

ОЦЕНКА УДАРОСТОЙКОСТИ БЕЗОПАСНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ СТЕКОЛ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются безопасные многослойные стекла современных легковых автомобилей, состоящие из двух слоев закаленного стекла и соединенные вместе тонким слоем поливинилбутирала (polyvinyl butyral – PVB). Предметом исследования являются процессы деформирования и разрушения безопасных многослойных стекол современных легковых автомобилей при фронтальном столкновении с манекеном. Цель работы – сопоставление описательных возможностей двух компьютерных моделей процессов деформирования и разрушения безопасных многослойных ветровых стекол при их столкновении с манекеном в интервале скоростей столкновения от 10 до 60 км/ч и углов столкновения – от 0° до 30°. *Материалы и методы.* Исследования процессов деформирования и разрушения безопасных многослойных стекол современных легковых автомобилей при фронтальном столкновении с манекеном выполнены методом конечных элементов. *Результаты.* Разработаны две компьютерных модели. Первая компьютерная модель ветрового стекла построена с использованием оболочечных элементов Бельчко – Цая с шестью точками интегрирования по толщине и имеет две точки интегрирования для каждого слоя. Вторая компьютерная модель построена с использованием объемных элементов с одной точкой интегрирования для каждого слоя. *Выводы.* Сопоставление описательных возможностей двух компьютерных моделей процесса соударения манекена с ветровым стеклом легкового автомобиля позволило сделать выводы о том, что вторая компьютерная модель в большей степени соответствует сложившимся качественным представлениям о процессе деформации и разрушения безопасных многослойных стекол современных легковых автомобилей.

Ключевые слова: безопасное многослойное стекло, легковой автомобиль, ударостойкость, деформация, разрушение, компьютерная модель.

А. Ю. Муйземнек, Е. Д. Карташова, И. И. Воячек

ASSESSMENT OF CRASH-WORTHINESS OF LAMINATED SAFETY GLASS IN CARS

Abstract. *Background.* The research deals with the study of safe laminated glass of modern cars, consisting of two layers of toughened glass bonded together with a thin layer of polyvinyl butyral (polyvinyl butyral – PVB). The subject of research is the process of deformation and fracture of laminated safety glass in modern passenger cars in a frontal collision with a dummy. The purpose of the study is to compare the descriptive capabilities of the two computer-related models of deformation and fracture of laminated safety windshields when they collide with a dummy in the range of 10 to 60 km / h and collision angles – from 0° to 30°. *Materials and methods.* Study of the deformation and fracture of safe laminated glass in modern passenger cars in case of a frontal collision with a dummy are performed on the finite elements method. *Results.* Two computer models are worked out. The first computer model of a windscreen is constructed on the base of shell elements of Belychko – Tsai with six points of integration in thickness and has two points of integration for

each layer. The second computer model is built on volumetric elements with a single point of integration for each layer. *Conclusions.* Comparison of descriptive capabilities of the two computer models of the collision process of the dummy with the windshield of the car proved that the second computer model satisfies the requirements of the established quality representations of the process of deformation and fracture of laminated safety glass in modern passenger cars.

Key words: laminated safety glass, car, shock resistance, strain, fracture, the computer model.

Введение

Безопасные многослойные стекла находят широкое применение в автомобильной промышленности. С одной стороны, применение безопасных многослойных стекол увеличивает стоимость легкового автомобиля, с другой – уменьшает тяжесть повреждений водителя, пассажиров или пешеходов при дорожно-транспортных происшествиях.

Используемые в автомобильной промышленности стекла классифицируются по их поведению при разрушении. Различают обычные стекла (floatglass), которые используются при изготовлении обычных окон. Они разрушаются с образованием больших и острых осколков, которые могут нанести тяжкие увечья. Такие стекла не могут считаться безопасными. При разрушении закаленных стекол (tempered glass) образуются мелкие и тупые осколки, поэтому такое стекло может считаться безопасным. Основными элементами безопасных многослойных стекол (safety glass) являются два закаленных стекла, соединенных вместе третьим слоем – тонким слоем поливинил бутираля (polyvinyl butyral – PVB). При разрушении такого стекла осколки остаются приклеенными к PVB-слою, что дополнительно снижает вероятность получения травм. Такие стекла называются безопасными многослойными стеклами.

При малых деформациях поведение безопасного многослойного стекла является упругим и определяется прежде всего сопротивлением деформированию двух слоев из закаленного стекла. При больших деформациях, которые могут возникнуть, например, при столкновении автомобилей, доминирующую роль играет PVB-слой. Это происходит потому, что стекло является хрупким материалом и не может выдерживать больших деформаций. После разрушения стеклянных слоев PVB-слой ведет себя как мембрана. В первом приближении PVB-слой может моделироваться как гиперупругий материал с пренебрежением вязкого сопротивления деформированию.

1. Постановка задачи исследования

Требования, действующие на территории Российской Федерации, к ударостойкости безопасных многослойных и закаленных стекол для средств наземного транспорта, к методам определения ударной прочности ударом шара массой 227 и 2226 г, ударом манекеном и методу определения безвредности осколков при разрушении определяются ГОСТ 5727–88 и ГОСТ 27903–88 [1, 2]. В частности, в них определены условия проведения испытаний, формы испытываемых образцов и ударников, критерии оценки стойкости к удару безопасных многослойных стекол. Так, критериями ударостойкости являются допустимая масса осколков, отделившихся с противоположной удару стороны стекла, отсутствие проникания ударника через стекло после

удара, характер разрушения стекла. Последний критерий предполагает образование после удара многочисленных радиальных и круговых трещин, причем расстояние от точки удара до ближайшей радиальной трещины должно быть не более 80 мм. Следует заметить, что из четырех регламентированных стандартами методов испытаний только в одном случае используются готовые изделия, в остальных используются плоские или близкие к плоским лабораторные образцы. Использование для оценки ударостойкости плоских образцов не позволяет получить объективную оценку ударостойкости готовых изделий, форма которых существенно отличается от плоской. Кроме того, условия ударного нагружения ветровых стекол могут существенно отличаться от лабораторных как по скорости соударения, так и по граничным условиям. Проблема оценки ударостойкости безопасных многослойных ветровых стекол может быть решена путем применения компьютерного моделирования процессов их ударного нагружения, при котором учитывалось бы многообразие форм и размеров ветровых стекол современных легковых автомобилей, разнообразие условий их нагружения. В работах последнего времени [3–10] рассматриваются различные аспекты построения и использования компьютерных моделей безопасных многослойных стекол, однако ряд вопросов, и прежде всего вопросы построения адекватных конечно-элементных моделей безопасных многослойных ветровых стекол, учитывающих их действительную геометрию и механические свойства составляющих многослойный композит материалов, остаются нерешенными.

