

УДК 630\*383

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-150-161

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАССЫ  
ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ****А.О. Боровлев<sup>1</sup>, соискатель;** *ResearcherID: [AAL-8641-2021](#),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5431-9944>***А.В. Скрыпников<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.;** *ResearcherID: [AAE-8824-2019](#),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>***В.Г. Козлов<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.;** *ResearcherID: [G-9613-2017](#),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2571-8687>***Т.В. Турикова<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доц.;** *ResearcherID: [P-8991-2019](#),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-310X>***О.Н. Тверитнев<sup>1</sup>, соискатель;** *ResearcherID: [AAE-1352-2021](#),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8183-0393>***В.В. Никитин<sup>4</sup>, канд. техн. наук, доц.;** *ResearcherID: [AAE-9971-2019](#),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5284-8116>*

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет инженерных технологий, просп. Революции, д. 19, г. Воронеж, Россия, 394036; e-mail: borov.borov.ar@yandex.ru, skrypnikovvsafe@mail.ru, tveritneffo@yandex.ru

<sup>2</sup>Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I, ул. Мичурина, д. 1, г. Воронеж, Россия, 394087; e-mail: vya-kozlov@yandex.ru

<sup>3</sup>Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: t.turikova@narfu.ru

<sup>4</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, Россия, 105005; e-mail: box534@mail.ru

**Аннотация.** Осуществление задач, связанных с развитием транспортной сети и лесовозных автомобильных дорог как неотъемлемой ее части, требует исследования закономерностей образования пространственных кривых при сочетании элементов плана и продольного профиля, т. е. рациональное проложение трассы на многие годы определяет ее важнейшие транспортно-эксплуатационные характеристики (скорость, уровень безопасности движения, пропускную способность). Учет зрительного восприятия дороги водителем повысит качество проектных решений, что позволит избежать возникновения аварийных ситуаций в дальнейшем, после введения трассы в эксплуатацию. Снижение скорости перед кажущимися резкими поворотами дороги негативно сказывается на эффективности работы лесовозного автомобильного транспорта, поэтому вид дороги в перспективе должен ориентировать водителя, т. е. быть зрительно ясным, явно меняющимся, обеспечивающим постоянство или плавное снижение скорости транспортного потока. Необходимость удачного пространственного решения дороги при этом повышается. В проектах лесовозных автомобильных дорог в качестве элементов плана трассы встречаются прямые линии, переходные кривые, описываемые в последние годы чаще всего по клотоиде, и круговые кривые. Установлено, что вид дороги в перспективе является зрительно понятным для водителя при условии, что линии, описывающие бровки дорожного полотна и кромки проезжей части, в перспективном изображении изогнуты в том же направлении, что и в плане дороги. Цель работы – определение комплекса количественных показателей (кривизны, радиуса кривой в плане, максимальной кривизны, максимальной скорости изменения кривизны) для оптимизации зрительной плавности и ясности центральных проекций элементарных пространственных и плоских кривых. Приведенный алгоритм обеспечивает возможность составления компьютерной программы для определения названных показателей, что позволит оценить зрительную плавность и ясность центральных проекций элементарных пространственных и плоских кривых на лесовозных автомобильных дорогах.

*Для цитирования:* Боровлев А.О., Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Тюрикова Т.В., Тверитнев О.Н., Никитин В.В. Математическое моделирование трассы лесовозных автомобильных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 150–161. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-150-161

*Ключевые слова:* пространственные кривые, проложение трассы, зрительная ясность, криволинейный участок, лесовозные дороги.

Элементами плана лесовозных автомобильных трасс являются в том числе прямые линии, переходные кривые, описываемые в настоящее время по клотоиде, и круговые кривые [1–3, 8, 9, 11–13, 16–19]. Кривые линии могут быть разделены при анализе перспективных изображений по направлению их изогнутости на левые и правые, а переходные кривые – по их отношению к направлению движения лесовозного подвижного состава на входные и выходные. Продольный профиль, как правило, проектируют, используя горизонтальные и наклонные прямые, вогнутые и выпуклые параболы (или круговые кривые). Обычно применяемые элементы плана и профиля трассы могут образовывать 28 взаимных сочетаний (комбинаций) [4–7]. Таким образом, путем сочетания элементов плана и профиля получаем элементы трассы в пространстве.

Цель работы – определение комплекса количественных показателей (кривизны, радиуса кривой в плане, максимальной кривизны, максимальной скорости изменения кривизны) для оптимизации зрительной плавности и ясности центральных проекций элементарных пространственных и плоских кривых.

Пространственную кривую, графическая модель которой представлена на рис. 1, аналитически можно описать следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x &= x(s); \\ y &= y(s); \\ z &= z(s). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В качестве параметра выступает путь  $s$ , отсчитываемый от точки зрения (ТЗ) водителя лесовоза, взятой за начало правой системы координат  $O$ , главный луч зрения берется за ось  $X$ . Плоскость изображения  $Y_cO_cZ_c$  принята перпендикулярной к оси  $X$ .

