

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

**Кафедра проектирования, строительства и эксплуатации  
транспортных объектов**

**П. В. КОВТУН, Т. А. ДУБРОВСКАЯ**

# **ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ РЕЛЬСОВОЙ КОЛЕИ**

**Пособие**

**Гомель 2021**

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов

П. В. КОВТУН, Т. А. ДУБРОВСКАЯ

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ РЕЛЬСОВОЙ КОЛЕИ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением  
по образованию в области транспорта и транспортной деятельности  
для обучающихся по специальности 1-37 02 05 «Строительство  
железных дорог, путь и путевое хозяйство» в качестве пособия  
по учебной дисциплине «Железнодорожный путь»*

Гомель 2021

2

УДК 625.1(075.8)  
ББК 39.211  
К56

Рецензенты: заместитель начальника Гомельского отделения Белорусской железной дороги *В. Д. Каймович*;  
кафедра транспортной инфраструктуры (заведующий кафедрой – д-р техн. наук *А. Л. Тюткин*, канд. техн. наук, доцент *А. М. Патласов*) (ДНУЖТ)

### **Ковтун, П. В.**

К56 Проектирование и расчет рельсовой колеи : пособие / П. В. Ковтун; Т. А. Дубровская ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 57 с.  
ISBN 978-985-891-037-2

Рассмотрены основные принципы проектирования и расчеты ширины рельсовой колеи, возвышения наружного рельса в кривых, переходных кривых, а также определение порядка укладки укороченных рельсов в кривых участках пути. Приведены примеры расчета.

Предназначено для студентов строительного факультета специальности 1–37 02 05 «Строительство железных дорог, путь и путевое хозяйство» дневной и заочной форм обучения для выполнения расчетно-графической работы № 1.

**УДК 625.1(075.8)**  
**ББК 39.211**

**ISBN 978-985-891-037-2**

© Ковтун П. В., Дубровская Т. А., 2021  
© Оформление. БелГУТ, 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 УСТРОЙСТВО И ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕЛЬСОВОЙ КОЛЕИ.....	5
2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШИРИНЫ КОЛЕИ В КРИВОЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХАРАКТЕРА ВПИСЫВАНИЯ В НЕЕ ЛОКОМОТИВА.....	11
2.1 Общие сведения.....	11
2.2 Определение оптимальной ширины колеи.....	16
2.3 Определение минимально допустимой ширины колеи.....	19
2.4 Устройство контррельсов в кривых.....	24
2.5 Примеры расчета.....	25
3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗВЫШЕНИЯ НАРУЖНОГО РЕЛЬСА.....	29
3.1 Определение возвышения наружного рельса из условия обеспечения равномерного вертикального износа рельсов обеих нитей кривой.....	29
3.2 Определение возвышения наружного рельса из условия обеспечения комфортабельности езды пассажиров.....	32
3.3 Анализ величины непогашенного ускорения в современных конструкциях подвижного состава .....	35
3.4 Пример расчета.....	37
4 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДЛИНЫ ПЕРЕХОДНОЙ И КРУГОВОЙ КРИВЫХ И ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ИХ РАЗБИВКИ.....	38
4.1 Назначение и форма переходных кривых.....	38
4.2 Выбор длины и параметра переходной кривой.....	41
4.3 Расчет разбивки переходной кривой.....	43
4.4 Пример расчета.....	45
5 УКЛАДКА УКРОЧЕННЫХ РЕЛЬСОВ В КРИВЫХ.....	49
5.1 Расчет укороченных рельсов.....	49
5.2 Пример расчета.....	53
Список литературы .....	57

## ВВЕДЕНИЕ

Обоснование и проверка ширины рельсовой колеи, установление надлежащих размеров возвышения наружного рельса в кривых, выбор и расчет переходных кривых, определение порядка укладки укороченных рельсов в кривых участках пути являются основными задачами в области устройства и проектирования рельсовой колеи. Оптимальное решение этих задач необходимо для обеспечения наилучших условий взаимодействия пути и подвижного состава.

Исходными данными для расчетов являются категории поездов, типы вагонов и локомотивов, среднесуточное количество каждой категории поездов, масса брутто и заданная скорость движения поездов, радиус круговой кривой, угол поворота кривой и другие данные.

