модель многослойного тканевого ортотропного материала [17]. Параметры модели приведены ниже:

Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> .....	2000
Модули упругости в направлении координатных осей материала $E_a = E_b$ , ГПа .....	2,0
Коэффициенты Пуассона в координатных плоскостях материала $\nu_{ba} = \nu_{ca}$ .....	0,35
Модуль сдвига $G_{ab}$ , ГПа .....	2,0

Для моделирования процесса раскрытия подушки безопасности использован метод корпускулярных частиц [22], позволяющий, в отличие от метода контрольного объема [23], проводить корректный расчет ситуаций, в которых взаимодействие подушки безопасности и объектов происходит до ее полного раскрытия. В соответствии с алгоритмом этого метода надув подушки происходит под действием потока частиц сферической формы, которые, по сути, являются ансамблями множества реальных молекул газа. При этом обеспечивалось равенство удельной поступательной кинетической энергии молекул и частиц. Взаимодействие между частицами и частицами и тканью представляло собой идеально упругие столкновения. Исходная геометрия подушки безопасности показана на рис. 3. Кривая газового расхода подбиралась так, чтобы обеспечить раскрытие подушки за 30 мс.

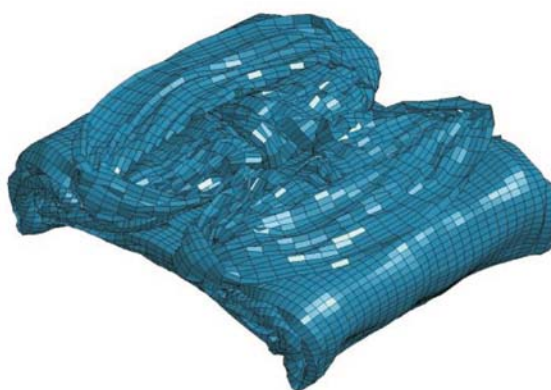


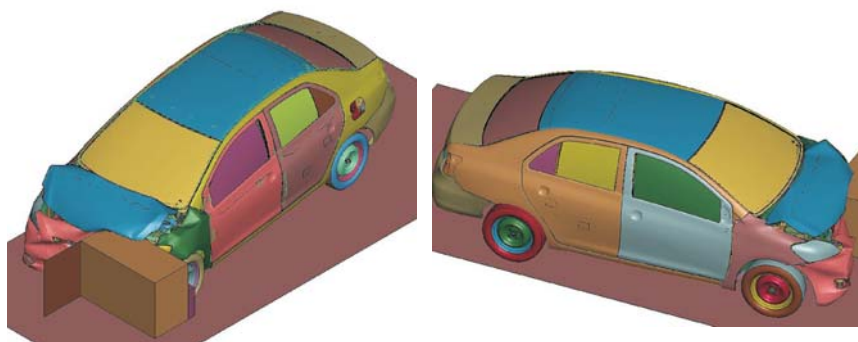
Рис. 3. Исходная геометрия подушки безопасности

**Физико-математическая модель процесса взаимодействия антропоморфного манекена и подушки безопасности на базе метода конечных элементов.** Для моделирования процесса взаимодействия манекена и подушки безопасности, а также для оценки соответствия требованиям правил пассивной безопасности ООН № 94 создана КЭ-модель, состоящая из легкового автомобиля *Toyota Yaris*, манекена «Гибрид III», ремня и подушки безопасности. Манекен был расположен на сиденье водителя автомобиля в точке *H* и пристегнут трехточечным ремнем безопасности. Подушка безопасности размещена в рулевом колесе под внешней панелью. Деформируемый барьер моделировался согласно требованиям, указанным в правилах ООН № 94. Начальная скорость автомобиля 50 км/ч.