Координаты центральной проекции ( $Y_cZ_c$ ) любой из линий, определяющих дорожное полотно (кромки покрытия, бровки, ось), плоскость изображений, которая расположена на расстоянии  $a$  от ТЗ, находятся через систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} y_c &= \frac{ay}{x}; \\ x_c &= \frac{az}{x}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

в которой величины  $x$ ,  $y$  и  $z$ , согласно (1), обозначают уравнения координат  $x(s)$ ,  $y(s)$  и  $z(s)$  пространственной кривой. Следовательно, координаты перспективы пространственной кривой являются функциями одного параметра  $s$ .

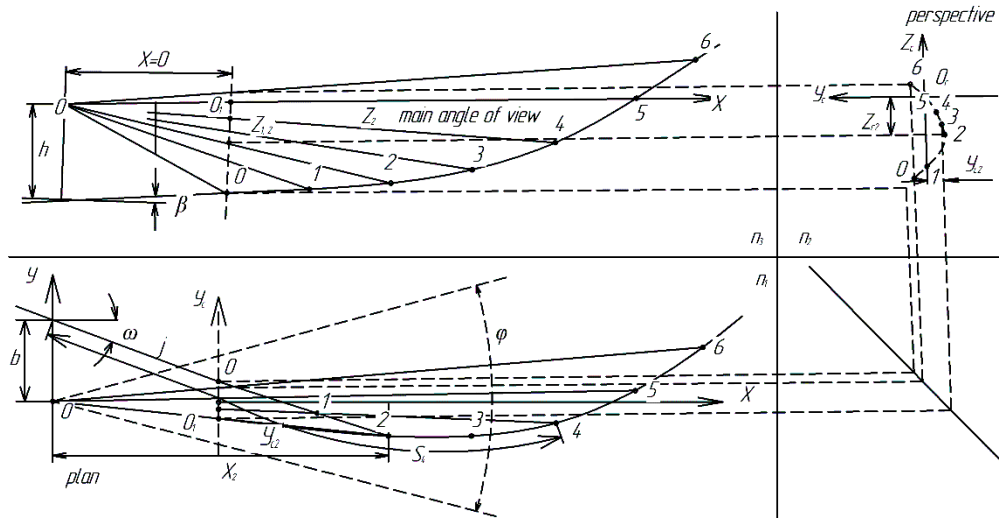


Рис. 1. Схема центрального проецирования пространственной кривой: 1 – горизонтальная плоскость проекции; 2 – фронтальная, 3 – профильная; 0 – расстояние от ТЗ до плоскости изображения  $Y_c O_c Z_c$ ,  $\varphi$  – угол сектора изображения; ( $b$ ,  $h$ ) – координата начала проецируемой линии;  $\beta$ ,  $\omega$  – углы наклона проецируемой линии относительно оси  $X$  в профиле и плане;  $j$  – угловой коэффициент, соответствующий углу  $\omega$

Fig. 1. Diagram of the central projection of the spatial curve: 1 – horizontal projection plane (PP), 2 – frontal PP, 3 – profile PP; 0 – distance from the viewpoint to the image plane  $Y_c O_c Z_c$ ,  $\varphi$  – image sector angle; ( $b$ ,  $h$ ) – coordinate of the beginning of the projected line;  $\beta$ ,  $\omega$  – angles of inclination of the projected line about the  $x$ -axis in the profile and plan;  $j$  – angular coefficient corresponding to the angle  $\omega$

В случае параметрического задания плоской кривой ее изогнутость выражается формулой

$$K_c = \frac{z'_c y''_c - z''_c y'_c}{(y'^2_c + z'^2_c) 3/2}. \quad (3)$$

Значения производных  $y'_c$ ,  $y''_c$ ,  $z'_c$ ,  $z''_c$  получаем, дифференцируя по параметру  $s$  уравнения перспективных координат (2), где

$$\begin{aligned} y'_c &= \left( \frac{ay}{x} \right)' = \frac{a(xy' - yx')}{x^2} = \frac{ap}{x^2}; \\ y''_c &= \left( \frac{ap}{x^2} \right)' = \frac{a(xp' - 2px')}{x^3}; \\ z'_c &= \left( \frac{az}{x} \right)' = \frac{a(xz' - zx')}{x^2} = \frac{aq}{x^2}; \\ z''_c &= \left( \frac{aq}{x^2} \right)' = \frac{a(qx' - 2qx')}{x^3}. \end{aligned} \quad (4)$$

В зависимостях (4) приняты следующие обозначения:

$$xy' - yx' = p; \quad xz' - zx' = q. \quad (5)$$

Производные этих величин по  $s$ :

$$p' = (xy' - yx')' = xy'' - yx''; \quad q' = (xz' - zx')' = xz'' - zx''. \quad (6)$$

