

УДК 625.723

UDC 625.723

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ
ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

**DESIGN OF ENERGY-SAVING
CONSTRUCTION OF LOGGING ROADS**

Кондрашова Елена Владимировна
д.т.н., доцент

Kondrashova Elena Vladimirovna
Dr.Sci.Tech., associate professor

Воронежская государственная лесотехническая академия, Воронеж, Россия

Voronezh State Academy of Forestry and Technologies, Voronezh, Russia

В статье рассмотрены энергосберегающие технологии проектирования лесовозных автомобильных дорог, способствующие экономии топлива, менее напряжённому режиму движения, снижению эмоциональной напряжённости водителя, уменьшению объёма земляных работ, облегчению ландшафтного проектирования за счёт лучшего обёртывания проектной естественной поверхности земли

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

Ключевые слова: ЛЕСОВОЗНАЯ АВТОМОБИЛЬНАЯ ДОРОГА, ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ, ЭКОНОМИЯ ТОПЛИВА, КУБИЧЕСКАЯ ПАРАБОЛА

Keywords: LOGGING ROAD, ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES, CUTTING DOWN FUEL CONSUMPTION, CUBIC PARABOLA

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

$$Q = \frac{\int_0^L \left[(kF + GaS)V(x)^2 + G \left(f_o + i(x) + j \frac{d}{g} \right) \right] q(x) dx}{h}, \quad (1)$$

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

$$Gi + Gf_o + (kF + aS_p G)v^2 + \frac{d}{g} G \frac{dV}{dt}. \quad (2)$$

Заменив, $a = i + f_o$, $b = (kF + aS_p G)/G$, получим

$$a = bV^2 = -\frac{d}{g} \frac{dV}{dt}. \quad (3)$$

Замена $\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dt} \cdot \frac{dt}{dS} \cdot \frac{dS}{dt} = V \frac{dV}{dS}$ даёт уравнение

$$dS = -\frac{d}{g} \cdot \frac{V}{a + bV^2} dV \quad (4)$$

с решением

$$S = \frac{d}{2gb} \ln \frac{V_1^2 + \frac{a}{b}}{V_2^2 + \frac{a}{b}}. \quad (5)$$

При неопределённости состава потока и на стадии предпроектных разработок можно ориентироваться на табл. 1 и 2, данные в которых рассчитаны по формуле (5).

Таблица 1 Зависимость оптимальной по минимуму расхода топлива длины участка дороги от начальной и конечной скоростей при $i=0\%$, отличном состоянии покрытия

Тип автомобиля	Начальная скорость, км/ч	Путь наката (м) при конечной скорости, км/ч				
		80	70	60	50	40
ГАЗ-3110	100	300	460	640	820	1000
КАМАЗ+ГКБ	100	320	500	690	880	1080
ГАЗ-3110	90	150	320	490	670	860
КАМАЗ+ГКБ	90	170	340	530	730	920
ГАЗ-3110	80	-	160	340	520	710
КАМАЗ+ГКБ	80	-	180	360	560	740
ГАЗ-3110	70	-	-	170	360	540
КАМАЗ+ГКБ	70	-	-	190	380	580
ГАЗ-3110	60	-	-	-	180	370
КАМАЗ+ГКБ	60	-	-	-	190	390

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 тяжёлых 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 трём причинам:

- 1) вследствие большего времени движения за счёт резкого снижения скорости;
- 2) за счёт работы двигателя на высоких оборотах, вследствие чего увеличивается удельный расход топлива (г/лс·ч);

3) за счёт работы двигателя практически на внешней (не на частичной) характеристике, что тоже приводит к увеличению удельного расхода топлива [3].

Таблица 2 Зависимость оптимальной по минимуму расхода топлива длины участка дороги от начальной и конечной скорости при $i=4\%$ и отличном состоянии покрытия

Тип автомобиля	Начальная скорость, км/ч	Путь наката (м) при конечной скорости, км/ч				
		80	70	60	50	40
ГАЗ-3110	100	160	240	320	390	450
КАМАЗ+ГКБ	100	170	280	330	410	470
ГАЗ-3110	90	80	180	240	310	370
КАМАЗ+ГКБ	90	90	170	250	320	380
ГАЗ-3110	80	-	80	180	230	290
КАМАЗ+ГКБ	80	-	80	180	230	300
ГАЗ-3110	70	-	-	80	150	210
КАМАЗ+ГКБ	70	-	-	80	150	210
ГАЗ-3110	60	-	-	-	70	130
КАМАЗ+ГКБ	60	-	-	-	70	130

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, расчётами расхода топлива и методическими разработками, способствующими освоению проектировщиками энергосберегающего метода проектирования продольного профиля.

