

УДК 629.3.023

А.И. Бохонский, А.П. Фалалеев*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПАССАЖИРА ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ
АВТОМОБИЛЯ С ПРЕГРАДОЙ***Исследовано динамическое поведение пассажира при ударе автомобиля о преграду.***Ключевые слова:** *пассивная безопасность, пассажир, столкновение автомобиля, удар.***Введение**

С ростом требований к пассивной безопасности при перевозке пассажиров постепенно меняются традиционные подходы к конструированию и ремонту транспортных средств: трансформируется силовая структура кузова, вводятся зоны поглощения энергии столкновения. Технологические возможности позволяют создавать конструкции, значительно снижающие риск получения травм пассажирами при ДТП, управлять свойствами кузова в процессе скоростного деформирования с учетом ограничений, накладываемых на состояние и поведение пассажира, наличия или отсутствия сдерживающих систем (ремней и подушек безопасности), а так же реального поведения систем безопасности.

Концепция современного автомобиля должна предусматривать оптимальное деформирование кузова или его элементов с целью снижения последствий для пассажира и водителя, даже не пристегнутых ремнями безопасности, что характерно для пассажиров автобусов и микроавтобусов.

Анализ известных исследований в области совершенствования конструкций безопасного автомобиля показывает, что вопросам моделирования поведения пассажира и кузова при столкновении уделялось не достаточно внимания [1, 2]. Несмотря на высокую эффективность численного моделирования деформаций кузова при ударе [1], аналитическое моделирование продолжает оставаться важным инструментом в задачах анализа и синтеза.

Пассивную безопасность транспорта характеризуют повреждения, которые получает пассажир при столкновении автомобиля с препятствием. Первоначально в качестве критерия использовался [1] индекс травмирования (SI – Severity Index)

$$SI = \int_0^T a_i^{2,5} dt \leq c, \quad (1)$$

где a_i – замедление, испытываемое пассажиром, в долях g ; T – время столкновения; c – параметр, значение которого определяется возможностями человеческого тела выдерживать перегрузки. В [1] допустимое значение этого параметра ($c = 1000$ единиц) определяет порог получения пассажиром серьезных травм при ДТП. В федеральном стандарте безопасности транспорта (Federal Motor Vehicle Safety Standard) 208 индекс травмирования заменен критерием повреждения головы (HIC – Head Injury Criterion) [3]. При HIC = 1000 с вероятностью 16 % среднестатистический пассажир получит серьезные или даже фатальные повреждения. Этот порог используется в расчетах пассивной безопасности конструкций при ударах и вычисляется как

$$HIC = (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) \cdot dt \right]^n \bigg|_{MAX}, \quad (2)$$

где $a(t)$ – замедление, испытываемое пассажиром; n – показатель степени, определяемый экспериментально, исходя из возможностей человеческого тела выдерживать перегрузки. Для среднестатистического взрослого мужского организма он соответствует 2,5 [1]; $(t_2 - t_1)$ – интервал времени (15 мс), в течении которого наблюдается наибольшее значение HIC.

Цель исследований – численный анализ последствий для пассажира при столкновении автомобиля с препятствием.

Модель столкновения

Анализ формулы (2) показывает, что основным фактором, влияющим на величину критерия HIC, является график линейного ускорения центра тяжести головы пассажира. Для получения оценки ускорения $a(t)$ представим поведение не пристегнутого пассажира массой M_p при столкновении автомобиля массой M_A , движущегося со скоростью V_0 , с жестким препятствием в виде динамической модели с двумя степенями свободы (рисунки 1).