Преобразовываем и упрощаем числитель выражения (3):

$$\begin{aligned} y_c''z_c' - y_c'z_c'' &= \frac{a^2(p'x - 2px')q}{x^3x^2} - \frac{a^2p(q'x - 2qx')}{x^2x^3} = \\ &= \frac{a^2(qp'x - 2qpx' - q'px + 2qpx')}{x^5} = \frac{a^2(qp' - pq')}{x^4} = \\ &= \frac{a[(xz' - zx')(xy'' - yx'') - (xy' - yx')(xz'' - zx'')]}{x^4} = \\ &= \frac{a^2[x^2z'y - xzx'y - xyz' + yzx'x - x^2y'z + xyx'z + xzy'x - yzx'x]}{x^4} = \\ &= \frac{a^2[(x^2z'y - y'z) + xy(x'z - z'x) + xz(y'x - x'y) + yz(x'x - x'x)]}{x^4} = \\ &= \frac{a^2[x(z'y - y'z) + y(x'z - z'x) + z(y'x - x'y)]}{x^3}. \end{aligned}$$

Преобразование и упрощение знаменателя выражения (3) дает:

$$\begin{aligned} (y_c'^2 + z_c'^2) \frac{3}{2} &= \left[ \frac{a(xy' - yx')}{x^2} \right]^2 + \left[ \frac{a(xz' - zx')}{x^2} \right]^2 = \\ &= \frac{a^3[(xy' - yx')^2 + (xz' - zx')^2]}{x^6}. \end{aligned}$$

Следовательно, кривизна

$$K_c = \frac{x^3[x(z'y - y'z) + y(x'z - z'x) + z(y'x - x'y)]}{a[(xy' - yx')^2 + (xz' - zx')^2]^{3/2}}. \quad (7)$$

Обозначим

$$\begin{aligned} z'y'' - y''z' &= u; \\ x'z'' - z'x'' &= v; \\ y'x'' - x'y'' &= w. \end{aligned} \quad (8)$$

Формулу (7) можно представить в виде:

$$K_c = \frac{x^3(xu + yv + zw)}{a(p^2 + q^2)^{3/2}}. \quad (9)$$

Обозначив далее

$$\begin{aligned} xu + yv + zw &= U; \\ p^2 + q^2 &= V, \end{aligned} \quad (10)$$

получаем

$$K_c = \frac{x^3U}{aV^{3/2}}. \quad (11)$$

Плоскость изображения обычно принимают на расстоянии 1 м, поэтому в дальнейшем  $a = 1$ .

При контроле зрительной ясности пространственных кривых важно определить направление изогнутости их центральных проекций. Если центр кривизны лежит на положительной полупрямой нормали, то кривизна считается положительной полупрямой нормали, если на отрицательной – кривизна отрицательная [10, 14–17, 19].

В случае фиксированного положения ТЗ над полотном дороги направление изогнутости можно определить другим, более простым способом. Если центр кривизны находится влево от центральной проекции кривой, то кривизна, высчитанная по формуле (7), положительная, если центр кривизны справа – отрицательная.

Скорость изменения кривизны выражается 1-й производной от кривизны  $K'_c$  по параметру  $s$ . Исходя из формулы (11), получаем:

$$\frac{dK_c}{ds} = K'_c = \frac{x^2(3UVx' + UVx - 1,5UV'x)}{V^{5/2}}. \quad (12)$$

Зависимость (12) можно представить и в виде

$$K'_c = K_c \left[ \frac{3x'}{x} + \frac{U'}{U} - \frac{1,5V'}{V} \right]. \quad (13)$$

В формулах (12) и (13)  $U'$  и  $V'$  являются производными функций  $U(s)$  и  $V(s)$ :

$$U' = x'y + y'v + z'w + xu' + yv' + zw'; \quad (14)$$

$$V' = 2(pp' + qq');$$

$$u' = z'y''' - y'z''';$$

$$v' = x'z''' - z'x''';$$

$$w' = y'x''' - x'y'''. \quad (15)$$

Алгоритм определения  $K_c$  и  $K'_c$  следующий.

Сначала определяются производные:

$$x = x(s); x' = x'(s); x'' = x''(s); x''' = x'''(s);$$

$$y = y(s); y' = y'(s); y'' = y''(s); y''' = y'''(s);$$

$$z = z(s); z' = z'(s); z'' = z''(s); z''' = z'''(s).$$

$x(s)$ ,  $y(s)$ ,  $z(s)$  представляют собой уравнения пространственной линии. Штрихами обозначены производные по  $s$ .

