

## СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 625.72: 528.4

Ю. А. Катькало, Н. В. Тулуевский, А. С. Литвинчук, А. И. Макеев

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ ЗАКРУГЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

UDC 625.72: 528.4

Y. A. Katkalo, N. V. Tuluevskiy, A. S. Litvinchuk, A. I. Makeev

### DETERMINATION OF GEOMETRIC DESIGN OF A HIGHWAY CURVE

#### Аннотация

Представлен новый способ определения геометрической конструкции закругления автомобильной дороги с использованием электронного тахеометра.

#### Ключевые слова:

автомобильная дорога, закругление автомобильной дороги, круговая кривая, клотоида, круговая с переходными кривыми, электронный тахеометр.

#### Abstract

A new technique for determining the geometric design of a curve in a highway using the electronic tachometer is presented.

#### Keywords:

highway, highway curve, circular curve, clothoid, circular curve with transition curves, electronic tachometer.

#### Существующее положение

При оценке качества строительства, при обследовании и паспортизации автомобильных дорог определяют на местности их действительные геометрические параметры [1], в том числе радиусы кривых в плане. Вначале необходимо узнать вид геометрической конструкции закругления: круговая кривая, клотоида, круговая с переходными кривыми. В настоящее время решение этого вопроса представлено в [2, 3]. Определение геометрической конструкции закругления дороги начинается с отыска-

ния на местности точек его начала *НК* и конца *КК*. Для этого на прямом участке, предшествующем закруглению, на наружной кромке проезжей части закрепляют две точки: *A* и *B*. Расстояние между этими точками составляет 30...40 м. В точке *B* устанавливают теодолит (рис. 1).

Визируют на вежу, установленную в точке *A*. Переводят трубу через зенит. Затем по кромке проезжей части перемещают вежу, наблюдая за ней в зрительную трубу прибора. При устойчивом отклонении вехи от вертикальной нити сетки фиксируют точку, которая



является началом закругления *НК*. Подступая подобным образом, находят с другой стороны точку *КК*, конец закругления. После этого приступают непосредственно к определению геометрической конструкции закругления с помощью теодолита.

На кромке покрытия через 10 м закрепляют точки 1, 2, 3, ... (рис. 2).

Устанавливают теодолит в начало кривой *НК* и визируют на точку *A* (см. рис. 1). Переводят трубу через зенит и от полученного направления последовательно наводят трубу на точки 1, 2, 3, ... и измеряют горизонтальные углы  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots$ .