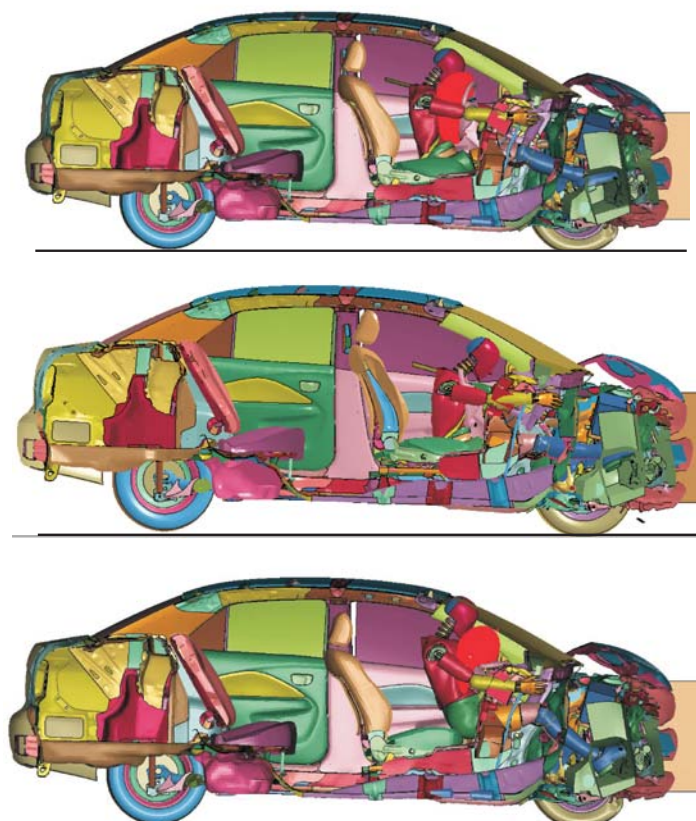
Расчеты проведены для трех вариантов: 1) столкновение с ремнем и подушкой безопасности; 2) столкновение с ремнем, но без подушки



безопасности; 3) столкновение без ремня, но с подушкой безопасности. В результате получена картина деформированного состояния кузова легкового автомобиля (рис. 4). Результаты раскрытия подушки безопасности, деформирования рулевой колонки и торможения манекена в зависимости от рассматриваемого варианта показаны на рис. 5.

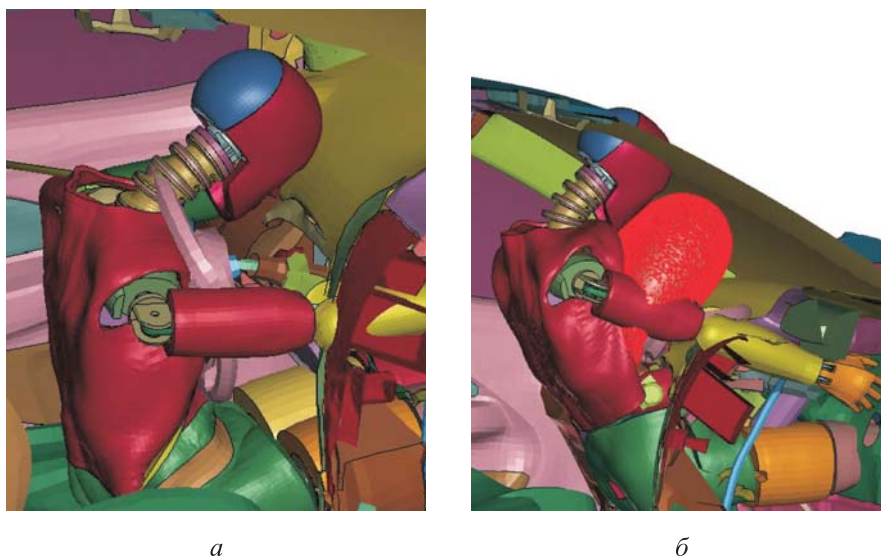


**Рис. 4.** Картина деформированного состояния кузова автомобиля *Toyota Yaris* при фронтальном ударе с 40%-ным перекрытием



