

Г.В. Величко, В.В. Филиппов

НОРМИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ КРИВЫХ И КОНТРОЛЬ ПЛАВНОСТИ ТРАССЫ

Существенная часть раздела 2 «Технические нормы на проектирование основных элементов автомобильных дорог» строительных норм ДБН В.2.3-4-2000 [7] отведена нормированию элементов криволинейных участков дорог и правилам их конструирования. Основой этого раздела ДБН послужили известные СНиП 2.05.02-85 [10]. Достаточно большое число пунктов ДБН в разделе 2, относящихся к криволинейным участкам, далеки от совершенства, и вследствие этого в нормы и правила заложены пониженные показатели удобства и плавности движения.

Плавность трассы является одним из важнейших качеств автомобильных дорог. Недостаточная плавность трассы, заложенная при ее начальном проектировании, трассировании, трудно исправляется даже при реконструкции.

Плавность трассы существенно зависит от параметров переходных кривых, среди которых в последнее время выделяются сплайн-кривые. Несмотря на преимущества сплайнов перед другими типами переходных кривых, сплайны ещё не стали привычным элементом трассы при проектировании автомобильных дорог. Одна из основных причин этого заключается в том, что долгое время не были нормированы параметры и характеристики сплайнов и других типов переходных кривых по условиям удобства и безопасности движения. В ДБН [7] нормированы длины переходных кривых в зависимости от радиуса и только применительно к клотоидам, сопрягающим прямые с круговыми кривыми. Этого явно недостаточно даже для нормирования тех же клотоид.

Клотоида долгое время применялась в качестве главной переходной кривой при проектировании автомобильных дорог. Основное свойство клотоиды отражает математически несложное уравнение $r \cdot s = C$, или: произведение радиуса r в любой её точке на расстояние s от начала клотоиды до этой точки - величина постоянная.

В теории дорожных переходных кривых [1,8] постоянная C определена из физических соображений через постоянство трех величин:

- 1) базы автомобиля,
- 2) скорости движения по переходной кривой,
- 3) угловой скорости поворота водителем рулевых колес.

Установленное таким образом основное свойство клотоиды сделало её главной переходной (рулевой) кривой в дорожном проектировании. Анализ показывает, что декларированное постоянство очень часто не выдерживается, и главенство клотоиды, как переходной кривой, в обеспечении плавности и безопасности движения, не обосновано. Из указанных трех величин нет претензий только к постоянству базы автомобиля. Но скорость автомобиля и угловая скорость поворота рулевых колёс? Сомнительно! Возражения не были весомыми при малой длине переходных кривых и высоких значениях расчетных скоростей. Действительно, например, на автомагистрали переходную кривую длиной 100-120 м автомобиль проезжает с расчетной скоростью примерно за 3 секунды. Но если переходная кривая устроена на съезде, то скорость движения по нему существенно меньше, чем на магистрали и время проезда по переходной кривой значительно возрастает. Изменение скорости, начатое на переходно-скоростной полосе, продолжается на самой переходной кривой. Полоса движения на переходной кривой непрерывно уширяется от её начала, и водитель приспособливается к этой переменной ширине, меняя угловую скорость поворота рулевых колес. Очевидный вывод: ни скорость движения

по переходной кривой, ни угловая скорость поворота водителем рулевых колес не постоянны.

Обычно длина клотоиды нормируется для случая сопряжения ею прямой и окружности. Именно для этой схемы в табл. 2.8 ДБН [7] нормируются минимальные длины переходной кривой.

Несмотря на то, что клотоида применяется достаточно давно, остались нерешенными задачи её нормирования для часто встречающихся случаев.

1. Стандартное нормирование в ДБН [7] препятствует проектированию клотоидных закруглений при $R < 150 - 200$ м, и данные табл. 2.8 ДБН могут быть применимы только для серпантин в горной местности. Следуя таблице 2.8 ДБН, невозможно ввести переходную кривую во многие дорожные закругления без нарушения их геометрической целостности и плавности. Например, согласно таблице 2.8 ДБН для кривой $R=60$ м наименьшая длина клотоиды 40 м. Согласно формуле $\beta = 57,3^\circ L / (2R)$ при длине $L = 40$ м $\beta = 18,1^\circ$, и наименьший угол поворота $38,2^\circ$ для закругления без круговой вставки, т.е., при симметричной биклотоиде. Это значит, что при $R=60$ м и при угле поворота трассы менее, например, $\theta = 30^\circ$ в закруглениях без круговой вставки длина клотоиды ($L = 2R(\theta/2) / 57,3^\circ$) не может быть больше 31,4 м, что на 30% меньше, чем требует таблица 2.8 ДБН, что является нарушением ДБН.