Результаты расчетов рельсовой колеи должны отвечать техническим условиям и нормам содержания пути в соответствии с требованиями Правил технической эксплуатации железной дороги в Республике Беларусь [1] и СТП-09150.56.010-2005 «Текущее содержание железнодорожного пути. Технические требования и организация работ» [2].

Кроме того, геометрические параметры рельсовой колеи имеют большое влияние на безопасность движения поездов, а также величину силового взаимодействия между путём и подвижным составом. Известно, что превышение геометрических характеристик установленных размеров ведет к повышенному износу как элементов пути, так и ходовых частей подвижного состава, вызывая при этом сокращение их срока службы.

Таким образом, решение основных задач по устройству и содержанию рельсовой колеи имеет также и технико-экономическое значение, позволяя управлять состоянием железнодорожного пути посредством экономических расчетов при безусловном соблюдении надежности рельсового пути.

# 1 УСТРОЙСТВО И ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕЛЬСОВОЙ КОЛЕИ

Железнодорожный путь в плане характеризуется прямыми и кривыми (рисунок 1.1). Минимальное расстояние между внутренними гранями головок рельсов, измеренное ниже поверхности катания на 13 мм, называется шириной рельсовой колеи.

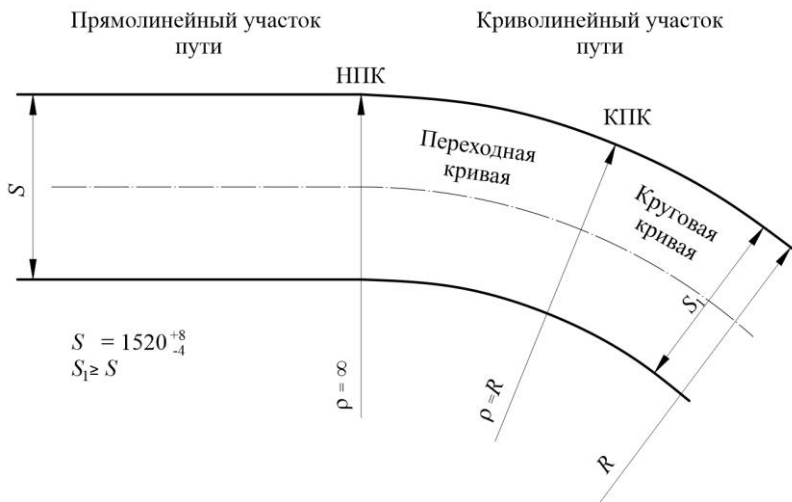


Рисунок 1.1 – Схема рельсовой колеи в плане

Рельсовая колея геометрически контролируется по шаблону, уровню, направлению в плане, просадкам и перекосам рельсовых нитей. Наиболее важным с точки зрения устройства пути является ширина колеи (шаблон) и уровень рельсовых нитей. Ширина рельсовой колеи и допуски ее содержания являются одними из основных факторов, определяющих степень воздействия на путь подвижного состава.

В различных странах ширина рельсовой колеи неодинакова. Так, минимальная ширина рельсовой колеи составляет  $S = 600$  мм (Индия), а максимальная ширина –  $S = 1676$  мм (Индия, Испания, Португалия). Самая распространенная ширина  $S = 1435$  мм составляет 64 % (Европа, США, Япония) от общей протяженности железных дорог мира. В странах СНГ, Финляндии, Монголии ширина рельсовой колеи  $S = 1520$  мм и составляет 12 %. В России на Сахалине узкая колея  $S = 1067$  мм.

На отдельных этапах развития железных дорог допуски в содержании ширины рельсовой колеи изменялись неоднократно. В 1860 году была узаконена ширина колеи 0,714 сажени (1524 мм) с зазором  $3/4'' - 7/4''$  (от 19 до

44,5 мм), а в 1884 году были утверждены допуски по уширению колеи на 0,003 сажени (6,4 мм) и сужению на 0,001 сажени (2,14 мм). Допуски +6 и –4 мм в прямых и кривых  $R > 1000$  м были установлены в 1898 году, при этом оба рельса должны были находиться в одном уровне.

