Лесоинженерное дело

УДК 630.383

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНФОРМАЦИОННО-ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

П.В. Тихомиров, В.В. Швецова, И.А. Саранов, Р.С. Сапелкин, А.Н. Брюховецкий, Е.Д. Щербаков

Статья посвящена исследованиям по определению детальности разбивки и контролю возведения дорожных закруглений различными методами, в данном случае при помощи информационно – интеллектуальных систем. Применяемые на практике разбивочные интервалы обеспечивают иногда либо недостаточную, либо излишнюю детальность разбивки. Так, недостаточная детальность приводит к неточностям, отклонениям от проектных геометрических параметров закруглений, что ведет к ухудшению эксплуатационного качества лесовозной автомобильной дороги, технико - экономических показателей и безопасности движения. Излишняя детальность приводит к снижению производительности разбивочно – контрольных работ, задержке поточно – строительного процесса, неоправданно большому количеству разбивочных знаков, неизбежно уничтожаемых, подлежащих восстановлению и мешающих работе дорожно-строительных машин и механизмов. Таким образом, в данной статье приводятся результаты исследований по определению оптимальных интервалов детальной разбивки и контроля строительства дорожных закруглений переменной и постоянной кривизны.

Ключевые слова: *стереофотограмметрия, стереоскопическая модель, кривая, геодезический метод.*

Введение

При обследовании лесовозных автомобильных дорог с целью определения геометрических элементов дороги выполняется комплекс изыскательских работ с использованием методов измерений [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Весь этот комплекс изысканий в настоящее время выполняют непосредственно в полевых условиях, что в период реконструкции дорог, является довольно трудоемким процессом и зачастую небезопасным для исполнителей. Вопросам обследования лесовозных автомобильных дорог для определения геометрических элементов дорог посвящены большое количество исследований отечественных ученых. [10, 11, 12].

Анализ существующих инструментальных работ показывает, что наряду со своими преимуществами они имеют существенные недостатки, связанные в основном с недостаточной точностью измерений, довольно продолжительными периодом выполнения полевых работ и требующие большого количества исполнителей. Предлагается обследование лесовозных автомобильных дорог, подлежащих реконструкции, выполнять по материалам наземной фото-видео фиксации. Применение этого метода при определении геометрических элементов лесовозных автомобильных дорог позволит в значительной степени автоматизировать изыскательские работы, перенести трудоемкие измерительные операции в камеральный процесс и одновременно с этим существенно повысить качество измерений. Материалы наземной фото-видео фиксации позволяют непосредственно в камеральных условиях по стереоскопической модели местности выполнять измерения ширины земляного полотна дороги, радиусов вертикальных и горизонтальных кривых, углов наклона и уклонов линий, определение положение главных точек кривых. Достоинства метода наземной стереофограмметрии в значительной степени проявляются еще больше с применением современных компьютерных технологий.

Вопросы применения наземной стереофотограмметрической съемки для целей определения геометрических элементов лесовозных автомобильных дорог являются актуальными в настоящее время по той причине, что от знания точных и достоверных данных о дороге зависит успех ее дальнейшего проектирования. Особенно остро эти вопросы стоят при выполнении работ по обследованию лесовозных автомобильных дорог для целей их реконструкции, в связи с тем, что отсутствуют разработки по оценке

точности при определении геометрических элементов лесовозных автомобильных дорог. Поэтому при обследовании автомобильных дорог для целей определения их геометрических элементов предлагается метод наземной стереофотограмметрии, позволяющий устранить вышеперечисленные недостатки геодезических методов измерений, так как дает возможность получить достоверную информацию о дороге в результате применения современных компьютерных технологий.

Материалы и методы

Определение ширины земляного полотна дороги (проезжей части, обочин и т. д) связано с линейными измерениями, тогда для нормального случая наземной фото-видео фиксации зависимость по определению линейных параметров лесовозной автомобильной дороги с использованием стереоскопической модели местности будет:

$$L_{i,i+1} = \frac{в_ф}{p_i \cdot p_{i+1}} \cdot \sqrt{(x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1})^2 + f_k^2 \cdot (p_i - p_{i+1})^2} \quad (1)$$

где $L_{i,i+1}$ – длина измеряемой линии (i, i+1)

x_{1i}, x_{1i+1} – координаты точек i и i+1, измеренные на левом снимке;

p_i, p_{i+1} – продольные параллаксы i и i+1.

Контроль измерения величин $L_{i,i+1}$ можно выполнить по следующим зависимостям:

$$L'_{i,i+1} = \frac{в_ф \cdot (x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i+1} \cdot p_i)}{p_i \cdot p_{i+1} \cdot Cos\alpha^0_{i,i+1}} \quad (2)$$

и

$$L''_{i,i+1} = \frac{в_ф \cdot (p_i - p_{i+1}) \cdot f_k}{p_i \cdot p_{i+1} \cdot Sin\alpha^0_{i,i+1}} \quad (3)$$

где $\alpha^0_{i,i+1}$ – дирекционный угол измеряемой длины линии.

Величину $\alpha^0_{i,i+1}$ можно получить по формуле:

$$tg\alpha^0_{i,i+1} = \frac{f_k \cdot (p_i - p_{i+1})}{x_{1i+1} \cdot p_i - p_{i+1} \cdot x_{1i}} \quad (4)$$

откуда $\alpha^0_{i,i+1}$ будет равен:

$$\alpha^0_{i,i+1} = arctg\left[\frac{f_k \cdot (p_i - p_{i+1})}{x_{1i+1} \cdot p_i - p_{i+1} \cdot x_{1i}}\right] \quad (5)$$

Подставляя в формулы (45) и (46) вместо $\alpha^0_{i,i+1}$ его значение из (48), получим в окончательном виде зависимости для определения $L'_{i,i+1}$ и $L''_{i,i+1}$, которые будут иметь вид:

$$L'_{i,i+1} = \frac{в_ф \cdot (p_i - p_{i+1}) \cdot f_k}{p_i \cdot p_{i+1} \cdot Cos\left[arctg\frac{f_k \cdot (p_i - p_{i+1})}{x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1}}\right]} \quad (6)$$

и

$$L''_{i,i+1} = \frac{в_ф \cdot (p_i - p_{i+1}) \cdot f_k}{p_i \cdot p_{i+1} \cdot Sin\left[arctg\frac{f_k \cdot (p_i - p_{i+1})}{x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1}}\right]} \quad (7)$$

Окончательное значение измеряемой величины $L_{i,i+1}$ будет равно среднему арифметическому из определений $L'_{i,i+1}$ и $L''_{i,i+1}$. Оценку точности выполненных измерений $L_{i,i+1}$ с использованием стереоскопической модели местности по материалам наземной стереофотограмметрии можно сделать по формуле (56).

