

## КОЛЕБАНИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛАСТИЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ КУЗОВА АВТОМОБИЛЯ

**В.Н. Торлин, профессор, д.т.н., А.П. Фалалеев, доцент, к.т.н.,  
С.В. Огрызков, ст. преподаватель, Севастопольский НТУ**

***Аннотация.** Исследуется влияние структуры и свойств материала панели на ее поведение при воздействии аэродинамических нагрузок и неровностей дорожного покрытия. Разработана математическая модель процессов колебания и потери устойчивости.*

***Ключевые слова:** кузов, полимер, деформация, колебания.*

### Введение

Основной тенденцией повышения уровня пассивной безопасности автомобиля в настоящее время является применение новых энергопоглощающих материалов в кузовных конструкциях – различных полимеров и их композиций, пористых, ячеистых, сетчатых и слоистых структур на базе каучука, эпоксидных смол, силикона, карбоновых нитей и др. Применение таких материалов значительно снижает вес автомобиля. Основными ограничениями на пути снижения податливости конструкции являются потеря устойчивости и резонансные явления при больших аэродинамических нагрузках.

### Анализ публикаций и постановка задачи

«Мягкие материалы» в конструкциях элементов кузовов в различные годы применялись на автомобилях Volvo, Ford и т.д. [1, 2]. Опытные образцы автомобилей с эластичными элементами кузова ежегодно представляются на автомобильных салонах [3]. Энергопоглощающая способность таких автомобилей оценивалась в работах [4, 5]. Однако, неисследованными являются вопросы упругой устойчивости элементов конструкций и их поведение в резонансных режимах колебаний.

### Цель работы

Целью данного исследования является разработка методики оценки устойчивости эле-

ментов конструкции кузова автомобиля, выполненных из новых энергопоглощающих материалов, при воздействии аэродинамических нагрузок и неровностей дорожного покрытия.

### Разработка методики

Основу разработанной методики составляет математическая модель процессов деформации, потери устойчивости и колебаний в резонансных областях исследуемых панелей, выполненных из композиционных материалов разнообразных структур и свойств. Физико-механические свойства материала панели в разработанной модели представлены в универсальной форме, позволяющей описывать поры, слои, ячейки, волокна и пр., для чего использовалась тригонометрическая интерполяция структуры материала путем полиномиального представления параметров Ляме

$$G(x, y) = G_0 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mn} \sin \frac{m\pi x}{L} \sin \frac{n\pi y}{B};$$

$$\lambda(x, y) = \lambda_0 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J b_{ij} \sin \frac{i\pi x}{L} \sin \frac{j\pi y}{B}; \quad (1)$$

где  $G_0 = \frac{E}{2(1+\gamma)}$ ,  $\lambda_0 = \frac{E\gamma}{(1+\gamma)(1-2\gamma)}$  – пара-

метры Ляме однородного материала;  $E$  – модуль упругости,  $\gamma$  – коэффициент Пуассона,  $B, L$  – ширина и длина панелей.

Процессы деформаций и колебаний панели, возникающие от аэродинамического воздействия и неровностей дорожного покрытия, представлены следующими обобщающими уравнениями [6]:

$$\begin{aligned} & \nabla^2 \left[ f_1(x, y) \nabla^2 u_z \right] - \frac{\partial^2 f_2(x, y)}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \\ & + 2 \frac{\partial^2 f_2(x, y)}{\partial x \partial y} \cdot \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 f_2(x, y)}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} = \\ & = \frac{1}{D_0} \left[ q(x, y) + N_x(x, y) \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \right. \\ & \left. + N_y(x, y) \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} - \frac{\rho h}{g} \cdot \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ ,  $f_1(x, y) = 1/G$ ,

$f_2(x, y) = 1/\lambda$ ,  $D_0 = \frac{G_0 h^3}{12}$ ,  $\rho/g$  – инерционный параметр;  $\rho$  – средняя плотность материала;  $h$  – толщина панели;  $q(x, y)$  – нормальная составляющая распределенной произвольной ветровой нагрузки;  $N_x(x, y)$ ,

$N_y(x, y)$  – касательные составляющие аэродинамического воздействия;  $u_z$  – деформация панели;  $t$  – время.

Граничные условия для закрепленной панели имеют вид

$$\text{– при } x=0, x=L: u_z = 0, \quad \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} = 0; \quad (3)$$

$$\text{– при } y=0, y=B: u_z = 0, \quad \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} = 0.$$

Начальные условия были приняты в виде

$$\text{– при } t=0: \begin{cases} u_z = H_0(1 + \sin \omega t), \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} = v_a \cos \omega t, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\omega = f(v_a)$  – частота вынуждающих сил,  $v_a$  – скорость автомобиля.