**Рис. 5.** Деформирование рулевой колонки и торможение манекена

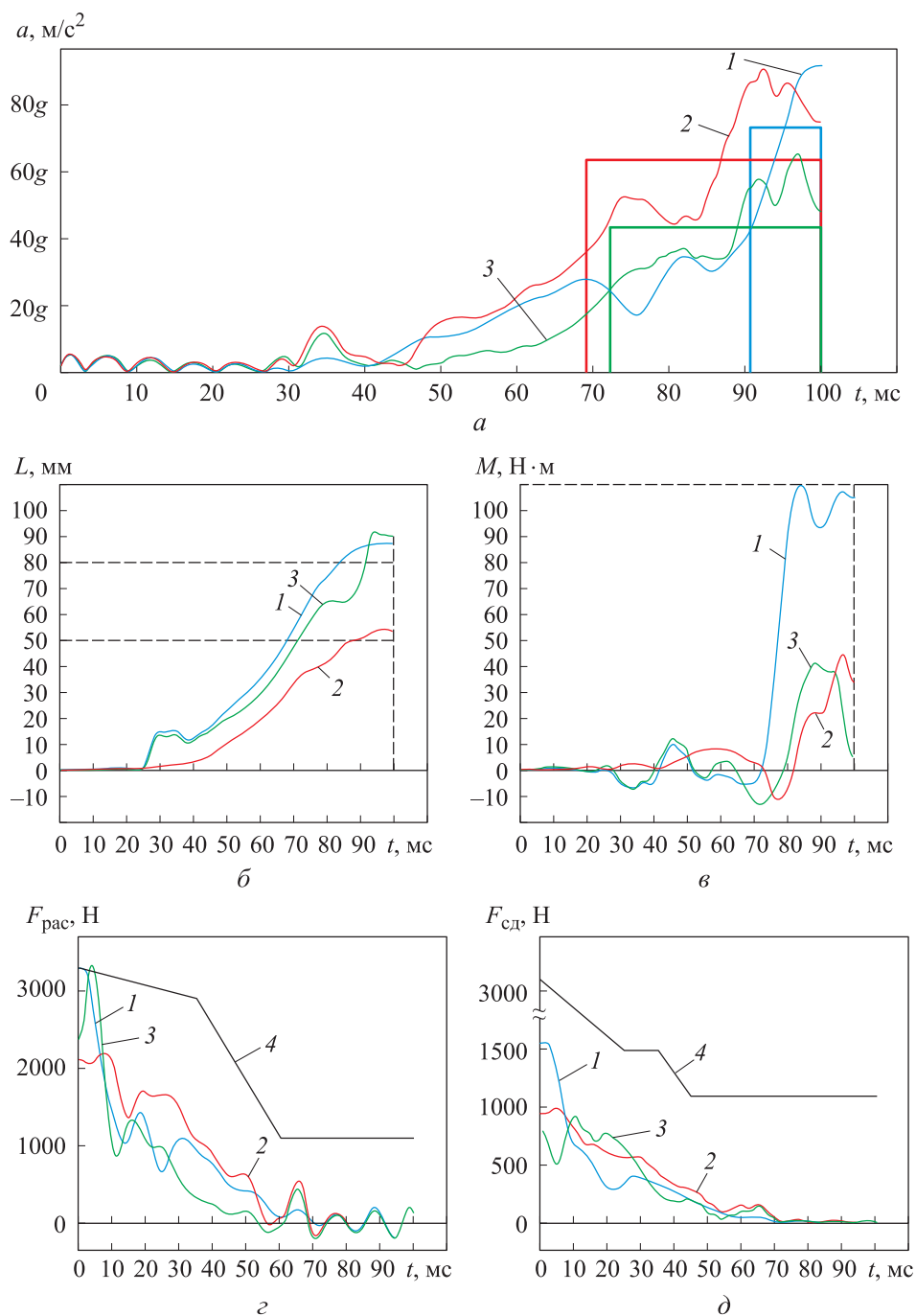
Результаты анализа картины деформированного состояния показали, что фронтальный удар с 40%-ным перекрытием является опасным режимом нагружения. В процессе столкновения происходит контакт манекена с подушкой безопасности и рулевым колесом. В случае отсутствия подушки безопасности манекен взаимодействует сразу с рулевым колесом (рис. 6, а). Ноги и руки манекена контактируют с передним моторным щитом, что может вызвать серьезные травмы. Голова манекена сталкивается с подушкой безопасности или непосредственно с рулевым колесом. При отсутствии ремня для погашения поступательного движения манекена недостаточно наличия подушки безопасности. Голова манекена соударяется с лобовым стеклом, а туловище контактирует с приборной панелью и нижним щитом (рис. 6, б).