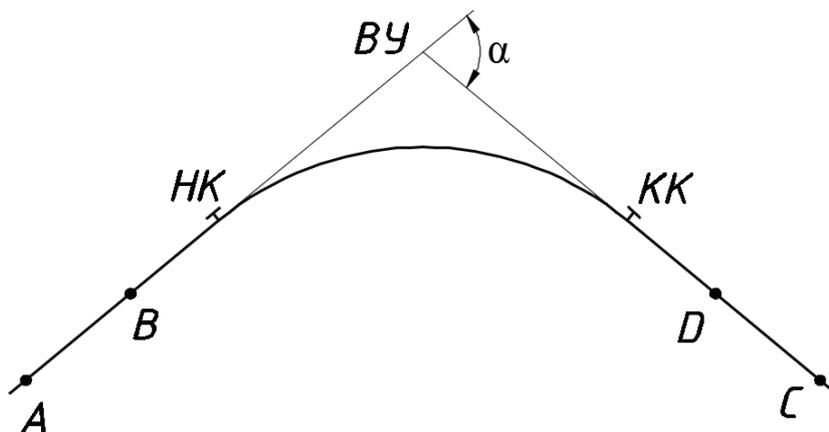


Рис. 1. Схема к определению на местности точек *НК*, *КК*

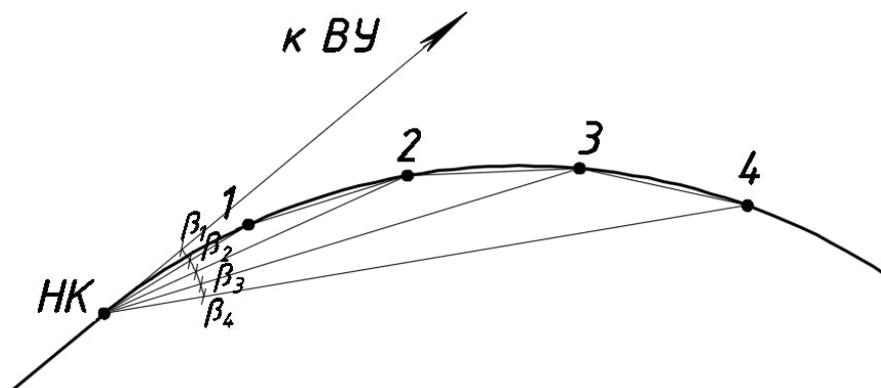


Рис. 2. Определение геометрической конструкции закругления с помощью теодолита

Далее в [2] приводятся утверждения. Если  $\beta_1 < \beta_2 < \beta_3 < \dots < \beta_i$ , то закругление имеет переходные кривые. Если при дальнейшем измерении углов наступает их равенство,  $\beta_i = \beta_{i+1} = \beta_{i+2} = \beta_{i+3} = \dots$ , то в точке *i* приближенно находится конец

переходной кривой *КПК* и, что то же самое, начало круговой *НКК*. Отметим, что последнее утверждение не всегда верно. Равенство углов  $\beta_i, \beta_{i+1}, \beta_{i+2}, \dots$  соблюдается только на закруглении из круговой кривой при установке теодо-



лита в ее начале. Если закругление состоит из круговой и двух переходных кривых, то теодолит устанавливается в начале переходной кривой *НПК*. Других точек на местности для его установки нет. В такой ситуации на переходной кривой углы  $\beta_i$  постепенно увеличиваются, а в пределах круговой кривой равенство углов не наступает, значения их продолжают увеличиваться. Значит, точка конца переходной кривой *КПК* не определяется. Описываемый способ указывает только на наличие в закруглении переходной кривой.

Имеется еще один способ опреде-

ления переходной кривой в закруглении [2]. Вблизи начала закругления на кривой (рис. 3) выбирают произвольную точку 1 и от нее через 10 м по кромке проезжей части отмечают точки 2, 3, 4, 5, ... . Между точками 1–3, затем 2–4, 3–5 и т. д. натягивают ленту рулетки и на середине отрезка измеряют стрелы  $f_1, f_2, f_3, \dots$ . Если  $f_1 < f_2 < f_3 < \dots$ , то закругление имеет переходную кривую и ее конец *КПК* находится посередине между точками  $i$  и  $i+1$ , в которых  $f_i < f_{i+1} = f_{i+2} = \dots$ . Такой способ дает весьма примерные результаты.

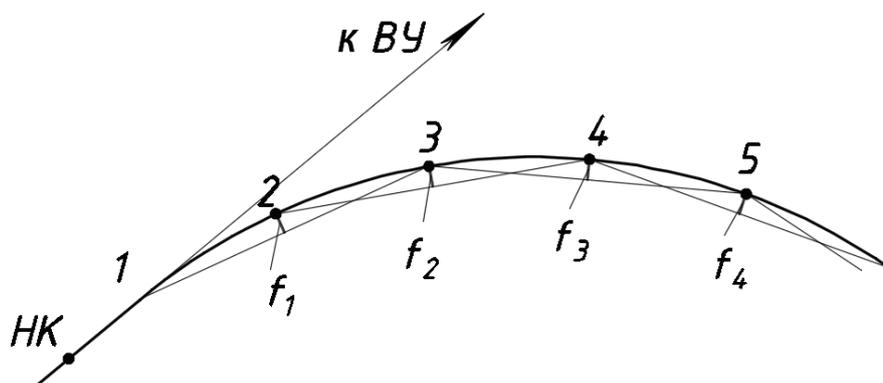


Рис. 3. Определение геометрической конструкции закругления по стрелам с помощью рулетки

Подойдем более строго к решению рассматриваемой задачи.