Затем находим:

$$p = xy' - yx'; \quad p' = xy'' - yx''';$$

$$q = xy'' - yx'''; \quad q' = xz'' - zx''';$$

$$u = z'y'' - y'z''; \quad u' = z'y''' - y'z''';$$

$$v = x'z'' - z'x''; \quad v' = x'z''' - z'x''';$$

$$w = y'x'' - x'y''; \quad w' = y'x''' - x'y'''. \quad (15)$$

А также:

$$U = xu + yv + zw;$$

$$V = p^2 + q^2;$$

$$U' = xu' + yv' + zw' + x'u + y'v + z'w;$$

$$V' = 2(pp' + qq').$$

Тогда

$$K_c = \frac{x^3U}{V^{3/2}}; \quad K'_c = K_c \left[ \frac{3x'}{x} + \frac{U'}{U} - \frac{1,5V'}{V} \right].$$

При формулировке задачи исследований предполагали, что наибольшая кривизна  $K_{с,н}$  может быть одним из показателей зрительной плавности дороги. При этом под наибольшей кривизной понимается наибольшее ее значение на исследуемом криволинейном участке. Для доказательства возможности использования показателя  $K_{с,н}$  установим связь между зрительной плавностью кромок проезжей части и соответствующими им графиками кривизны.

В качестве примера взят типичный участок трассы, состоящий из трех элементов: прямой, пространственной кривой и кривой (рис. 2). На рис. 3 представлено перспективное изображение этой части дороги.

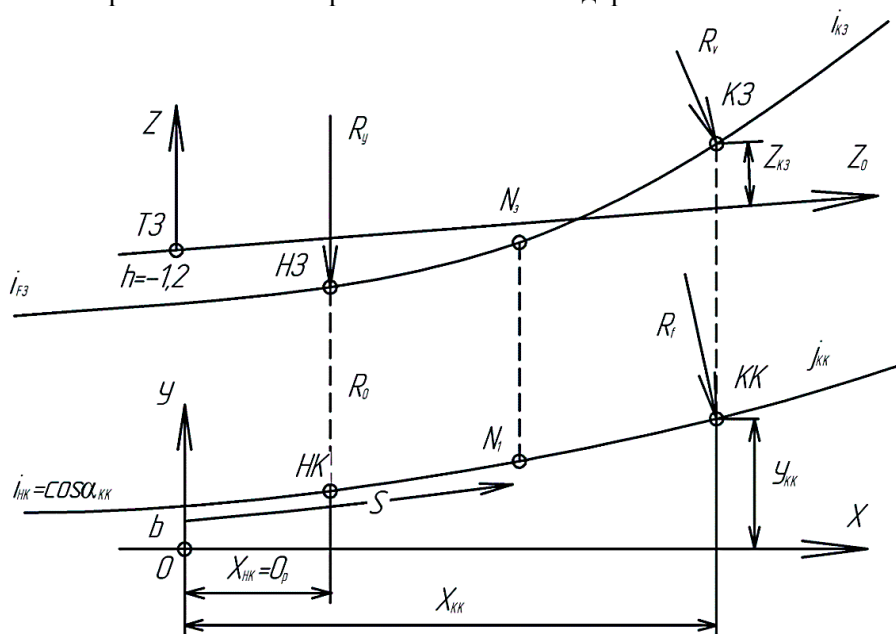


Рис. 2. Параллельные проекции пространственной линии (оси дороги) на профильной и горизонтальной плоскостях

Fig. 2. Parallel projections of the spatial line (road axis) on the profile and horizontal planes

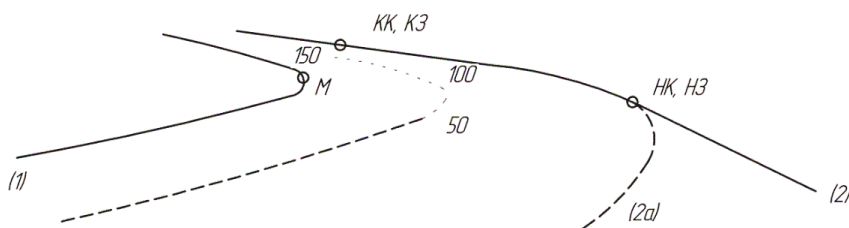


Рис. 3. Перспективное изображение участка дороги, ось которого показана на рис. 2: НК, М, КК – точки наибольшей кривизны

Fig. 3. Perspective image of the road section, the axis of which is shown in fig. 2 НК, М, КК – points of greatest curvature

При построении математических моделей участков трассы в дальнейшем будем использовать следующие обозначения:

$b, h$  – прямоугольные координаты оцениваемой линии в плоскости  $YOZ$ ,  $m$  ( $b$  – ширина ТЗ;  $h$  – высота ТЗ (уровень глаз водителя) относительно касательной к началу профильной проекции оцениваемой пространственной кривой);

$D_p, D_v$  – расстояние от плоскости  $YOZ$  соответственно до точек начала кривых в плане НК и профиле НЗ, м;  
 $i$  – продольный уклон трассы;  
 $R_p$  – радиус кривой в плане, м;  
 $R_v$  – параметр параболы в продольном профиле, м;  
 $s$  – параметр (горизонтальная проекция пути с началом в плоскости  $YOZ$ ), м.