Целью данной работы является сопоставление описательных возможностей двух компьютерных моделей процессов деформирования и разрушения безопасных многослойных ветровых стекол при их столкновении с манекеном в достаточно широком интервале скоростей столкновения. При построении обеих компьютерных моделей использовалась программа LS-DYNA [11]. В первой компьютерной модели для описания поведения ветрового стекла использовалась модель многослойного композита, причем в каждой точке интегрирования по толщине тетрагонального оболочечного элемента были заданы различные модели материалов. Для двух внешних слоев из закаленного стекла использовалась модель упругопластичности с произвольной диаграммой упрочнения и произвольной зависимостью сопротивления деформирования от скорости деформации с интегрированной моделью разрушения по критериям достижения эффективной пластической деформации, пластического утонения, величины первого главного значения тензора деформаций или минимального шага по времени (модель материала типа 123), а для PVB-слоя использовалась модель гиперупругого материала Огдена третьего порядка (модель материала типа 77). Во второй компьютерной модели использовались только гекаэдрические объемные элементы. В этой компьютерной модели для двух слоев из закаленного стекла использовалась модель керамики Джонсона-Холмквиста (модель материала типа 110), а для PVB-слоя – модель гиперупругого материала Огдена третьего порядка.

2. Геометрия ветрового стекла легкового автомобиля

При определении геометрии ветрового стекла примем следующие допущения:

- ветровое стекло имеет плоскость симметрии;

– срединная поверхность ветрового стекла является боковой поверхностью усеченного конуса, имеющего угол в вершине 2α .

Для построения срединной поверхности ветрового стекла использовались следующие исходные данные:

– результаты измерения размеров ветрового стекла в его плоскости симметрии (рис. 1) – b_1, b_2, c . На рис. 1 образующая усеченного конуса, попадающая в сечение плоскостью симметрии, расположена горизонтально;

– результаты измерений размеров ветрового стекла в вертикальной плоскости, перпендикулярной продольной плоскости симметрии легкового автомобиля – $2a_1, 2a_2, f_1, f_2, f_3$ (рис. 2);

– угол наклона ветрового стекла в плоскости симметрии легкового автомобиля δ (см. рис. 1).

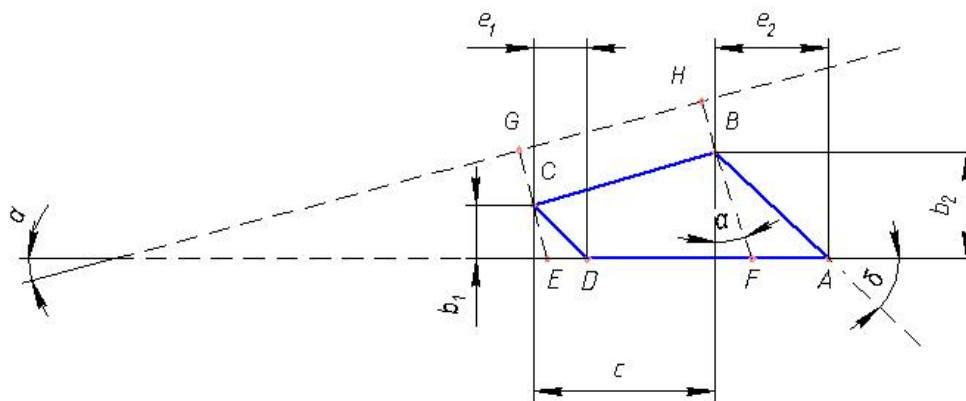


Рис. 1. Проекция ветрового стекла на его плоскость симметрии

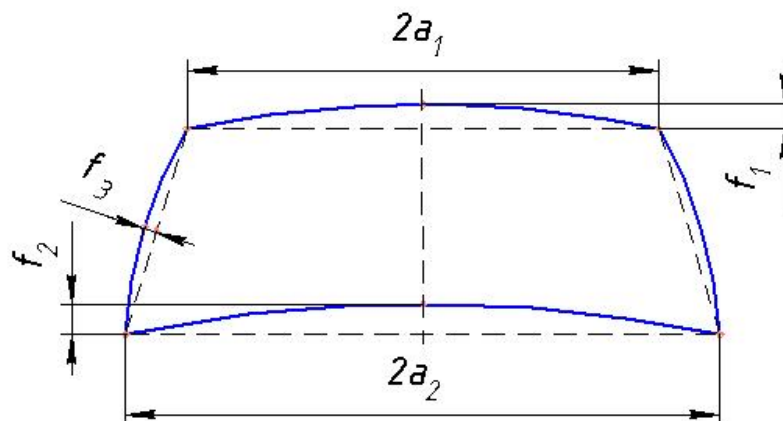


Рис. 2. Проекция ветрового стекла на вертикальную плоскость, перпендикулярную плоскости продольной симметрии легкового автомобиля

Необходимые построения выполним в следующей последовательности:

1. Найдем расстояние между точками E и F (рис. 1):

$$|EF| = c + b_2 \operatorname{tg} \alpha - b_1 \operatorname{tg} \alpha = c + (b_2 - b_1) \operatorname{tg} \alpha.$$

2. Выполним показанные на рис. 3 вспомогательные построения и по известным l и d определим r .

