

УДК 624.075.2

**Каюмов Р.А.** – доктор физико-математических наук, профессорE-mail: [kayumov@rambler.ru](mailto:kayumov@rambler.ru)**Хайруллин Л.Р.** – кандидат технических наукE-mail: [lenarhay@mail.ru](mailto:lenarhay@mail.ru)**Попов М.М.** – студентE-mail: [bloodpokeraxe@yandex.ru](mailto:bloodpokeraxe@yandex.ru)**Хамитов А.Р.** – студентE-mail: [nomadblack@bk.ru](mailto:nomadblack@bk.ru)**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

**Методика оценки удерживающей способности дорожного ограждения\*****Аннотация**

В статье представлена методика расчета энергоемкости и динамического прогиба дорожного ограждения и динамического прогиба на основе подходов строительной механики. Для одного из частных вариантов ограждения проведено численное исследование влияния различных конструктивных решений на работу конструкций ограждений барьерного типа для автомобилей. Приведены теоретические расчеты прогиба ограждения, исходя из которых можно осуществлять подбор и составлять рекомендации по увеличению удерживающей способности конструкции.

**Ключевые слова:** дорожное ограждение, изгиб, расплющивание, удлинение, стойка.

Поглощение энергии при ударе происходит за счет различных форм деформации – упругой и пластической. Динамическая сила  $P_{dinam}$  связана с удерживающей способностью (энергоемкостью  $W$ ) ограждения соотношением:

$$W = \int_0^{V_{dinam}} P_{dinam} \cdot dV_{dinam} \quad (1)$$

Здесь  $V_{dinam}$  – динамический прогиб. При решении задачи методами строительной механики необходимо задавать или  $V_{dinam}$ , или  $P_{dinam}$ .

**1. Упругая энергоемкость при изгибе**

Упругая деформация изгиба при ударе по балке при наихудшем сценарии определяется следующим образом. Сначала требуется определить реакции стоек при ударе балки посередине пролета силой  $P_y = P_{дин} \sin \alpha$  (рис. 1).

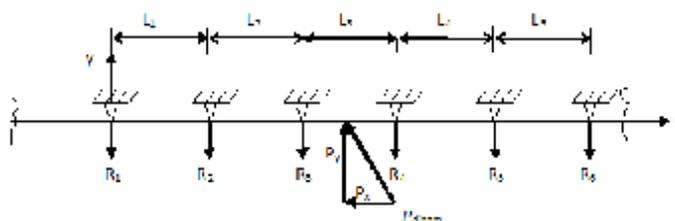


Рис. 1

Для этого составляется выражение для прогиба в виде:

$$\begin{aligned}
 EJ_V = & R_1 \frac{z^3}{6} + R_2 \frac{(z-L_1)^3}{6} + R_3 \frac{(z-L_1-L_2)^3}{6} + \\
 & + P \frac{(z-L_1-L_2-0,5L_3)^3}{6} + R_4 \frac{(z-L_1-L_2-L_3)^3}{6} + \\
 & + R_5 \frac{(z-L_1-L_2-L_3-L_4)^3}{6} + R_6 \frac{(z-L_1-L_2-L_3-L_4-L_5)^3}{6} + Cz + D \cdot
 \end{aligned} \quad (2)$$

\*Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 15-08-06018

Неизвестные  $C, D, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$  находятся из условия равенства нулю прогибов на опорах и уравнений равновесия. Это дает следующие выражения при равенстве длин всех пролетов, т.е. при:

$$L_1 = L_2 = \dots L_5 \tag{3}$$

$$R_1 = \frac{3P}{152} = 0,0197P, R_2 = -\frac{18P}{152} = -0,118P, \tag{4}$$

$$R_3 = \frac{91P}{152} = 0,599P, R_6 = R_1, R_5 = R_2, R_4 = R_3. \tag{4}$$

Учет более отдаленных опор дает поправку менее чем на 1 %. Для определения энергии упругой деформации используется соотношение:

$$W_1^{elastic} = \frac{1}{2} v_p P = 0,01096 \frac{P^2 L^3}{2EJ_x}, \tag{5}$$

где  $v_p$  – прогиб под силой  $P$ ,  $E$  – модуль упругости,  $J_x$  – главный момент инерции относительно центральной оси  $x$  сечения балки (рис. 2а).