Одним из основных элементов кривых лесовозных автомобильных дорог является их радиус R. При обследовании закруглений дорог с целью их реконструкции очень важным являются вопросы определения радиуса кривых. В связи с тем, что на существующей дороге непосредственное определение радиусов кривых (горизонтальных и вертикальных) вызывает значительные затруднения, а в большинстве случаев является опасным для исполнителей видом работ, то возникает задача по использованию косвенных методов измерений для отыскания R. От значений радиусов (горизонтальных и вертикальных) кривых лесовозных автомобильных дорог, а также от величин достаточной точности его определения, зависит выбор проектных решений при реконструкции закруглений лесовозных автомобильных дорог, а также разработка мер по их эффективной эксплуатации.

Радиус горизонтальных кривых лесовозных автомобильных дорог по материалам наземной стереофотограмметрии можно получить по следующей формуле (рисунок 1):

$$R_i^r = \frac{a}{2Sin\alpha} \quad (8)$$

где R^r – радиус горизонтальной кривой;
a – хорда СВ;
α – горизонтальный угол, образованный хордами АВ и АС.

В формуле (8) неизвестными параметрами являются величины а и α, которые можно получить по материалам наземной стереофотограмметрии. Так, длина хорды СВ и равная, а для нормального случая съемки (рисунок 1) будет равна:

$$a = \frac{в_ф\sqrt{(x_{1i+2}\cdot p_{i+1} - x_{1i+1}\cdot p_{i+2})^2 + f_k^2\cdot(p_{i+1}-p_{i+2})^2}}{p_{i+1}\cdot p_{i+2}} \quad (9)$$

где x_{1i+1}, x_{1i+2} – координаты точек $i+1$ и $i+2$ кромок покрытия, измеренные на левом снимке;
p_{i+1}, p_{i+2} – продольные параллаксы точек и кромок покрытия.

Для определения величины угла α воспользуемся известной из аналитической геометрии формулой:

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cdot Cos\,\alpha \quad (10)$$

где b – хорда АС;
с – хорда АВ.

В формуле величины хорд АС и АВ являются неизвестными, тогда применительно к нормальному

$$c = \frac{в_ф\sqrt{(x_{1i+2}\cdot p_i - x_{1i}\cdot p_{i+2})^2 + f_k(p_i - p_{i+2})^2}}{p_i\cdot p_{i+2}} \quad (11)$$

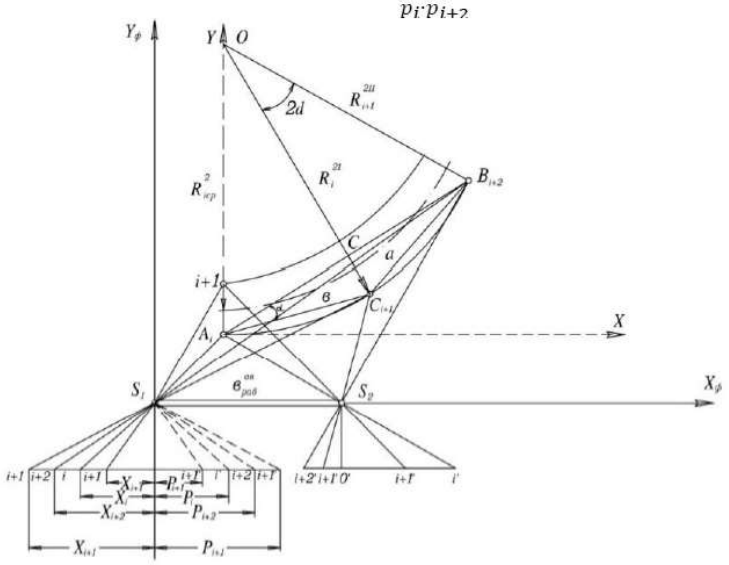

Рис. 1. Определение радиусов горизонтальных кривых методом наземной стереофотограмметрии

$$b = \frac{в_ф\sqrt{(x_{1i+2}\cdot p_i - x_{1i}\cdot p_{i+1})^2 + f_k^2\cdot(p_i - p_{i+1})^2}}{p_i\cdot p_{i+1}} \quad (12)$$

где $x_{1i,i+1,i+2}$ – координаты точек, измеренные по кромке покрытия.

Подставляя в формулу (10) величины хорд АС и АВ, полученных соответственно по формулам (11) и (12), найдем значение угла α, который равен:

$$\alpha = arctg\left(\frac{b^2+c^2-a^2}{2bc}\right) \quad (13)$$

Радиус горизонтальной кривой дороги на основании формулы (8) после подстановки в нее вместо а из (9), а вместо α формулы (13), будем иметь:

$$R_i^r = \frac{в_ф\sqrt{(x_{1i+2}\cdot p_{i+1} - x_{1i+1}\cdot p_{i+2})^2 + f_k^2\cdot(p_{i+1}-p_{i+2})}}{2p_{i+1}\cdot p_{i+2}\cdot Sin[\arccos\left(\frac{b^2+c^2-a^2}{2bc}\right)]} \quad (14)$$

Определять величину R_i^r можно как по внутренней, так и по внешней кромкам покрытия, целесообразно измерять его дважды (один раз по внутренней $R_i^{r\prime\prime}$ и по внешней $R_i^{r\prime}$), а окончательное получать горизонтальный радиус кривой как среднее арифметическое из этих определений ($R_{i\text{ср}}^r$).