Решение задачи (2) – (4) с учетом (1) было найдено в виде

$$u_z = u_z^0 + u_z^1 + u_z^2, \quad (5)$$

$$\text{где } u_z^0(x, y) = \sum_{c=1}^C \sum_{d=1}^D k_{mn} \sin \frac{c\pi x}{L} \sin \frac{d\pi y}{B}.$$

Постоянные  $k_{mn}$  определяются из граничных условий (3)  $u_z^1$  и  $u_z^2$  определяются последовательной подстановкой  $u_z^0$  в (2) [6].

Решение (5) позволяет определить деформацию панели от нагрузки  $q(x, y)$

$$u_z = f[q(x, y)]. \quad (6)$$

Для определения минимальной критической нагрузки, при которой панель потеряет устойчивость в направлении  $x$ , найдем составляющую  $u_{zx}$  в виде

$$\begin{aligned} u_{zx}(x, y) &= F_i(y) \sin \frac{c\pi x}{B}; \\ c &= 1, 2, 3; \quad i = 0, 1, 2. \end{aligned} \quad (7)$$

Тогда подстановка (7) в (2) даст для функции  $F_i(y)$  уравнение

$$\begin{aligned} & F_i^{IV} - \frac{2c^2\pi^2}{B^2} F_i'' - \\ & - \frac{c^2\pi}{B^2} \left( \frac{N_x(x, y)}{D_0} - \frac{c^2\pi^2}{B^2} \right) F_i = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

решение которого даёт условие устойчивости в направлении  $x$  для  $u_{zx}^0$ ,  $u_{zx}^1$ ,  $u_{zx}^2$

$$\begin{aligned} & \left[ k_0 + k_1^2 \cos(r_1 L) \operatorname{ch}(r_2 L) \right] a_{mn} - \\ & - \frac{k_0}{r_1 r_2} (r_1^2 - r_2^2) \sin(r_2 L) \operatorname{sh}(r_1 L) b_{mn} = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $r_1, r_2$  – корни характеристического уравнения для (8),  $k_0, k_1$  – их производные.

Решение трансцендентного уравнения (9) дает минимальное значение  $N_x(x, y)$ . Решение было получено численно методом Ньютона.

Аналогичная процедура была реализована в направлении  $y$  и найдено минимальное значение  $N_y(x, y)$  для  $u_{zy} = f[G(x, y), \lambda(x, y)]$ .

Моделирование колебаний осуществлялось с помощью динамической составляющей  $u_z^t(x, y)$ , которая была определена в виде

$$u_z^t = (k_1 \sin \omega_{mn} t + k_2 \cos \omega_{mn} t) \Phi_{mn}(x, y); \quad (10)$$

$$m = n = 1, 2, 3,$$

где  $\omega_{mn}$  – искомая частота собственных колебаний.

Подстановка (10) в (2) и удовлетворение начальным условиям (4) позволяет найти  $\omega_{mn}$

$$\omega_{mn} = \frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{gD_0}{\rho h} \left[ \left( \frac{mL}{B} \right)^2 + n^2 \right]} a_{mn}. \quad (11)$$

Форма колебаний с частотами  $\omega_{mn}$  определяется видом функции  $\Phi_{mn}(x, y)$ . С достаточной высокой точностью процесс моделируется суммой гармоник

$$\Phi_{mn}(x, y) = \sum_{k_1=1}^{K_1} \sum_{k_2=1}^{K_2} \sin \frac{k_1 \pi x}{B} \sin \frac{k_2 \pi y}{L}. \quad (12)$$

Окончательное решение задачи было получено как сумма трех решений

$$u_z = u_{zx} + u_{zy} + u_z^t. \quad (13)$$

### Компьютерная реализация методики

Методика (1) – (13) была реализована в среде MATLAB. Разработанное программное обеспечение позволяет исследовать влияние структуры и свойств материала панели на ее поведение при воздействии аэродинамических нагрузок и неровностей дорожного покрытия.

Рассмотрим поведение ячеистой панели из силикона с упругими характеристиками  $G_0 = 0,12 \cdot 10^4$  МПа,  $\lambda = 0,104$  МПа при варьировании воздействия неровностей дорожного покрытия и скорости аэродинамического обдува.