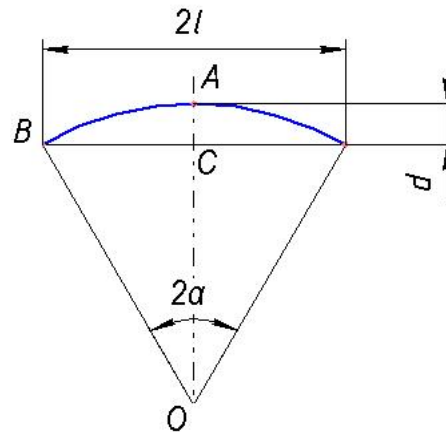


Рис. 3. Схема к определению радиуса ветрового стекла

Для этого из треугольника ABC найдем $\operatorname{tg} \beta = \frac{d}{a}$. Определим угол $\gamma = \frac{\pi}{2} - \beta$. Найдем

$$\alpha = \pi - 2\gamma = \pi - 2\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) = 2\beta.$$

Из выражения $\sin \alpha = \frac{a}{r}$ найдем

$$r = a(\sin \alpha)^{-1} = a(\sin 2\beta)^{-1} = a \left[\sin \left(2 \operatorname{arctg} \left(\frac{d}{a} \right) \right) \right]^{-1}. \quad (1)$$

3. Найдем угол α в вершине конуса (рис. 1). Обозначим $r_1 = |EG|$, $r_2 = |FH|$, $d_1 = |EC| = \frac{b_1}{\cos \alpha}$, $d_2 = |FB| = \frac{b_2}{\cos \alpha}$. Тогда $\sin \alpha = \frac{r_2 - r_1}{|EF|}$.

В последнее выражение подставим вычисленные по зависимости (1) r_1 и r_2 :

$$\begin{aligned} \sin \alpha &= \frac{a_2 \left[\sin \left(2 \operatorname{arctg} \left(\frac{d_2}{a_2} \right) \right) \right]^{-1} - a_1 \left[\sin \left(2 \operatorname{arctg} \left(\frac{d_1}{a_1} \right) \right) \right]^{-1}}{c + (b_2 - b_1) \operatorname{tg} \alpha} = \\ &= \frac{a_2 \left[\sin \left(2 \operatorname{arctg} \left(\frac{b_2}{a_2 \cos \alpha} \right) \right) \right]^{-1} - a_1 \left[\sin \left(2 \operatorname{arctg} \left(\frac{b_1}{a_1 \cos \alpha} \right) \right) \right]^{-1}}{c + (b_2 - b_1) \operatorname{tg} \alpha} \text{ zz.} \quad (2) \end{aligned}$$

Учитывая, что $\alpha \ll 1$, будем считать, что $\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha = \alpha$, $\cos \alpha = 1$. Тогда выражение (2) может быть записано следующим образом:

$$\alpha = \frac{a_2 \left[\sin \left(2 \operatorname{arctg} \left(\frac{b_2}{a_2} \right) \right) \right]^{-1} - a_1 \left[\sin \left(2 \operatorname{arctg} \left(\frac{b_1}{a_1} \right) \right) \right]^{-1}}{c + (b_2 - b_1) \alpha}. \quad (3)$$

Приведем выражение (3) к виду

$$\alpha [c + (b_2 - b_1) \alpha] = a_2 \left[\sin \left(2 \operatorname{arctg} \left(\frac{b_2}{a_2} \right) \right) \right]^{-1} - a_1 \left[\sin \left(2 \operatorname{arctg} \left(\frac{b_1}{a_1} \right) \right) \right]^{-1}. \quad (4)$$

Выражение (4) является уравнением второго порядка относительно неизвестного α . Обозначим $A = (b_2 - b_1)$, $B = c$,

$$C = - \left\{ a_2 \left[\sin \left(2 \operatorname{arctg} \left(\frac{b_2}{a_2} \right) \right) \right]^{-1} - a_1 \left[\sin \left(2 \operatorname{arctg} \left(\frac{b_1}{a_1} \right) \right) \right]^{-1} \right\}.$$

Тогда выражение (4) может быть записано следующим образом:

$$A\alpha^2 + B\alpha + C = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) имеет корни

$$\alpha_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}. \quad (6)$$

Для большинства ветровых стекол современных легковых автомобилей угол α имеет малое положительное значение.

В качестве примера на рис. 4, а приведена геометрическая модель ветрового стекла, имеющего следующие размеры: $a_1 = 1,34$ м, $a_2 = 1,55$ м, $b_1 = 0,07$ м, $b_2 = 0,105$ м, $c = 0,61$ м, $e_1 = 0,096$ м, $e_2 = 0,174$ м, $f_1 = 0,031$ м, $f_2 = 0,016$ м; $f_3 = 0,023$ м. Рассчитанное значение угла в вершине конуса составило $\alpha = 0,123^\circ$.

Показанная на рис. 4 геометрическая модель ветрового стекла использовалась при построении конечно-элементной модели и последующем компьютерном моделировании.

3. Модели материалов ветровых стекол легковых автомобилей

У каждого материала существует уникальная зависимость сопротивления деформированию, которая обычно определяется экспериментально в простейших условиях нагружения, например при растяжении.

В простейших случаях эта зависимость может быть представлена в виде функции, связывающей какие-либо меры напряженного и деформированного состояния, их скорости и время. Для материалов, называемых гиперупругими, напряженное состояние может быть определено с использованием удельной энергии упругой деформации $W = \hat{W}(C)$, которая является

функцией правого тензора деформаций Коши – Грина $\mathbf{C}$. При этом второй тензор напряжений Пиола – Кирхгоффа $\mathbf{S}$, являющийся мерой напряженного состояния в начальной конфигурации, может быть определен по зависимости

$$\mathbf{S} = 2 \frac{\partial \hat{W}(\mathbf{C})}{\partial \mathbf{C}}. \quad (7)$$

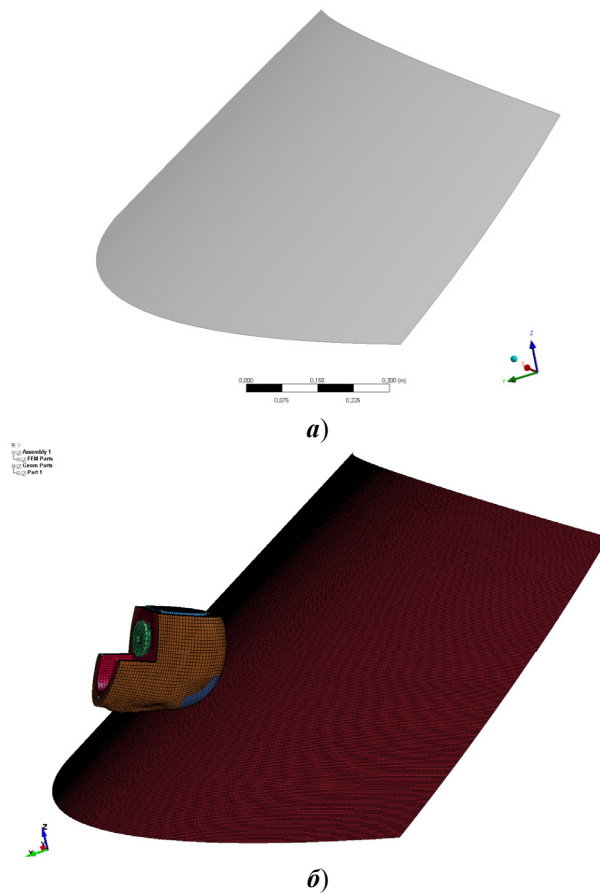


Рис. 4. Модели ветрового стекла легкового автомобиля:
а – геометрическая модель; **б** – конечно-элементная модель