Если принять ось  $X$  касательной к  $t_1$ , началу кривой в плане, то участок трассы, показанный на рис. 2, можно задать по интервалам следующими системами уравнений:

$$\begin{aligned} \text{при} \quad & 0 < s < s_{\text{НК}} \\ & \left. \begin{aligned} x &= s; \\ y &= b; \\ z &= h; \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{при} \quad & s_{\text{НК}} \leq s \leq s_{\text{КК}} \\ & \left. \begin{aligned} x &= D_p + R_p \sin \alpha \\ y &= b + R_p (1 - \cos \alpha) \\ z &= h + is + \frac{(s - D_v)^2}{2R_v} \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{при} \quad & s_{\text{КК}} \leq s \\ & \left. \begin{aligned} x &= x_{\text{КК}} + (s - s_{\text{КК}}) \cos \alpha_{\text{КК}} \\ y &= y_{\text{КК}} + (s - s_{\text{КК}}) \sin \alpha_{\text{КК}} \\ z &= z_{\text{КК}} + (s - s_{\text{КК}}) \sin \beta_{\text{КК}} \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

где  $\alpha$  – угол поворота трассы в плане, рад,  $\alpha = \frac{s - D_p}{R_p}$ ;  $\alpha_{\text{КК}}$  – угол поворота трассы

в точке КК, рад,  $\alpha_{\text{КК}} = \frac{s_{\text{КК}} - D_p}{R_p}$ ;  $\beta_{\text{КЗ}}$  – угол поворота трассы в профиле в точке

КЗ, рад,  $\beta_{\text{КЗ}} = \frac{s_{\text{КЗ}} - D_v}{R_v}$ .

В таблице приведены результаты расчета изгиба по формуле (7) для кривой с параметрами  $R_p = 500$  м;  $R_v = 5000$  м. Координаты  $b_{\text{л,кр}} = 5,0$  м;  $b_{\text{п,кр}} = -2,0$  м;  $h = -1,2$  м.  $D_p = D_v = 60$  м. Шаг прироста аргумента  $\Delta S = 10$  м.

Координаты графиков кривизны  $K_c(s)$

$s$	0	10	20	30	40	50	60	60	70	80
$b_{\text{л,кр}}$		–	–	–	–	–	0	5,4	19,2	93,8
$b_{\text{п,кр}}$		0,38	4,87	34,5	128,0	66,0	34,0	34,1	15,2	8,1
$s$	90	100,0	110,0	120,0	130,0	140,0	150,0	160,0	160,0	200,0
$b_{\text{л,кр}}$	488,0	275,3	67,5	24,2	11,4	6,3	3,9	2,6	0	0
$b_{\text{п,кр}}$	4,9	3,1	2,2	1,6	0,9	0,8	0,7	0,6	0	0

По этим данным вычерчены графики кривизны левой и правой кромок проезжей части (рис. 4).

В целях выявления связи между зрительной плавностью кромок трассы и соответствующими графиками кривизны обратимся к рис. 3 и 4. Видно, что внутренняя кромка (линия 1) является менее плавной, чем внешняя (линия 2). Наибольшая изогнутость последней оказывается в интервале НК–КК. Это показывает и ее график кривизны  $K_{c,1}(s)$ . Точку наибольшей изогнутости 2 определить на глаз трудно, но по графику  $K_{c,2}(s)$  видно, что ею является точка НК (точка максимальной изогнутости линии 2 в данном случае находится в интервале О–НК на не использованной для закругления угла поворота части кривизны).