### **Определение геометрической конструкции закругления**

Новый подход к определению геометрической конструкции закругления возможен с использованием современных электронных приборов. Вначале, как и в рассмотренной ситуации, находим точки *НК* и *КК*. При этом используем электронный тахеометр. Устанавливаем его в точке *B* (см. рис. 1). На горизонтальном круге электронного тахеометра фиксируем отсчет ГК, равный  $180^\circ$ , и визируем на точку *A*. Изме-

ряем расстояние до этой точки  $l_{BA}$ . Поворачиваем зрительную трубу на  $180^\circ$  и получаем продолжение направления *A–B* при отсчете ГК, равном  $0^\circ$ . По наружной кромке проезжей части перемещаем вежу с призмным отражателем. При наблюдении в зрительную трубу определяем момент устойчивого смещения вехи от вертикальной нити сетки. Получаем точку *НК*<sub>1</sub>. Закрепляем ее. Для повышения точности определяем точку *НК*<sub>2</sub> и по внутренней кромке проезжей части (рис. 4). За окончательное принимаем среднее положение точки *НК* из определений по обеим кромкам. Измеряем расстояние до точки *НК* –  $l_{BHK}$ .



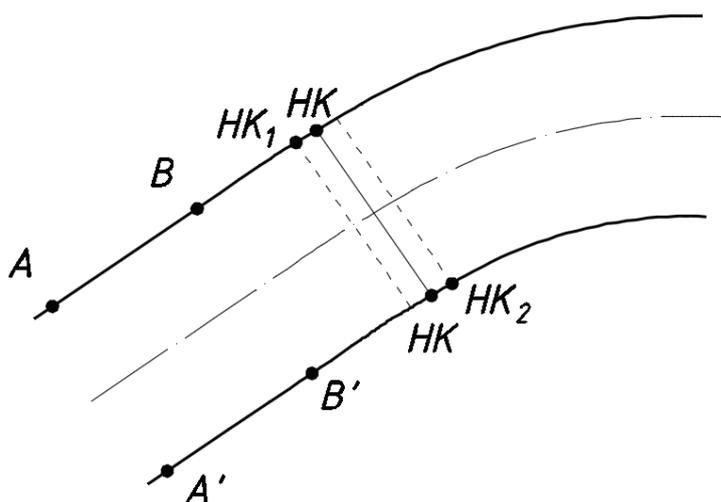


Рис. 4. Нахождение среднего положения точки  $HK$

Действуя подобным образом из закрепленных точек  $C$  и  $D$  (см. рис. 1), получаем положение точки  $KK$ .

Имея на местности точку  $HK$  и направление на вершину угла поворота трассы  $BУ$  как продолжение направления  $AB$ , задаем систему прямоугольных координат. Начало коор-

динат находится в точке  $HK$ . Ось  $X$  направлена по касательной к вершине угла  $BУ$ , ось  $У$  – по перпендикуляру внутрь закругления.

Рассмотрим следующую ситуацию. Закругление состоит только из круговой кривой (рис. 5).

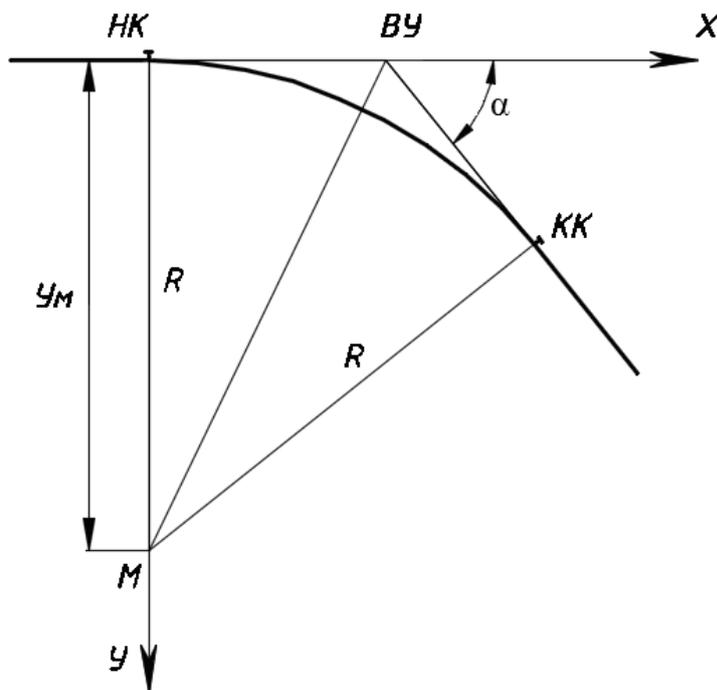


Рис. 5. Круговая кривая



Круговая кривая как элемент автомобильной дороги является частью окружности. В заданной системе координат уравнение круговой кривой

$$(X - X_M)^2 + (Y - Y_M)^2 = R^2,$$

где  $X_M, Y_M$  – прямоугольные координаты центра окружности;  $R$  – радиус

круговой кривой.