Выполним оценку точности определения радиусов горизонтальных кривых лесовозных автомобильных дорог геодезическим методом и методом наземной стереофотограмметрии. С этой целью продифференцируем зависимость (8) по параметрам а и α, тогда получим:

$$\partial R = \frac{a}{2Sin\alpha} \cdot (\frac{\partial a}{a} \cdot \frac{\partial \alpha}{tg\alpha \cdot p'}) \quad (15)$$

В формуле (15), перейдя от дифференциалов к квадратам средних квадратических погрешностей, будем иметь:

$$m_R^2 = R^2[(\frac{ma}{a})^2 + (\frac{m\alpha}{tg\alpha \cdot p'})^2] \quad (16)$$

На основании (16) средняя квадратическая погрешность определения радиуса кривой будет:

$$m_R = R\sqrt{(\frac{m_a}{a})^2 + (\frac{m_\alpha}{tg\alpha \cdot p'})^2} \quad (17)$$

где m_a – средняя квадратическая погрешность измерения хорды а;
m_α - средняя квадратическая погрешность измерения угла α;
p' - величина радиана в минутах.

Анализ полученной зависимости (17) показывает, что точность определения R будет в основном зависеть от его длины и а. Принимая во внимание, что в наземной стереофотограмметрии угол α не измеряют, а вычисляют на основании косвенных измерений, и подставив в (17) вместо m_a из (56), будем иметь:

$$m_R = \frac{R \cdot Y_{max}^2 \cdot m_p}{в_ф \cdot f_k^2 \cdot a} \cdot \sqrt{2(x_1^2 Cos^2\Psi + f_k^2 \cdot Sin^2\Psi)} \quad (18)$$

В формуле (78) величина $\frac{Y_{max}^2 \cdot m_p}{в_ф \cdot f_k^2}$ равна m_y, тогда можно записать:

$$m_R = \frac{R \cdot m_y}{f_k \cdot a} \cdot \sqrt{2(x_1^2 Cos^2\Psi + f_k^2 \cdot Sin^2\Psi)} \quad (19)$$

В случае, если базис фотографирования расположен параллельно измеряемой линии а при Ψ=00, формула (19) примет следующий вид:

$$m_R = \frac{R \cdot m_y \cdot x_1 \cdot \sqrt{2}}{f_k \cdot a} \quad (20)$$

В случае, если $в_ф$ расположен перпендикулярно измеряемой линии а, при $\Psi^0 = 90^0$, формула (19) будет:

$$m_R = \frac{R \cdot m_y \cdot \sqrt{2}}{a} \quad (21)$$

В общем случае, при $\Psi^0 = 45^0$ будем иметь формулу для расчета точности определения радиусов кривых дорог по материалам наземной стереофотограмметрии с использованием стереоскопической местности:

$$m_R = \frac{R \cdot m_y}{a} \cdot \sqrt{x_1^2 + f_k^2} \quad (22)$$

Выполним сравнительный анализ точности определения R по стереомодели местности для $\Psi^0 = 0^0$ и $\Psi^0 = 90^0$, используя полученные зависимости (20) и (21). Численные значения m_R при R= 25-250 метров, x_1=80мм, f_k=195мм и m_y=0,25-1,00м сведем в таблицу 1.

Анализ полученных данных в таблице 1 показывает, что среднее квадратические погрешности определения радиусов кривых будут иметь наименьшее значение при расположении базиса фото-видео фиксации примерно параллельно измеряемой хорде а, при других значениях Ψ^0 точность измерений будет падать. Однако такое расположение базиса фотографирования повлечет за собой увеличение объемов съемочных работ, что в конечном итоге будет сказываться на продвижении полевых работ. Поэтому целесообразно при выполнении съемочных работ базис фото-видео фиксации располагать на обочинах дороги ($\Psi^0 = 90^0$), а оценку точности выполнять по формуле (21). В таком случае, как показывают данные, приведенные в таблице 1, точность определения радиуса также будет вполне приемлемой.

Результаты

При обследовании лесовозных автомобильных дорог возникает очень часто задача по определению вертикальных радиусов кривых (выпуклых и вогнутых). Для определения вертикального радиуса

выпуклой кривой по материалам наземной стереофотограмметрической съемки (рисунок 2) можно использовать формулу:

$$R_i^{в"} = \frac{L^2}{2 \cdot i} \quad (23)$$

где $R_i^{в"}$ – радиус вертикальной выпуклой кривой;
L – величина расстояния видимости встречного автомобиля;
i – высота луча зрения водителя (1,2м).

Таблица 1 - Средние квадратические погрешности m_R полученные для случаев при $\Psi^0 = 0^0$ и $\Psi^0 = 90^0$.

R,м	m_R, м							
	$\Psi^0 = 0^0$				$\Psi^0 = 90^0$			
	m_y				m_y			
	0,25	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	1,00
25	0,04	0,07	0,11	0,14	0,08	0,17	0,25	0,34
50	0,08	0,14	0,22	0,28	0,16	0,34	0,50	0,68
100	0,14	0,28	0,42	0,56	0,35	0,70	1,05	1,40
125	0,18	0,36	0,54	0,72	0,43	0,87	1,30	1,74
250	0,36	0,72	1,08	1,44	0,87	1,75	2,62	3,50

Величину расстояния видимости L можно определить как длину хорды АВ, которая будет равна:

$$L = \frac{в_ф \cdot \sqrt{(x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1})^2 + f_k (p_i - p_{i+1})^2}}{p_i \cdot p_{i+1}} \quad (24)$$

где x_{1i}, x_{1i+1} – координаты точек i и $i+1$, измеренные по кромке покрытия на левом снимке;
p_{i+1}, p_i- продольные параллаксы точек $i+1$ и i.