2. Не ясно, какой клотоидой сопрягать две окружности в С-образном сопряжении. Например, какой радиус (200 м или 500 м) следует брать из таблицы табл. 2.8 ДБН [7] для определения длины и параметра переходной кривой? Согласно этой таблице для радиуса 200 м нужна клотоида длиной 70 м, для радиуса 500 м - длиной 110 м. Это две разные клотоиды: параметр клотоиды ($A = \sqrt{RL}$) для радиуса 200 м $A = \sqrt{200 \times 70} = 118,3$ м, для радиуса 500 м

$A = \sqrt{500 \times 110} = 234,5$ м. Ясно, что на участке сопряжения указанных окружностей клотоида должна быть единой, то есть, её параметр в каждой точке сопрягающего элемента должен быть одним и тем же. Но какому параметру эта сопрягающая клотоида должна соответствовать, 118,3 м или 234,5 м? Пункт 2.20 и таблица 2.8 ДБН [7] не дают ответа.

3. При большем параметре A клотоиды длина дуги переходная кривая может быть меньше нормативной и наоборот.

Практика дорожного движения уже давно нуждается в переходных кривых другого типа, чем клотоида, и в закруглениях малых радиусов, например, на съездах транспортных развязок, и длинных переходных кривых с большими конечными радиусами при проектировании эстетических трасс.

Даже для коротких переходных кривых на съездах транспортных развязок нужны кривые другого типа, чем клотоида. Доказано, что линейная закономерность изменения кривизны, как у клотоиды, является основной причиной снижения безопасности движения на клотоиде [9]:

на клотоиде превышение скорости приводит к увеличению центростремительного ускорения с возможным нарушением устойчивости движения, скольжением и заносом автомобиля,

для клотоиды характерно резкое возрастание центростремительного ускорения,

клотоида имеет большие углы наклона касательных в сечениях расхождения кромок и разделения бровок на рампах транспортных развязок, ухудшающие условия вхождения автомобилей на дорогу со стороны примыкающей к ней рампы,

несмотря на нормирование клотоид, из условия движения с постоянной расчетной скоростью, движение по ним зачастую происходит с изменением скорости.

Клотоиды зачастую мало применимы при проектировании психологически ясных и зрительно плавных трасс с длинными переходными кривыми. Время проезда по длинной переходной кривой велико, а фактическая скорость движения на ней может меняться в отличие от постоянной скорости, которая принимается при обосновании клотоиды как переходной кривой. А известный постулат (для клотоиды) постоянства поворота рулевых колес здесь не применим, так как обычно при большой длине геометрического элемента водитель обеспечивает устойчивость автомобиля в выбираемом динамическом коридоре легкими поворотами руля, и траектория движения автомобиля систематически колеблется около оси полосы. Так что постоянство указанных величин и здесь не подтверждается практикой.

Не всегда однозначен ответ на вопрос о применимости клотоиды для достижения требуемых архитектурно-ландшафтных свойств трассы. Из-за постоянства произведения её радиуса на длину, клотоида является довольно «жестким» геометрическим элементом, форма которого требует такой же формы огибаемого элемента рельефа или ситуации. При решении задач трассирования эта же жесткость клотоиды часто не позволяет варьировать её длиной или её формой так, как этого требуют правила архитектурно-ландшафтного проектирования. Из однозначной зависимости между длиной клотоиды, её углом β и сдвижкой p , значения которых обратно пропорциональны радиусу, следует, что существенное и достаточное для целей архитектурно-ландшафтного проектирования удлинение клотоиды или увеличение её параметра возможно только при увеличении значений радиусов и углов закруглений. Для обеспечения зрительной плавности параметр A клотоиды согласуется с радиусом R и определяет её длину L , при которой она становится сопоставимой с радиусом. Так, при $L = R$ даже при биклотоиде, то есть без круговой вставки, требуется угол поворота не менее 57.3° . Если угол

поворота в два раза меньше, то и длина клотоиды при том же радиусе должна быть уменьшена тоже в два раза, а зрительная плавность при этом будет ухудшена. Если же необходимо сохранить прежнюю длину клотоиды при уменьшении угла поворота в два раза, то радиус следует увеличить в два раза, что существенно сдвигает трассу и возможно увеличение объемов работ. Такие же трудности возникают при ограничениях на величину биссектрисы.

