ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИММЕТРИЧНЫХ СЕРПАНТИН 1-ГО РОДА

1 Виды серпантин и их элементы

Материал излагается по учебному пособию [1]. Участки трассы дороги, сопрягаемые между собой при помощи нескольких прямых и кривых, расположенных вне образованного ими угла, называют *серпантинами.*

Серпантина состоит из *основной кривой AB*, двух *вспомогательных* и *вставок* между основной и вспомогательными кривыми. В качестве вставок используются *прямые отрезки* или *переходные кривые*.

Серпантины бывают двух видов: 1-го рода, когда вспомогательные кривые направлены в противоположные стороны (а), и 2-го рода, когда вспомогательные кривые направлены в одну сторону (б).

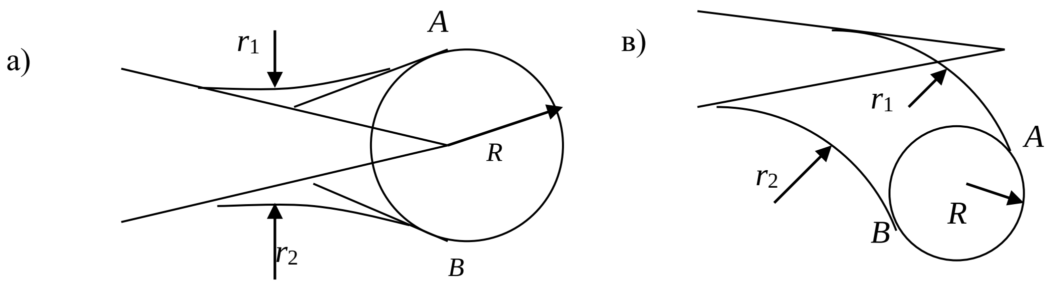

Рисунок 1 – Виды серпантин

Основные элементы серпантин должны назначаться в соответствии с рекомендациями СП [2].

Таблица 1 – Основные расчетные параметры элементов серпантин

Параметры элементов серпантины	Параметры серпантин при расчётной скорости движения км/ч		
	30	20	15
Наименьший радиус кривых в плане, м	30	20	15
Поперечный уклон проезжей части на вираже, ‰	60	60	60
Длина переходной кривой, м	30	25	20
Уширение проезжей части, м	2,2	3,0	3,5
Наибольший продольный уклон в пределах серпантины, ‰	30	35	40

Наибольшее распространение получили серпантины 1-го рода с переходными кривыми. Серпантину 1-го рода называют *симметричной*, если основная кривая описана одним радиусом R и ее центр расположен на биссектрисе острого угла. Серпантина 1-го рода называется *несимметричной*, если радиусы вспомогательных кривых не равны и основная кривая состоит из нескольких дуг, или ее центр не расположен на биссектрисе угла. Положение центра окончательно выбирается только после тщательного обследования рельефа.

2 Проектирование серпантин с прямыми вставками

Чтобы освоить методику расчета серпантин, сначала рассмотрим самую простую серпантину – *с прямыми вставками*. Для её расчета необходимо задаться следующими значениями:

α – угол поворота трассы;

R – радиус основной кривой;

r – радиус вспомогательной кривой;

m– длина прямой вставки.

1. Вычисляем центральный угол β вспомогательной кривой

$$\mathrm{tg}\frac{\beta}{2} = \frac{-m + \sqrt{m^2 + R(2r + R)}}{2r + R}\ , \tag{2.1}$$

$$\beta = 2\,\mathrm{arctg}(\mathrm{tg}\frac{\beta}{2})\,. \tag{2.2}$$

2. Вычисляем тангенс вспомогательной кривой

$$T_в = r \cdot \mathrm{tg}\frac{\beta}{2}. \tag{2.3}$$

3. Находим расстояние от вершины угла, в который вписана вспомогательная кривая, до основной кривой

$$d_1 = T_в + m\,. \tag{2.4}$$

4. Находим расстояние от вершины угла, в который вписана вспомогательная кривая, до вершины угла поворота трассы

$$d_2 = \frac{d_1}{\cos\beta} = \frac{R}{\sin\beta}\,. \tag{2.5}$$

5. Находим центральный угол, стягивающий основную кривую серпантины

$$\gamma = 360° - 2(90° - \beta) - \alpha = 180° + 2\beta - \alpha\ . \tag{2.6}$$