**Рис. 6.** Результат взаимодействия манекена с внутренними элементами легкового автомобиля

Основными элементами кузова, воспринимающими энергию при ко-сфронтальном ударе, являются левый лонжерон, крыло, крышка капота и элементы моторного отсека (двигатель, радиатор, передняя левая подвеска, колесо). Двигатель, обладая большой массой и моментом инерции, в процессе удара значительно уменьшает зону деформации и воспринимает значительную долю ударной энергии.

Зависимость перегрузки, возникающей в голове манекена, от времени удара и значения критерия НИС36 приведены на рис. 7 (а — ускорение, выраженное в единицах  $g$ ). Значение критерия НИС36 составляет 880 ед. для варианта 1, 481 ед. для варианта 2 и 407 ед. для варианта 3. Во всех



**Рис. 7.** Зависимости перегрузки ( $a$ ), возникающей в голове манекена, сжатия грудной клетки ( $б$ ), изгибающего момента шеи при растяжении ( $в$ ), осевого растягивающего ( $г$ ) и сдвигающего ( $д$ ) усилий на шею в направлении «спереди–назад» от времени удара и значения критерия НИС36:

1 — отсутствие подушки безопасности; 2 — наличие подушки безопасности;  
 3 — отсутствие ремня безопасности; 4 — требование правил ООН № 94

случаях значения НИС36 не превышают предельно допустимого (1000 ед.). Максимальное ускорение, возникающее в голове манекена, превышает 80g, но его длительность менее 3 мс для первых двух вариантов расчета. Для варианта 3 расчета ускорение менее 65g.

Зависимость сжатия грудной клетки от времени ( $l$  — перемещение грудной клетки) показана на рис. 7, б. При наличии ремня и подушки безопасности (вариант 1) перемещение грудной клетки составляет 53 мм, что незначительно превышает допустимое значение (50 мм). Для виртуального испытания без подушки безопасности (вариант 2) перемещение равно 88 мм, для случая без ремня безопасности — 92 мм (вариант 3), что однозначно приведет к травмам водителя, несовместимым с жизнью.

Зависимость изгибающего момента  $M$  шеи при растяжении от времени приведена на рис. 7, в. Максимальное значение равно 44 Н·м при наличии подушки безопасности (вариант 1), что меньше установленного в нормативной документации значения 57 Н·м. При отсутствии подушки (вариант 2) максимальное значение составляет 110 Н·м, что превышает допустимое значение почти в 2 раза и ведет к значительным травмам шейного отдела позвоночника. Для расчета без ремня безопасности (вариант 3) максимальное значение изгибающего момента шеи составляет 41 Н·м.

Зависимости осевого растягивающего ( $F_{рас}$ ) и сдвигающего ( $F_{сд}$ ) усилий на шее в направлении «спереди–назад» от времени приведены на рис. 7, г и д. Для вариантов 1 и 2 нагрузка лежит в требуемом правилем ООН № 94 диапазоне значений. При этом максимальное усилие в случае наличия подушки безопасности меньше, чем при ее отсутствии. Для варианта 3 осевое растягивающее усилие на шее превышает установленное требованиями значение (см. рис. 7, д).

Результаты для пяти критериев травмируемости рассматриваемых вариантов приведены в таблице.

**Результаты виртуальных испытаний (требуемые значения приведены выше)**

Параметр	Вариант		
	1	2	3
1. Критерий травмирования головы, ед.	880	481	407
2. Результирующее ускорение центра масс головы	Удовлетворяет		
3. Критерий травмирования шеи (NIC)	Удовлетворяет		Не удовлетворяет
4. Значение изгибающего момента шеи при растяжении по оси Y, Н·м	44	110	41
5. Критерий сжатия грудной клетки (ThCC), мм	53	88	92

**Заключение.** Разработанная физико-математическая модель процесса взаимодействия подушки безопасности с антропоморфным манекеном на базе МКЭ позволяет дать оценку травмируемости манекена, расположенного на водительском сиденье при кософронтальном ударе легкового автомобиля.

Установка ремня без подушки безопасности или подушки без ремня безопасности может привести к летальному исходу в результате кософронтального удара легкового автомобиля. Рулевая колонка значительно внедряется в грудную клетку манекена (88 мм для варианта 2 и 92 мм для варианта 3), что значительно превышает значения, установленные требованиями (50 мм).