Координаты центра такой кривой  $X_M = 0, Y_M = R$ .

Рассмотрим другую ситуацию. Закругление состоит из круговой и двух переходных кротоидных кривых (рис. 6).

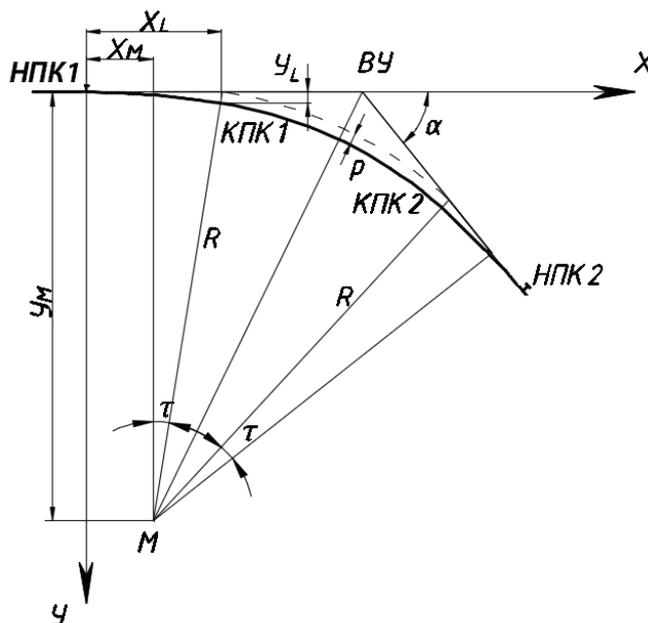


Рис. 6. Круговая с переходными кривыми

В этом случае координаты центра круговой кривой

$$X_M = t, \quad Y_M = R + p,$$

где  $t$  – дополнительный тангенс;  $p$  – сдвигка круговой кривой.

Дополнительный тангенс вычисляется по формуле

$$t = X_L - R \sin \tau,$$

а сдвигка круговой кривой

$$p = Y_L - R(1 - \cos \tau),$$

где  $X_L, Y_L$  – прямоугольные координаты конца переходной кривой;  $\tau$  – угол

наклона касательной к концу переходной кривой.

$$X_L = L \left( 1 - \frac{L^2}{40R^2} \right), \quad Y_L = \frac{L^2}{6R} \left( 1 - \frac{L^2}{56R^2} \right),$$

$$\tau = \frac{L}{2R}.$$

Дополнительный тангенс представим в следующем виде:

$$t = L \left( 1 - \frac{L^2}{40R^2} \right) - R \sin \tau.$$

Функцию  $\sin \tau$  разложим в степенной ряд:



$$\sin \tau = \tau - \frac{\tau^3}{3!} + \frac{\tau^5}{5!} - \dots \quad t = \frac{L}{2},$$

Для обеспечения необходимой точности достаточно ограничиться первыми двумя членами ряда. Тогда

$$t = \frac{L}{2} - \frac{L^3}{240R^2}.$$

При заданных в соответствии с ТКП 45–3.03–19–2006 [4] значениях  $L$  и  $R$  величина  $\frac{L^3}{240R^2}$  не превосходит 0,02 м – при радиусах 600...2000 м; 0,05 м – при радиусах 500 м; 0,09 и 0,10 м – при радиусах соответственно 400 и 300 м, что находится в пределах погрешности и не оказывает практического влияния на величину  $t$ . Таким образом, можно принять, что

$$X_M = -\frac{1}{2} \cdot \frac{y_1(x_2^2 + y_2^2 - x_3^2 - y_3^2) + y_2(x_3^2 + y_3^2 - x_1^2 - y_1^2) + y_3(x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2)}{x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)},$$

$$Y_M = \frac{1}{2} \cdot \frac{x_1(x_2^2 + y_2^2 - x_3^2 - y_3^2) + x_2(x_3^2 + y_3^2 - x_1^2 - y_1^2) + x_3(x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2)}{x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)}.$$

Прямоугольные координаты точек кривой измеряем на местности электронным тахеометром. Устанавливаем его на свободной станции в точке  $S$  (рис. 7).

