

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

**В.К. Курьянов, О.В. Рябова, Е.В. Кондрашова,  
А.В. Скрыпников, Ю.В. Лобанов, С.Н. Меркулов**

*ГОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия» (ВГЛТА); ГОУ ВПО «Воронежский государственный архитектурно-строительный университет (ВГАСУ)», г. Воронеж*

*Рецензент В.Ф. Калинин*

**Ключевые слова и фразы:** квадратная и кубическая параболы; продольный профиль; расход топлива; эпюры скорости.

**Аннотация:** Рассмотрены энергосберегающие технологии проектирования автомобильных дорог, способствующие экономии топлива, менее напряженному режиму движения, снижению эмоциональной напряженности водителя, уменьшению объема земляных работ, облегчению ландшафтного проектирования за счет лучшего обертывания проектной естественной поверхности земли.

Энергосберегающие проектные решения минимизируют расход топлива и обеспечиваются, прежде всего, проектированием геометрии пути, учитывающей режимы движения автомобилей и зависимость расхода топлива от дорожных условий.

Расход топлива пропорционален мощности двигателя, зависящий от сил сопротивления движению и скорости автомобиля, а общий расход топлива на участке дороги длиной  $L$  определяется энергией, необходимой для преодоления автомобилем этого участка, то есть

$$Q = \frac{\int_0^L \left[ (kF + G\alpha S)v(x)^2 + G \left( f_0 + i(x) + j \frac{\delta}{g} \right) \right] q(x)}{\eta dx}, \quad (1)$$

---

Курьянов В.К. – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой транспорта леса и инженерной геодезии ВГЛТА; Рябова О.В. – доктор технических наук, профессор кафедры строительства автомобильных дорог ВГАСУ; Кондрашова Е.В. – кандидат технических наук, доцент кафедры транспорта леса и инженерной геодезии ВГЛТА; Скрыпников А.В. – доктор технических наук, профессор кафедры транспорта леса и инженерной геодезии ВГЛТА; Лобанов Ю.В., Меркулов С.Н. – аспиранты кафедры транспорта леса и инженерной геодезии ВГЛТА, г. Воронеж.

где  $v(x)$ ,  $q(x)$ ,  $i(x)$  – соответственно скорость, удельный расход топлива и уклон как функция пути.

Оптимизировать очертание продольного профиля по расходу топлива, то есть найти уравнение проектной линии, минимизирующей  $Q$  (задача вариационного исчисления для одной кривой и динамического программирования для участка дороги), чрезвычайно сложно при достаточно большой длине участка и при ограничениях на величину уклонов, расстояние видимости, контрольные и рабочие отметки и т.п. Проектированию энергосберегающих конструкций дороги способствует автоматизированная обработка данных, дающая общий расход топлива и построение эпюр расходов. Эпюры позволяют направленно формировать варианты проектных решений в сторону уменьшения  $Q$ , используя следующие принципы.

Один из основных принципов минимизации расхода топлива – проектирование дорожных условий, обеспечивающих эффективное использование кинетической энергии, то есть уменьшение длины участка, требующих торможения и проектирования такого сочетания элементов дороги, при котором водитель может эффективно использовать накат [1].

Режим наката типичен после спуска, в конце которого скорость высока и равна  $v_1$ . Если за спуском проектируется любой элемент дороги, рассчитанный на движение со скоростью  $v_2$  (пересечение в одном уровне и т.п.) и  $v_2 < v_1$ , то расстояние  $S$  от этого элемента до конца спуска определяется режимом наката. Расстояние  $S$  находится решением уравнения движения автомобиля при накате

$$Gi + Gf_0 + (kF + \alpha S_p G)v^2 + \frac{\delta}{g} G \frac{dv}{dt}. \quad (2)$$

Заменив,  $a = i + f_0$ ,  $b = (kF + \alpha S_p G)/G$ , получим

$$a = bv^2 = -\frac{\delta}{g} \frac{dv}{dt}. \quad (3)$$

Замена  $\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dt} \cdot \frac{dt}{dS} \cdot \frac{dS}{dt} = v \frac{dv}{dS}$  дает уравнение с разделяющимися переменными,

$$dS = -\frac{\delta}{g} \cdot \frac{v}{a + bv^2} dv \quad (4)$$

с решением

$$S = \frac{\delta}{2gb} \ln \frac{v_1^2 + \frac{a}{b}}{v_2^2 + \frac{a}{b}}. \quad (5)$$

При неопределенности состава потока и на стадии предпроектных разработок можно ориентироваться на табл. 1, данные в которой рассчитаны по формуле (5).