На практике очень часто изложенные здесь проблемы остаются неразрешенными, в результате чего на криволинейных участках допускается нестыковка элементов, сведение геометрической гладкости до нулевого порядка. В итоге транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог по показателям удобства и безопасности движения снижаются. Для разрешения указанных проблем, по сути, обусловленных постоянством скорости изменения кривизны клотоиды, достаточно расширить геометрическую элементную базу переходных кривых автомобильных дорог с включением в нее кривых с нелинейным по длине изменением кривизны.

До появления развитых САПР, при проектировании плавной трассы основная трудность заключалась в том, что прежде, чем увидеть клотоиду уложенной на плане местности, требовалось рассчитать ее геометрические параметры, элементы детальной разбивки, а затем перенести на чертеж. Такая методика, конечно, громоздкая. Мало помогали делу гибкие линейки и шаблоны клотоид и круговых кривых. К удовлетворительному результату приводил метод проб и ошибок, на что уходило много времени, и это совершенно не стимулировало развитие клотоидного трассирования, тем более что нормативные документы не требовали в явном виде продолжения плавных трасс. И в результате – “жесткие трассы” даже в странах с высоким уровнем автомобилизации и развитой дорожной сетью.

Автоматизация проектирования сняла технические трудности при расчетах и вычерчивании клотоидных трасс. В известной программе CREDO [3,4] можно строить динамически изменяющуюся клотоиду, ухватив ее за один конец и направляя другой по направлению трассы, контролировать ее параметры. Проектировщику уже нет необходимости тратить время на расчет элементов клотоид. Но, решив ряд вычислительных и чертежных задач, именно автоматизация высветила проблемы проектирования плавных трасс, что заставило пристальнее изучить свойства переходных кривых, в том числе кривых с нелинейным изменением кривизны, обосновать метод их нормирования и ввести их в проектную практику.

Возможность применения в качестве переходных, наряду с клотоидами, и других математических кривых, обоснована в трудах А.К.Бируля, В.Ф.Бабкова, М.С.Замахаева, А.А.Белятынского, В.А.Федотова О.В.Андреева, и др.

Наиболее известные переходные кривые, по многим свойствам отличные от клотоиды - это предложенные А.А.Белятынским и С.А.Тарановым [2] кадиоида (КАДИ) и В.А.Федотовым [9] ПЕРС - переходная кривая для движения с переменной скоростью (Союздорпроект). Эти кривые, а также известная из учебников «тормозная кривая» (Bremskurve) [1,8], используются, в основном, как короткие переходные кривые - вспомогательные элементы трассы, сопрягающие прямые и круговые кривые малых радиусов.

Свойства переходных кривых и с линейной, и с нелинейной закономерностью изменения кривизны, их общность и различия детально исследованы Г.В.Величко, В.В.Филипповым [5,6]. На основе этих исследований предложен общий метод нормирования параметров любых типов переходных кривых. Из этого общего метода следуют, как частные, все известные зависимости, по которым нормируются параметры клотоиды. В таком общем методе задачи нормирования

переходных кривых с любой, как с линейной, так и с нелинейной закономерностью изменения кривизны, решаются по тем же апробированным критериям, по которым нормируются элементы плана и продольного профиля.

Так, известно, что безопасность и удобство движения по криволинейным элементам плана определяются центробежным ускорением и скоростью его изменения J (м/с³). Именно по допустимому значению скорости изменения центробежного ускорения $J_{\text{доп}}$ нормируют в ДБН [7] минимальную длину клотоиды. На переходной кривой с нелинейной закономерностью изменения кривизны скорость нарастания центробежного ускорения не постоянна, и поэтому говорить о минимальной длине такой кривой вряд ли имеет смысл. Какой же параметр кривой следует нормировать, назначая его предельное значение? Ответ очевиден - это должен быть именно тот параметр, который определяет суть таких переходных кривых, то есть показатель темпа изменения их кривизны.

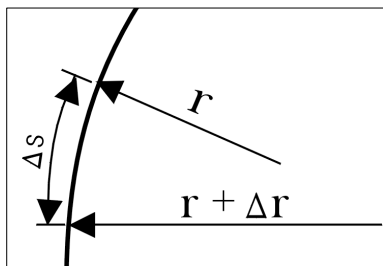


Рисунок 1 - Схема к расчету скорости изменения кривизны

Как в этом нетрудно убедиться, именно темп изменения кривизны определяет скорость нарастания центробежного ускорения. В любой точке переходной кривой с радиусом кривизны r центробежное ускорение вычисляется по формуле $a = v^2 / r$. Если в эту формулу ввести кривизну $k = 1 / r$, то