6. Вычисляем длину основной кривой серпантины

$$K_о = \frac{\pi \cdot R \cdot \gamma}{180°}\,. \tag{2.7}$$

7. Вычисляем длину вспомогательной кривой серпантины

$$K_{\text{в}} = \frac{\pi \cdot r \cdot \beta}{180°}. \tag{2.8}$$

8. Определяем полную длину серпантины

$$S = 2(K_{\text{в}} + m) + K_{\text{о}}. \tag{2.9}$$

Тестовый пример, вычисленный с помощью программы Excel, приведен в табл. 2. Схематический чертеж – на рис. 2.

Таблица 2 – Расчет серпантины с прямыми вставками

Параметр	Обозначение	Значение
Угол поворота трассы, °		34
Радиус основной кривой, м		30
Радиус вспомогательной кривой, м		150
Длина прямой вставки, м		100
Центральный угол вспомогательной кривой:	tg(β/2)	0,1244
	β, радианы	0,2476
	β,°	14,19
Тангенс вспомогательной кривой	Tв	18,67
Расстояние от вершины угла вспомогательной кривой до основной кривой серпантины, м	d_1	118,67
Расстояние от вершины угла вспомогательной кривой до центра серпантины, м	d_2	122,40
Центральный угол, стягивающий основную кривую серпантины,°	γ	174,38
Длина основной кривой серпантины, м	Kо	91,30
Длина вспомогательных кривых, м	Kв	37,14
Полная длина серпантины, м	S	365,59

Порядок построения.

1. Сначала строим угол поворота трассы.

2. Далее, вписываем основную кривую радиусом R с центром в вершине угла поворота O (рис. 2).

3. От точки O откладываем отрезок OB, равный d_2, т.е. строим точку B - вершину угла для вспомогательной кривой.

4. Делаем створ циркуля равным d_1 и из точки B строим точку С на пересечении с основной кривой серпантины.

5. Из точки B откладываем тангенсы ***T*в** и с помощью теорем геометрии ищем центр вспомогательной кривой A.

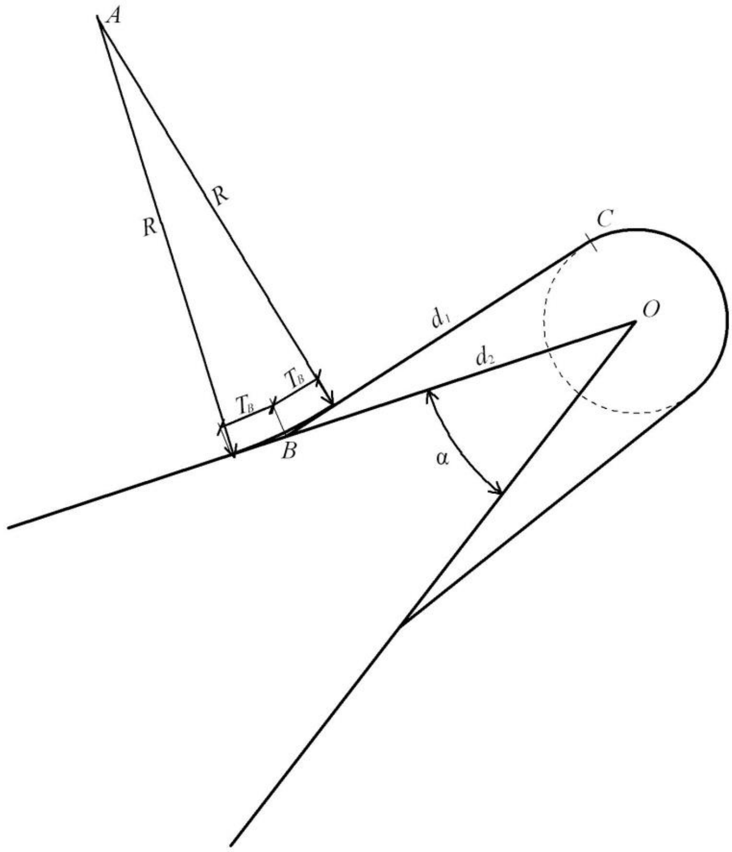

Рисунок 2 – Чертеж серпантины с прямыми вставками

3 Расчеты симметричной серпантины 1-го рода с переходными кривыми

Такие серпантины применяются при скоростях движения свыше 20 км/ч.