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

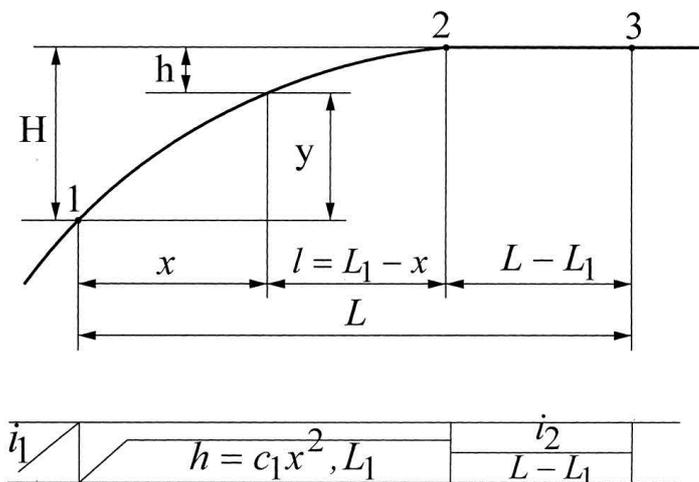


Рисунок 1 – Сопряжение прямых с уклонами i_1, i_2 квадратной параболой

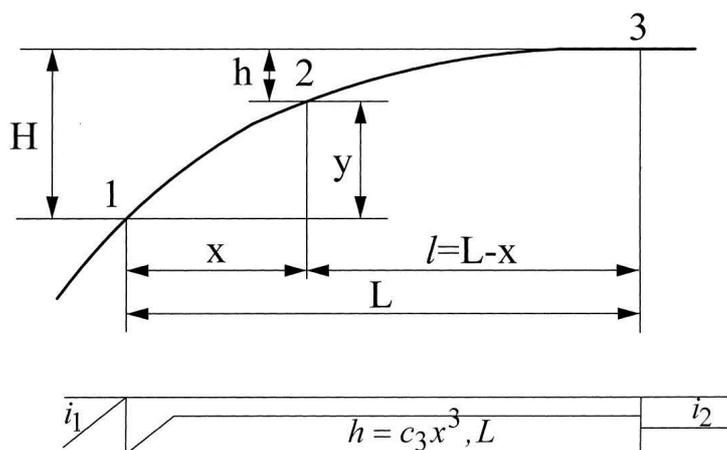


Рисунок 2 – Сопряжение прямых с уклонами i_1, i_2 кубической параболой

Начало координат обычно располагают в вершине кривой, т. 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 1 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 $L - L_1$.

Перенесём 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 напряжённый режим двигателя при движении по кубической параболе и как следствие эпюру скорости, показанную на рис. 3, в которой значения скорости соответствуют закономерности изменения уклона, приведённой в табл. 3 [4].

Таблица 3 Уклоны и превышения квадратной и кубической параболы как функция расстояния x от точки с уклоном 60 ‰

$x, \text{ м}$	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
$i = y'_1, \text{ ‰}$	60	50	40	30	20	10	0	0	0	0
$i = y'_3, \text{ ‰}$	60	47,4	36,3	26,7	18,5	11,9	6,7	3	0,7	0
$h_2, \text{ м}$	0	5,50	10,0	13,5	16,0	17,5	18,0	18,0	18,0	18,0
$h_3, \text{ м}$	0	5,36	9,53	12,67	14,91	16,42	17,33	17,80	17,98	18,0

Для упрощения вычислений эпюры скорости аппроксимированы линейными отрезками так, как показано на рис. 4, 5, т.е., 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

$$L_1 = \frac{2}{3}L, L_3 = \frac{1}{2}L, V_4 = \frac{3}{4}(V_2 - V_1) + V_1, q_4 = \frac{1}{4}(q_2 - q_1) + q_2.$$