$a = v^2 k$. В некоторой последующей точке переходной кривой (см. рис. 1), отстоящей от предыдущей точки на достаточно малое расстояние Δs , будем иметь: радиус $r + \Delta r$, кривизну $k + \Delta k$ и ускорение $a = v^2(k + \Delta k)$. С учётом того, что при малой длине Δs скорость

движения может рассматриваться как постоянная, приращение ускорения на той же малой длине $\Delta a = v^2 \Delta k$ и, соответственно, скорость нарастания центробежного ускорения $J = \Delta a / \Delta t = v^2 \Delta k / \Delta t$. Таким образом, на участке малой длины Δs величины Δa и J прямо пропорциональны приращению кривизны Δk . Так как время проезда по участку Δs кривой $\Delta t = \Delta s / v$, то окончательно, на любом участке длиной Δs скорость нарастания центробежного ускорения (м/с³):

$$J = (\Delta k / \Delta s) v^3, \quad (1)$$

где $\Delta k / \Delta s$ - скорость изменения кривизны (приращение кривизны Δk (1/м) на элементарном участке кривой Δs (м)), размерность скорости изменения кривизны 1/м²;

V - скорость движения, (м/с).

Для сокращённого обозначения скорости изменения кривизны $\Delta k / \Delta s$ введен символ W . Скорость изменения кривизны для любого типа переходной кривой на произвольно выбранном элементарном её отрезке может быть вычислена по формуле $W = \Delta k / \Delta s$ (1/м²). Соответственно, на этом элементарном отрезке кривой скорость нарастания центробежного ускорения $J = W v^3$ (м/с³).

Ясно, что при резком изменении кривизны движение по переходной кривой не будет ни безопасным, ни удобным. Поэтому скорость изменения кривизны W не должна превышать допустимых значений, которые определяются допустимой скоростью нарастания центробежного ускорения $J_{\text{доп}}$. Таким образом, условие

$$W_{\text{доп}} = J_{\text{доп}} / v^3 \quad (2)$$

должно служить общим обоснованием нормирования максимальной допустимой скорости изменения кривизны W для всех видов переходной кривой.

При таком общем подходе к нормированию параметров любой переходной кривой нормирование параметров клотоиды является частным случаем. В любой точке клотоиды по всей её длине L или на любом её элементарном отрезке скорость W изменения кривизны постоянная. Это следует из уравнения клотоиды $s \cdot r = s / k = C$, то есть $W = dk / ds = 1 / C$. Параметр C находят из формулы $C = RL$ (или $C = 1 / A^2$, здесь A - используемый в действующих нормативных документах параметр клотоиды, $A = \sqrt{RL}$). И окончательно, подставляя величину $W = 1 / RL$ в левую часть общей зависимости (2) для нормирования максимальной скорости изменения кривизны, получим известную формулу для минимальной длины клотоидной кривой: $L = v^3 / (J_{\text{доп}} R)$.

Таким образом, разрабатывая нормы и правила применения переходных кривых любого вида, следует нормировать величину $W_{\text{доп}}$ - максимальный темп изменения кривизны. Очевидно, что не имеет смысла нормировать другие параметры. В каждом конкретном случае вид кривой, её длина и параметры зависят от местных рельефных и ситуационных особенностей, определяющих условия движения. Но так как при каждом проектировании переходной кривой любого вида она характеризуется конкретной скоростью изменения кривизны W , то именно этот параметр и следует определять расчетом и сравнивать с допустимым значением.

Рассчитанные для каждой кривой значения скорости изменения кривизны W необходимо сравнивать с допустимыми значениями $W_{\text{доп}}$, которые следует нормировать для стандартных расчетных скоростей движения, исходя из предельных значений скорости нарастания центробежного ускорения $J_{\text{доп}}$. Трудность заключается в том, что анализ действующих

нормативных документов не даёт однозначного ответа на вопрос о предельном значении $J_{\text{доп}}$, положенном в основу нормирования переходных кривых. Так, например, расчётные значения $J_{\text{доп}}$, принятые в действующем ДБН, существенно отличаются от ожидаемой величины $0,5 \text{ м/с}^3$, декларированной в ряде нормативных документов, и изменяются почти в два раза (от $0,3 \text{ м/с}^3$ до $0,67 \text{ м/с}^3$). Приведенные в табл. 1 значения получены обратным пересчётом минимальных длин переходных кривых (клотоид) из табл. 2.8 в [7] и табл. 11 в [10].

Можно предположить что такой разброс расчётных значений $J_{\text{доп}}$ связан с «подгонкой» длин переходных кривых к рациональным длинам отгонов виражей.