Правый тензор деформаций Коши – Грина, являющийся мерой деформированного состояния, определяется по зависимости

$$\mathbf{C} = \mathbf{F}^T \mathbf{F}, \quad (8)$$

где $\mathbf{F} = \text{grad}(\mathbf{x})$ – градиент деформации; $\mathbf{F}^T$ – тензор, симметричный по отношению к $\mathbf{F}$; $\mathbf{x}$ – радиус вектор материальной частицы.

В случае изотропного материала удельная энергия упругой деформации является функцией инвариантов правого тензора деформаций Коши – Грина:

$$W = \hat{W}(I_C, II_C, III_C), \quad (9)$$

где I_C, II_C, III_C – первый, второй и третий инварианты правого тензора деформаций Коши – Грина.

Стандартная функция удельной энергии упругой деформации, описывающая поведение резноподобного материала Муни – Ривлина, записывается следующим образом [12, 13]:

$$W = A(I_C - 3) + B(II_C - 3) + C\left(\frac{1}{III_C^2} - 1\right) + D(III_C - 1)^2, \quad (10)$$

где A, B – параметры материала.

Удельная энергия упругой деформации, описывающая поведение материала Огдена, равна [14, 15]:

$$W = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N \frac{\mu_j}{\alpha_j} \left(\lambda_i^{\alpha_j} - 1 \right) + K(J - 1 - \ln J), \quad (11)$$

где α_j – нецелые числа;

$$J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3; \quad \lambda_i^* = \lambda_i J^{-1/3}.$$

Для описания поведения керамики, стекла и других хрупких материалов в программе LS-DYNA используется модель материала типа 110, в основе которой лежит модель пластического разрушения Джонсона – Холмквиста [16].

При проведении компьютерного моделирования моделей процесса деформирования и разрушения ветрового стекла при его столкновении с движущимся телом значения параметров модели керамики Джонсона – Холмквиста для силикатного флоат-стекла были заимствованы из работы [16].

4. Идентификация параметров модели PVB-слоя

Выбор модели материала PVB-слоя и идентификация ее параметров осуществлены на основе результатов испытаний на одноосное растяжение, которые были заимствованы из работы [3]. Полученная экспериментально диаграмма деформирования показана на рис. 5 (кривая 1). Выбор модели материала осуществлялся из числа следующих моделей – моделей Блетца – Ко (материал типа 7), Муни – Ривлина (материал типа 27), Фрайзера – Неша (материал типа 31), Огдена (материал типа 77). Идентификация параметров моделей материалов осуществлялась методом наименьших квадратов. Все модели, за исключением модели Блетца – Ко, позволили при надлежащем подборе параметров удовлетворительно описать экспериментальную диаграмму деформирования. Наиболее близкое совпадение экспериментальной и расчетной диаграмм деформирования было получено при использовании модели Огдена третьего порядка, причем начиная с модели третьего порядка средняя абсолютная ошибка (Mean absolute error) не превышала 0,287 МПа, а средне-квадратическая ошибка (L2 norm of residual) – 1,5642 МПа.

Были получены следующие параметры модели Огдена: $\mu_1 = 1,1574 \cdot 10^{-1}$ ГПа; $\lambda_1 = 2,177$; $\mu_2 = -5,5107 \cdot 10^{-1}$ ГПа; $\lambda_2 = 1,1995$;

$\mu_3 = 1,6597$ ГПа; $\lambda_3 = 2,5498 \cdot 10^{-1}$. Расчетная диаграмма деформирования, построенная при этих параметрах модели, приведена на рис. 5 (кривая 4). Для сравнения на рис. 5 приведены диаграммы деформирования, полученные в работе [3] при параметрах модели Муни – Ривлина $A = 1,6$ МПа, $B = 0,06$ МПа (кривая 2) и в работе [7] при параметрах модели Муни – Ривлина: $A = 0$ МПа, $B = 1,51$ МПа, $D = 76,92$ МПа (кривая 3).

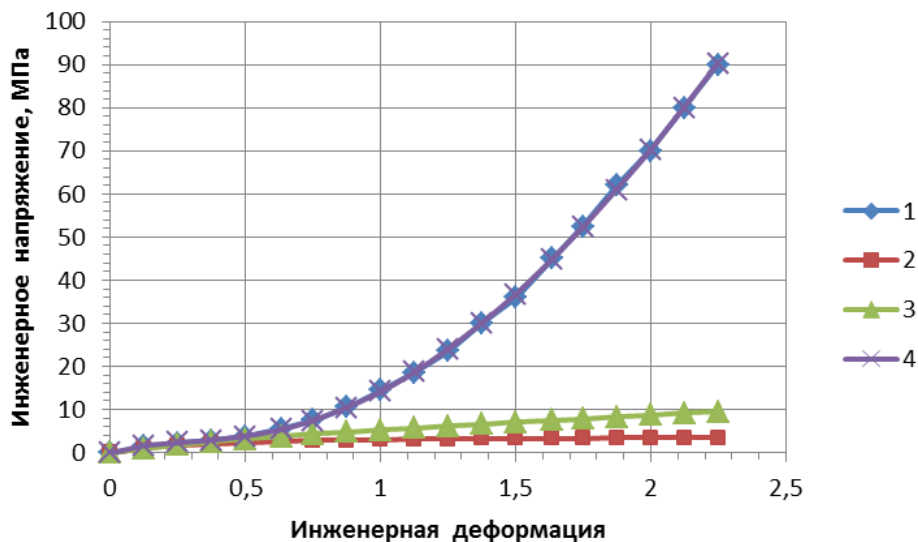


Рис. 5. Диаграмма деформирования материала PVB-слоя: 1 – экспериментальная; 2 – модель Муни – Ривлина [3]; 3 – модель Муни – Ривлина [7]; 4 – модель Огдена

Модель Огдена третьего порядка с идентифицированными параметрами использована при создании компьютерной модели ветрового стекла легкового автомобиля.