Таблица 1

**Зависимость оптимальной по минимуму расхода топлива  
длины участка дороги от начальной и конечной скоростей,  
отличном состоянии покрытия**

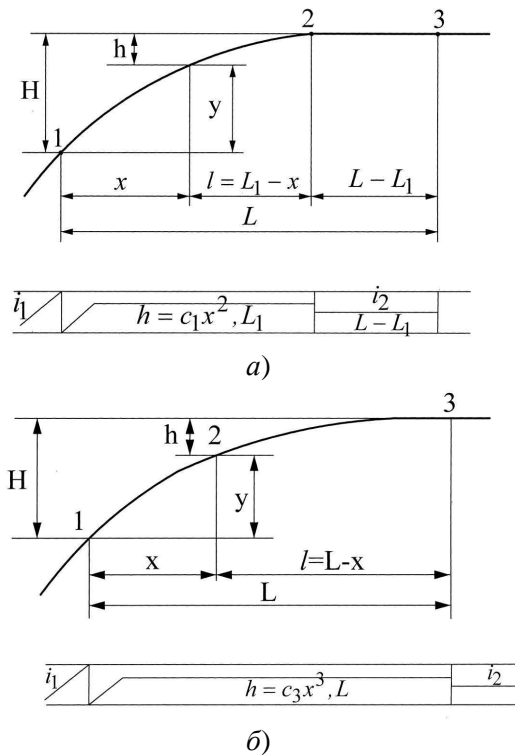
Тип автомобиля	Начальная скорость, км/ч	Путь наката, м, при конечной скорости, км/ч				
		80	70	60	50	40
При уклоне $i = 0 \%$						
ГАЗ-3110	100	300	460	640	820	1000
КАМАЗ+ГКБ	100	320	500	690	880	1080
ГАЗ-3110	80	–	160	340	520	710
КАМАЗ+ГКБ	80	–	180	360	560	740
ГАЗ-3110	60	–	–	–	180	370
КАМАЗ+ГКБ	60	–	–	–	190	390
При уклоне $i = 4 \%$						
ГАЗ-3110	100	160	240	320	390	450
КАМАЗ+ГКБ	100	170	280	330	410	470
ГАЗ-3110	80	–	80	180	230	290
КАМАЗ+ГКБ	80	–	80	180	230	300
ГАЗ-3110	60	–	–	–	70	130
КАМАЗ+ГКБ	60	–	–	–	70	130

Другой, не менее важный принцип, обеспечивающий сбережение энергии – проектирование продольного профиля [2], гарантирующего движение без переключения на пониженные передачи (I и II) особенно автопоездов и тяжелых автомобилей. При движении на этих передачах расход топлива на преодоление одного и того же пути (по сравнению с движением на повышенных передачах), резко увеличивается по трем причинам: 1) вследствие большего времени движения за счет резкого снижения скорости; 2) за счет работы двигателя на высоких оборотах, вследствие чего увеличивается удельный расход топлива (г/лс·ч); 3) за счет работы двигателя практически на внешней (не на частичной) характеристике, что тоже приводит к увеличению удельного расхода топлива.

Третий принцип, удовлетворяющий одновременно ряду других важных требований: безопасности, экономичности, удобства, – проектирование трассы, обеспечивающей движение с постоянной скоростью.

Настоящее предложение использовать кубическую параболу в качестве вертикальной кривой обосновано соответствующим анализом, расчетами расхода топлива и методическими разработками, способствующими освоению проектировщиками энергосберегающего метода проектирования продольного профиля.

Сопоставим варианты вертикальных кривых, описанных квадратной и кубической параболками, причем схема сопряжения элементов продольного профиля такая, как показано на рис. 1, 2.



**Рис. 1. Сопряжение прямых с уклонами  $i_1, i_2$  :**  
*a* – квадратной параболой; *б* – кубической параболой

Начало координат обычно располагают в вершине кривой (точке 0), в точке 2 (квадратная парабола) или 3 (кубическая парабола).