Значение $J_{\text{доп}}$, равное $0,5 \text{ м/с}^3$, можно было бы считать достаточно приемлемым. Однако детальный анализ показывает, что уточнения $J_{\text{доп}}$ и дифференцированный подход к назначению его расчётных значений могут и улучшить условия движения, и способствовать снижению объемов работ. Здесь полезен краткий исторический экскурс. Известно, что параметр $J_{\text{доп}}$ впервые исследовали железнодорожники и в качестве нормативного значения ими было принято $J_{\text{доп}} = 0,3 \text{ м/с}^3$ (английский проф. Шорт предложил это значение на основе экспериментальных исследований). Известный автомобилист Янте называет J импульсом и назначает $J_{\text{доп}}$ в пределах от $0,5 \text{ м/с}^3$ до $1,25 \text{ м/с}^3$. Отечественные дорожники вначале принимали $J_{\text{доп}} = 0,3 \text{ м/с}^3$. Затем перешли к $0,5 \text{ м/с}^3$, иногда принимали $1,0 \text{ м/с}^3$. Так, например, в проекте ОДН РФ от 1997 г. «Геометрические элементы автомобильных дорог» предусматривалось для автомагистралей и для скоростных дорог $J_{\text{доп}} = 0,8 \text{ м/с}^3$, а для всех остальных автомобильных дорог - $1,0 \text{ м/с}^3$.

Таблица 1 - Расчётные значения нарастания центробежного ускорения в действующем ДБН [7]

| | | | | | | | | |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Расчетная скорость, V (км/ч) | 150 | 120 | 100 | 80 | 60 | 50 | 40 | 30 |
| R _{мин} , основной, м | 1200 | 800 | 600 | 300 | 150 | 100 | 60 | 30 |
| L _{мин} , основной, м | 100 | 120 | 120 | 90 | 60 | 50 | 40 | 30 |
| J, м /с ³ | 0,60 | 0,38 | 0,30 | 0,40 | 0,51 | 0,53 | 0,57 | 0,64 |
| R _{мин} , горная, м | 1000 | 600 | 400 | 250 | 125 | 100 | 60 | 30 |
| L _{мин} , горная, м | 120 | 120 | 100 | 80 | 55 | 50 | 40 | 30 |
| J, м /с ³ | 0,60 | 0,51 | 0,53 | 0,54 | 0,67 | 0,53 | 0,57 | 0,64 |

А.К. Бируля считает, что длину переходной кривой следует назначать так, чтобы время проезда по ней было не менее 1 с на обычных дорогах, и 2 с на автомагистралях. Такие значения времени проезда сопоставимы с общепринятыми значениями времени реакции, используемыми при проектировании дорог. По другим данным это время назначается до 5 с. Считается, что такая оценка времени проезда по переходной кривой связана со временем реакции водителя и необходимой адекватной оценкой изменения условий движения.

Из всего этого также следует, что необходимо обоснованно дифференцировать значения $J_{доп}$ и, соответственно, $W_{доп}$ для различных условий движения. А для того, чтобы не было путаницы и неопределенности при установлении параметров переходных кривых, в нормативных документах, в частности, в ДБН [7] должны быть установлены не минимальные длины переходных кривых, а именно предельные значения: $J_{доп}$ - скорость нарастания центробежного ускорения и $W_{доп}$ - темп изменения кривизны. Нормированные значения $J_{доп}$ и $W_{доп}$ позволят обоснованно рассчитывать, назначать и проверять параметры

переходных кривых, обеспечивающие требуемые условия безопасности и удобства движения для всех случаев проектирования дорожных закруглений (в действующем СНиП нормированы длины переходных кривых не для всех случаев их применения). Ведь именно таким образом, то есть, нормированием физических, а не геометрических характеристик, обеспечивается безопасное движение на железных дорогах, и в директивных документах нормируются критические значения нарастания центробежного ускорения, а не длины переходных кривых, которые находятся стандартным расчетом. Так, в директивных документах 8ЦЗ (1976 г.) и 2ЦЗ (1996 г.) «Приказ об установлении допускаемых скоростей движения поездов...» установлены критические значения $J_{доп}$ ($0,6 \text{ м/с}^3$ для общих случаев и $0,3 \text{ м/с}^3$ для сопряжения двух кривых с разностью кривизны менее $1/3000$).

С учетом изложенного, в соответствии с условиями местности и экономической целесообразностью проектирования криволинейных участков трассы выделены три уровня удобства движения и три градации значений $J_{доп.}$, см. табл 2.