Подставляя в формулу (59) вместо L ее значение из (24), будем иметь зависимость для определения вертикального радиуса выпуклой кривой с использованием материалов наземной стереофотограмметрии, которая равна:

$$R_i^{в"} = \frac{в_ф^2 (x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1})^2 + f_k (p_i - p_{i+1})^2}{2{,}4 \cdot p_i^2 \cdot p_{i+1}^2} \quad (25)$$

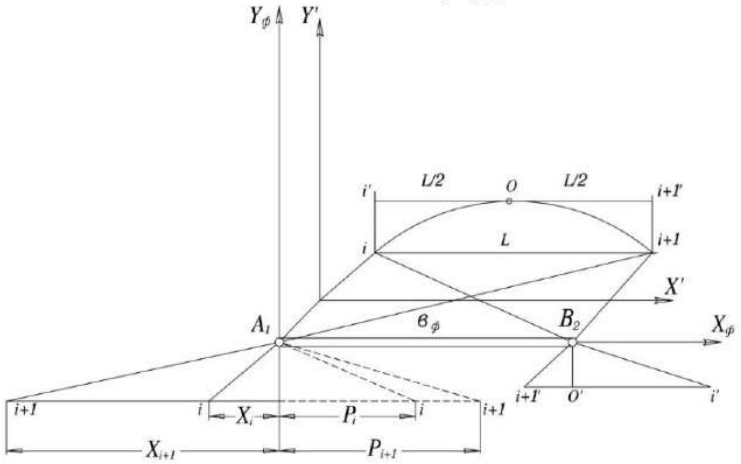

Рис. 2. Определение радиусов выпуклых кривых методом наземной стереофотограмметрии

Оценку точности определения вертикального радиуса выпуклой кривой можно получить по следующей зависимости:

$$m_{R^{в"}} = \frac{Y_{max}^2 \cdot L \cdot m_p \sqrt{2(x_1^2 Cos^2\Psi^0 + f_k^2 Sin^2\Psi^0}}{в_ф \cdot f_k^2 \cdot i} \quad (26)$$

Для определения вертикального радиуса вогнутой кривой воспользуемся рисунком 3, из которого можно вывести зависимость для $R_i^{в'}$, которая будет иметь следующий вид:

$$R_i^{в'} = \frac{a}{2Sin\alpha^0} \quad (27)$$

где $R_i^{в'}$ - радиус вертикальной вогнутой кривой;

а – хорда;
α – вертикальный угол, образованный хордами с и в и равный разности углов наклона этих хорд ($\alpha_1^0 - \alpha_2^0$).

Величину хорды а можно получить по формуле (9) которая имеет аналогичный вид и для этого типа кривой. Значение угла наклона можно получить по формуле:

$$Sin\alpha^0 = \frac{h_{i,i+1}}{L_{i,i+1}} \tag{28}$$

где $L_{i,i+1}$ – наклонное расстояние между определяемыми точками i и $i+1$ дороги;
$h_{i,i+1}$ – превышение между определяемыми точками i и $i+1$ дороги.

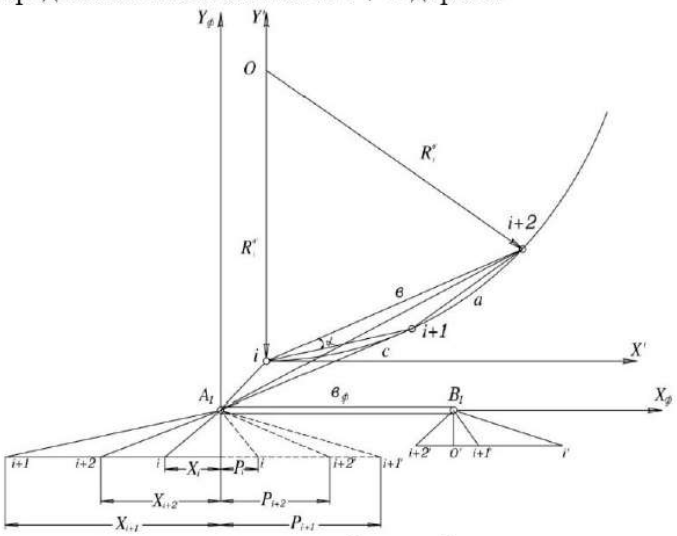

Рис. 3. Определение радиусов вогнутых кривых методом наземной стереофотограмметрии

Величину $L_{i,i+1}$ можно получить по формуле 26 в наземной стереофотограмметрии для нормального случая съемки будет:

$$h_{i,i+1} = \frac{в_ф(z_{1i+1} \cdot p_i - z_{1i} \cdot p_{i+1})}{p_i \cdot p_{i+1}} \tag{29}$$

где z_{1i}, z_{1i+1} – координаты точек i и i+1 по кромке покрытия на левом снимке;
p_i, p_{i+1} – параллаксы точек i и i+1.

Вертикальный угол α^0 будет равен разности углов наклона хорды АС минус угол наклона хорды АВ (рисунок 3), тогда для α^0 можно записать:

$$\alpha^0 = \alpha_1^0 - \alpha_2^0 \tag{30}$$

где α_1^0 – угол наклона хорды АС;
α_2^0 – угол наклона хорды АВ.

Тогда для углов наклона хорд АС и АВ на основании (29) и после подстановки в нее вместо $L_{i,i+1}$ из формулы (9), а вместо α^0 из формулы (30) можно привести зависимости для определения α_1^0 и α_2^0, которые будут иметь вид:

$$\alpha_1^0 = \arcsin\left[\frac{(z_{1i+2} \cdot p_i - z_{1i} \cdot p_{i+2})}{\sqrt{(x_{1i+2} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+2})^2 + f_k^2 (p_i - p_{i+2})^2}}\right. \tag{31}$$

и

$$\alpha_2^0 = \arcsin\left[\frac{(z_{1i+1} \cdot p_i - z_{1i} \cdot p_{i+1})}{\sqrt{(x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1})^2 + f_k^2 (p_i - p_{i+1})^2}}\right. \tag{32}$$

Подставляя в формулу (27) вместо α^0 его значение согласно (30), (32), а вместо $L_{i,i+1}$ из (9) получим зависимость для определения вертикального радиуса вогнутой кривой по материалам наземной стереофотограмметрии, которая в окончательном виде будет:

$$R_i^{в'} = \frac{в_ф \sqrt{(x_{1i+2} \cdot p_{i+1} - x_{1i+1} \cdot p_{i+2})^2 + f_k^2 (p_{i+1} - p_{i+2})^2}}{2 p_{i+1} \cdot p_{i+2} \cdot Sin\alpha^0} \tag{33}$$

Оценку точности определения радиусов вогнутых вертикальных кривых, на основании полученной зависимости (26) можно выполнять по формуле:

$$m_{R_i^{в}}{}' = \frac{в_ф \cdot m_y}{f_k} \cdot \sqrt{2(z_1^2 Cos^2\Psi^0 + f_k^2 Sin^2\Psi^0} \quad (34)$$

При изыскания лесовозных автомобильных дорог на реконструкцию, наряду с определением их элементов: ширины земляного полотна (проезжей части) лесовозной автомобильной дороги, радиусов горизонтальных и вертикальных кривых, очень важным является определение главных точек кривых (начала и конца). Это обусловлено необходимостью обследования существующей дороги с точки зрения безопасности движения на ней.