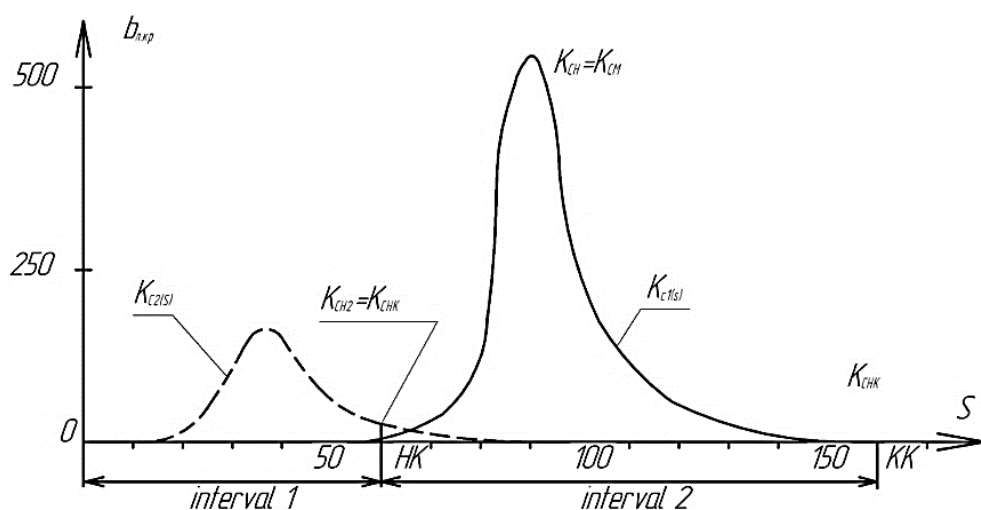


Рис. 4. Графики кривизны центральных проекций левой (1) и правой (2) кромок проезжей части

Fig. 4. Graphs of the curvature of the central projections of the left (1) and right (2) edges of the roadway

Таким образом, из анализа можно сделать следующие выводы:

линия 1 наиболее изогнута в точке М, т. е.  $K_{c,н,1} = K_{c,м}$ ; линия 2 – в точке НК, т. е.  $K_{c,н,2} = K_{c,нк}$ ;  $K_{c,н,2} < K_{c,н,1}$ ;

линия 2 по качественной оценке плавнее линии 1; более плавной линии 2 соответствует меньшее значение наибольшей кривизны  $K_{c,н,2}$ .

Это свидетельствует о том, что максимальная изогнутость  $K_{c,м}$ , находящаяся в точке М вершин кривых, может быть использована в качестве количественного показателя зрительной плавности.

Частные значения кривизны  $K_{c,м}$ ,  $K_{c,нк}$  и  $K_{c,кк}$  в дальнейшем рассматриваются отдельно, поскольку имеют самостоятельное значение при количественной оценке зрительной плавности пространственных кривых.



### Заключение

На основе описательной характеристики дано математическое определение плавной линии. Под этим термином понимается криволинейный участок трассы 2-го и более высоких порядков гладкости. Показана разница между аналитически фиксируемой и зрительно воспринимаемой плавностью.

Установлено, что видимость дороги в перспективе правильно ориентирует водителя автомобиля при условии, что линии, описывающие бровки дорожного полотна и кромки проезжей части, в пространственном изображении изогнуты в том же направлении, что и в плане дороги. На этом основании сформулировано условие геометрического родства вида лесовозной автомобильной дороги в пространственной перспективе и ее плана. Оно позволяет аналитически проверить зрительную ясность криволинейных участков.

Выявлен комплекс количественных показателей: кривизна, радиус кривой в плане, максимальная кривизна и максимальная скорость изменения кривизны, – которые достаточно полно характеризуют зрительную плавность и ясность центральных проекций элементарных пространственных и плоских кривых.

В случаях, когда точка максимальной кривизны находится за пределами зоны видимости, за показатель плавности принимается изогнутость в точке, расположенной на границе видимости.

Кривизна и радиус кривой в плане служат для проверки зрительной ясности, а показатели частных значений кривизны – для оценки степени видимой плавности кривых.

Приведенный алгоритм позволит в будущем создать компьютерную программу для определения названных показателей и поможет быстро и качественно оценить как зрительную плавность, так и ясность кривых лесовозных автомобильных дорог.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабков В.Ф. Дорожные условия и безопасность движения. М.: Транспорт, 1993. 271 с.  
Babkov V.F. *Road Conditions and Traffic Safety*. Moscow, Transport Publ., 1993. 271 p.
2. Бирюля А.К. Эксплуатация автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1966. 326 с.  
Birulya A.K. *Operation of Roads*. Moscow, Transport Publ., 1966. 326 p.
3. Гулевский В.А., Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Ломакин Д.В., Микова Е.Ю. Экспериментальная оценка сцепных качеств и ровности покрытий при различных состояниях автомобильных дорог и погодных условиях // Вестн. Воронеж. гос. аграр. ун-та. 2018. № 1(56). С. 112–118.  
Gulevsky V.A., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Lomakin D.V., Mikova E.Yu. Experimental Evaluation of Traction Properties and Road Evenness in Various Road and Weather Conditions. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Vestnik of Voronezh State Agrarian University], 2018, no. 1(56), pp. 112–118. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2018.1.112>
4. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. М.: Транспорт, 2012. 424 с.  
Dryu D. *Theory of Traffic Flows and Their Management*. Moscow, Transport Publ., 2012. 424 p.

5. Иванов В.Н., Ерохов В.Н. Влияние параметров автомобильных дорог на расход топлива // Автомобильные дороги. 2014. № 8. С. 10–13.

Ivanov V.N., Erokhov V.N. Influence of Parameters of Roads on Fuel Consumption. *Avtomobil'nyye dorogi*, 2014, no. 8, pp. 10–13.