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: $DQ_v = Q_{v2} - Q_{v3}$ за счёт того, что в вершине подъёма при квадратной параболе от точки 4 до точки 2 и далее до точки 4 скорости (а значит и расход топлива) несколько выше, чем для кубической параболы; $DQ_i = Q_{i2} - Q_{i3}$ за счёт 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 $G \frac{d}{2g} (v_2^2 - v_1^2)$ для обоих вариантов пути. Отрицательная разность $DQ_f = Q_{f2} - Q_{f3}$ получается за счёт того, что на участке от точки 4 до точки 3 удельные расходы топлива больше для кубической параболы, чем для квадратной.

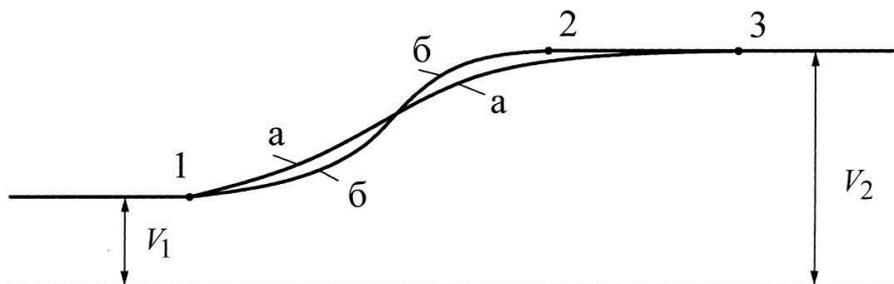


Рисунок 3 – Эпюры скорости: а – при квадратной параболе, б – при кубической параболе

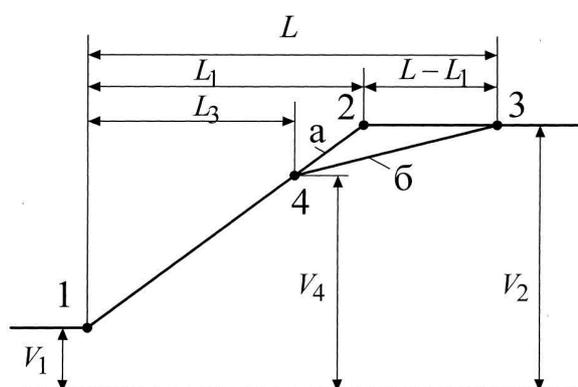


Рисунок 4 – Аппроксимация эпюр скорости: а – при квадратной параболе; б – при кубической параболе

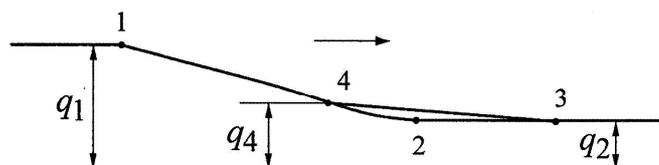


Рисунок 5 – Аппроксимация эпюр удельного расхода топлива: а – при квадратной параболе; б – при кубической параболе

Анализ показывает, что значения DQ_i , DQ_f и DQ_j примерно равны по абсолютной величине, на порядок меньше величины DQ_v и поэтому ими можно пренебречь. Таким образом, сбережение расхода топлива обеспечивается величиной DQ_v , которую можно оценить, интегрируя функцию

$(kF + aSG)xV^2(x)q(x)$ от точки 4 до точки 3 отдельно для квадратной и отдельно для кубической парабол

$$DQ_v \cong (kF + aSG) \times \left[V_2^2 q_2 (L - L_1) - \frac{V_4^2 q_4 - V_2^2 q_2}{2} (L - L_3) \right] / h \cong \quad (12)$$

$$\cong 0,25(kF + aSG)Lq_2V_2^2.$$

Для оценки сбережения топлива рассчитаны значения DQ_v и Q_2 для вариантов проезда автомобилями квадратной и кубической параболы при различных радиусах квадратной параболы и при различных начальных уклонах. Результаты расчёта показывают, что сбережение топлива по кубической кривой не менее 5 %.