Величина силы  $P$ , которая вызывает лишь упругие деформации, определяются из условия:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_x} = \sigma_T, \tag{6}$$

здесь  $W_x$  – момент сопротивления сечения,  $\sigma_m$  – предел текучести,  $M_{max}$  – максимальный изгибающий момент, определяемый по формуле:

$$M_{max} = EJ_x \frac{d^2 v(z_p)}{dz^2}, \tag{7}$$

здесь  $z_p$  – координата точки приложения силы, которая при условии (2) будет  $z_p = 2,5L$ . Тогда, получаем:

$$M_{max} = 0,171PL. \tag{8}$$

Из условия (6) вытекает выражение для  $P = P_m$ , после которой начинается пластическая деформация балки:

$$P_T = \frac{\sigma_T W_x}{(0,171L)}. \tag{9}$$

Окончательно энергия упругой деформации определяется по следующей формуле:

$$W_1^{elastic} = \frac{0,01096L (\sigma_T W_x)^2}{(0,342EJ_x L)}. \tag{10}$$

## 2. Пластическая энергоёмкость при расплющивании сечения балки типа «Волна»

Дальнейшая деформация происходит при пластических деформациях. Если толщина стенки мала, то происходит расплющивание (распрямление) сечения (превращение изогнутого профиля в плоское), как это изображено на рис. 2.

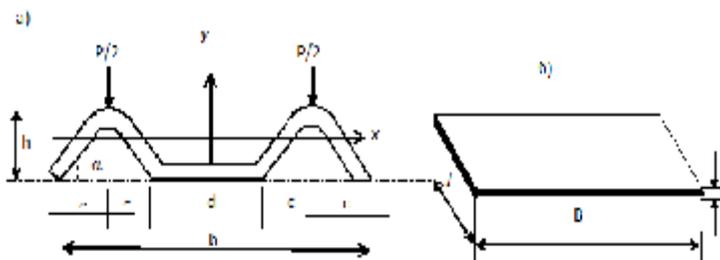


Рис. 2

Энергоёмкость такой деформации может быть подсчитана по формуле:

$$W_I^{plastic} = 6M_z^{plastic} \alpha. \tag{11}$$

Предельный пластический момент  $M$  подсчитывается по формуле:

$$M_z^{plastic} = 2S_z \sigma_m, \tag{12}$$

где  $S_z$  – статический момент половины сечения распрямленной части профиля:

$$S_z = \frac{dl_1}{8}, \tag{13}$$

здесь  $l_1$  – длина волны. Угол  $\alpha$  определяется согласно рис. 2а:

$$a = \arctg\left(\frac{h}{c}\right). \tag{14}$$

Величина  $l_1$  определяется соотношением

$$l_1 = kb, \quad k \approx 1,5. \tag{15}$$

### 3. Пластическая энергоёмкость при деформации изгиба

Дальнейшая деформация происходит по схеме пластических шарниров (рис. 3). Число звеньев, углы наклона к первоначальному положению определяются на основе кинематической теоремы предельного равновесия путем минимизации коэффициента предельной нагрузки.

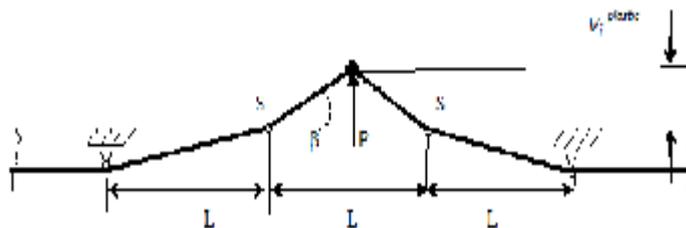


Рис. 3 Вид на ограждение сверху.