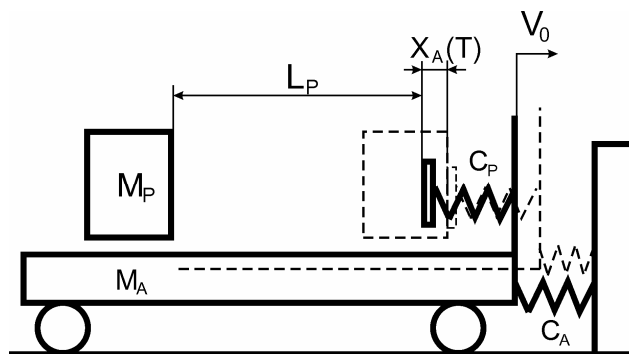


Рисунок 1 – Движение автомобиля и пассажира при столкновении автомобиля с жестким препятствием

Столкновение начинается с касания автомобилем препятствия со скоростью V_0 . При столкновении начинает деформироваться кузов автомобиля (упругая связь C_A). Пассажир продолжает движение «по инерции» со скоростью V_0 до столкновения с передним рядом сидений или элементами передней панели, обладающих упругостью C_P и удаленных от него на расстояние L_P . Таким образом, явление столкновения системы автомобиль-пассажир с препятствием условно может быть разбито на две фазы.

Первая фаза начинается с касания автомобилем препятствия (сплошная линия, рисунок 1) и заканчивается касанием пассажиром упругой связи C_P (пунктирная линия рисунка 1). За время первой фазы упругая связь C_A деформируется на величину $X_A(T)$, а пассажир со скоростью V_0 преодолевает расстояние L_P до упругой связи C_P .

Без учета сопротивления движению в первом приближении можно записать

$$L_P + X_A(T) = V_0 T. \quad (3)$$

Для определения $X_A(T)$ дифференциальное уравнение движения автомобиля после столкновения (без учета демпфирования) записывается в виде:

$$M_A \ddot{X}_A = -C_A X_A \quad (4)$$

или $\frac{d^2 X_A}{dt^2} + \omega^2 X_A = 0$, $\omega^2 = C_A / M_A$. Начальные условия: при $t = 0$, $X_A(0) = 0$, $\dot{X}_A(0) = V_0$. Решение уравнения (4) имеет вид

$$X_A(t) = C_1 \sin \omega t + C_2 \cos \omega t,$$

а его производная

$$V_A(t) = \frac{dX_A}{dt} = C_1 \omega \cos \omega t - C_2 \omega \sin \omega t.$$

С учетом начальных условий после определения произвольных постоянных движение автомобиля в первой фазе

$$X_A(t) = \frac{V_0}{\omega} \sin \omega t. \quad (5)$$

Тогда при $t = T$ перемещение $X_A(T) = \frac{V_0}{\omega} \sin \omega T$, а уравнение (3) принимает вид

$$L_P + \frac{V_0}{\omega} \sin \omega T = V_0 T. \quad (6)$$

Из трансцендентного уравнения (6) с использованием функции fsolve находится длительность первой фазы удара T , что позволяет сформулировать начальные условия для второй фазы движения системы.

Вторая фаза удара начинается с момента контакта пассажира с упругой связью C_P и характеризуется ускорением, которое испытывает тело пассажира. Для его определения рассмотрим систему с двумя степенями свободы, возмущение которой вызвано условиями, возникшими в конце первой фазы. Дифференциальные уравнения движения (без учета сопротивления), составленные на основании принципа Даламбера:

$$M_A \ddot{X}_{A,2F} = -C_A X_{A,2F} + C_P (X_{P,2F} - X_{A,2F}), \quad (7)$$

$$M_P \ddot{X}_{P,2F} = -C_P (X_{P,2F} - X_{A,2F}).$$

Начальные условия для второй фазы движения:

$$\begin{aligned} X_{A,2F}(0) &= X_A(T), & \dot{X}_{A,2F}(0) &= \dot{X}_A(T), & X_{P,2F}(0) &= X_P(T) = V_0 \cdot T, \\ \dot{X}_{P,2F}(0) &= \dot{X}_P(T) = V_0. \end{aligned} \quad (8)$$

Частные решения системы (7) ищутся в виде:

$$X_{A,2F} = D_1 \cdot \sin \omega t, \quad X_{P,2F} = D_2 \cdot \sin \omega t;$$

тогда $\ddot{X}_{A,2F} = -D_1 \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t, \quad \ddot{X}_{P,2F} = -D_2 \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t.$ (9)