Результаты моделирования приведены на рис. 1, 2. На рис. 1 приведено влияние амплитуды неровностей дорожного покрытия на колебания поверхностей панели из силикона при  $h = 4$  мм,  $v_a = 20$  м/с; при увеличе-

нии неровностей от  $H = 15$  мм до  $H = 30$  мм амплитуда колебаний панелей увеличивается в 2,8 раз, что ведет к потере устойчивости.

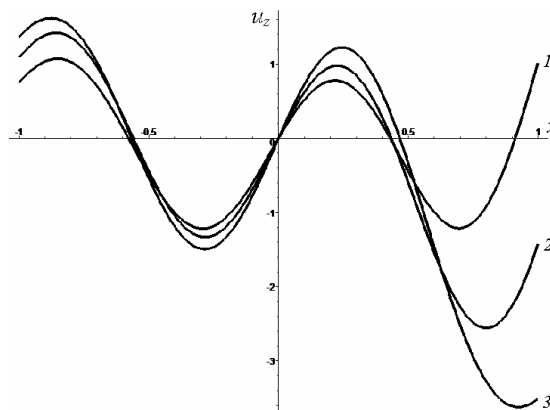


Рис. 1. Влияние амплитуды вынуждающего воздействия дорожного покрытия: 1 –  $H = 15$  мм; 2 –  $H = 25$  мм; 3 –  $H = 30$  мм

Более существенное влияние на амплитуду колебаний панели оказывает суммарное воздействие неровностей дороги и скорости движения автомобиля, рис. 2.

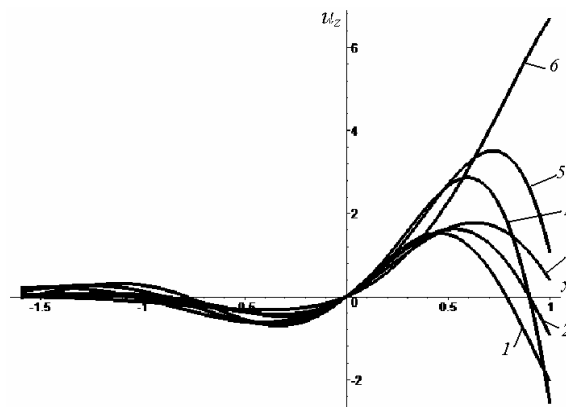


Рис. 2. Влияние суммарного воздействия неровностей дороги и скорости обдува

При движении по дороге  $H = 15$  мм со скоростью  $v_a = 20, 25, 30$  м/с (кривые 1, 2, 3) рост амплитуды незначительный, но при увеличении  $H$  до 20 мм на скорости 20 м/с (кривая 4), 25 м/с (кривая 5), 28 м/с (кривая 6) амплитуда колебаний панели резко возрастает, что также свидетельствует о потере устойчивости.

### Выводы

Применение «мягких» материалов в конструкции кузова автомобиля с целью снижения последствий ДТП уменьшает уровень аэро-

динамической устойчивости панелей кузова за счет возникновения на их поверхностях волновых процессов.

Суммарное воздействие неровностей дороги и аэродинамической нагрузки на жесткую панель может привести к недопустимому росту колебаний и её разрушению.

С целью создания элементов конструкции кузова с высокой энергопоглощающей способностью необходимо исследовать различные варианты структур материалов навесных деталей кузова – бампера, дверей, а также элементов каркаса – стоек, порогов, крыши и т.д.

### Литература

1. <http://www.volvo.com/bus/global/en-gb/volvogroup/core+values/safety/FUPS.htm>.
2. [http://auto.fixa.ru/auto\\_company/ford/ford\\_mondeo\\_2001/ford\\_mondeo\\_2001\\_15.php](http://auto.fixa.ru/auto_company/ford/ford_mondeo_2001/ford_mondeo_2001_15.php).
3. <http://world.honda.com/news/2007/4071009-Tokyo-Motor-Show-2007.htm>.
4. Торлин В.Н., Ветрогон А.А., Яковенко Е.А. Конечно-элементный анализ энергопоглощающей способности кузова автомобиля // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2006. – №7 (101). – С. 115 – 119.
5. Огородников В.А., Киселёв В.Б., Сивак И.О. Энергия. Деформации. Разрушения (задачи автотехнической экспертизы): Монография. – Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 204 с.
6. Ломакин В.А. Теория упругости неоднородных тел. – М.: Изд-во МГУ, 1976. – 368 с.

Рецензент: М.А. Подригало, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 9 октября 2007 г.