Дальнейшее изменение допусков происходило в 1928 году (+5 мм и 0 мм) и в 1931 году (+10 мм и –3 мм). В 1968 году принимается решение о переходе на ширину рельсовой колеи 1520 мм с допусками +6 мм, –4 мм при скорости движения более 50 км/ч и +10 мм, –4 мм – при скорости менее 50 км/ч.

Допуски в содержании рельсовых нитей по уровню также изменялись неоднократно. В расположении рельсовых нитей по уровню допускалось превышение 4 мм. В 1979 году для снижения виляющего движения экипажей на прямых было разрешено содержать одну рельсовую нить выше другой на 5 мм, а с 1980 и в редакции ПТЭ 2016 года [1] – на 6 мм.

В настоящее время на Белорусской железной дороге действуют следующие нормы ширины рельсовой колеи [1]:

- в прямых участках пути – 1520 мм;
- в кривых при радиусе:
  - 350 м и более – 1520 мм;
  - от 349 до 300 м – 1530 мм;
  - от 299 м и менее – 1535 мм.

На участках железнодорожных линий и путях, где комплексная замена рельсошпальной решетки не производилась, допускается принимать ширину колеи:

- в прямых участках пути – 1524 мм;
- в кривых при радиусе:
  - более 650 – 1524 мм;
  - от 650 до 450 м – 1530 мм;
  - от 449 до 350 м – 1535 мм;
  - от 349 м и менее – 1540 мм.

Величины отклонений от номинальных размеров ширины колеи, не требующие устранения на прямых и кривых участках железнодорожного пути, не должны превышать по уширению +8 мм, по сужению –4 мм. Эти нормы обеспечивают в основном оптимальную ширину колеи для массового вида экипажей (вагонов). Ширина колеи менее 1512 мм и более 1548 мм не допускается. Ширина колеи для пути, уложенного на железобетонные шпалы до 1998 года, менее 1510 мм и более 1548 мм не допускается. Порядок эксплуатации бесстыкового пути на железобетонных шпалах, уложенного до 1996 года, устанавливается Белорусской железной дорогой [1].

Нормативными документами [2] установлены ограничения скоростей движения поездов в зависимости от величины отступления ширины рельсовой колеи. Нормы и допуски содержания рельсовой колеи по шаблону и уровню на железнодорожных путях необщего пользования представлены в [1].

Совершенствование норм и допусков содержания рельсовой колеи происходило во взаимосвязи с установлением геометрических характеристик колесных пар, т. к. колесные пары обращающегося подвижного состава, как свидетельствует практика того времени, не отвечали предъявляемым требованиям. Насадкой колесной пары называют расстояние между нерабочими сторонами гребней колес (рисунок 1.2).

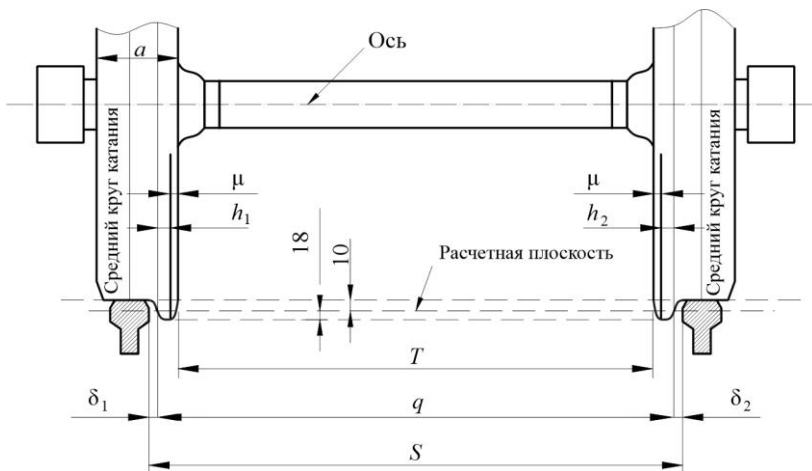


Рисунок 1.2 – Положение вагонной колесной пары в рельсовой колее на прямой

Согласно ПТЭ [1] расстояние между внутренними гранями колес у ненагруженной колесной пары должно быть 1440 мм. У локомотивов и вагонов, а также специального подвижного состава, обращающихся со скоростью 120–140 км/ч, отклонения допускаются в сторону увеличения не более 3 мм и в сторону уменьшения не более 1 мм. При скоростях до 120 км/ч допускаются отклонения  $\pm 3$  мм, у железнодорожного подвижного состава, не имеющего выхода на железнодорожные пути общего пользования, отклонения также не должны превышать  $\pm 3$  мм.