Подставляя (9) в (7), получим систему линейных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} -M_A \cdot \omega^2 \cdot D_1 + (C_A + C_P)D_1 - C_P \cdot D_2 &= 0, \\ -M_P \cdot \omega^2 \cdot D_2 + C_P \cdot D_2 - C_P \cdot D_1 &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

которая однородна относительно амплитуд D_1, D_2 . Из условия, что амплитуды одновременно не могут равняться нулю следует, что определитель, составленный из коэффициентов системы, должен быть равен нулю, т.е.:

$$\begin{vmatrix} C_A + C_P - M_A \omega^2 & -C_P \\ -C_P & C_P - M_P \omega^2 \end{vmatrix} = 0. \quad (11)$$

После разворачивания определителя (11) и решения квадратного уравнения относительно ω^2 найдены частоты ω_1, ω_2 собственных колебаний системы. Общее решение системы уравнений (7):

$$\begin{aligned} X_{A,2F} &= A_1 \sin(\omega_1 t + \alpha_1) + B_1 \sin(\omega_2 t + \alpha_2), \\ X_{P,2F} &= A_2 \sin(\omega_1 t + \alpha_1) + B_2 \sin(\omega_2 t + \alpha_2). \end{aligned} \quad (12)$$

Между постоянными A_1 и A_2 , B_1 и B_2 существуют следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \frac{A_2}{A_1} &= \frac{C_A + C_P - \omega_1^2 \cdot M_A}{C_P} = \rho_1, \\ \frac{B_2}{B_1} &= \frac{C_A + C_P - \omega_2^2 \cdot M_A}{C_P} = \rho_2. \end{aligned} \quad (13)$$

С учетом (13) решения (12) и их производные равны:

$$\begin{aligned} X_{A,2F} &= A_1 \sin(\omega_1 t + \alpha_1) + B_1 \sin(\omega_2 t + \alpha_2), \\ V_{A,2F} &= A_1 \omega_1 \cos(\omega_1 t + \alpha_1) + B_1 \omega_2 \cos(\omega_2 t + \alpha_2), \\ X_{P,2F} &= \rho_1 A_1 \sin(\omega_1 t + \alpha_1) + \rho_2 B_1 \sin(\omega_2 t + \alpha_2), \\ V_{P,2F} &= \rho_1 A_1 \omega_1 \cos(\omega_1 t + \alpha_1) + \rho_2 B_1 \omega_2 \cos(\omega_2 t + \alpha_2). \end{aligned} \quad (14)$$

С использованием начальных условий (8) определены константы $A_1, B_1, \alpha_1, \alpha_2$. Решение системы трансцендентных уравнений (14) выполнялось в пакете MAPLE 12 при исходных данных: $M_A = 1000$ кг, $M_P = 100$ кг, $C_A = 200$ кН/м, $C_P = 33$ кН/м, $L_P = 0,9$ м, $V_0 = 10$ м/с. Собственные частоты системы равны: $\omega_1 = 12,9 \text{ с}^{-1}$; $\omega_2 = 19,9 \text{ с}^{-1}$.

Для принятых исходных данных система трансцендентных уравнений (14) для определения параметров $A_1, B_1, \alpha_1, \alpha_2$, описывающих движение во второй фазе (в Maple), принимает вид:

$$\begin{aligned} U1 &:= 0.6017269116 - A1 \sin(al1) + B1 \sin(al2) = 0; \\ U2 &:= 10 - 12.9 A1 \cos(al1) + 19.9 B1 \cos(al2) = 0; \\ U3 &:= 1.501726912 - 2.017878788 A1 \sin(al1) - 4.939696970 B1 \sin(al2) = 0; \\ U4 &:= 10 - 26.03063637 A1 \cos(al1) - 98.29996970 B1 \cos(al2) = 0. \end{aligned}$$

Эта система решена в Maple с использованием процедуры fsolve. Найденные корни представлены ниже (на языке Maple).

$$> \text{fsolve}(\{U1, U2, U3, U4\}, \{A1, B1, al1, al2\});$$

$$\{ B1 = -0.08433478051, a12 = 5.771095975, A1 = -0.9227531100, a11 = -8.653735903 \}$$