6. Калужский Я.А., Бегма И.В., Кисляков В.М., Филиппов В.В. Применение теории массового обслуживания в проектировании автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1969. 136 с.

Kaluzhskiy Ya.A., Begma I.V., Kislyakov V.M., Filippov V.V. *Application of Queueing Theory in the Design of Roads*. Moscow, Transport Publ., 1969. 136 p.

7. Козлов В.Г. Методы, модели и алгоритмы проектирования лесовозных автомобильных дорог с учетом влияния климата и погоды на условия движения: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2017. 406 с.

Kozlov V.G. *Methods, Models and Algorithms for Designing Timber Roads Considering the Impact of Climate and Weather on Traffic Conditions*: Dr. Eng. Sci. Diss. Arkhangel'sk, 2017. 406 p.

8. Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Микова Е.Ю., Могутнов Р.В., Чуриков Е.В. Формирование модели проектирования системы «дорожные условия – транспортные потоки» и пути ее реализации // Лесотехн. журн. 2018. Т. 8, № 1(29). С. 100–111.

Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Mikova E.Yu., Mogutnov R.V., Chirikov E.V. Formation of the Model of Designing the System “Road Conditions – Transport Flows” and Ways of Its Implementation. *Lesotekhnicheskiiy zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2018, vol. 8, no. 1(29), pp. 100–111. DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5ab0dfbe6ece23.91630316](https://doi.org/10.12737/article_5ab0dfbe6ece23.91630316)

9. Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Могутнов Р.В., Микова Е.Ю., Зеликова Ю.А. Комплексные экспериментальные исследования изменения параметров и характеристик дорожных условий, транспортных потоков и режимов движения под влиянием климата и погоды // Лесотехн. журн. 2018. Т. 8, № 2(30). С. 156–168.

Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Mogutnov R.V., Mikova E.Yu., Zelikova Yu.A. Comprehensive Experimental Research of Changing Parameters and Characteristics of Road Conditions, Transport Flows and Motion Modes under Influence of Climate and Weather. *Lesotekhnicheskiiy zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2018, vol. 8, no. 2(30), pp. 156–168. DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5b240611858af4.37544962](https://doi.org/10.12737/article_5b240611858af4.37544962)

10. Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Чирков Е.В., Поставничий С.А., Могутнов Р.В. Теоретические основы и методы математического моделирования лесовозных автомобильных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 6. С. 117–127.

Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Chirkov E.V., Postavnichiy S.A., Mogutnov R.V. Theoretical Foundations and Methods of Mathematical Modeling of Forestry Roads. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 6, pp. 117–127. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.6.117>

11. Кондрашова Е.В., Скворцова Т.В. Совершенствование организации дорожного движения в транспортных системах лесного комплекса // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 3-2(33). С. 272–275.

Kondrashova E.V., Skvortsova T.V. Improvement of Road Traffic Organization in the Forest Complex Transport Systems. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii* [Automation and Remote Control], 2008, no. 3-2(33), pp. 272–275.

12. Сильянов В.В., Ситников Ю.М. Расчет скоростей движения при проектировании автомобильных дорог // Тр. МАДИ. 1974. Вып. 72. С. 47–66.

Silyanov V.V., Sitnikov Yu.M. Calculation of Traffic Speeds in the Design of Roads. *Trudy MADI*, 1974, iss. 72, pp. 47–66.

13. Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Ломакин Д.В., Микова Е.Ю. Оценка влияния на скорость движения постоянных параметров плана и профиля при различных состояниях поверхности дороги // Лесн. вестн. 2017. Т. 21, № 6. С. 43–49.

Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Lomakin D.V., Mikova E.Yu. Assessment of the Impact on the Speed of the Constant Parameters of the Plan and Profile in the Various States of the Road Surface. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2017, vol. 21, no. 6, pp. 43–49. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2017-6-43-49>

14. Хомяк Я.В. Проектирование сетей автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1983. 207 с.

Khomyak Ya.V. *Designing Road Networks*. Moscow, Transport Publ., 1983. 207 p.

15. Чернышова Е.В. Алгоритм решения задачи оптимального трассирования лесовозной автомобильной дороги на неоднородной местности // Вестн. ВГУИТ. 2017. Т. 79, № 2(72). С. 113–120.