Если поставить колесную пару на прямом участке пути на рельсы, то между гребнями колес и рабочими гранями рельсов будет зазор (см. рисунок 1.2):

$$\delta = \delta_1 + \delta_2.$$

Из рисунка 1.2 следует, что с учетом силового воздействия подвижного состава на путь

$$\delta = S - (T + 2h + 2\mu + \epsilon_q) = S - q + \epsilon_s, \quad (1.1)$$

где  $S$  – ширина колеи в прямом участке пути, мм;



$T$  – насадка колес, мм;

$h$  – толщина гребня, мм. Согласно ПТЭ  $h_{\max} = 33$  мм,  $h_{\min} = 25$  мм (при скоростях движения до 120 км/ч) и  $h_{\min} = 28$  мм (при скоростях движения от 121 до 140 км/ч);

$\mu$  – утолщение гребня выше расчетной плоскости, равное для вагонных колес 1 мм, для локомотивных – нулю;

$q$  – колесная колея, мм. Это расстояние между рабочими гранями гребней (реборд) колес в расчетной плоскости. От вершины гребней расчетная плоскость находится на расстоянии 20 мм у локомотивных колес и 18 мм – у вагонных;

$\epsilon_q$  – изменение ширины колесной пары за счет упругого изгиба ее оси под нагрузкой, мм;

$\epsilon_s$  – упругие изменения ширины колеи под подвижным составом, мм.

Так как существуют минимальные, нормальные и максимальные значения  $S$ ,  $T$ , и  $h$ , то, соответственно, существуют и зазоры  $\delta_{\min}$ ,  $\delta_o$ ,  $\delta_{\max}$ . Подставляя различные значения  $T$ ,  $h$  и  $S$ , получим следующие значения  $\delta$  (таблица 1.1).

**Таблица 1.1 – Зазоры между гребнями колес и рабочими гранями рельсов**

Скорость движения, км/ч	Колесная пара	Зазор между гребнями колес и рабочими гранями рельсов, мм		
		$\delta_{\min}$	$\delta_o$	$\delta_{\max}$
От 0 до 120	Локомотивная	7	14	39
	Вагонная	5	12	37
От 121 до 140	Локомотивная	7	14	31
	Вагонная	5	12	29

Из таблицы 1.1 видно, что в некоторых случаях зазор  $\delta$  может быть значительных размеров. Эти зазоры необходимы для уменьшения сопротивления движению поездов, износа рельсов и колес, исключения возможности заклинивания экипажей при движении и, как следствие, исключения вползания гребня на рельс. Однако излишние размеры  $\delta$  ухудшают условия взаимодействия пути и подвижного состава, а именно: увеличивают угол удара при косых набеганиях колес в прямых и при проходе в кривые участки пути, ухудшают условия комфортабельности езды (при больших значениях зазора больше качка и влияние железнодорожных экипажей), быстрее расстраивается путь и т. д. Вот поэтому с 70-х годов прошлого века встал вопрос об уменьшении зазора  $\delta$ . Это было сделано за счет уменьшения ширины колеи, т. е. вместо  $S = 1524(+6 -4)$  мм она была принята  $S = 1520(+6 -4)$  мм, а впоследствии –  $S = 1520(+8 -4)$  мм. Геометрические размеры колесных пар и рельсовой колеи на прямых приводятся в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Геометрические размеры колесных пар и рельсовой колеи на прямых

Колесо	Скорость движения, м/ч	Насадка колес Т, мм			Толщина гребня h, мм			Колесная колея q, мм			Ширина колеи в прямом участке пути S, мм		
		Максимальная	Нормальная	Минимальная	Максимальная	Нормальная	Минимальная	Максимальная	Нормальная	Минимальная	Максимальная	Нормальная	Минимальная
Локомотивное	≤140	1443	1440	1437	33	33	25	1509	1506	1487	1526	1520	1516
	>140	1443	1440	1439	33	33	28	1509	1506	1495	1526	1520	1516
Вагонное	≤140	1443	1440	1437	33	33	25	1511	1508	1489	1526	1520	1516
	>140	1443	1440	1439	33	33	28	1511	1508	1497	1526	1520	1516

Очертания поверхности катания локомотивных и вагонных колес представлены на рисунке 1.3.