5. Описание компьютерных моделей

Далее осуществлено сопоставление описательных возможностей двух компьютерных моделей процесса деформирования и разрушения ветрового стекла при его столкновении с движущимся телом. В обеих моделях в качестве тела использовалась голова манекена, основные характеристики которой соответствовали FMVSS 201U [17]. При этом использовалась конечно-элементная модель FMH (FMH – Free Motion Head) версии LSTC.FMH.011808 фирмы LSTC [18]. Обе компьютерные модели включали закрепленное по периметру ветровое стекло и FMH.

В первой компьютерной модели для описания поведения ветрового стекла использовались оболочечные элементы Бельчко – Цая (оболочечный элемент типа 2) с шестью точками интегрирования по толщине. По толщине ветрового стекла располагался один оболочечный элемент. Ветровое стекло считалось трехслойным. Общая толщина ветрового стекла составляла 5 мм, при этом толщина внешних слоев из стекла равнялась 2,12 мм, толщина внутреннего PVB-слоя равнялась 0,76 мм. Точки интегрирования были расположены таким образом, чтобы в каждом слое ветрового стекла равномерно

располагалось две точки интегрирования. К каждой точке интегрирования были приписаны соответствующие модели материалов. Для описания поведения слоев из стекла использовалась модель материала типа 123, для описания поведения PVB-слоя – модель Огдена третьего порядка (модель материала типа 77), параметры которой были представлены выше. Конечно-элементная сетка ветрового стекла была построена на основе геометрической модели, которая показана на рис. 4,а, ее размер составлял 580×246 элементов (рис. 4,б). Средний размер оболочечного элемента, используемого при моделировании ветрового стекла, составил около 2,5 мм.

Во второй компьютерной модели для описания поведения всех трех слоев ветрового стекла использовались объемные элементы с одной точкой интегрирования (объемный элемент типа 1). По толщине ветрового стекла располагалось шесть объемных элементов – по два элемента на каждый слой. Для описания поведения слоев из стекла использовалась модель материала Джонсона – Холмквиста (материал типа 123), для описания поведения PVB-слоя – модель Огдена третьего порядка. Размер конечно-элементной сетки составлял $290 \times 123 \times 6$ элементов. Средний размер объемного элемента в плоскости ветрового стекла составил около 5 мм.

6. Результаты компьютерного моделирования

Компьютерное моделирование процесса столкновения головы пешехода с ветровым стеклом легкового автомобиля осуществлено с использованием двух представленных выше моделей. Рассматривалось фронтальное столкновение, при котором плоскости симметрии ветрового стекла и головы совпадали, а угол между вектором скорости центра масс головы и вектором нормали стекла в точке удара изменялся от 30 до 60°. Удар наносился в центральную часть ветрового стекла. Скорость столкновения варьировалась в интервале от 2,78 до 16,6 м/с (от 10 до 60 км/ч). Моделировалась начальная часть процесса продолжительностью 100 мс.

В качестве примера на рис. 6 представлены результаты моделирования процесса развития деформации и разрушения ветрового стекла, полученные с использованием двух компьютерных моделей, иллюстрирующие описательные возможности каждой из моделей. На рисунке представлена эволюция сетки трещин.

Отображение результатов моделирования, полученных с использованием первой модели (рис. 6,а,в,д,ж), позволяет увидеть разрушение ветрового стекла по удалению состоящих из трех слоев оболочечных элементов, либо путем отображения какой-либо физической величины, которая является чувствительной к разрушению одного из слоев, например, лицевого. Область разрушения будет выделена другим цветом. В качестве такой величины может использоваться первое главное напряжение или накопленная поврежденность. На рис. 6,а,в,д,ж использован первый способ отображения разрушения.

Отображение результатов моделирования, полученных с использованием второй модели (рис. 6,б,г,е,з), позволяет увидеть разрушение каждого слоя ветрового стекла, например лицевого слоя, под которым виден второй PVB-слой. Он отображен другим цветом.