Замена квадратных парабол кубическими при вогнутых вертикальных кривых тоже обеспечивает положительный эффект по расходу топлива, но несколько меньше, чем для выпуклых кривых за счёт меньшей длины вогнутых кривых.

Оценка показывает, что на 100 км дороги при интенсивности потока от 1000 до 5000 авт./сутки, $Q_{ср.дн.} = 20$ л/км, относительной длине вертикальных выпуклых кривых 10 % и $DQ_{отн.} = 3 \div 5$ % экономия топлива составляет от 20 до 180 тыс. л. в год.

Таблица 3 - Результаты расчёта сбережения топлива при замене квадратной параболы кубической (МАЗ, $q = 6.4 \cdot 10^{-4}$ г/кг м, $kF = 0.28$, $d = 1.15$, $s = 50$ см/км)

i , %	V_1 , м/с	R=25 000 м			R=10 000 м			R=5 000 м		
		Q_2 , Г	DQ , Г	Q_2/DQ , Г	Q_2 , Г	DQ , Г	Q_2/DQ , Г	Q_2 , Г	DQ , Г	Q_2/DQ , Г
8	6,7	1323	96	7,3	617	38	6,2	381	19	5
6	8,9	912	72	7,9	443	29	6,5	287	14	5
4	13,6	547	48	8,8	272	19	7,1	180	10	5,3

Для уточнения величины расхода топлива в транспортном потоке, используем экспериментальные данные топливной экономичности.

Так как при некоторой скорости расход топлива наименьший, то общую зависимость расхода топлива Q от скорости V можно представить в виде

$$Q = Q_{min} + r(V - V_m) + k(V - V_m)^2 \quad (13)$$

где V_m - скорость, соответствующая минимуму расхода топлива Q_{min} ;
 r, k - эмпирические коэффициенты.

Коэффициенты r, k получены при анализе экспериментальных исследований топливной экономичности и обобщённых на рис. 6. В среднем для транспортного потока $r = -0,15$ и $k = 0,00225$. Значения V_m примерно равны 40 км/ч для грузовых и 60 км/ч для легковых [2,5].



Рисунок 6 – Зависимость превышения расхода топлива над Q_{min} от разности скорости $V - V_{min}$ (x – ЗИЛ, + - ГАЗ, □ – МАЗ)

При выводе зависимости расхода топлива от скорости автомобиля в транспортном потоке за исходные данные принят расход топлива при свободном движении со скоростью V_c . При этом Q и V_c связаны зависимостью

$$Q_c = Q_{min} + r(V_c - V_m) + k(V_c - V_m)^2 \quad (14)$$

Так как в потоке скорость снижена до значения V_n и расход топлива изменен (увеличен или уменьшен) до значения Q_n , то

$$Q_c = Q_{min} + r(V_c - V_m) + k(V_c - V_m)^2. \quad (15)$$

Подставляя (15) в (14), получаем расход топлива при движении автомобиля в потоке со скоростью V_n

$$Q_n = Q_c - r(V_c - V_n) - k[(V_c - V_n)^2 + (V_n - V_m)^2], \quad (16)$$

то есть расход топлива по сравнению со свободным движением изменяется на величину

$$DQ_n = Q_n - Q_c = r(V_c - V_n) - k[(V_c - V_m)^2 - (V_n - V_m)^2] \quad (17)$$

или $DQ = (V_c - V_n)[r - k(V_c + V_n - 2V_m)]$.

Расход топлива необходимо находить по зависимости (17) с учётом распределения скорости как случайной величины, то есть

$$Q_n = \int_{V_{min}}^{V_{max}} Q(V)j(V) dV \quad (18)$$

Используя метод линеаризации функции случайного аргумента, получим

$$Q_n = Q(V_n) + \frac{1}{2} Q''(V_n)S_n^2, \quad (19)$$

то есть расход топлива вследствие учёта дисперсии скорости уточняется на величину

$$DQ_{\delta} = kS_V^2, \quad (20)$$

Дополнительный расход топлива автомобиля в потоке вызван обгонами. Расход топлива при обгоне увеличивается на величину, которая соответствует проезду дополнительного расстояния 150 м. Поэтому дополнительный расход топлива, вызванный обгонами

$$DQ_{обг} = 0,15n_{обг}Q_c, \quad (21)$$

где $n_{обг}$ - количество обгонов на участке дороги, на котором без обгонов израсходовано топлива Q_c .