Расчёт симметричных серпантин первого рода с переходными кривыми ведут в четыре этапа (рис. 3):

1. Определение элементов переходных кривых у основной круговой и двух вспомогательных.

2. Определение элементов серпантины (углов построения, тангенса серпантины, длины серпантины, главных точек серпантины и др.).

3. Проверка возможности размещения земляного полотна двух вспомогательных кривых.

4. Решение вопроса водоотвода, обустройства и обеспечение безопасности движения.

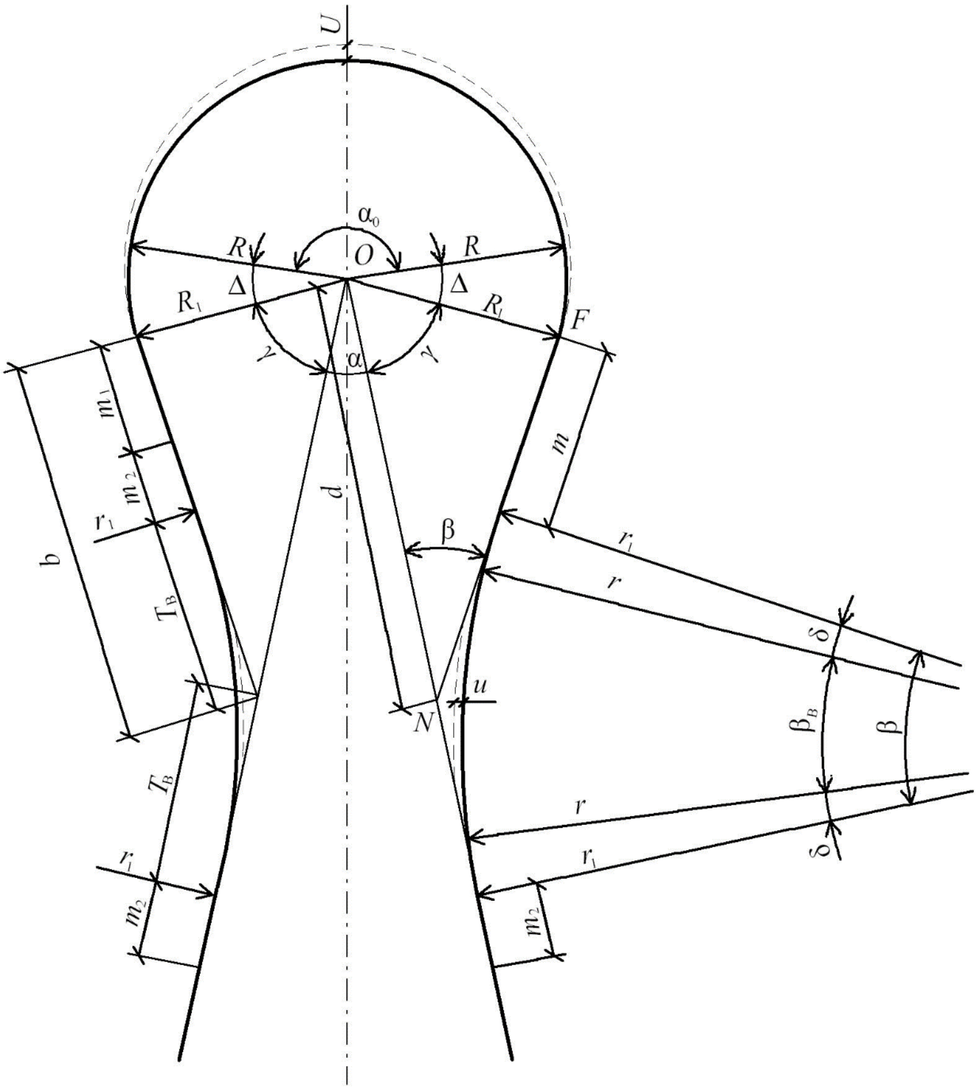

Рисунок 3 - Разбивочный чертёж симметричной серпантины первого рода

Для расчётов серпантины необходимо задать: α – угол поворота трассы, *R* – радиус основной кривой, *r* – радиус вспомогательной кривой, *L* – длину переходной кривой для основной кривой, *l* – длину переходной кривой для вспомогательной кривой.