Местоположение электронного тахеометра и его ориентация определяются с помощью функции «обратная засечка». Опорными являются точки  $HK$ ,  $B$ ,  $A$ . Их прямоугольные координаты

$$X_{HK} = 0, \quad Y_{HK} = 0, \quad X_B = -l_{BHK},$$

$$Y_B = 0, \quad X_A = -(l_{BHK} + l_{BA}), \quad Y_A = 0.$$

Зная прямоугольные координаты точек  $HK$ ,  $A$ ,  $B$ , измеряем электронным тахеометром прямоугольные координаты станции  $X_S$  и  $Y_S$ .

а длина переходной кривой  $L = 2t$ .

При тех же заданных значениях  $L$  и  $R$  [4] сдвигка  $p$  часто не превосходит  $\frac{1}{1000}$ , а в крайних случаях (при  $R = 300$  м)  $\frac{1}{125}$  величины радиуса. При определении действительных радиусов закруглений такая ошибка вполне допустима и практически не оказывает влияния на величину  $Y_M$ .

Из изложенного следует, что для определения конструкции закругления надо знать прямоугольные координаты его центра  $X_M$  и  $Y_M$ . Эти координаты можно вычислить по известным формулам, если имеются прямоугольные координаты трех точек круговой кривой.

Выбираем несколько точек в середине закругления, на круговой его части и электронным тахеометром со свободной станции измеряем их прямоугольные координаты  $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$ . Вычисляем координаты центра  $X_M, Y_M$  по трем точкам закругления.

Полученные значения  $X_M, Y_M$  позволяют установить геометрическую конструкцию закругления. Если величина  $X_M$  близка к нулю, то закругление состоит только из круговой кривой.

Если  $X_M$  имеет значительную величину, примерно 50 м и более, то закругление содержит переходные кривые. Длину переходной кривой  $L$  принимаем равной  $2X_M$ .



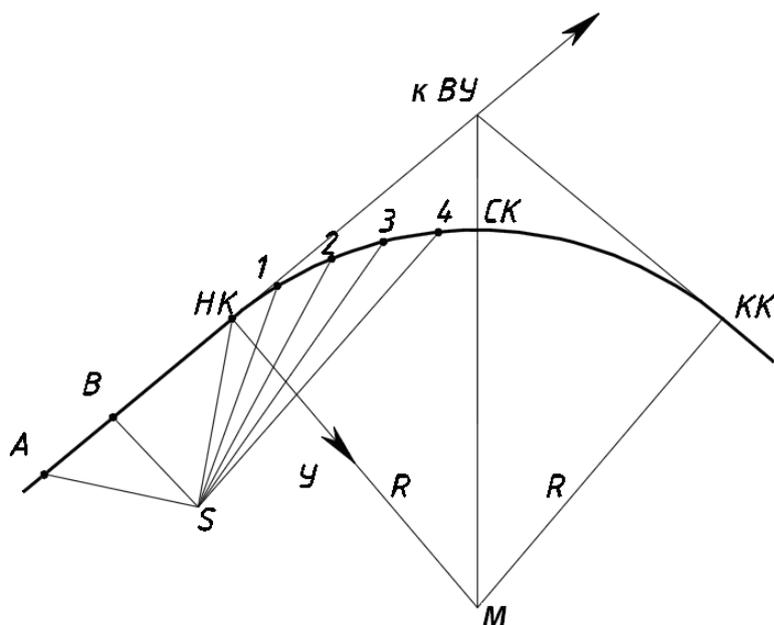


Рис. 7. Схема к определению прямоугольных координат центра закругления

Установив длину переходной кривой, вычисляем прямоугольные координаты  $X_L$ ,  $Y_L$  ее конечной точки  $КПК$ . Разбивку точки  $КПК$  выполняем электронным тахеометром способом прямоугольных координат от станции  $S$ .