Анализ показывает, что количество обгонов достигает максимума $N_{обг} = 100 \text{ обг} / \text{кмчас}$ при интенсивности $N = 400-500 \text{ а/ч}$ по одной полосе. Так как $N_{обг}$ произошло на участке дороги в течение одного часа, а за этот час прошло N автомобилей, то в среднем на один автомобиль потока приходится $n_{обг} = N_{обг} / N$. Максимум $n_{обг} = (0,2 \div 0,25) \text{ обг} / \text{кмавт}$. Поэтому максимальный дополнительный расход топлива составляет

$$DQ_{обг} = 0,03 \div 0,04 Q_c, \tag{22}$$

Эта величина на порядок меньше DQ_n и DQ_b .

Расчет значений DQ_n и DQ_b показывает, что с ростом плотности потока расход топлива снижается до значения, соответствующего уровню загрузки примерно 0,65. Затем существенно возрастает, особенно при насыщенном потоке, когда исчерпана пропускная способность – табл. 4.

Таблица 4 Влияние плотности потока на расход топлива (горизонтальный участок, ГАЗ-20 %, ЗИЛ-25 %, МАЗ-5 %, $v_m = 50 \text{ км/ч}$) $Q_c = 22,2 \text{ л/100 км}$

Плотность, авт/км	Свободное движение	5	10	15	20	25	30	40	60
Интенсивность, авт/ч	Свободное движение	340	550	770	950	1100	1150	1000	770
Скорость, км/ч	75	68	55	51	48	44	34	25	13
DQ_n , л/км	-	-5,7	-10,4	-10,4	-10	-8,8	0,4	7,5	26
DQ_s , л/км	5	3,0	2,0	1,0	0,5	0,4	0,2	-	-
Q_n , л/км	27,2	19,5	13,7	12,8	12,7	13,8	22,8	-	-

Выводы.

1. Проектирование профиля по кубической параболе наряду с экономией топлива обеспечивает менее напряжённый режим движения, снижение эмоциональной напряжённости водителя за счёт удлинения пути от i_1 к i_2 и в сочетании с общепринятыми круговыми кривыми даёт возможность лучшего обёртывания проектной естественной поверхности земли, что уменьшает объём земляных работ и облегчает ландшафтное проектирование.

2. Выявлены особенности расхода топлива при движении автомобилей в потоке. С ростом плотности потока расход топлива снижается до значения, соответствующего уровню загрузки дороги 0,65, а затем существенно возрастает. Значительное (до 23 %) увеличение расхода топлива вызвано неоднородностью потока по скорости (дисперсией скорости). На дорогах V-II технических категорий снижение проектными решениями среднеквадратического отклонения от скорости на 20 % уменьшает расход топлива на 7 %.

Список литературы:

1. Бабков, В.Ф. Дорожные условия и безопасность движения [Текст]: 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 [Текст] / В.К. Курьянов, Е.В. Кондрашова, А.В. Скрыпников; Воронеж. гос. лесотехн. акад. – Воронеж, 2002. – 30 с. – Деп. в ВИНТИ 07.08.02 №1450-B2002.
3. Кондрашова, Е.В. Поиск оптимального варианта лесовозной автомобильной дороги в системе автоматизированного проектирования [Текст] / Е.В. Кондрашова // Вестник Московского государственного университета леса «Лесной вестник», 2009. – № 2. – С. 117-120.
4. Кондрашова, Е.В. Оптимизация проектных решений при вариантном проектировании лесовозных автомобильных дорог и организации движения на них [Текст] / Е.В. Кондрашова // Вестник Московского государственного университета леса «Лесной вестник», 2009. – № 3. – С. 94-99.
5. Кондрашова, Е.В. Определение эффективности транспортной работы лесовозной автомобильной дороги [Текст] / Е.В. Кондрашова // Бюллетень транспортной информации, 2009. – № 9. – С. 25-27.