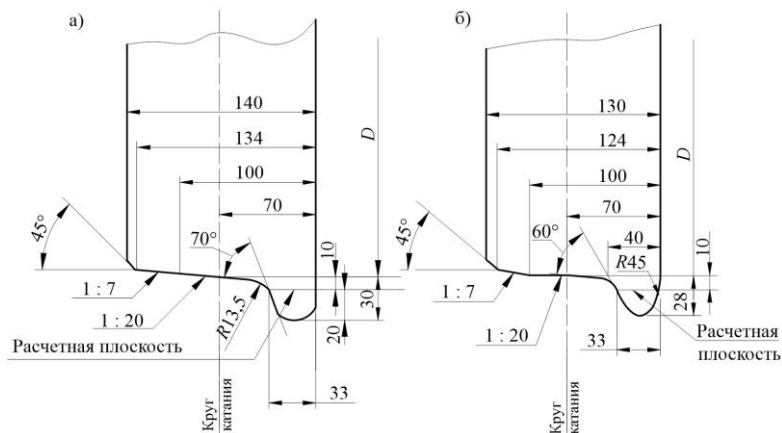


Рисунок 1.3 – Профиль колеса:  
а – локомотивного; б – вагонного

Средняя часть поверхности катания бандажей имеет коничность 1/20, а боковая наружная часть поверхности катания бандажа – 1/7. У сборных колес она заканчивается фаской шириной 5–6 мм, имеющей угол с вертикалью 45°, а у цельнокатанных колес фаска с наружной стороны заменяется закруглением радиусом 10 мм. Повышенная коничность наружной части колес и фаска облегчают перекатывание бандажа с острых стрелочных переводов на рамный рельс. Средний круг катания колеса находится на расстоянии 70 мм от внутренней вертикальной грани. По этому кругу и определяется значение диаметра колеса. Номинальный проектный диаметр вагонных колес на доро-

гах нормальной колеи равен 900, 950 и 1050 мм. Номинальный диаметр колес тепловозов равен 1050 мм, а электровозов – 1200 и 1250 мм. Угол наклона к горизонту рабочей реборды у вагонных колес без износов – 60°, у локомотивных – 70°.

В процессе эксплуатации поверхность катания и гребень колесной пары изнашиваются. Виды износа колес регламентируются ПТЭ [1].

При движении железнодорожного экипажа по рельсам часть осей, закрепленных в общей раме вагона или тележки, остается всегда параллельной друг другу. Расстояние между крайними осями экипажа, которые сохраняют параллельность при движении в прямых и кривых участках пути, называют жесткой базой экипажа (рисунок 1.4). Следует отличать от жесткой базы колесную базу. Это расстояние между крайними осями экипажа. От величины жесткой базы зависит вписывание экипажа в кривые. Для облегчения вписывания подвижного состава некоторые оси имеют разбеги.

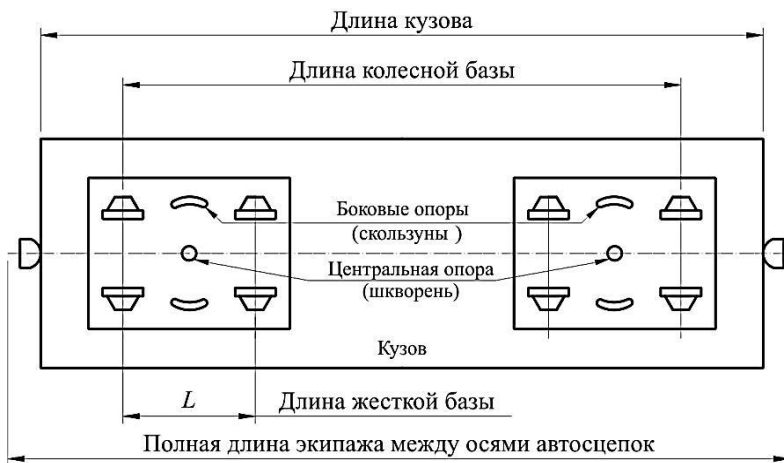


Рисунок 1.4 – Основные параметры экипажа

## **2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШИРИНЫ КОЛЕИ В КРИВОЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХАРАКТЕРА ВПИСЫВАНИЯ В НЕЕ ЛОКОМОТИВА**