Конец переходной кривой  $КПК$  можно отыскивать на местности и по-другому, отмеряя длину  $L$  по кромке проезжей части дорожным курвиметром.

Значение  $Y_M$  практически дает величину радиуса  $R$  круговой кривой. Для более точного определения радиуса  $R$  следует воспользоваться способами, приведенными в [5, 6].

Координаты  $X_M$ ,  $Y_M$  надо определить несколько раз в пределах круговой кривой и за окончательные величины принять их средние значения.

Если предполагается, что закругление состоит только из клотоидной кривой, то для проверки этого следует по наружной кромке покрытия с интервалом 10 м закрепить точки от начала до середины кривой. Затем последовательно по трем точкам определить величины  $X_M$ . Если значения  $X_M$  постоянно уменьшаются и равенство их не наступает, то это указывает на отсут-

ствие круговой кривой в закруглении. Такое закругление состоит только из клотоидной кривой.

В итоге при использовании представленного способа устанавливаем геометрическую конструкцию закругления и получаем значения длины переходной кривой  $L$  и радиуса круговой кривой  $R$ . На местности имеем закрепленные точки закругления  $НПК1$ ,  $КПК1$  ( $НКК$ ),  $НПК2$ ,  $КПК2$  ( $ККК$ ).

### Выводы

Представлен новый способ определения на местности геометрической конструкции закругления автомобильной дороги.

По измеренным электронным тахеометром прямоугольным координатам точек круговой кривой вычисляются прямоугольные координаты центра дорожного закругления  $X_M$ ,  $Y_M$ .

Полученные координаты  $X_M$ ,  $Y_M$  позволяют определить геометрическую конструкцию закругления:

– если величина  $X_M$  близка или равна нулю, то закругление состоит только из круговой кривой и радиус её  $R$  равен величине  $Y_M$ ;



– если величина  $X_M$  имеет некоторое значение, примерно 50 м и более, то закругление содержит переходные кривые; длина переходной кривой  $L$  равна  $2X_M$ , а радиус круговой кривой

равен величине  $U_M$ .

Положение на местности конца переходной кривой  $KPK$  при закреплённом ее начале  $НПК$  определяется электронным тахеометром.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ТКП 059-2007.** Автомобильные дороги. Правила устройства. – Минск, 2007. – 94 с.
2. **Кузьмин, В. В.** О методике и точности определения радиуса круговой кривой на закруглении автомобильной дороги / В. В. Кузьмин // Инженерная геодезия. – 1987. – Вып. 30. – С. 46–49.
3. **Ганьшин, В. Н.** Геодезические работы при реконструкции промышленных предприятий / В. Н. Ганьшин, Б. И. Коськов, И. М. Репалов. – Москва, 1990. – 149 с.
4. **ТКП 45-3.03-19-2006.** Автомобильные дороги. Нормы проектирования. – Минск, 2006. – 42 с.
5. Определение действительных радиусов на закруглениях автомобильных дорог электронным тахеометром / Ю. А. Катькало [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 3. – С. 89–95.
6. Определение радиусов закруглений автомобильных дорог способом прямоугольных координат / Ю. А. Катькало [и др.] // Вестн. МГТУ. – 2005. – № 1. – С. 98–102.

*Статья сдана в редакцию 15 сентября 2017 года*

**Юрий Анатольевич Катькало**, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-298-47-41-64.

**Николай Владимирович Тулуевский**, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-293-15-02-34.

**Артем Сергеевич Литвинчук**, студент, Белорусско-Российский университет.

**Андрей Иванович Макеев**, студент, Белорусско-Российский университет.

**Yury Anatolyevich Katkalo**, Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-298-47-41-64.

**Nikolai Vladimirovich Tuluevskiy**, senior lecturer, Belarusian-Russian University. Phone: +375-293-15-02-34.

**Artem Sergeevich Litvinchuk**, student, Belarusian-Russian University.

**Andrei Ivanovich Makeev**, student, Belarusian-Russian University.