Наличие в конструкции только подушки безопасности не позволяет удержать манекен от столкновения с внутренними элементами легкового автомобиля — по результатам расчета голова манекена ударилась о лобовое стекло автомобиля.

Наличие в конструкции легкового автомобиля подушки и ремня безопасности позволяет уменьшить значения параметров 4 и 5 (см. таблицу) до значений, указанных в правилах ООН № 94.

Значение параметра 1 значительно возрастает в случае наличия подушки и ремня безопасности (880 ед.) по сравнению с другими рассматриваемыми вариантами (481 ед. для варианта 2 и 407 ед. для варианта 3). Это связано с величиной и продолжительностью действия ускорения на голову манекена в процессе контактного взаимодействия с препятствием.

Для вариантов 1 (ремень и подушка безопасности) и 2 (только ремень безопасности) максимальное ускорение, возникающее в голове манекена, превышает 80g, но длительность его действия менее 3 мс, что соответствует требованиям правил ООН № 94. Для варианта только с подушкой безопасности максимальное ускорение не превышает 65g.

Значения параметра 3 для вариантов 1 и 2 находится ниже значений, установленных правилами ООН № 94.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зузов И.В., Зузов В.Н. Совершенствование конструкции корпуса кузова легкового автомобиля на стадии проектирования для обеспечения требований пассивной безопасности при кософронтальном ударе. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2013, № 1 (90), с. 60–71.
- [2] Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Проблемы поиска оптимальных конструктивных параметров бампера автомобиля при ударном воздействии с позиций пассивной безопасности. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, 2018, № 3, с. 130–136.

- [3] Хусаинов А.Ш., Кузьмин Ю.А. Пассивная безопасность автомобиля. Ульяновск, УлГТУ, 2011.
- [4] Hallquist J.O. LS-DYNA theory manual. LSTC, 2006.
- [5] Зузов В.Н., Сулегин Д.А. Исследование влияния на энергоемкость основных силовых элементов кузова автомобиля в зоне бокового удара. *Вестник ЮУрГУ. Сер. Машиностроение*, 2020, т. 20, № 4, с. 20–34.
- [6] Сулегин Д.А., Зузов В.Н. Исследование влияния усиливающих элементов двери автомобиля на пассивную безопасность при боковом ударе. *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*, 2021, № 1 (132), с. 86–97.  
DOI: [https://doi.org/10.46960/1816-210X\\_2021\\_1\\_86](https://doi.org/10.46960/1816-210X_2021_1_86)
- [7] Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Проблемы поиска оптимальных решений для обеспечения пассивной безопасности кабин грузовых автомобилей при минимальной массе. *Известия МГТУ «МАМИ»*, 2018, № 4, с. 92–102.  
DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-66869>
- [8] Дюбуа П.Б. Расчет стойкости к ударным нагрузкам с помощью программы LS-DYNA. *Матер. учеб. семинара пользователей LS-DYNA*. Снежинск, 2002, с. 62.
- [9] Орлов Л.Н. Пассивная безопасность и прочность кузовов, кабин, автотранспортных средств. Методы расчета и оценки. Н. Новгород, НГТУ, 2005.
- [10] Шабан Б.А., Зузов В.Н. Особенности моделирования каркасных элементов кузовов и кабин автомобилей при исследовании пассивной безопасности. *Наука и образование: научное издание*, 2012, № 11. DOI: 10.7463/1112.0486675
- [11] Шабан Б.А., Зузов В.Н. Особенности построения конечно-элементных моделей кабин для исследования пассивной безопасности при ударе в соответствии с правилами ЕЭК ООН № 29. *Наука и образование: научное издание*, 2013, № 3. DOI: 10.7463/0313.0542301
- [12] Шмелев А.В., Лисовский Э.В., Короткий В.С. Компьютерное моделирование испытаний и исследование кабин грузовых автомобилей по требованиям пассивной безопасности. *Актуальные вопросы машиноведения*, 2015, № 4, с. 168–173.
- [13] Шабан Б.А., Зузов В.Н. Анализ влияния конструктивных факторов кабины на пассивную безопасность грузовых автомобилей при ударе по передним стойкам. *Наука и образование: научное издание*, 2013, № 11. DOI: 10.7463/1113.0636798
- [14] Melvin J., Weber K. Task B final report. UMTRI-85-3. Univ. of Michigan Transportation Research Institute, 1985.
- [15] Lobdell T.E., Kroell C.K., Schneider D.C., et al. Impact response of the human thorax. In: King W.F., Mertz H.J. (eds). *Human Impact Response: Measurement and Simulation*. Boston, MA, Springer, 1973, pp. 201–245.  
DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1502-6\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1502-6_11)
- [16] Li N. Finite element modeling and simulation of occupant responses in highway crashes. Diss. Dr. Phil. Mech. Eng. Univ. of North Carolina, 2014.