Тогда

$$h_2 = C_2 l^2, \quad h_3 = C_3 l^3. \quad (6)$$

Уклоны, как функции координаты  $l$ , находят из условия  $i = \frac{dh}{dl}$ , для квадратной и кубической парабол:

$$i = 2C_2 l, \quad i = 3C_3 l^2. \quad (7)$$

Коэффициенты  $C_2$  и  $C_3$  определяются граничными условиями, в качестве которых примем:  $K$  – перепад высот точек 1 и 2;  $i_1$  – уклон в точке 1, нулевой уклон в точке 2 (или 3). Тогда

$$C_2 = \frac{H}{L_1^2}, \quad C_3 = \frac{H}{L^3}, \quad (8)$$

где  $L_1$  – длина квадратной параболы от точки 1 до точки 2;  $L$  – длина кубической параболы от точки 1 до точки 3.

Так как сопоставить расходы топлива необходимо на участке одной и той же длины и так как  $L_1 < L$ , дополним вариант сопряжения квадратной параболой до длины  $L$  прямолинейным отрезком нулевого уклона, длина отрезка  $L - L_1$ .

Перенесем начало координат в точку 1 и тогда

$$Y_2 = H - h_2 = H - C_2(L_1 - x)^2, \quad Y_3 = H - h_3 = H - C_3(L - x)^2. \quad (9)$$

В точке  $x$  величина продольного уклона для квадратной параболы

$$Y_2' = 2C_2(L_1 - x), \quad (10)$$

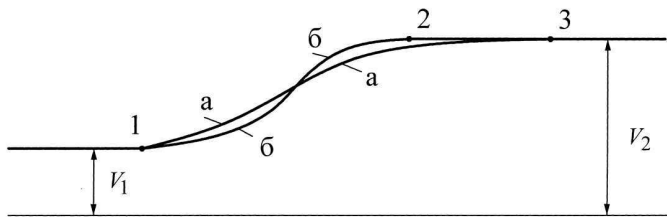
для кубической

$$Y_3' = 3C_3(L - x)^2. \quad (11)$$

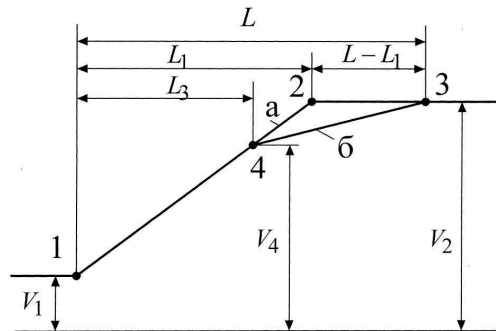
Отметим, что при движении от точки 2 к точке 1 величина продольного уклона кубической параболы меньше, чем квадратной, и только на расстоянии 450 м от точки 1 уклоны сравниваются и в дальнейшем по мере продвижения к вершине уклоны кубической параболы несколько больше уклонов квадратной. Это свойство кубической параболы обеспечивает менее напряженный режим двигателя при движении по кубической параболе (см. рис. 2).

Для упрощения вычислений эпюры скорости аппроксимированы линейными отрезками так, как показано на рис. 3, 4, то есть в соответствии с закономерностью взаимного соотношения уклонов кубической и квадратной параболы. В частности, при  $i_2 = 0$  получается такое соотношение между элементами кривых и эпюр скорости и расхода топлива

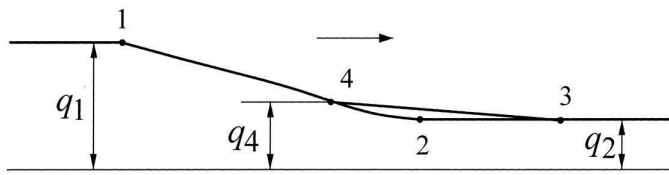
$$L_1 = \frac{2}{3}L, \quad L_3 = \frac{1}{2}L, \quad v_4 = \frac{3}{4}(v_2 - v_1) + v_1, \quad q_4 = \frac{1}{4}(q_2 - q_1) + q_2.$$



**Рис. 2. Эпюры скорости:**  
а – при квадратной параболе; б – при кубической параболе



**Рис. 3. Аппроксимация эпюр скорости и эпюры удельного расхода топлива:**  
а – при квадратной параболе; б – при кубической параболе



**Рис. 4. Аппроксимация эиюр удельного расхода топлива:**  
*a* – при квадратной параболле; *b* – при кубической параболле