Первый уровень удобств движения может быть установлен при проектировании автомагистралей в нестеснённых условиях местности, при которых технически возможно и экономически целесообразно обеспечение максимального удобства движения ($J_{доп}$ в пределах $0,3-0,5 \text{ м/с}^3$).

Второй уровень следует выбирать при проектировании всех остальных дорог в условиях, аналогичных первому уровню ($J_{доп}$ в пределах $0,4-0,7 \text{ м/с}^3$).

Третий уровень удобств движения может быть установлен при проектировании нового строительства и реконструкции дорог в сложных топографических условиях, в застроенной или горной местности, ($J_{доп}$ в пределах $0,95-1,4 \text{ м/с}^3$) при этом значения $J_{доп}$ следует считать граничными по всем критериям.

Таблица 2 - Максимально допустимая скорость нарастания центробежного ускорения

| Расчётная скорость V , км/ч | Минимальный радиус R , м | Максимально допустимая скорость нарастания центробежного ускорения $J_{доп}$ в зависимости от уровня удобства движения, м/с ³ | | |
|-------------------------------|----------------------------|--|-----------|-----------|
| | | Уровень 1 | Уровень 2 | Уровень 3 |
| 150 | 1200 | 0,30 | 0,40 | 0,95 |
| 120 | 800 | 0,30 | 0,40 | 0,95 |
| 100 | 600 | 0,30 | 0,40 | 0,95 |
| 80 | 300 | 0,35 | 0,50 | 1,10 |
| 60 | 150 | 0,40 | 0,60 | 1,25 |
| 50 | 100 | 0,40 | 0,60 | 1,25 |
| 40 | 60 | 0,40 | 0,60 | 1,25 |
| 30 | 30 | 0,50 | 0,70 | 1,40 |

Выше было отмечено, что для переходных кривых достаточно нормировать максимально допустимую скорость нарастания центробежного ускорения и нецелесообразно нормировать длину переходной кривой. Исключение, как показано ранее, могут составить только переходные кривые с линейным законом изменения кривизны - клотоиды. Так нормированы минимально-допустимые длины переходных кривых в действующем ДБН [7], табл. 2.8. В несовершенстве такого подхода убеждает тот факт, что данные табл. 2.8 ДБН приводят к невозможности устройства переходных кривых в основной массе дорожных закруглений без нарушения их

геометрической целостности и плавности (см. выше о недостатках клотоид).

Отмеченные противоречия в методике нормирования разрешаются ещё одним условием - условием практической целесообразности устройства переходных кривых. Считается, что практическая целесообразность и положительный эффект от устройства переходной кривой возникает при величине сдвигки круговой кривой p более 0,2 м (по некоторым нормативным документам - при $p > 0,1$ м). При меньших значениях сдвигки для удобства проезда водители смещают траекторию движения автомобиля в пределах полосы движения и без переходной кривой. Исходя из этого условия ($p=0,2$ м), для клотоид предлагается нормировать их минимально допустимые длины, так как в силу линейного характера изменения кривизны клотоида имеет наименьшую длину по сравнению со всеми другими кривыми с тем же скоростями изменения кривизны W . А для всех других типов переходных кривых из того же условия практической целесообразности предлагается нормировать максимально допустимую скорость изменения кривизны. В таблице 3 приведены минимальные, при $p = 0,2$ м, длины клотоид L_{\min} , минимальные углы закруглений θ_{\min} с такими переходными кривыми и соответствующие этому условию значения $J_{\text{доп}}$ и W_{max} .

Полученные значения практически целесообразны и обеспечивают техническую возможность их соблюдения (по минимально допустимым углам поворота) в большинстве случаев. Незначительное увеличение по сравнению с табл. 2.8 ДБН [7] минимально допустимой длины переходных кривых для больших радиусов обеспечит улучшение условий движения на скоростных дорогах, а её уменьшение для кривых меньших радиусов расширит пределы углов поворота для дорог более низких категорий.