- [17] Borrvall T., Ehle C., Stratton T. A fabric material model with stress map functionality in LS-DYNA. *10th European LS-DYNA Conf.*, 2015.  
URL: <https://www.dynalook.com/conferences/10th-european-ls-dyna-conference/11developeriiiprepost-mapping/03-borrvall-dynamorenordic-p.pdf> (дата обращения: 15.06.2022).
- [18] Котиев Г.О., Петюков А.В., Гонсалес Астуа А.В. Экспериментально-теоретический метод исследования особенностей функционирования подушек безопасности автомобиля. *Труды НАМИ*, 2021, № 2, с. 15–24.  
DOI: <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2021-2-15-24>
- [19] Hirth A., Haufe A., Olovsson L. Airbag simulation with LS-DYNA: past — present — future. *6th Europ. LS-DYNA Users' Conf.*, 2007.  
URL: <https://www.dynamore.se/en/downloads/papers/keynote/airbag-simulation-with-ls-dyna-past-2013-present/view> (дата обращения: 15.06.2022).
- [20] Wang J., Teng H. The recent progress and potential applications of CPM particle method in LS-DYNA. *LS-DYNA Forum*, 2010.  
URL: <https://www.dynamore.de/de/download/papers/forum10/papers/D-III-03.pdf/view> (дата обращения: 15.06.2022).
- [21] Belytschko T., Lin J., Tsay C.S. Explicit algorithms for nonlinear dynamics of shells. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 1984, vol. 42, iss. 2, pp. 225–251.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(84\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0045-7825(84)90026-4)
- [22] Olovsson L. Corpuscular method for airbag deployment simulations in LS-DYNA. *Report R32S-1 IMPETU Safe AB*, 2007.
- [23] Hallquist J.O., Stillman D.W., Hughes T.J.R., et al. Modeling of airbags using MVMA/DYNA 3D. Final Report. LSTC, 1990.

**Гонсалес Астуа Андрес Виктор** — студент кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Гончаров Роман Борисович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Петюков Андрей Вячеславович** — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Гонсалес Астуа А.В., Гончаров Р.Б., Петюков А.В. Физико-математическое моделирование процесса взаимодействия подушки безопасности легкового автомобиля с антропоморфным манекеном. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2022, № 4 (103), с. 4–21.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-4-4-21>

## NUMERICAL SIMULATION OF INTERACTION BETWEEN A PASSENGER CAR AIRBAG AND AN ANTHROPOMORPHIC DUMMY MODEL

A.V. Gonsales Astua

R.B. Goncharov

A.V. Petyukov

andresastua@yandex.ru

goncharov.roman@bmstu.ru

petyukov\_a@bmstu.ru

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

---

### Abstract

The paper considers a finite-element numerical simulation of interaction between an airbag and an anthropomorphic dummy model, presenting a case study of a passenger car subjected to oblique frontal impact, as per UN passive safety Regulation no. 94. A system of conservation equations for mass, impulse and energy forms the basis of the simulation. We used a penalty method as a contact algorithm. We investigated three situations: 1) one including the seat belt and the airbag; 2) one including the belt but not the airbag; 3) one including the airbag without the belt. The airbag simulation took into account the specifics of its deployment process and its position within the steering wheel. The seat belt simulation included simplified models of the retracting and locking devices. The computation results showed that our finite-element numerical simulation of interaction between the airbag and the anthropomorphic dummy model makes assessing the test device injury rate possible; absence of either the seat belt or the airbag may result in death due to oblique frontal impacts; if the design only includes an airbag, collisions between the anthropomorphic dummy model and the interior car parts will not be prevented; a design providing both an airbag and a seat belt meets the basic requirements of UN passive safety Regulation no. 94