Из общего расхода топлива  $Q$  на участке длиной  $L$  выделим части, определяющиеся квадратом скорости  $Q_v$ , величиной уклона  $Q_i$ , сопротивлением качению  $Q_f$  и сопротивлением инерции  $Q_j$ . Анализ показывает, что кубическая кривая обеспечивает сбережение энергии и расхода топлива. Положительны разности:  $\Delta Q_v = Q_{v2} - Q_{v3}$  за счет того, что в вершине подъема при квадратной параболле от точки 4 до точки 2 и далее до точки 4 скорости (а значит и расход топлива) несколько выше, чем для кубической параболлы;  $\Delta Q_i = Q_{i2} - Q_{i3}$  за счет того, что на участке с большими значениями  $q(x)$  уклоны  $i_3(x) < i_2(x)$ . Одинаковы расходы топлива  $Q_{j2}$  и  $Q_{j3}$ , так как равны разности кинетических энергий  $G \frac{\delta}{2g} (v_2^2 - v_1^2)$  для обоих вариантов пути. Отрицательная разность  $\Delta Q_f = Q_{f2} - Q_{f3}$  получается за счет того, что на участке от точки 4 до точки 3 удельные расходы топлива больше для кубической параболлы, чем для квадратной.

Анализ показывает, что значения  $\Delta Q_i$ ,  $\Delta Q_f$  и  $\Delta Q_j$  примерно равны по абсолютной величине, на порядок меньше величины  $\Delta Q_v$  и поэтому ими можно пренебречь. Таким образом, сбережение расхода топлива обеспечивается величиной  $\Delta Q_v$ , которую можно оценить, интегрируя функцию  $(kF + \alpha SG)xv^2(x)q(x)$  от точки 4 до точки 3 отдельно для квадратной и отдельно для кубической парабол

$$\Delta Q_v \cong (kF + \alpha SG) \left[ v_2^2 q_2 (L - L_1) - \frac{v_4^2 q_4 - v_2^2 q_2}{2} (L - L_3) \right] / \eta \cong 0,25(kF + \alpha SG)Lq_2 v_2^2. \quad (12)$$

Для оценки сбережения топлива рассчитаны значения  $\Delta Q_v$  и  $Q_2$  для вариантов проезда автомобилями квадратной и кубической параболлы при различных радиусах квадратной параболлы и при различных начальных уклонах. Результаты расчета показывают, что сбережение топлива по кубической кривой не менее 5 %. Оценка показывает, что на 100 км дороги при интенсивности потока от 1000 до 5000 авт./сутки,  $Q_{\text{средн}} = 20$  л/км, относительной длине вертикальных выпуклых кривых 10 % и  $\Delta Q_{\text{отн}} = 3 \dots 5$  % экономия топлива составляет от 20 до 180 тыс. л в год.

**Вывод.** Проектирование профиля по кубической параболе наряду с экономией топлива обеспечивает менее напряженный режим движения, снижение эмоциональной напряженности водителя за счет удлинения пути от  $i_1$  к  $i_2$  и в сочетании с общепринятыми круговыми кривыми дает возможность лучшего обертывания проектной естественной поверхности земли, что уменьшает объем земляных работ и облегчает ландшафтное проектирование.

#### *Список литературы*

1. Бабков, В.Ф. Дорожные условия и безопасность движения : учеб. / В.Ф. Бабков. – М. : Транспорт, 1982. – 280 с.
2. Курьянов, В.К. Рекомендации по проектированию элементов поперечного профиля на кривых в плане при движении автомобильных поездов / В.К. Курьянов, Е.В. Кондрашова, А.В. Скрыпников ; Воронеж. гос. лесотехн. акад. – Воронеж, 2002. – 30 с. – Деп. в ВИНТИ 07.08.02 №1450-В2002.

---

### **Energy-Saving Technologies of Highways Designing**

**V.K. Kuryanov, O.V. Ryabova, E.V. Kondrashova,  
A.V. Skrypnikov, Y.V. Lobanov, S.N. Merkulov**

*Voronezh State Timber College;  
Voronezh State Architecturally-Building University, Voronezh*

**Key words and phrases:** square and cubic parabolas; a longitudinal structure; the charge of fuel.

**Abstract:** The paper studies energy-saving technologies of highways construction. These help cut down fuel consumption, make the traffic schedule less intense, lower the driver's emotional stress as well as decrease the excavation works, and simplify the landscape designing due to improved wrapping up of natural soil surface.

---

© В.К. Курьянов, О.В. Рябова, Е.В. Кондрашова,  
А.В. Скрыпников, Ю.В. Лобанов, С.Н. Меркулов, 2008