Точки S соответствуют положениям точек креплений барьерной балки со стойками, деформированными в результате удара. L – расстояние между стойками

Энергоёмкость такой деформации в точке приложения силы вычисляется по формуле:

$$W_2^{plastic} = 2M_2^{plastic} \beta, \tag{16}$$

здесь предельный момент  $M_2^{plastic}$  определяется по известному соотношению:

$$M_2^{plastic} = 2S_x \sigma_T. \tag{17}$$

Статический момент  $S_x$  вычисляется или для профиля, изображенного на рис. 2а, или для сечения, изображенного на рис. 2б. Во втором случае будет:

$$S_x = \frac{Bd^2}{8}. \tag{18}$$

Поскольку во втором случае  $S_x$  получается меньшей величины, то в запас энергоёмкости можно ограничиться формулой (18). Это будет справедливо для тонкостенных сечений.

Угол  $\beta$  определяется согласно рис. 3:

$$\beta = \arctg\left(\frac{2V_i^{plastic}}{L}\right), \tag{19}$$

здесь  $V^{plastic}$  – это прогиб участка между стойками. На разных участках он может быть разным, а определяются они также на основе кинематической теоремы предельного равновесия путем минимизации коэффициента предельной нагрузки.

Если перемещение  $V^{plastic}$  должно быть принято согласно нормативам (т.е. если оно регламентируется), то :

$$V^{plastic} = \sum_i V_i^{plastic} = V_{max}^{norm}. \tag{20}$$

Другим ограничением для  $V^{plastic}$  является условие достижения деформациями предельных значений  $\epsilon^{lim}$  для материала.

### 4. Энергоёмкость от пластических деформаций удлинения

При больших прогибах кроме изгибных деформаций появляются деформации удлинения. Их энергоёмкость определяется по формуле:

$$W_3^{plastic} = N_z \epsilon_z L. \tag{21}$$

Нормальное усилие  $N_z$  находится по формуле:

$$N_z = \sigma_T A, \quad (22)$$

где  $A$  – площадь сечения балки.

Деформация удлинения  $\epsilon_z$  балки на участке с номером  $i$  будет при этом определяться из соотношения:

$$e_z = \frac{V_i^{plastic} \sin \beta}{L}. \quad (23)$$

В дальнейшем будем считать, что на всех участках угол  $\beta$  одинаков.

Для определения  $V^{plastic}$  необходимо сравнить два их значения – нормативное  $V_{max}^{norm}$  (если оно регламентируется) и значение, определяемое из условия достижения деформацией  $\epsilon_z$  предельного значения  $\epsilon^{lim}$ :

$$e^{lim} = \frac{V_{lim}^{plastic} \sin \beta}{L}. \quad (24)$$

Прогиб  $V_{lim}^{plastic}$ , угол  $\beta$  и длина  $L$  связаны геометрическим соотношением:

$$\beta = \text{arctg} \left( \frac{2V_{lim}^{plastic}}{L} \right). \quad (25)$$

Задача отыскания  $V_{lim}^{plastic}$  сводится к решению трансцендентного уравнения вида:

$$e^{lim} = \frac{\left[ V_{lim}^{plastic} \sin \left[ \text{arctg} \left( \frac{2V_{lim}^{plastic}}{L} \right) \right] \right]}{L}. \quad (26)$$

Из двух значений  $V_{max}^{norm}$  и  $V_{lim}^{plastic}$  выбирается меньшая величина.

При больших деформациях  $\epsilon_z$ , близких к  $\epsilon^{lim}$ , вместо  $\sigma_T$  необходимо брать  $\sigma_B$  (временное сопротивление).