### **2.1 Общие сведения**

Ширина колеи в кривых определяется условиями вписывания в них подвижного состава. Вписывание есть процесс взаимодействия ходовых частей подвижного состава с рельсовой колеей. При движении экипажа по кривой его ходовые части могут занимать различные положения, которые зависят от следующих факторов: радиуса кривой, радиуса колеса подвижного состава, величины жесткой базы, скорости движущихся поездов, конструктивных особенностей ходовых частей подвижного состава, возвышения наружного рельса, внешних сил, действующих на экипаж и рельсовую колею, сил тяги локомотива, состояния рельсов и колес и др.

Расчет ширины колеи принято производить на основе либо геометрических (кинематических), либо динамических характеристик. Более обоснованным является расчет, в котором учитываются силы воздействия экипажа на путь, поскольку они являются главным критерием того или иного вида вписываний подвижного состава в кривые.

В настоящее время сохраняется [3–5] следующая классификация видов геометрического вписывания: свободное, заклиненное, принудительное. Вид вписывания тесно связан с расположением центра поворота экипажа (полюсом поворота «С»), который находится в точке пересечения продольной оси экипажа с перпендикуляром, опущенным на эту ось из центра кривой. Центром поворота (полюсом поворота «С») называется точка, относительно которой происходит поворот жесткой базы экипажа при движении по кривой.

При свободном вписывании движение экипажа направляется только наружной рельсовой нитью кривой. Центр поворота для 2- и 3-осных тележек экипажа расположен на задней оси, а для 4-осных – между 3 и 4 осями. Согласно исследованиям профессора К. Ю. Цеглинского при свободном вписывании обеспечивается минимальное сопротивление движению, поэтому ширина рельсовой колеи при свободном вписывании является оптимальной.

Заклиненное вписывание характеризуется отсутствием зазоров между гребнями колес и рабочими гранями рельсов. Центр поворота находится посередине жесткой базы. В условиях нормальной эксплуатации такое вписывание не допускается, т. к. возникает большое сопротивление движению и значительный износ колес и рельсов. Поэтому заклиненное вписывание является расчетной схемой для определения минимально допустимой ширины рельсовой колеи.

Принудительным называют вписывание, при котором гребни колес касаются также внутреннего рельса и движение направляется обеими рельсовыми нитями. Центр поворота зависит от сил, действующих на экипаж, и может занимать различные положения между серединой жесткой базы и последней осью. В отдельных случаях возможно расположение центра поворота позади последней оси экипажа. В этом случае, по-видимому, будут касаться наружной нити два колеса.

Ширина колеи в кривой определяется расчетом вписывания железнодорожных экипажей в кривую исходя из следующих двух условий:

а) ширина колеи должна быть оптимальной – обеспечивать минимальное сопротивление движению поездов и минимальный износ рельсов и колес, не допускать искажения положения колеи в плане, не превышать максимально допустимую величину;

б) ширина колеи не должна быть меньше минимально допустимой, т. е. не должна допускать заклинивания ходовых частей между рельсовыми нитями.

При всех видах вписывания ширину рельсовой колеи можно определить по общей формуле

$$S = q_{\max} + f_n - f_v + 4\text{мм} - \sum \eta, \quad (2.1)$$

где  $q_{\max}$  – максимальная ширина колесной пары, мм;

$f_n$  – наружная стрела изгиба рельсовой нити, отсчитываемая от хорды, проведенной через точку касания набегающего колеса с наружной нитью кривой по линии рабочих граней гребней колес, мм;

$f_v$  – внутренняя стрела изгиба рельсовой нити, отсчитываемая от хорды, проведенной через точку касания колеса с внутренней нитью кривой по линии рабочих граней гребней колес, мм;

4 мм – допуск на сужение рельсовой колеи;

$\sum \eta$  – сумма поперечных разбегов осей, мм.