Таблица 3 - Минимальные длины клотоид, углы закруглений и максимально допустимая скорость изменения кривизны

| $V_{расч},$ км/ч | $R_{мин},$ м | $L_{мин}$ при $p=0.2,$ м | $\theta_{мин}$ | $J_{доп},$ м/с ³ | $W_{max},$ $10^{-5}/м^2$ |
|---------------------|--------------|-----------------------------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 150 | 1200 | 76 | 3° 35' | 0,79 | 1,10 |
| 120 | 800 | 62 | 4° 28' | 0,74 | 2,02 |
| 100 | 600 | 54 | 5° 07' | 0,66 | 3,09 |
| 80 | 300 | 38 | 7° 15' | 0,96 | 8,77 |
| 60 | 150 | 27 | 10° 15' | 1,13 | 24,7 |
| 50 | 100 | 22 | 12° 34' | 1,20 | 45,5 |
| 40 | 60 | 17 | 16° 13' | 1,34 | 98,0 |
| 30 | 30 | 12 | 22° 55' | 1,59 | 278 |

Со скоростью изменения кривизны W , нормированной в таблице 3, неудобно работать на практике. Поэтому предложен более удобный для практиков-проектировщиков метод проверки соответствия кривой с нелинейным изменением кривизны нормативным требованиям нарастания поперечных ускорений на переходной кривой. Метод анализа основан на следующих известных положениях.

У клотоиды, в каждой её точке скорость изменения кривизны постоянна и обратно пропорциональна её параметру C , который определяется как $C = RL$. То есть, для клотоиды $W = 1/C$. Так как часто параметр клотоиды принято определять в метрах, то есть в виде $A = \sqrt{RL}$, то темп изменения кривизны удобно определять в виде $W = 1/A^2$. Отсюда следует, что $A = \sqrt{1/W}$ и таким образом, с учетом (1а) для клотоиды нормируется параметр A :

$$A_{\text{мин}} = \sqrt{1/W_{\text{доп}}} = \sqrt{V^3 / (47J_{\text{доп}})}, \quad (3)$$

где V - расчетная скорость, км/час.

Например, при расчетной скорости 120 км/час и степени нарастания центробежного ускорения 0,5 м/с³ минимальный параметр клотоиды

$A_{\text{мин}} = \sqrt{120^3 / (47 \times 0,5)} = 271 \text{ м}$. При этом минимальная длина клотоиды находится из зависимости $L_{\text{мин}} = A_{\text{мин}}^2 / R$, и, например, для радиуса кривой 600 м $L_{\text{мин}} = 2712 / 600 = 123 \text{ м}$. ДБН дает значение 120 м. Расхождение несущественно.

На переходной кривой с нелинейным изменением кривизны величина W , в отличие от клотоиды, не постоянна, а в каждой точке меняется. Так же на таких кривых меняется и величина $A_{\text{нк}}$, связанная с темпом изменения кривизны W зависимостью $A_{\text{нк}} = \sqrt{1/W_{\text{нк}}}$. Но, тем не менее, в любой точке переходной кривой должно соблюдаться условие (3), и поэтому для кривой с нелинейным изменением кривизны:

$$A_{\text{нк}} \geq A_{\text{мин}}. \quad (4)$$

Таким образом, для повышения удобства и безопасности движения и для нормирования переходных кривых всех типов предложено заменить таблицу 2.8 ДБН [7] таблицей 4. В таблице 4 приведены рекомендуемые и минимальные значения длин клотоид $L_{\text{доп}}$. Для контроля скорости нарастания кривизны, нарастания поперечных ускорений и поперечных сил в таблице 4 приведены также параметры переходных кривых, соответственно $A_{\text{рек}}$ - для обеспечения максимального удобства движения, и $A_{\text{мин}}$ - для проектирования нового строительства и реконструкции дорог в сложных топографических условиях, в застроенной или горной местности.

Параметр A , определяющий скорость изменения кривизны на переходных кривых любого типа, не должен быть меньше значений, приведенных в таблице 4.

В отношении другой границы диапазона - минимально допустимой скорости изменения кривизны $W_{\text{доп}}$ - следует отметить, что их ограничение не имеет смысла. Это объясняется тем, что основное достоинство переходных кривых с нелинейным характером изменения кривизны, по сравнению с клотоидами именно в том-то и заключается, что скорость изменения кривизны и, соответственно скорость нарастания центробежного ускорения, у них изменяются плавно, от нулевых до максимальных расчётных значений.

Таблица 4 - Нормативные параметры переходных кривых с линейным и нелинейным характером изменения кривизны

| Расчётная скорость V , км/ч | Длина переходной кривой с линейным изменением кривизны $L_{\text{доп}}$, м | | Наименьший параметр A , м, для обеспечения удобства движения | |
|-------------------------------|---|-------------|--|--------------------------------|
| | Рекомендуемые | Минимальные | Максимального, $A_{\text{рек}}$ | Минимального, $A_{\text{мин}}$ |
| 150 | 200 | 76 | 490 | 280 |
| 120 | 150 | 62 | 350 | 200 |
| 100 | 120 | 54 | 270 | 150 |
| 80 | 104 | 38 | 180 | 100 |
| 60 | 77 | 27 | 110 | 60 |
| 50 | 67 | 22 | 80 | 50 |
| 40 | 57 | 17 | 60 | 35 |
| 30 | 38 | 12 | 35 | 20 |

Примечание. При заданной степени нарастания бокового ускорения $J_{дон}$ (м/с³) наименьший параметр A следует вычислять по формуле $A_{мин} = \sqrt{V^3 / (47J_{дон})}$.