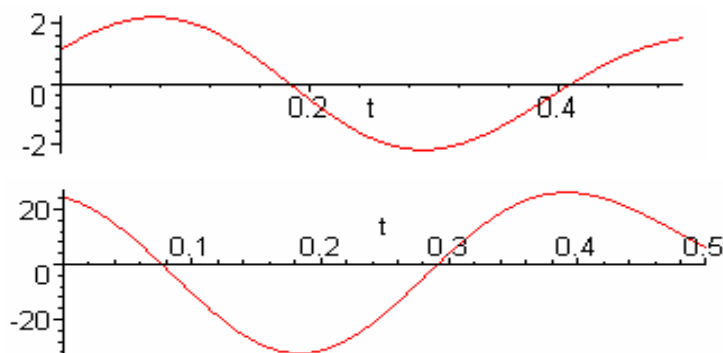


Рисунок 2 –Графики: перемещения и скорости движения пассажира во второй фазе

Как следует из графиков, после столкновения во второй фазе движения скорость пассажира может превышать скорость движения автомобиля до столкновения, т.е. в результате столкновения кинетическая энергия пассажира существенно превышает его кинетическую энергию до столкновения.

Функция максимального значения интеграла (2) исследована в зависимости от начальной скорости столкновения и расстояния до сдерживающей системы (рисунок 3).

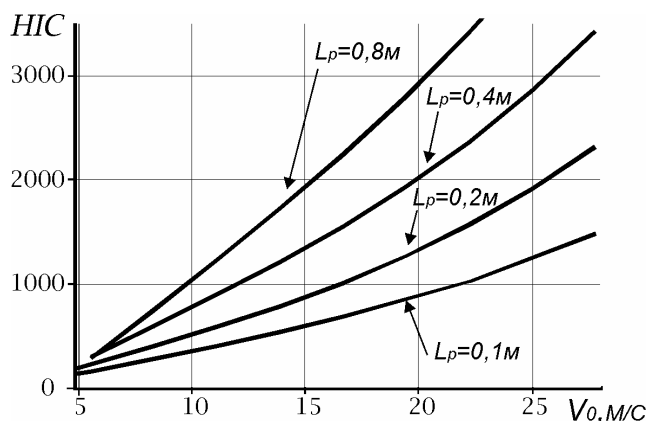


Рисунок 3 – Влияние свободного хода пассажира на получение травм

Получение серьезных травм во второй фазе движения после столкновения зависит не только от начальной скорости столкновения, но и от свободного движения пассажира. Пристегнутый пассажир со свободным ходом сдерживающей системы в пределах 0,1 м достигнет значения HIC = 1000 при скорости 20 м/с, в то время как непристегнутый при свободном ходе 0,4 м – при скорости 12 м/с.

Полученная модель позволяет анализировать перегрузку, испытываемую пассажиром при столкновении различных транспортных средств, и определить безопасные скорости транспортировки.

Дальнейшие исследования связаны с выбором такого оптимального закона упругопластического демпфирования для условия столкновения автомобиля с препятствием, при котором перегрузки пассажира не будут превышать нормированной величины.

Бibliографический список

1. Freic P. Crashworthiness and Compatibility of low Mass Vehicles in Collisions./ P. Freic, R. Kaeser, R Hafner, et. al. // SAE Technical Paper. — 1997. — No SAE-970122. — P. 35–43.
2. Huang M. On Body Mount Crash Characteristics/ M. Huang // SAE paper № 1999-01-10 International Body Engineering conference and Expositions, Detroit, Michigan, 28-30 Sept. 1999 y. Also in Journal of Passenger Cars SAE. — Michigan, 1990 Transactions Section. — P. 3330–3342.
3. Bronzino J.D. Biomedical Engineering Fundamentals / J.D. Bronzino. — Boca Raton.: CRC press: Taylor and Francis Group, 2006. — P. 47–57.

Поступила в редакцию 22.02.2010 г.