Величины  $f_n$  и  $f_v$  определяются из рисунка 2.1. Для вывода формулы (2.1) кривая  $AB$  достраивается до окружности радиусом  $R + S / 2$ . Из рисунка 2.1 видно, что  $FB = \lambda + b_n$  представляет собой перпендикуляр, опущенный из точки  $B$  окружности на диаметр  $MN = 2(R + S / 2) = 2R + S$ , и поэтому является средним пропорциональным между отрезками диаметра  $NF$  и  $FM$ .

В связи с этим можно записать, что  $FM / FB = FB / FN$

или

$$f_n / (\lambda + b_n) = (\lambda + b_n) / (2R + S - f_n).$$

Отсюда

$$f_n = (\lambda + b_n)^2 / (2R + S - f_n).$$

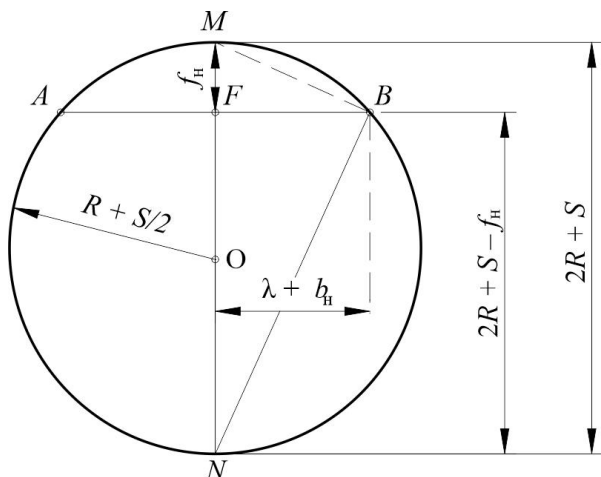


Рисунок 2.1 – Схема определения стрелы изгиба наружного рельса

Пренебрегая в знаменателе величинами  $S$  и  $f_n$  по малости в сравнении с  $2R$ , найдем

$$f_n = \frac{(\lambda + b_n)^2}{2R}, \quad (2.2)$$

где  $\lambda$  – расстояние от центра вращения экипажа до геометрической оси первого колеса, мм;

$b_n$  – расстояние от геометрической оси первой колесной пары до точки касания гребня колеса с рельсом (рисунок 2.2), мм;

$R$  – радиус заданной кривой, мм.

С точки зрения расчета  $S_{\text{опт}}$  величину  $b_n$  (рисунок 2.2) в формуле (2.2) проф. Г. М. Шахуняц рекомендует определять для случая неизношенных гребней как для самого неблагоприятного сочетания по следующей формуле:

$$b_n = \frac{\lambda(r+t)\text{tg}\tau}{R + S/2 - (r+t)\text{tg}\tau}, \quad (2.3)$$

где  $\lambda$  и  $R$  – имеют те же значения, что и в формуле (2.2);

$S$  – ширина колеи, принимаемая 1520 мм;

$r$  – радиус катания колеса, мм. Данные о размерах приведены в приложении 1–3 [4], а также в таблице 2.1;

$t$  – расстояние от поверхности среднего круга катания головки рельса до точки прижатия гребня к рельсу, принимаемое равным 10 мм;

$\tau$  – угол наклона к горизонту рабочей реборды колеса.