Определение элементов переходных кривых у основной кривой. Радиус основной кривой *R* и длину переходной кривой *L* назначают по рекомендациям СП [2].

Сначала вычисляют параметр переходной кривой (клотоиды)

$$C_0 = R \cdot L. \qquad (3.1)$$

Далее определяют координаты точки конца переходной кривой по формуле

$$\begin{cases} X_0 = L - \dfrac{L^5}{40C_0^2}, \\ Y_0 = \dfrac{L^3}{6 \cdot C_0} - \dfrac{L^7}{336 \cdot C_0^3}. \end{cases} \qquad (3.2)$$

Затем находят величину угла, стягивающего дугу, в пределах которой часть круговой кривой радиуса R заменяется клотоидой длиной L. Угол, измеряемый в радианах, находят по формуле

$$\Delta = \frac{L}{2 \cdot R} \quad , \qquad (3.3)$$

Чтобы перевести в градусы, следует воспользоваться зависимостью

$$\Delta = \frac{180^\circ \cdot L}{2\pi \cdot R}.$$

Для того, чтобы радиус R с введением переходной кривой остался без изменения, необходимо ввести фиктивную круговую кривую радиусом

$$R_1 = R + U, \qquad (3.4)$$

где

$$U = Y_0 + R \cdot \cos\Delta - R. \qquad (3.5)$$

Далее, находят расстояние от начальной точки переходной кривой до начала основной круговой кривой

$$m_1 = X_0 - R \cdot \sin\Delta. \qquad (3.6)$$

Определение элементов переходных кривых у вспомогательных кривых. Вычисляют параметр переходной кривой (клотоиды)

$$C_в = r \cdot l. \qquad (3.7)$$

Находят координаты конечной точки переходной кривой

$$\begin{cases} X_в = l - \dfrac{l^5}{40 \cdot C_в^2}, \\ Y_в = \dfrac{l^3}{6 \cdot C_в} - \dfrac{l^7}{336 \cdot C_в^3}. \end{cases} \qquad (3.8)$$

Определяют величину угла, стягивающего дугу, в пределах которой часть вспомогательной круговой кривой радиуса r заменяется клотоидой длиной l. Угол, измеряемый в радианах, находят по формуле

$$\delta = \frac{l}{2 \cdot r} \quad , \tag{3.9}$$

Чтобы перевести в градусы, следует воспользоваться зависимостью

$$\delta = \frac{180^{\circ} \cdot l}{2\pi \cdot r}. \tag{3.10}$$

Для того, чтобы радиус R с введением переходной кривой остался без изменения, необходимо ввести фиктивную круговую кривую радиусом

$$r_1 = r + u, \tag{3.11}$$

где

$$u = Y_{\text{в}} + r \cdot \cos\delta - r. \tag{3.12}$$

Далее, находят расстояние от конца вспомогательной круговой кривой до начальной точки переходной кривой

$$m_2 = X_{\text{в}} - r \cdot \sin\delta. \tag{3.13}$$

Расчет элементов построения серпантины. Определение элементов серпантины начинают с вычисления центрального угла вспомогательных кривых β. Из прямоугольного треугольника *NOF*, построенного на точках *O* (вершина угла серпантины), *N* (вершина угла, в который вписана вспомогательная кривая) и *F* (точка сопряжения круговой кривой радиуса R_1 с прямой вставкой m_1), следует

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{R_1}{m + T_{\text{в}}}, \tag{3.14}$$

где $T_{\text{в}}$ – тангенс вспомогательной кривой, определяемый в соответствии с правилами разбивки кривой по зависимости

$$T_{\text{в}} = r_1 \cdot \operatorname{tg}\frac{\beta}{2}, \tag{3.15}$$

$$m = m_1 + m_2. \tag{3.16}$$

Подставив (3.15) в (3.14), получаем равенство

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{R_1}{m + T_{в}} = \frac{R_1}{m + r_1 \cdot \operatorname{tg}\dfrac{\beta}{2}},$$

из которого следует, что тангенс половинного угла

$$\operatorname{tg}\frac{\beta}{2} = \frac{-m + \sqrt{m^2 + R_1 \cdot (2 \cdot r_1 + R_1)}}{2 \cdot r_1 + R_1} \tag{3.17}$$