Chernyshova E.V. Algorithm for Solving the Problem of Optimal Tracing of a Timber Road on a Non-Uniform Terrain. *Vestnik Voronežskogo gosudarstvennogo universiteta inženernyh tekhnologij* [Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2017, vol. 79, no. 2(72), pp. 113–120. DOI: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-2-113-120>

16. Berestnev O., Soliterman Y., Goman A. Development of Scientific Bases of Forecasting and Reliability Increase of Mechanisms and Machines – One of the Key Problems of Engineering Science. *International Symposium on History of Machines and Mechanisms Proceedings HMM 2000*. Ed. by M. Ceccarelli. Dordrecht, Springer, 2000, pp. 325–332. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-015-9554-4\\_37](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9554-4_37)

17. Kozlov V.G., Gulevsky V.A., Skrypnikov A.V., Logoyda V.S., Menzhulova A.S. Method of Individual Forecasting of Technical State of Logging Machines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327, iss. 4, art. 042056. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042056>

18. Mogutnov R.V., Tikhomirov P.V., Skrypnikov A.V., Zavrzhnov A.I., Kozlov V.G., Belyaev A.N., Zelikov V.A., Mikheyev N.V. Designing Mathematical Models of Geometric and Technical Parameters for Modern Road-Building Machines Versus the Main Parameter of the System. *Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” Dedicated to the 85th Anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Press, 2019, pp. 823–827. DOI: <https://doi.org/10.2991/isees-19.2019.165>

19. Skrypnikov A., Dorokhin S., Kozlov V.G., Chernyshova E.V. Mathematical Model of Statistical Identification of Car Transport Informational Provision. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12, no. 2, pp. 511–515.

## MATHEMATICAL MODELING OF THE ROUTE OF LOGGING ROADS

**Anton O. Borovlev**<sup>1</sup>, External PhD Student; ResearcherID: [AAL-8641-2021](https://orcid.org/0000-0002-5431-9944),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5431-9944>

**Alexey V. Skrypnikov**<sup>1</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAE-8824-2019](https://orcid.org/0000-0003-1073-9151),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>

**Vyacheslav G. Kozlov**<sup>2</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [G-9613-2017](https://orcid.org/0000-0003-2571-8687),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2571-8687>

**Tatyana V. Tyurikova**<sup>3</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [P-8991-2019](https://orcid.org/0000-0002-3592-310X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-310X>

**Oleg N. Tveritnev**<sup>4</sup>, External PhD Student; ResearcherID: [AAE-1352-2021](https://orcid.org/0000-0002-8183-0393),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8183-0393>

**Vladimir V. Nikitin**<sup>4</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAE-9971-2019](https://orcid.org/0000-0001-5284-8116), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5284-8116>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Engineering Technologies, prosp. Revolyutsii, 19, Voronezh, 394036, Russian Federation; e-mail: borov.borov.ar@yandex.ru, skrypnikovvsafe@mail.ru, tveritneffo@yandex.ru

<sup>2</sup>Voronezh State Agricultural University named after Emperor Peter the Great, ul. Michurina, 1, Voronezh, 394087, Russian Federation; e-mail: vya-kozlov@yandex.ru

<sup>3</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: t.turikova@narfu.ru

<sup>4</sup>Bauman Moscow State Technical University (National Research University), ul. 2-ya Baumanskaya, 5, str. 1, Moscow, 105005, Russian Federation; e-mail: box534@mail.ru

**Abstract.** The implementation of tasks related to the development of the transportation network as a whole and logging roads as an integral part of it requires scientifically based theoretical studies of the patterns of formation of spatial curves when combining elements of the plan and the longitudinal profile, since the rational laying of the route for many years determines its most important transport and operational characteristics (speed, traffic safety, traffic capacity). Consideration of the visual perception of the road by the driver will improve the quality of design decisions, which will allow to avoid emergencies in the future after setting the route into service. On the other hand, a decrease in speed before seemingly sharp turns of the road affects the efficiency of logging road transport. Therefore, the view of the road ahead should strongly orient the driver, i.e. be visually clear and clearly changing, ensuring the constancy or smooth reduction of the traffic flow mode. At the same time, the need for a successful spatial solution of the road increases. In the designs of logging roads, straight lines, transition curves, described in recent years most often according to the clothoid, and circular curves are found as elements of the route plan. It is found that the road view in perspective correctly orients the driver of the car, i.e. it is visually clear, provided that the lines describing the edges of the roadway and the edges of the roadway in the perspective image are curved in the same direction as in the road plan. The purpose of the work is to determine a set of quantitative indicators (curvature, radius of the curve in the plan, maximum curvature, maximum rate of change of curvature) for optimization of the visual smoothness and clarity of the central projections of elementary spatial and plane curves. The performed studies allow us to fully characterize the visual smoothness and clarity of the central projections of elementary spatial and plane curves. The above algorithm makes it possible to compile a computer program to determine the mentioned indicators. The indicators determined by this algorithm allow us to evaluate both the visual smoothness and clarity of curves on logging roads.

**For citation:** Borovlev A.O., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Tyurikova T.V., Tveritnev O.N., Nikitin V.V. Mathematical Modeling of the Route of Logging Roads. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 150–161. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-150-161.

**Keywords:** spatial curves, route layout, visual clarity, curved section, logging roads.