### Keywords

*Airbag, seat belt, crashworthiness, passenger car, Finite Element Method*

Received 07.04.2022

Accepted 11.05.2022

© Author(s), 2022

---

### REFERENCES

[1] Zuzov I.V., Zuzov V.N. Improvement of construction of motor car body at the designing stage to satisfy passive safety requirements at offset frontal impact. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2013, no. 1 (9), pp. 60–71 (in Russ.).



- [2] Goncharov R.B., Zuzov V.N. Problems of finding optimal design parameters of a car bumper under impact from the standpoint of passive safety. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2018, no. 3, pp. 130–136 (in Russ.).
- [3] Khusainov A.Sh., Kuzmin Yu.A. *Passivnaya bezopasnost' avtomobilya* [Passive car safety]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2011.
- [4] Hallquist J.O. LS-DYNA theory manual. LSTC, 2006.
- [5] Zuzov V.N., Sulegin D.A. An investigation of the effect on the energy intensity of the main power elements of the car body in the side impact zone. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 20–34 (in Russ.).
- [6] Sulegin D.A., Zuzov V.N. An investigation of the effect of a car door reinforcements on passive safety in a side impact. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2021, no. 1 (132), pp. 86–97 (in Russ.). DOI: [https://doi.org/10.46960/1816-210X\\_2021\\_1\\_86](https://doi.org/10.46960/1816-210X_2021_1_86)
- [7] Goncharov R.B., Zuzov V.N. Problems of finding the best solutions to ensure the passive safety of the cabins of trucks at a minimum weight. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2018, no. 4, pp. 92–102 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-66869>
- [8] Dyubua P.B. Raschet stoykosti k udarnym nagruzkam s pomoshch'yu programmy LS-DYNA. *Materialy uchebnogo seminara pol'zovateley LS-DYNA* [Calculation of resistance to shock loads using the program LS-DYNA, Proc. Train. Workshop of LS-DYNA users]. Snezhinsk, 2002, p. 62 (in Russ.).
- [9] Orlov L.N. *Passivnaya bezopasnost' i prochnost' kuzovov, kabin, avtotransportnykh sredstv. Metody rascheta i otsenki* [Passive safety and strength of bodies, cabins, vehicles. Methods of calculation and evaluation]. Nizhniy Novgorod, NSTU Publ., 2005.
- [10] Shaban B.A., Zuzov V.N. Features of wireframe modeling bodies and cabs of cars while investigating passive safety. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2012, no. 11 (in Russ.). DOI: 10.7463/1112.0486675
- [11] Shaban B.A., Zuzov V.N. Features of building finite element models of cabins for passive safety studies under the impact according to UNECE Regulations № 29. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2013, no. 3 (in Russ.). DOI: DOI: 10.7463/0313.0542301
- [12] Shmelev A.V., Lisovskiy E.V., Korotkiy V.S. Computer simulation and analysis of commercial vehicle cab passive safety parameters. *Aktual'nye voprosy mashinovedeniya* [Topical Issues of Mechanical Engineering], 2015, no. 4, pp. 168–173 (in Russ.).
- [13] Shaban B.A., Zuzov V.N. Analysis of impact of structural factors on passive safety of truck cabs at a front impact on A-pillars. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2013, no. 11 (in Russ.). DOI: 10.7463/1113.0636798
- [14] Melvin J., Weber K. Task B final report. UMTRI-85-3. Univ. of Michigan Transportation Research Institute, 1985.