и угол

$$\beta = 2\,\mathrm{arctg}\left(\mathrm{tg}\frac{\beta}{2}\right)\cdot 180^{\circ}/\pi. \qquad (3.18)$$

Угол, необходимый для дополнительных построений,

$$\gamma = 90^{\circ} - \beta. \qquad (3.19)$$

Далее, находят биссектрису вспомогательной кривой

$$Б_{в} = r_1 \cdot \left(\frac{1}{\cos\frac{\beta}{2}} - 1\right) + u. \qquad (3.20)$$

На следующем этапе определяют от начала основной круговой кривой радиуса R_1 до вершины угла, в который вписана вспомогательная кривая (расстояние между точками N и F, рис. 3)

$$b = T_{в} + m. \qquad (3.21)$$

Вычисляют расстояние от центра серпантины до вершины угла, в который вписана вспомогательная кривая, по одной из формул:

$$d = \frac{b}{\cos\beta} = \frac{R_1}{\sin\beta}. \qquad (3.22)$$

Затем находят тангенс серпантины

$$T_{с} = d + T_{в} + m_2 \qquad (3.23)$$

и центральный угол основной круговой кривой после введения переходных кривых

$$\alpha_0 = 360^{\circ} - 2\cdot(\gamma + \Delta) - \alpha. \qquad (3.24)$$

Длину основной круговой кривой находят по формуле

$$K_0 = \frac{\pi\cdot R\cdot\alpha_0}{180^{\circ}}. \qquad (3.25)$$

При назначении переходных кривых у вспомогательных кривых центральный угол $\beta_{в}$, соответствующий этим кривым, уменьшается на 2δ:

$$\beta_{в} = \beta - 2\cdot\delta. \qquad (3.26)$$

Тогда длина оставшейся вспомогательной круговой кривой

$$K_{в} = \frac{\pi\cdot r\cdot\beta_{в}}{180^{\circ}}. \qquad (3.27)$$

Полная длина серпантины

$$L_{с} = 2\cdot(2l + K_{в} + L) + K_0. \qquad (3.28)$$

Домер серпантины

$$Д_{с} = L_{с} - 2\cdot T_{с}. \qquad (3.29)$$

Размещение элементов земляного полотна в шейке серпантины. Наименьшее расстояние между ветвями серпантины Z, необходимое для размещения элементов земляного полотна верхней и нижней ветвей серпантины зависит от ширины земляного полотна, типа боковых канав, поперечного уклона ската местности по линии шейки серпантины, способов сопряжения между собой верхнего и нижнего полотна дороги (рис. 4).

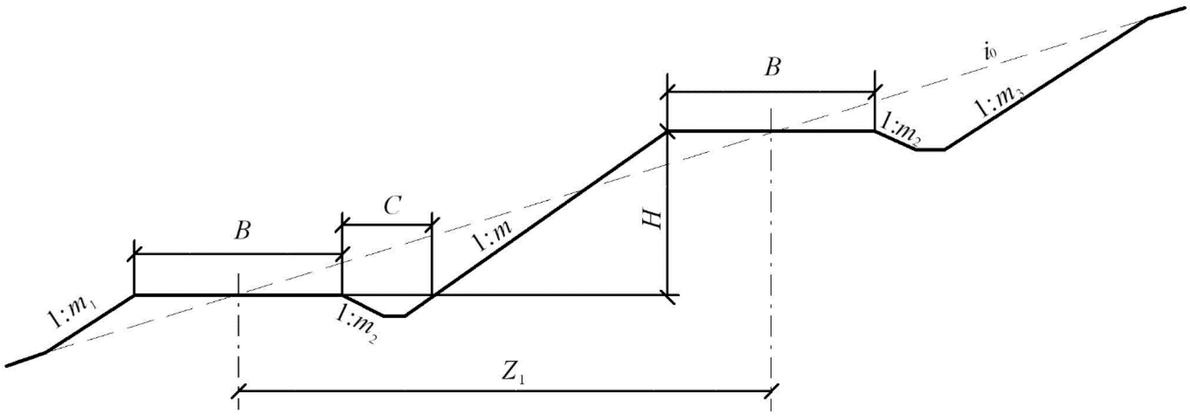

Рисунок 4 - Минимально требуемое расстояние между ветвями серпантины

Минимально требуемое расстояние между ветвями серпантины Z_1 не должно быть меньше значения

$$Z_1 = \frac{H}{i_0}, \tag{3.30}$$

где H – перепад высот верхней и нижней ветвей серпантины, i_0 – уклон ската местности по линии шейки серпантины (рис. 4, 5).