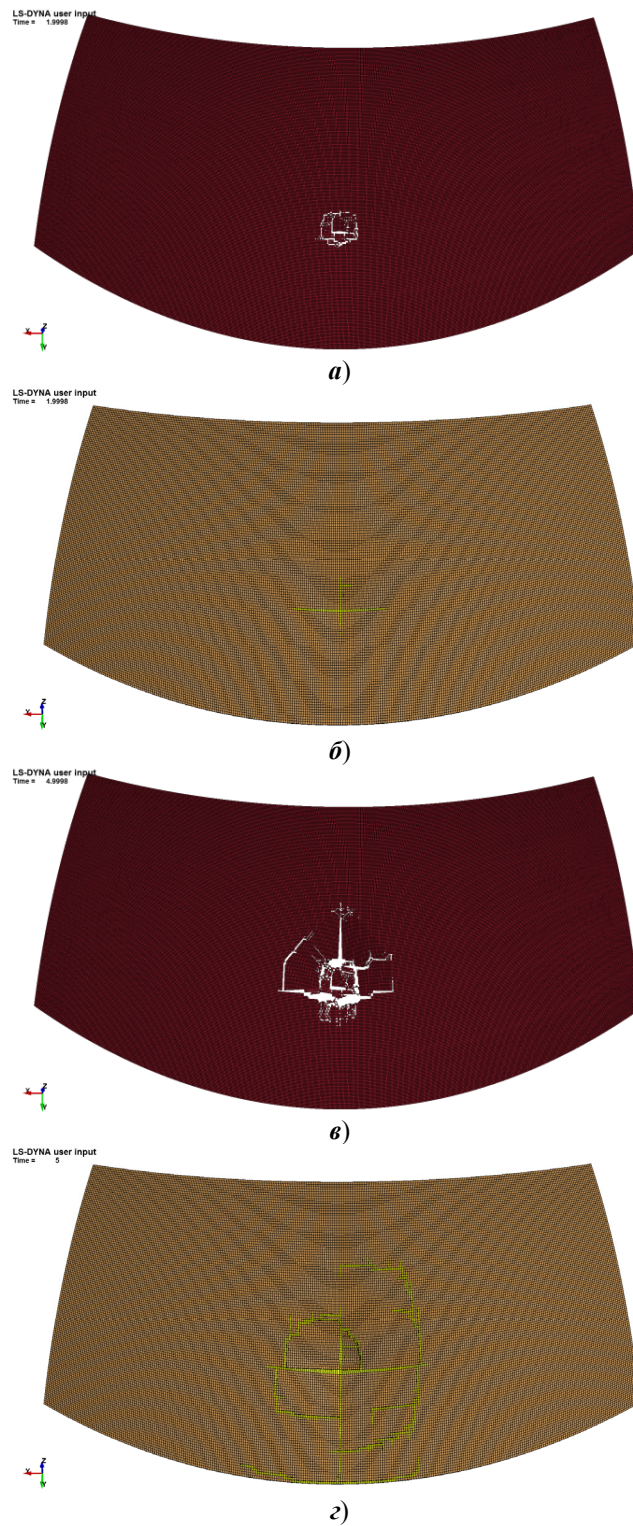


Рис. 6. Развитие разрушения ветрового стекла: *а, в, д, ж* – использование первой модели; *б, г, е, з* – использование второй модели; *а, б* – время 2 мс; *в, г* – время 5 мс; *д, е* – время 8 мс; *ж, з* – время 14 мс

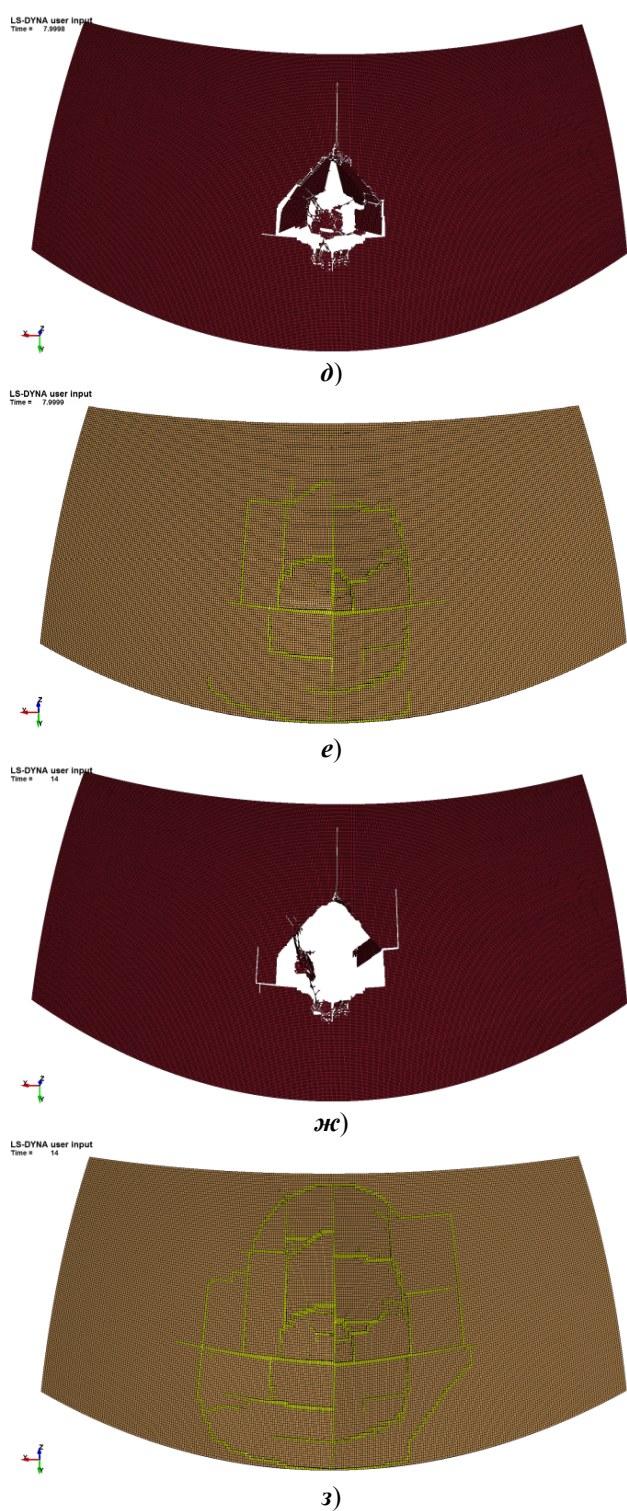


Рис. 6. Окончание

Сопоставление описательных возможностей двух компьютерных моделей процесса деформирования и разрушения ветрового стекла легкового ав-

томобиля при соударении с головой пешехода, осуществленное на основе результатов моделирования рассматриваемого процесса в определенных выше диапазонах изменения параметров соударения, позволило сделать следующие выводы:

1. В общем обе компьютерные модели одинаково представляют последовательность разрушения ветрового стекла:

- первоначально в центре удара возникает система радиальных трещин, в большинстве случаев состоящая из четырех-шести трещин, радиальные трещины начинают расти. Система радиальных трещин на лицевой и тыльной стороне ветрового стекла различная;

- на поверхностях радиальных трещин возникает система окружных трещин. Окружные трещины могут быть замкнутыми или разомкнутыми. Система окружных трещин может состоять из одной трещины круго- или эллипсообразной формы, но обычно таких трещин больше. В процессе возникновения радиальных трещин появляются окружные трещины не только все большего размера, но и в уже образовавшейся сетке возникают окружные трещины меньшего размера. Система радиальных трещин на лицевой и тыльной стороне ветрового стекла различная;

- происходит дальнейшая деформация и разрушение ветрового стекла, сопровождающаяся развитием сетки трещин, при этом все больше оголяется PVB-слой;

- дальнейшее развитие процесса соударения может сопровождаться сквозным разрушением ветрового стекла или частичным восстановлением его формы при рикошете. В любом из этих двух случаев направление вектора скорости центра масс ударяющего тела изменяется. Величина угла между вектором скорости центра масс ударяющего тела и вектором нормали к поверхности ветрового стекла после столкновения может быть равна или больше величины этого угла до столкновения, но менее 180° . Следует выделить движение ударяющего тела, при котором вектор его скорости направлен вдоль касательной поверхности ветрового стекла.