## 5. Энергоемкость стойки

Виды сечения стойки приведены на рис. 4. Схема деформации стойки при ударе приведена на рис. 5. Энергоемкость деформации такого типа определяется по формуле:

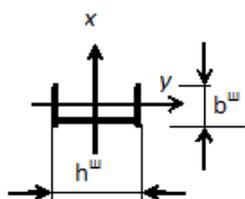


Рис. 4

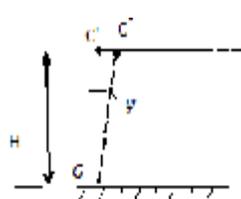
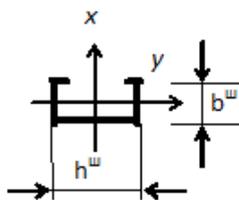


Рис. 5

$$W_C = M_m \cdot \psi, \quad (27)$$

где  $\psi$  – изменения углов наклона в точке 1,  $M_T$  зависит от формы и размеров сечения и определяется по соотношению:

$$M_T = 2S_x^{A/2} \sigma_T. \quad (28)$$

Изменение угла в точке  $G$  будет определяться из соотношения:

$$\psi \cong \frac{CC^*}{H}. \quad (29)$$

Вычисление  $S_x^{A/2}$  проводится по соотношениям теории геометрических характеристик

## 6. Результаты численных экспериментов

При расчёте дорожное ограждение было принято по ГОСТ Р52289. Уровень удерживающей способности и энергоёмкость были приняты соответственно У1 и 130 кДж. Масса автомобиля при расчёте принималась  $m=1$  т, скорость при наезде на дорожное ограждение  $v=80$  км/ч.

При расчёте упругой энергоёмкости при изгибе энергия деформации получилась равной  $W_1^{\text{elastic}}=3,8 \cdot 10^{-3}$  кН, что составило около 0,00002 % от общей энергоёмкости при ударе.

При расчёте пластической энергоёмкости при расплющивании сечения балки типа «Волна» энергоёмкость получилась  $W_1^{\text{plastic}}=165,33$  кН, что составило около 0,9 % от общей энергоёмкости при ударе.

При расчёте пластической энергоёмкости при деформации изгиба барьерной балки энергоёмкость в точке приложения силы получилась  $W_2^{\text{plastic}}=226,56$  кН, что составило около 1,2 % от общей энергоёмкости при ударе.

Энергоёмкости от пластических деформаций удлинения равна  $W_3^{\text{plastic}}=17,8 \cdot 10^3$  кН, что составило около 97 % от общей энергоёмкости при ударе.

Энергоёмкость деформации стойки получилась равной  $W_c=140,45$  кН, что составило около 0,7 % от общей энергоёмкости при ударе.

Таким образом, в основном энергия удара гасится за счет пластической деформации удлинения ограждающей балки.

Выясним, используя теоретический расчет по приведенной методике, с какой скоростью должен двигаться автомобиль и под каким максимально возможным углом должен произойти удар, чтобы балка прогнулась на максимально допустимое значение 1,5 м. согласно ГОСТ Р52289 . Результаты расчета приведены в таблице.

На рис. 6 приведена зависимость скорости от массы в случае нормативно возможного максимального прогиба ограждения 1,5 м. согласно ГОСТ 52721-2007.

Таблица

Вид транспортного средства	Скорость, V (км/ч)	Масса транспортного средства, m (т)
Прямой удар в отбойник (угол 90°)		
Легковой автомобиль	68,2	1,5
Автобус	54,92	5
Грузовой автомобиль	37,46	12
Прямой удар в отбойник (угол 5°)		
Легковой автомобиль	114,5	1,5
Автобус	91,67	5
Грузовой автомобиль	59,19	12