- [15] Lobdell T.E., Kroell C.K., Schneider D.C., et al. Impact response of the human thorax. In: King W.F., Mertz H.J. (eds). *Human Impact Response: Measurement and Simulation*. Boston, MA., Springer, 1973, pp. 201–245.  
DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1502-6\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1502-6_11)
- [16] Li N. Finite element modeling and simulation of occupant responses in highway crashes. Diss. Dr. Phil. Mech. Eng. Univ. of North Carolina, 2014.
- [17] Borrvall T., Ehle C., Stratton T. A fabric material model with stress map functionality in LS-DYNA. *10th European LS-DYNA Conf.*, 2015.  
Available at: <https://www.dynalook.com/conferences/10th-european-ls-dyna-conference/11developeriiprepost-mapping/03-borrvall-dynamorenordic-p.pdf> (accessed: 15.06.2022).
- [18] Kotiev G.O., Petyukov A.V., Gonsales Astua A.V. Experimental-theoretical method for studying the vehicle airbag modules functioning. *Trudy NAMI*, 2021, no. 2, pp. 15–24 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2021-2-15-24>
- [19] Hirth A., Haufe A., Olovsson L. Airbag simulation with LS-DYNA past — present — future. *6th Europ. LS-DYNA Users' Conf.*, 2007. Available at: <https://www.dynamore.se/en/downloads/papers/keynote/airbag-simulation-with-ls-dyna-past-2013-present/view> (accessed: 15.06.2022).
- [20] Wang J., Teng H. The recent progress and potential applications of CPM particle method in LS-DYNA. *LS-DYNA Forum*, 2010. Available at: <https://www.dynamore.de/de/download/papers/forum10/papers/D-III-03.pdf/view> (accessed: 15.06.2022).
- [21] Belytschko T., Lin J., Tsay C.S. Explicit algorithms for nonlinear dynamics of shells. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 1984, vol. 42, iss. 2, pp. 225–251.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(84\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0045-7825(84)90026-4)
- [22] Olovsson L. Corpuscular method for airbag deployment simulations in LS-DYNA. Report R32S-1 IMPETU Safe AB, 2007.
- [23] Hallquist J.O., Stillman D.W., Hughes T.J.R., et al. Modeling of airbags using MVMA/DYNA 3D. Final Report. LSTC, 1990.

**Gonsales Astua A.V.** — Student, Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Goncharov R.B.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Petyukov A.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Gonsales Astua A.V., Goncharov R.B., Petyukov A.V. Numerical simulation of interaction between a passenger car airbag and an anthropomorphic dummy model. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2022, no. 4 (103), pp. 4–21 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-4-4-21>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОСЕСИММЕТРИЧНЫХ УПРУГИХ ПОЛЕЙ В АНИЗОТРОПНЫХ ТЕЛАХ ВРАЩЕНИЯ, ВЫЗВАННЫХ ДЕЙСТВИЕМ ОБЪЕМНЫХ СИЛ

Д.А. Иванов<sup>1</sup>  
Е.Ю. Левина<sup>2</sup>

lsivdmal@mail.ru  
hensi-l@yandex.ru

<sup>1</sup> ЛГТУ, Липецк, Российская Федерация

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Представлена методика построения упругих полей для трансверсально-изотропных тел, ограниченных коаксиальными поверхностями вращения и находящихся под действием неосесимметричных объемных сил. Построенная теория оперирует понятиями метода граничных состояний, основу которого составляют пространства состояний среды. Базис пространства внутренних состояний формируется с помощью фундаментальных многочленов. Многочлен ставится в любую позицию вектора перемещения плоского вспомогательного состояния и по формулам перехода определяется пространственное состояние. Набор таких состояний образует конечномерный базис, по которому после ортогонализации искомые характеристики упругого поля раскладываются в ряды Фурье с одинаковыми коэффициентами. Коэффициенты рядов представляют собой скалярные произведения векторов заданных и базисных объемных сил. Поиск упругого состояния сводится к решению квадратур. Даны рекомендации в построении базиса внутренних состояний в зависимости от вида заданных по различным циклическим законам (синуса и косинуса) объемных сил. Проанализировано решение конкретной задачи теории упругости для трансверсально-изотропного кругового цилиндра от действия неосесимметричных объемных сил. Проведены анализ сходимости рядов и оценка точности решения в графическом виде

### Ключевые слова

*Неосесимметричная деформация, метод граничных состояний, упругое состояние, объемные силы, трансверсально-изотропные тела, пространство состояний*

Поступила 09.11.2021

Принята 24.03.2022

© Автор(ы), 2022

---

**Введение.** Создание новых или развитие существующих методов расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) тел из сложных по структуре и реологии материалов по большей части опирается на об-