2. Компьютерные модели по-разному представляют особенности разрушения ветрового стекла:

- первая компьютерная модель представляет процесс пробития ветрового стекла в большей степени как пролом, начинающийся с образования за счет развития радиальных трещин-«лепестков» с центром в точке удара и сопровождающийся их изгибом вплоть до разрушения по линиям соединения с основной поверхностью ветрового стекла. В процессе деформации происходит образование мелкой сетки трещин в вершинах лепестков и других местах с высоким уровнем нагруженности;

- вторая компьютерная модель представляет процесс пробития ветрового стекла как процесс образования и развития сетки радиальных и окружных трещин на наружных слоях ветрового стекла, оголения PVB-слоя и его растяжения, приводящего к образованию более мелкой сетки трещин.

3. Модели не описывают следующие эффекты, обнаруживаемые при разрушении ветровых стекол современных легковых автомобилей:

- существующие экспериментальные исследования разрушения безопасных многослойных окон, данные автотехнических экспертиз легковых автомобилей после дорожно-транспортных происшествий свидетельствуют о том, что в процессе разрушения стекла образуется значительно большее чис-

ло радиальных трещин, а размеры осколков стекла как оставшихся приклеенными к PVB-слою, так и отделившихся от него значительно меньше. В некоторой степени первая компьютерная модель описывает процесс образования мелкой сетки трещин;

– обе компьютерных модели не описывают морфологию мелких трещин, которая определяется не только химическим составом материалов, из которых изготовлено ветровое стекло, но и основными параметрами технологического процесса его изготовления.

4. Использование обеих компьютерных моделей дает различный уровень ускорений центра масс головы пешехода при столкновении в рассматриваемых условиях как по максимальному значению ускорения и его среднему значению, так и по продолжительности процесса столкновения (рис. 7).

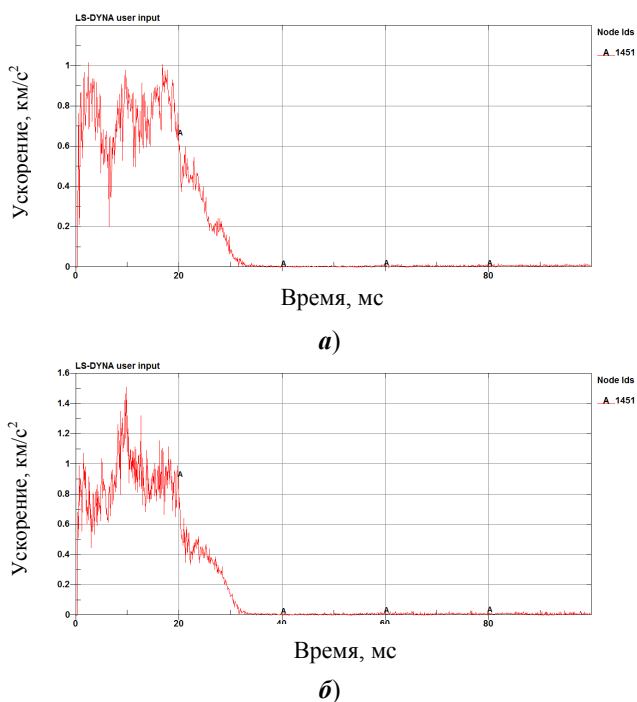


Рис. 7. Графики зависимостей ускорения центра масс головы пешехода от времени: *а* – использование первой модели; *б* – использование второй модели

Резюмируя сказанное, можно сделать вывод о том, что вторая компьютерная модель в большей степени соответствует сложившимся качественным представлениям о процессе деформации и разрушения безопасных многослойных стекол современных легковых автомобилей при фронтальном столкновении с деформируемыми объектами.

Заключение

В работе проведено сопоставление описательных возможностей двух компьютерных моделей безопасных многослойных ветровых стекол при их столкновении с манекеном в достаточно широком интервале скоростей столкновения.

Первая компьютерная модель ветрового стекла построена с использованием оболочечных элементов Беличко – Цая с шестью точками интегрирования по толщине – по две точки интегрирования для каждого слоя. Для описания внешних слоев безопасного многослойного стекла использована модель материала типа 123 программы LS-DYNA, а для PVB-слоя – модель гиперупругости Огдена. Вторая компьютерная модель построена с использованием объемных элементов с одной точкой интегрирования. Для описания внешних слоев безопасного многослойного стекла использована модель Джонсона – Холмквиста, а для PVB-слоя – модель гиперупругости Огдена. Параметры модели гиперупругости Огдена идентифицированы по полученной экспериментально диаграмме деформирования этого материала при растяжении. Сопоставление описательных возможностей двух компьютерных моделей процесса соударения головы пешехода с ветровым стеклом легкового автомобиля, осуществленное на основе результатов моделирования рассматриваемого процесса в широких диапазонах изменения параметров соударения, позволило сделать выводы о том, что вторая компьютерная модель в большей степени соответствует сложившимся качественным представлениям о процессе деформации и разрушения безопасных многослойных стекол современных легковых автомобилей при фронтальном столкновении с деформируемыми объектами.

Список литературы

1. ГОСТ 5727–88. Стекло безопасное для наземного транспорта. Общие технические условия. – М., 1988.
2. ГОСТ 27903–88. Стекло безопасное для автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин. – М., 1988.
3. **Du Bois, P. A.** Modelling of safety glass for crash simulation / P. A. Du Bois, S. Kolling, W. Fassnacht // Computational Materials Science : Twelfth International Workshop on Computational Mechanics of Materials. – 2003. – Vol. 28, Issues 3–4, November. – P. 675–683.
4. **Du Bois, P. A.** General aspects of material models in LS-DYNA. LS-DYNA Forum / P. A. Du Bois, W. Fassnacht, S. Kolling // Bad Mergentheim, Germany, 2002. – Vol. 2. – P. 1–55.
5. **Du Bois, P. A.** A simplified approach for the simulation of rubber-like materials under dynamic loading / P. A. Du Bois // 4-th European LS-DYNA Users Conference. – 2003. – Vol. 31/46. – P. D-1.
6. **Du Bois, P. A.** Crashworthiness engineering course notes / P. A. Du Bois. – Livermore Software Technology Corporation, 2004.
7. **Sun, D. Z.** Modelling of the failure behaviour of windscreens and component tests. Proceedings of the 4-th LS-DYNA Forum / D. Z. Sun, F. Andrieux, A. Ockewitz, H. Klamser, J. Hogenmüller. – Bamberg, 2005.
8. **Timmel, M.** A finite element model for impact simulation with laminated glass / M. Timmel, S. Kolling, P. Osterrieder, P. A. Du Bois // International Journal of Impact Engineering. – 2007. – Vol. 34, Issue 8, August. – P. 1465–1478.
9. **Munsch, M.** Lateral glazing characterization under head impact: experimental and numerical investigation / Marie Munsch, Nicolas Bourdet, Caroline Deck, Remy Willinger. – Strasbourg, France. IMFS-CNRS University of Strasbourg. – P. 0000–0184.
10. **Magdalena Wingren.** Windscreen study using a free moving headform. An investigation of windscreen behaviour when subjected to headform impact. Master Degree Project in Applied Mechanics / Magdalena Wingren. – One year Level 30 ECTS Spring term, 2011.