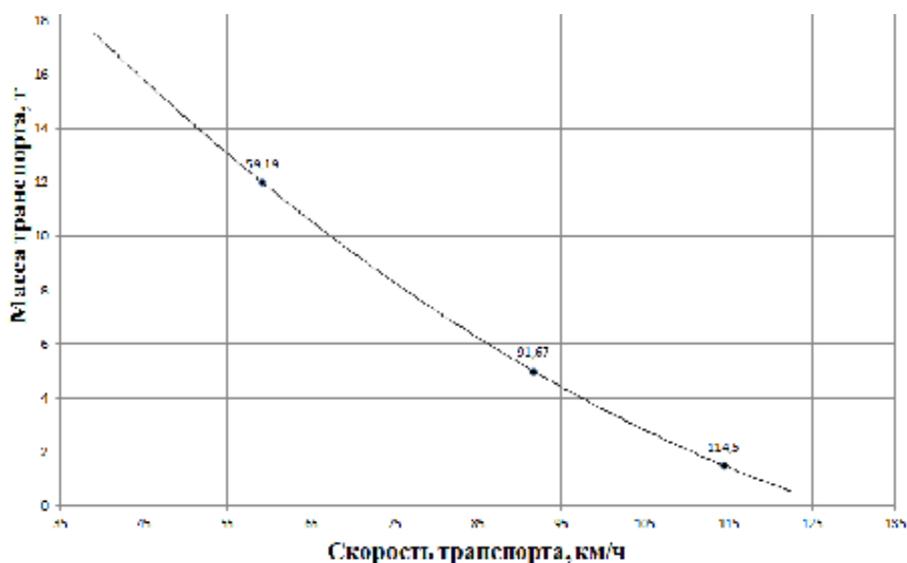


Рис. 6. Зависимость скорости от массы

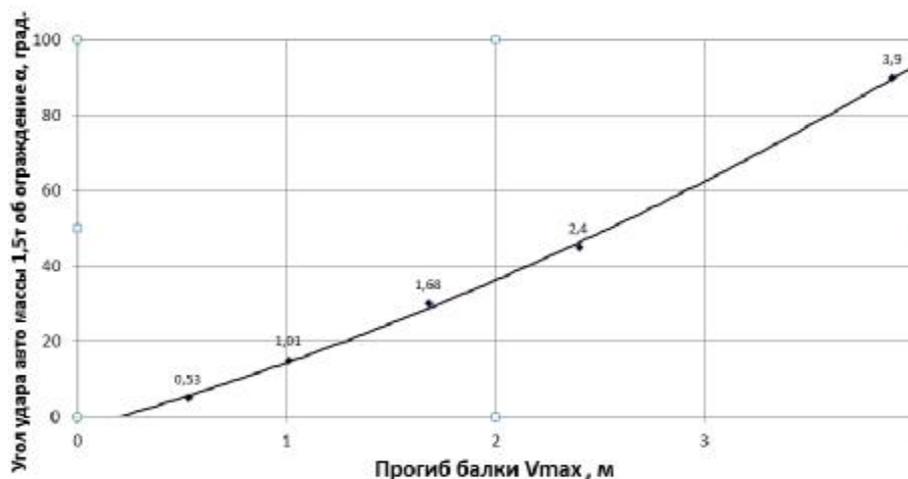


Рис. 7. Зависимость величины прогиба от угла вектора скорости при заданных характеристиках удара

Теперь поставим обратную задачу. При заданных наиболее вероятных условиях удара транспортного средства, вычислим величину прогиба  $v_{max}$ . Рассмотрим следующие условия: скорость 90 км/ч = 25 м/с; масса 1,5 т; угол динамического удара 15°. Для расчета используется теория предельного равновесия, т.е. считается, что вся энергия удара тратится на пластическую деформацию изгиба стоек и деформацию удлинения балки ограждения. Для этого запишем:

$$W_N = mv^2/2 - W_M = mv^2/2 - 2\sigma_t S_x \alpha; \Delta L = W_N / (\sigma_t A),$$

где  $W_N$  – работа на растяжение балки,  $W_M$  – работа на изгиб стойки,  $A$  – площадь сечения,  $\sigma = 2,4$  т/см<sup>2</sup>,  $\alpha$  – угол между первоначальным положением стойки и после изгиба (находим из соотношения шага стоек 3 м и  $\max$  прогиба 1,5 м),  $v$  – скорость транспортного средства,  $\Delta L$  – величина удлинения балки. После этого легко находится прогиб. Зависимость на рис. 7 отражает полученные результаты теоретического расчета.