Определение положения начала и конца кривой непосредственно в полевых условиях представляет собой довольно сложную и трудоемкую задачу. Существующие способы определения главных точек кривой, однако предполагают выполнение инструментальных геодезических работ. Поэтому наиболее рациональным способом определения главных точек кривой будет тот, при котором все измерительные операции будут вестись в камеральном процессе и с достаточной для дальнейшего проектирования точностью. Для определения главных точек кривой (начало и конец) предлагается аналитический способ с использованием материалов наземной стереофотограмметрической съемки, который основывается на получении полярных координат (r, φ и β) этих точек кривой.

Сущность аналитического способа заключается в следующем. Начало и конец закругления рассматривается с математической точки зрения как точки касания прямой к окружности (рисунок 4). Определение r, φ , β предусматривается выполнять в полярной системе координат, где точка О есть полюс, а отрезок ON полярная ось (рисунок 4) и уравнение касательно к кривой можно представить в следующем виде:

$$r = \frac{P}{Cos\,(\varphi + \beta)} \quad (35)$$

где r – радиус – вектор (расстояние от полюса до точки начала или конца кривой);
P – кратчайшее расстояние от полюса к прямой касательной;
φ –угол между радиусом – вектором и полярной осью;
β - угол между радиусом-вектором и произвольно взятой хордой ОА на кривой.

Уравнение окружности в полярной системе координат в этом случае будет иметь следующий вид:

$$r = 2R_i^r \cdot Sin(\varphi + \alpha) \quad (36)$$

R_i^r – радиус горизонтальной кривой;
α – угол между касательной в точке полюса О и произвольно взятой хордой ОА на кривой.

Итак, для определения положения начала (конца точки М) необходимо определить полярные координаты точки М, а именно величину полярного угла ($\varphi + \beta$) и длину радиуса –вектора r. Приравняв в формулах (35) и (36) правые части и выполнив некоторые преобразования, получим зависимость для определения полярного угла $\varphi + \beta$, которая будет иметь вид:

$$Sin(2\,\varphi + \alpha + \beta) = \frac{P}{R_i^r} - Sin(\alpha - \beta) \quad (37)$$

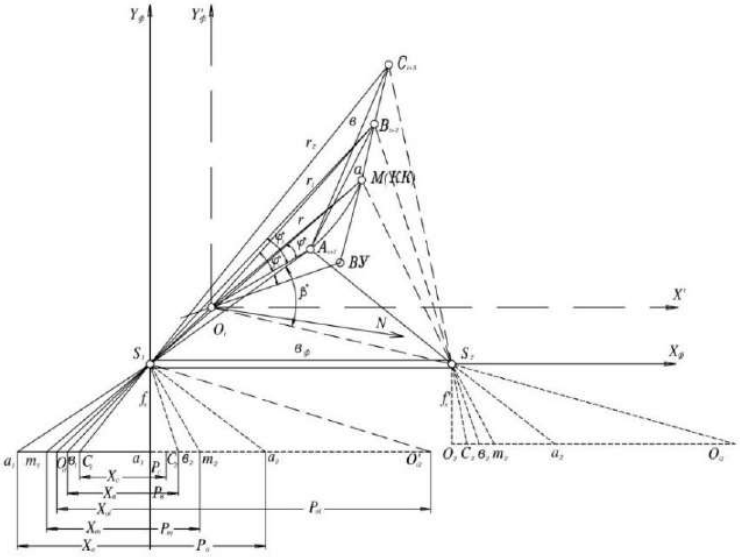

Рис. 4. Определение координат начала (конца) кривых методом наземной стереофотограмметрии

На основании формулы (30) угол φ будет равен:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2} - \frac{1}{2}\arcsin\left[\frac{P}{R_i^r} - Sin(\alpha - \beta)\right] \quad (38)$$

В полученной формуле 38 для определения угла φ, однако необходимо установить зависимости для величин P, φи β. Кратчайшее расстояние от полюса к прямой касательной P можно определить из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} r_1 \cdot Cos(\varphi_1 + \beta) = P \\ r_2 \cdot Cos(\varphi_2 + \beta) = P \end{cases} \quad (39)$$

где r_1 – расстояние от полюса точки O к произвольно взятой точке B на прямой,

r_2 – расстояние от полюса точки O к другой произвольно взятой точке C на прямой;

φ_1, φ_2 – углы между произвольно взятой хордой OA на кривой, и величинами расстояний соответственно OB и OC.

В формуле (39) выполним обозначения вместо $\varphi_1 + \beta = x$ и $\varphi_2 - \varphi_1 = \varphi$, тогда систему уравнений можно будет представить в таком виде:

$$\begin{cases} r_1 \cdot Cosx = P \\ r_2 \cdot Cos(\varphi + x) = P \end{cases} \quad (40)$$

Выполнив в 40 некоторые преобразования и подставив вместо:

$r_2 \cdot (Cosx \cdot Sin\varphi - Sinx \cdot Cos\varphi) = P$

$Sinx = \sqrt{1 - \frac{P_2}{r_2}}$ и $Cosx = \frac{P}{r_1}$

получим следующее уравнение:

$$\frac{r_2}{r_1} \cdot Cos\varphi - r_2 \cdot Sin\varphi \cdot \sqrt{\frac{1}{P_2} - \frac{1}{r_2}} = 1 \quad (41)$$