Обоснованные в настоящей статье методика и параметры нормирования эффективны лишь при достаточном уровне контроля их практического применения. Теория проектирования дорог, критерии безопасности и удобства движения требуют, чтобы переходные кривые разных типов были математически строго определены, а практика требует, чтобы для любых переходных кривых проверка соответствия их параметров нормативам была достаточно проста. Это означает, что расчёт фактических значений W в любой точке такой кривой должен быть простым. В данном случае это не сложно, так как расчет W сводится к простому вычислению разности значений кривизны k на концах элементарного участка, в окрестностях заданной точки. С точностью, достаточной для практических целей, длину Δs такого участка можно принять равной 1 м, и тогда на любом элементарном участке темп изменения кривизны вычисляется просто:

$$W \approx k_s - k_{s+1,м} \approx \Delta k. \quad (5)$$

Так как приращение кривизны $\Delta k = 1/r - 1/(r + \Delta r)$, то отсюда следует другая практическая формула для расчета скорости изменения кривизны на любом элементарном отрезке переходной кривой:

$$W = \Delta k / \Delta s = \Delta r / (\Delta s r (r + \Delta r)) \approx \Delta r / (\Delta s r^2). \quad (6)$$

При $\Delta s = 1$ м также получается простая формула:

$$W \approx \Delta r / r^2. \quad (7)$$

Выводы

1. Обоснована необходимость расширения геометрической элементной базы переходных кривых автомобильных дорог с включением в нее кривых с нелинейным по длине изменением кривизны.

2. Предложен общий метод нормирования параметров любых типов переходных кривых как с линейной, так и с нелинейной закономерностью изменения кривизны.

3. В качестве основного нормируемого показателя для переходных кривых любого вида предложена величина максимальной скорости изменения кривизны, зависящая от расчетной скорости и допустимой скорости нарастания центробежного ускорения. Для различных уровней удобства движения обоснованы нормативные параметры переходных кривых с линейным и нелинейным изменением кривизны.

4. Для контроля плавности трассы предложены практические формулы для расчета скорости изменения кривизны на криволинейном участке дороги.

Литература

1. Бабков В.Ф., Андреев О.В. Проектирование автомобильных дорог. Ч.1: Учебник для вузов. - М.: Транспорт, 1979, 367 с.

2. Беятынский А.А., Таранов А.М. Проектирование кривых при строительстве и реконструкции автомобильных дорог. - К.: Вища школа, 1989. - 302 с.

3. Величко Г.В., Филиппов В.В. Основы методологии конструирования в CREDO. Автоматизированные технологии изысканий и проектирования, 2000, № 2, с.36-40.

4. Величко Г.В., Филиппов В.В. Современная методология и практика проектирования

автомобильных дорог. Автошляховик України, №, 4, 2001, с. 46-49.

5. Величко Г.В., Поспелов П.И., Лобанов Е.А., Филиппов В.В. Конструирование плавных автомобильных дорог с нелинейно меняющейся кривизной. Автомобильные дороги, 2002, № 4, с. 64-67.

6. Величко Г.В., Поспелов П.И., Лобанов Е.А., Филиппов В.В. Развитие нормативной базы проектирования автомобильных дорог с применением в плане и продольном профиле геометрических элементов с нелинейным изменением кривизны. Сб. трудов МАДИ (ГТУ) «Проектирование автомобильных дорог», М., 2002, с. 10-16.

7. ДБН В.2.3-4-2000 (Споруди транспорту, Автомобільні дороги). Держбуд України, Київ, 2000, 117.

8. Проектування автомобільних доріг: Підручник. Ч.1 / Біятинський О.А., В.Й.Заворицький, В.П. Старовойда, Я.В. Хом'як. К. Вища шк., 1997. - 518 с.

9. Проектирование автомобильных дорог: Справочник инженера-дорожника /Под ред. Г.А.Федотова. М.: Транспорт, 1989, 437 с.

10. СНиП 2.05.02-85. Автомобильные дороги. Госстрой СССР.-М.:ЦИТП Госстроя СРСР, 1986. - 56 с.