11. **Hallquist, J. O.** LS-DYNA. Theoretical Manual. Livermore Software Technology Corporation / J. O. Hallquist. – Report 1018, 1991.
12. **Mooney, M.** A theory of large elastic deformations / M. Mooney // J. Appl. Physics. – 1940. – Vol. 11. – P. 582–592.
13. **Rivlin, R. S.** Large elastic deformations of isotropic materials. Proc. Roy. Soc. / R. S. Rivlin. – London, 1948. – Vol. 241. – P. 379–397.
14. **Ogden, R. W.** Large deformation isotropic elasticity: on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids. Proc. Roy. Soc. / R. W. Ogden. – London, 1972. – Vol. 326. – P. 565–584.
15. **Ogden, R. W.** Elastic deformations of rubberlike solid / R. W. Ogden ; eds.: H. O. Hopkins, M. J. Sewell // Mechanics of Solids. The Rodney Hill 60-th Anniversary Volume, Pergamon Press. – Oxford, 1982. – P. 499–537.
16. **Johnson, G. R.** An improved computational constitutive model for brittle materials / G. R. Johnson, T. J. Holmquist // High-Pressure Science and Technology, 1994, American Institute of Physics, 1994.
17. Federal Motor Vehicle Safety Standard 201: Occupant Protection in Interior Impact, Federal Register, 1997. – Vol. 62, № 6, April 8.
18. Dilip Dhalsod, Mike Burger, Jacob Krebs. LSTC Free Motion Headform. User's Guide. Version: LSTC.FMH.011808. – Livermore Software Technology Corporation, 2008.

References

1. GOST 5727–88. *Steklo bezopasnoe dlya nazemnogo transporta. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [Harmless glass for ground transport. General technical conditions]. Moscow, 1988.
2. GOST 27903–88. *Steklo bezopasnoe dlya avtomobiley, traktorov i sel'skokhozyaystvennykh mashin* [Harmless glass for automobiles, tractors and agricultural machines]. Moscow, 1988.
3. Du Bois P. A., Kolling S., Fassnacht W. *Computational Materials Science: Twelfth International Workshop on Computational Mechanics of Materials*. 2003, vol. 28, issues 3–4, November, pp. 675–683.
4. Du Bois P. A., Fassnacht W., Kolling S. *General aspects of material models in LS-DYNA. LS-DYNA Forum*. Bad Mergentheim, Germany, 2002, vol. 2, pp. 1–55.
5. Du Bois P. A. *4-th European LS-DYNA Users Conference*. 2003, vol. 31/46, p. D-1.
6. Du Bois P. A. *Crashworthiness engineering course notes*. Livermore Software Technology Corporation, 2004.
7. Sun D. Z., Andrieux F., Ockewitz A., Klamser H., Hogenmüller J. *Modelling of the failure behaviour of windscreens and component tests. Proceedings of the 4-th LS-DYNA Forum*. Bamberg, 2005.
8. Timmel M., Kolling S., Osterrieder P., Du Bois P. A. *International Journal of Impact Engineering*. 2007, vol. 34, issue 8, August, pp. 1465–1478.
9. Munsch M., Bourdet Nicolas, Deck Caroline, Willinger Remy *Lateral glazing characterization under head impact: experimental and numerical investigation*. Strasbourg, France. IMFS-CNRS University of Strasbourg, pp. 0000–0184.
10. Wingren Magdalena *Windscreen study using a free moving headform. An investigation of windscreen behaviour when subjected to headform impact. Master Degree Project in Applied Mechanics*. One year Level 30 ECTS Spring term, 2011.
11. Hallquist J. O. LS-DYNA. Theoretical Manual. Livermore Software Technology Corporation. Report 1018, 1991.
12. Mooney M. J. Appl. Physics. 1940, vol. 11, pp. 582–592.
13. Rivlin R. S. *Large elastic deformations of isotropic materials. Proc. Roy. Soc. London*, 1948, vol. 241, pp. 379–397.

14. Ogden R. W. *Large deformation isotropic elasticity: on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids*. *Proc. Roy. Soc. London*, 1972, vol. 326, pp. 565–584.
15. Ogden R. W., Hopkins H. O., Sewell M. J. *Mechanics of Solids. The Rodney Hill 60-th Anniversary Volume*, Pergamon Press. Oxford, 1982, pp 499–537.
16. Johnson G. R., Holmquist T. J *High-Pressure Science and Technology.*, 1994. American Institute of Physics, 1994.
17. *Federal Motor Vehicle Safety Standard 201: Occupant Protection in Interior Impact*, *Federal Register*, 1997, vol. 62, no. 6, April 8.
18. Dilip Dhalsod, Mike Burger, Jacob Krebs. *LSTC Free Motion Headform. User's Guide. Version: LSTC.FMH.011808*. Livermore Software Technology Corporation, 2008.

Муйземнек Александр Юрьевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра транспортных машин,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: muiyzemnek@yandex.ru

Muiyzemnek Aleksandr Yur'evich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of transport machines
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Карташова Екатерина Дмитриевна
аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: muiyzemnek@yandex.ru

Kartashova Ekaterina Dmitrievna

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Воячек Игорь Иванович

доктор технических наук, профессор,
кафедра технологии машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: Voyachek@list.ru

Voyachek Igor' Ivanovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of machine building
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.001.63

Муйземнек, А. Ю.

**Оценка ударостойкости безопасных многослойных стекол легко-
вых автомобилей** / А. Ю. Муйземнек, Е. Д. Карташова, И. И. Воячек // Изве-
стия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. –
2013. – № 3 (27). – С. 230–246.