Величина P из уравнения (41) будет равна:

$$P = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{ctg(\varphi_2 - \varphi_1)}{r_1} - \frac{1}{r_2 \cdot Sin(\varphi_2 - \varphi_1)}\right]^2 + \frac{1}{r_1^2}}} \quad (42)$$

Для определения расстояний r_1 и r_2, а также углов φ_1 и φ_2 воспользуемся выше приведенной зависимостью для измерения линейных параметров дорог (1), на основании которой можно получить следующие формулы:

$$r_1 = \frac{\text{в}\phi\sqrt{(x_{1i+2} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+2})^2 + f_k^2 (p_i - p_{i+2})^2}}{p_i \cdot p_{i+2}} \quad (43)$$

$$r_2 = \frac{\text{в}\phi\sqrt{(x_{1i+3} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+3})^2 + f_k^2 (p_i - p_{i+3})^2}}{p_i \cdot p_{i+3}} \quad (44)$$

$$l = \frac{\text{в}\phi\sqrt{(x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1})^2 + f_k^2 (p_i - p_{i+1})^2}}{p_i \cdot p_{i+1}} \quad (45)$$

Величина углов φ_1 и φ_2 можно получить из известной из тригонометрии теоремы косинусов, откуда для φ_1 , φ_2 формулы будут иметь вид:

$$\varphi_1 = \arccos\left(\frac{r_1^2 + l_1^2 - a^2}{2r_1 \cdot l}\right) \quad (46)$$

$$\varphi_2 = \arccos\left(\frac{r_2^2 + l^2 - b^2}{2r_2 \cdot l}\right) \quad (47)$$

Длина хорд a, b и l в формулах (46) и (47) можно получить так:

$$a = \frac{\text{в}\phi\sqrt{(x_{1i+2} \cdot p_{i+1} - x_{1i+1} \cdot p_{i+2})^2 + f_k^2 (p_{i+1} - p_{i+2})^2}}{p_{i+1} \cdot p_{i+2}} \quad (48)$$

$$b = \frac{\text{в}\phi\sqrt{(x_{1i+3} \cdot p_{i+1} - x_{1i+1} \cdot p_{i+3})^2 + f_k^2 (p_{i+1} - p_{i+3})^2}}{p_{i+1} \cdot p_{i+3}} \quad (49)$$

$$\text{c} = \frac{\text{в}\phi\sqrt{(x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1})^2 + f_k^2 (p_i - p_{i+1})^2}}{p_i \cdot p_{i+1}} \quad (50)$$

Получив зависимости для определения Р и φ согласно (42) и (46), величину угла β можно рассчитать по формуле

$$\beta = \arccos\left(\frac{P}{r_1} - \varphi_1\right) \tag{51}$$

Для угла α можно из рисунка 4 записать:

$$\alpha = arcsin\frac{l}{2 \cdot R_i^r} \tag{52}$$

Заключение

Таким образом для определения координат положения начала (конца) закругления необходимо выполнить следующие подготовительные операции:

- определить радиус горизонтальной кривой R_i^r;
- определить дины хорд r_1, r_2, l, a и b и улов φ_1 и φ_2;
- определить полярные координаты по формулам (35), (38), (11).

Зная координаты положения начала и конца кривой можно без особого труда получить координаты середины кривой и вершины угла поворота трассы, а также вычислить остальные элементы кривой (тангенс, биссектрису, домер) по известным зависимостям.

Одним из основных геометрических элементов лесовозных автомобильных дорог, кроме перечисленных выше, является уклон дороги $i_{\text{тр}}$. При обследовании дорог уклон $i_{\text{тр}}$ определяют с целью установления соответствия проектного решения, выполненному строительству и оценке качества дорожно-строительных работ. При этом особое внимание следует обращать на достоверность и качество (точность) получаемой информации о дороге в результате обследования ее, с целью получения уклона $i_{\text{тр}}$. Рассмотрим определения величин уклонов $i_{\text{тр}}$ углов наклона $\nu_{\text{тр}}^0$ дорог по материалам наземной стереофотограмметрии применительно к нормальному случаю съемки. Величину уклона $i_{\text{тр}}$ дороги можно получить по известной формуле

$$i_{\text{тр}} = \frac{h}{S} tg\nu_{\text{тр}}^0 \tag{53}$$

где $i_{\text{тр}}$ – уклон дороги;

$\nu_{\text{тр}}^0$ – угол наклона дороги.

В связи с тем, что непосредственно по материалам наземной стереофотограмметрии величину угла наклона $\nu_{\text{тр}}^0$ дороги определить невозможно, то с этой целью обратимся к формуле (29), откуда $\nu_{\text{тр}}^0$ равен:

$$\nu_{\text{тр}}^0 = \arcsin\left[\frac{(z_{1i} \cdot p_{i+1} - z_{1i+1} \cdot p_i)}{\sqrt{(x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1})^2 + f_k^2 (p_i - p_{i+1})^2}}\right] \tag{54}$$

Подставляя (14) в формулу (13) вместо $\nu_{\text{тр}}^0$, получим зависимость для определения уклона дороги $i_{\text{тр}}$ методом наземной стереофотограмметрии, которая имеет вид:

$$i_{\text{тр}} = tg\left[arcsin\frac{(z_{1i} \cdot p_{i+1} - z_{1i+1} \cdot p_i)}{\sqrt{(x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1})^2 + f_k^2 (p_i - p_{i+1})^2}}\right. \tag{55}$$

где z_{1i}, z_{1i+1} – координаты точек i и $i+1$, измеренные на левом снимке;

p_i, p_{i+1} – продольные параллаксы точек i и $i+1$

Оценку точности определения уклона дороги $m_{i_{\text{тр}}}$ Методом наземной стереофотограмметрии можно выполнить по следующей формуле:

$$m_{i_{\text{тр}}} = \frac{\sqrt{2\left(\frac{Y_{max}^2 \cdot m_x^2}{f_k^2} + \frac{Y_{max}^4 \cdot z_{1i}^2 \cdot m_p^2}{в_\phi \cdot f_k^2}\right)}}{S_{i,i+1} \cdot Cos^2 \nu_{\text{тр}}^0 \cdot S'} \tag{56}$$

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что материалы наземной стереофотограмметрической съемки позволяют получить объективную и качественную информацию о лесовозной автомобильной дороге, перенести трудоемкие измерительные операции в камеральный процесс, автоматизировать изыскательские работы.