При совмещении откосов полувыемки и полунасыпи в одной плоскости перепад высот верхней и нижней ветвей серпантины

$$H = \frac{(B + C)\cdot i_0}{1 - n \cdot i_0}, \tag{3.31}$$

где B – ширина земляного полотна, C – ширина кювета поверху, n – заложение откосов земляного полотна (рис. 4). Тогда

$$Z_1 = \frac{B + C}{1 - n \cdot i_0}. \tag{3.32}$$

При сопряжении верхнего и нижнего полотна с помощью подпорных стенок (рис. 5)

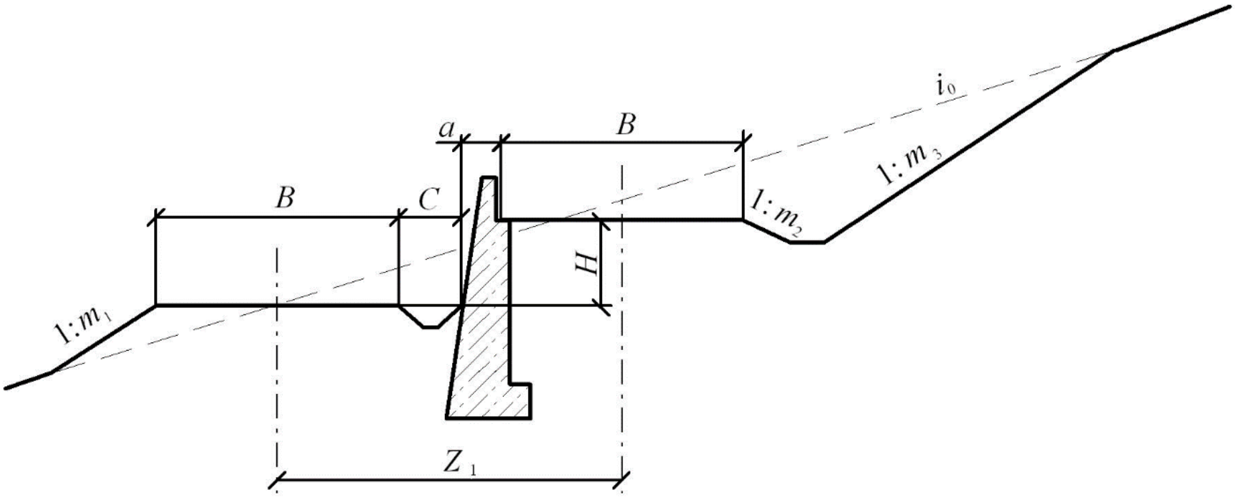

Рисунок 5 - Минимальное расстояние между ветвями серпантины с подпорной стенкой

$$H = \frac{B + C + a}{1 - n \cdot i_0}, \tag{3.33}$$

где a – ширина подпорной стенки. Тогда

$$Z_1 = \frac{B + C + a}{1 - n \cdot i_0}. \tag{3.34}$$

В действительности же фактическое расстояние между серединами вспомогательных кривых (в шейке серпантины)

$$Z = 2\left(d \cdot \sin\frac{\alpha}{2} + r_1 \cdot \left(\frac{1}{\cos\frac{\beta}{2}} - 1\right) + u_{в}\right). \tag{3.35}$$

После определения Z_1 и Z проверяют возможность размещения величины Z на расстоянии Z_1.

Если $Z > Z_1$, то элементы верхнего и нижнего полотна не разместятся в месте наибольшего сближения ветвей. В этом случае следует:

- увеличить радиусы вспомогательных кривых;
- сдвинуть центр серпантины внутрь острого угла.

Если эти мероприятия не помогут, то следует принять устройство подпорных стенок. Следует заметить, что может иметь место значительное количество комбинаций сопряжения подпорных стенок.

Источники информации

1. Жуков В.И. Проектирование в сложных условиях: учеб. пособие. КрасГАСА, 2000. 95 с.
2. СП 34.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85* / Мин-во регионального развития Российской Федерации. – М., 2013. 139 с.