### Вывод

Разработанная в статье методика расчета энергоемкости и динамического прогиба дорожного ограждения и динамического прогиба на основе подходов строительной механики позволила провести исследование влияния различных конструктивных решений на работу конструкций ограждений барьерного типа. Получено, что в основном энергия удара гасится за счет пластической деформации удлинения ограждающей балки.

### Список библиографических ссылок

1. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
2. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
3. Каюмов Р.А. Метод вариации упругих характеристик в задаче о предельной нагрузке // Журнал ПМТФ, 1990, № 3. – С. 134-139.
4. Каюмов Р.А. Об одном методе двусторонней оценки предельной нагрузки // Проблемы прочности, 1992, № 1. – С. 51-55.
5. Каюмов Р.А. Связанная задача расчета механических характеристик материалов и конструкций из них // Известия РАН. Механика твердого тела, 1999, № 6. – С.118-127.
6. Терегулов И.Г., Каюмов Р.А., Сибгатуллин Э.С. Расчет конструкций по теории предельного равновесия. – Казань: Фэн (Наука), 2003. – 180 с.
7. Рекомендации по применению ограждающих устройств на мостовых сооружениях автомобильных дорог. Росавтодор. – М., 2001. – 80 с.
8. Буйленко В.Я., Сахарова И.Д. Расчетные параметры воздействия автомобилей на ограждающие устройства автомобильных дорог и мостов. Труды СоюздорНИИ. – М., 1982. – 124 с.

**Kayumov R.A.** – doctor of physical and mathematical sciences, professor

E-mail: [kayumov@rambler.ru](mailto:kayumov@rambler.ru)

**Khayrullin L.R.** – candidate of technical sciences

E-mail: [lenarhay@mail.ru](mailto:lenarhay@mail.ru)

**Popov M.M.** – student

E-mail: [bloodpokeraxe@yandex.ru](mailto:bloodpokeraxe@yandex.ru)

**Khamitov A.R.** – student

**Kazan State University of architecture and engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### Methods of assessing the ability of holding road enclosure

#### Resume

The paper presents a methodology for calculating the energy consumption and dynamic deflection of a road protection and dynamic deflection on the basis of structural mechanics approaches. For one of the private fencing options, a numerical study of the influence of various design solutions to work construction fences, barrier-type car. Presented the results theoretical calculations of fences trough, on the basis of which it is possible to carry out the selection and make recommendations to increase the holding capacity of the structure. With the developed method of calculation in the article and the dynamic power consumption of guardrails and dynamic deflection deflection based approaches structural mechanics we managed to get that basically all of the energy of the car hitting the road fence extinguished by plastic deformation of the extension beams and fencing energy capacity rack bending. The elastic energy intensity of bending plastic power consumption when flattening the beam section type «Wave» and the plastic deformation energy intensity at the bend negligibly small, it means that the calculation can be neglected. They perform a constructive function, but does not protect.

**Keywords:** road fence, bending, flattening, elongation, desk.

#### Reference list

1. Rabotnov Y.N. Fracture Mechanics. – M.: Nauka, 1988. – 712 p.
2. Malinin N.N. Applied Theory of Plasticity. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 400 p.
3. Kayumov R.A. The method of variation of the elastic characteristics of the problem of full load // Zhurnal PMTF, 1990, № 3. – P. 134-139.
4. Kayumov R.A. A method of two-way evaluation of the ultimate load // Problemy prochnosti, 1992, № 1. – P. 51-55.
5. Kayumov R.A. A related problem of calculating the mechanical properties of materials and constructions from them // Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela, 1999, № 6. – P. 118-127.
6. Teregulov I.G., Kayumov R.A., Sibgatullin E.S. Calculation of structures on the limit equilibrium theory. – Kazan: Fen (Nauka), 2003. – 180 p.
7. Recommendations for use of protecting devices on the bridge constructions of highways. Rosavtodor. – M., 2001. – 80 p.
8. Bujlenko V.Ya., Saharova I.D. Design parameters Car walling impact on the device of roads and bridges. Trudy SoyuzdorNII. – M., 1982. – 124 p.