Результаты проведенных исследований для всех состояний системы совершенствования геометрического контроля строительства дорожных закруглений позволили установить, что при разбивке

и контроле строительства дорожных кривых примененной кривизны необходимо принимать разбивочные интервалы неодинаковыми по длине, обратно пропорциональными кривизне участка. Это позволяет сократить количество разбивочных знаков, измерений и построений и в то же время повысить эффективность и качество разбивочно-контрольных и дорожно-строительных работ.

Разработанный метод позволил сократить количество исполнителей и время выполнения работ, улучшить количество и качество получаемой информации о лесовозной автомобильной дороге, которые будут использованы при выборе нового направления трассы, существенным образом автоматизировать изыскательский процесс при выполнении работ.

На основании теоретического анализа геометрических параметров и динамических свойств тормозных кривых, выполненного для математического обеспечения комбинированного метода разбивки и контроля строительств примыканий и съездов, выяснено, что эти кривые не в полной мере обеспечивают безопасность и экономичность движения транспорта. В связи с этим выведены и проанализированы движения транспорта, проанализированы уточненные параметрические уравнения тормозных переходных кривых соответствующие реальным траекториям движения лесовозного автопоезда на поворотах с плавным изменением скорости. Уточненные кривые позволят повысить технико-экономические показатели, безопасность и комфортабельность движения на участках примыкания и съездов и сократить строительные затраты.

Литература

1. Козлов В.Г. Экспериментальные исследования сезонных изменений интенсивности подвижного состава автомобильного транспорта // Новые технологии и технические средства для эффективного развития АПК: материалы национальной научно-практической конференции Воронежского государственного аграрного университета им. императора Петра I. - 2019. - С. 317-326.

2. Курьянов В.К. Автоматизированная обработка результатов полевых измерений при оценке геометрических параметров лесовозных автомобильных дорог // Депонированная рукопись № 182-В2005 08.02.2005.

3. Курьянов В.К. О.Н. Бурмистрова, А.В. Скрыпников Анализ расчетных и экспериментальных данных по допускаемым скоростям движения // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления лесного комплекса: межвузовский сборник научных трудов. - Воронеж: Воронежская государственная лесотехническая академия, 2000. - С. 70-75.

4. Курьянов В.К., С.И. Сушков, А.В. Скрыпников Введение в теорию массового обслуживания с ожиданием применительно к движению лесовозного транспорта // Повышение эффективности лесозаготовок малолесных районов России: межвузовский сборник научных трудов по материалам Международной конференции. - 2002. - С. 129-132.

5. Курьянов В.К., А.В. Скрыпников, Е.В. Кондрашова Комплекс эпюр транспортно эксплуатационных характеристик дороги-основа оценки проектных решений // Лесоэксплуатация. - Красноярск: ГОУ ВПО "Сибириский государственный технологический университет", 2004. - С. 248-254.

6. Курьянов В.К., А.В. Скрыпников, В.А. Борисов; под общей редакцией профессора Камусина А.А. Лесотранспорт как система водитель-автомобиль- дорога-среда: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки дипломированного специалиста 250400 Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств по специальности 250401 Лесоинженерное дело. - Москва: Московский государственный университет леса, 2010.

7. Курьянов В.К. Математическая обработка результатов полевых измерений при нивелировании для оценки транспортно-эксплуатационных качеств лесовозных автомобильных дорог // Депонированная рукопись № 248-В2005 21.02.2005.

8. Курьянов В.К., З.Н. Нахаев, А.В. Скрыпников Математические модели техногенного воздействия автомобильных дорог на экосистемы придорожной полосы // Депонированная рукопись № 571-В2003 28.03.2003.

9. Курьянов В.К., О.Н. Бурмистрова, А.В. Скрыпников Методика расчета допускаемых скоростей на участках с ограниченной видимостью в профиле // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления лесного комплекса: межвузовский сборник научных трудов. – Воронеж: Воронежская государственная лесотехническая академия, 2000. - С. 65-69.

10. Боровлев А.О., Торопцев В.В., В.В.Никитин В.В., Тихомиров П.В., Брюховецкий А.Н., Скрыпников А.В. Выбор центрально-проецирующего аппарата пространственных кривых при проектировании лесовозных автомобильных дорог // Строительные и дорожные машины. - 2021. -№ 7. - С. 51-54.

11. Микова Е.Ю., Никитин В.В., Тихомиров П.В., Брюховецкий А.Н., Высоцкая И.А., Тимофеев В.А., Щербаков Е.Д. Графо-аналитический метод построения перспективных изображений лесовозных автомобильных дорог // Механизация и автоматизация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве: материалы национальной научно-практической конференции. - Воронеж, 2020. - С. 225-229.

12. Логойда В.С., Букреев В.Ю., Дрыга И.А., Тихомиров П.В., Никитин В.В. Исследование работоспособности метода индивидуального прогнозирования // Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. - 2019. - С. 317-322.

©**Тихомиров П.В.** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой транспортнотехнологических машин и сервиса, ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет» (ФГБОУ ВО «БГИТУ»), e-mail: vtichomirov@mail.ru; **Швецова В.В.** – канд. техн. наук, доцент кафедры начертательной геометрия и инженерной графики, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», e-mail: vikt.schvetzova2012@yandex.ru; **Саранов И.А. –** канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры информационной безопасности, e-mail: mr.saranov@mail.ru; **Сапелкин Р.С. –** преподаватель цикловой комиссии информационных технологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ФГБОУ ВО «ВГУИТ»), e-mail: charls5796@mail.ru; **Брюховецкий А.Н**. – докторант кафедры информационной безопасности, ФГБОУ ВО «ВГУИТ», e-mail: ABN1985@inbox.ru; **Щербаков Е.Д.** – экстерн кафедры информационной безопасности, ФГБОУ ВО «ВГУИТ», e-mail: ESD88@inbox.ru.

UDC 630.383

DETERMINATION OF GEOMETRIC ELEMENTS OF LOGGING HIGHWAYS USING INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS

P.V. Tikhomirov, V.V Shvetsova, A.B. Bondarev, I.A. Saranov, R.S. Sapelkin

The article is devoted to research on determining the detail of the breakdown and control of the construction of road curves by various methods, in this case with the help of information and intelligent systems. The breakdown intervals used in practice sometimes provide either insufficient or excessive detail of the breakdown. Thus, insufficient detail leads to inaccuracies, deviations from the design geometric parameters of the curves, which leads to a deterioration in the operational quality of the logging road, technical and economic indicators and traffic safety. Excessive detail leads to a decrease in the productivity of center–control work, a delay in the flow–construction process, an unjustifiably large number of center signs that are inevitably destroyed, subject to restoration and interfering with the work of road construction machines and mechanisms. Thus, this article presents the results of research to determine the optimal intervals for detailed breakdown and control of the construction of road curves of variable and constant curvature.

Keywords*: stereophotogrammetry, stereoscopic model, curve, geodetic method.*

References

1. Kozlov V.G. [Experimental studies of seasonal changes in the intensity of rolling stock of motor transport. New technologies and technical means for the effective development of the agro-industrial complex] Materialy nacional'noj nauchno-prakticheskoj konferencii Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta im. Imperatora Petra I [Materials of the national scientific and practical conference of the Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I.] - 2019. - pp. 317-326. (In Russ.).

2. Kuryanov V.K. [Automated processing of field measurement results in the assessment geometric parameters of logging roads] Deponirovannaya rukopis' [Deposited manuscript] No. 182-B2005 08.02.2005. (In Russ.).

3. Kuryanov V.K. O.N. Burmistrova, A.V. Skrypnikov [Analysis of calculated and experimental data on permissible speeds of movement. Mathematical modeling, computer optimization of technologies, parameters of equipment and management systems of the forest complex] Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov [Interuniversity collection of scientific papers] 2000. - pp. 70-75. (In Russ.).

4. Kuryanov V.K., S.I. Sushkov, A.V. Skrypnikov [Introduction to the theory of queuing with expectation in relation to the movement of logging transport. Improving the efficiency of logging in low-forest areas of Russia] Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov po materialam Mezhdunarodnoj konferencii [Interuniversity collection of scientific papers based on the materials of the International Conference] - 2002. - pp. 129-132. (In Russ.).

5. Kuryanov V.K., A.V. Skrypnikov, E.V. Kondrashova [A set of diagrams of transport and operational characteristics of the road-the basis for evaluating design solutions] Lesoekspluataciya [Lesoexploitation] 2004. - pp. 248-254. (In Russ.).

6. Kuryanov V.K., A.V. Skrypnikov, V.A. Borisov; under the general editorship of Professor Kamusin A.A. [Forest transport as a driver-car-road-environment system] Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov, obuchayushchihsya po napravleniyu podgotovki diplomirovannogo specialista 250400 Tekhnologiya lesozagotovitel'nyh i derevopererabatyvayushchih proizvodstv po special'nosti 250401 Lesoinzhenernoe delo [A textbook for university students studying in the direction of training a certified specialist 250400 Technology of logging and wood processing industries in the specialty 250401 Forest engineering] 2010. (In Russ.).

7. Kuryanov V.K. [Mathematical processing of the results of field measurements during leveling to assess the transport and operational qualities of logging roads] Deponirovannaya rukopis' [Deposited manuscript] No. 248-B2005 02.21.2005. (In Russ.).

8. Kuryanov V.K., Z.N. Nakhaev, A.V. Skrypnikov [Mathematical models of the technogenic impact of highways on the ecosystems of the roadside strip] Deponirovannaya rukopis' [Deposited manuscript] No. 571-B2003 28.03.2003. (In Russ.).

9. Kuryanov V.K., O.N. Burmistrova, A.V. Skrypnikov [Methodology for calculating permissible speeds in areas with limited visibility in the profile. Mathematical modeling, computer optimization of technologies, equipment parameters and control systems of the forest complex] Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov [Interuniversity collection of scientific papers] 2000. - pp. 65-69. (In Russ.).

10. Borovlev A.O., Toroptsev V.V., V.V.Nikitin V.V., Tikhomirov P.V., Bryukhovetsky A.N., Skrypnikov A.V. [The choice of the central projection apparatus of spatial curves in the design of logging highways] Stroitel'nye i dorozhnye mashiny [Construction and road machines] 2021. - No. 7. - pp. 51-54. (In Russ.).

11. Mikova E.Yu., Nikitin V.V., Tikhomirov P.V., Bryukhovetsky A.N., Vysotskaya I.A., Timofeev V.A., Shcherbakov E.D. [Grapho-analytical method of constructing perspective images of logging highways. Mechanization and automation of technological processes in agricultural production] Materialy nacional'noj nauchno-prakticheskoj konferencii [Materials of the national scientific and practical conference] 2020. - pp. 225-229. (In Russ.).

12. Logoida V.S., Bukreev V.Yu., Dryga I.A., Tikhomirov P.V., Nikitin V.V. [Investigation of the efficiency of the individual forecasting method. Innovative technologies and technical means for agriculture] Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii molodyh uchenyh i specialistov [Materials of the international scientific and practical conference of young scientists and specialists] 2019. - pp. 317-322. (In Russ.).

©Tikhomirov P.V. – PhD in Engineering sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technological Machines and Services of Transport, Bryansk State Technological University of Engineering (BSTUE), e-mail: vtichomirov@mail.ru; **Shvetsova V.V.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, e-mail: vikt.schvetzova2012@yandex.ru; **Saranov I.A. –** PhD in Engineering sciences, Senior Lecturer of the Department of Information Security, Voronezh State University of Engineering Technologies (VSUET), e-mail: mr.saranov@mail.ru; **Sapelkin R.S. –** Teacher of the cycle commission of information technologies, VSUET, e-mail: charls5796@mail.ru; **Bryukhovetskiy A.N.** – PhD student of the Department of Intellectual Security, VSUET, e-mail: ABN1985@inbox.ru; **Shcherbakov E.D**. – external student of the Department of Information Security, VSUET, e-mail: ESD88@inbox.ru.