Таблица 2.1 – Параметры ходовых частей подвижного состава

Тип экипажа	Конструкционная скорость $v$ , км/ч	Радиус колеса по кругу катания $r$ , см	Число осей в жесткой базе	Длина жесткой базы $L$ , см	Поперечные разбеги $\eta$ , мм, осей	
					крайних $\eta_1$	средней у трехосной тележки $\eta_2$
<i>Электровозы переменного тока</i>						
ВЛ60	120	62,5	3	460	1,0	15,5
ВЛ60 <sup>к</sup>	100	62,5	3	460	1,0	15,5
ВЛ80, ВЛ80 <sup>к</sup>	110	62,5	2	300	1,0	–
ВЛ82 <sup>м</sup>	110	62,5	2	300	1,0	–
ЧС4 <sup>г</sup>	160	62,5	3	460	1,3	1,3
ВЛ65	120	62,5	2	290	1	–
<i>Электровозы постоянного тока</i>						
ВЛ23	100	60	3	440	0	14
ВЛ8	80	60	2	320	2,9	–
ВЛ10	100	62,5	2	300	1,0	–
ЧС1	120	62,5	2	333	0	0
ЧС2 <sup>м</sup> , ЧС2 <sup>г</sup>	160	62,5	3	460	0	0
ЧС3	120	62,5	2	333	0	0
ЧС200	220	62,5	2	320	0	0
<i>Тепловозы</i>						
ТЭ7	140	52,5	3	420	1,5	14
ТЭ3, ТЭ30	100	52,5	3	420	1,5	14
2ТЭ10Л	100	52,5	3	420	1,5	14
2ТЭ10В	100	52,5	3	370	1,5	14
2ТЭ116	100	52,5	3	370	1,5	14
2ТЭ121	100	52,5	3	440	1,5	14
ТЭП10	140	52,5	3	420	1,5	14
ТЭП60	160	52,5	3	460	0	19
ТЭП70	160	52,5	3	430	1,5	14
ТЭП75	160	61,0	3	430	1,5	14
ТГ102К	120	61,0	2	250	1,5	0
<i>Вагоны</i>						
Грузовой 4-осный	–	47,5	2	185	6	–
Грузовой 6-осный	–	47,5	3	350	2	6
Пассажирский	–	52,5	2	270	6	–

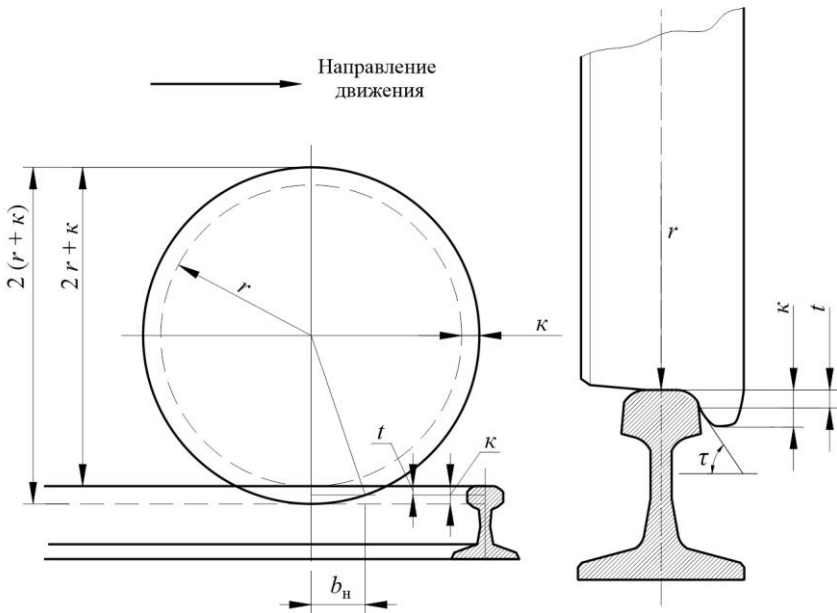


Рисунок 2.2 – Схема к определению расстояния от геометрической оси первой колесной пары до точки касания гребня колеса с рельсом

Очевидно, что согласно рисункам 2.1 и 2.2 внутренняя стрела изгиба

$$f_{\text{в}} = \frac{(\lambda - b_{\text{в}})^2}{2R}. \quad (2.4)$$

Здесь, в свою очередь, в случае расчета минимально допустимой ширины рельсовой колеи размер  $b_{\text{в}}$  определяется для неизношенных гребней как для самого неблагоприятного сочетания по следующей формуле:

$$b_{\text{в}} = \frac{\lambda(r+t)\text{tg}\tau}{R - S_{\text{max}} / 2 + (r+t)\text{tg}\tau}. \quad (2.5)$$

При этом в криволинейных участках пути  $S_{\text{max}}$  принимается в зависимости от радиуса кривой  $R$  согласно [1].

Величина забега  $b_{\text{н}}$ ,  $b_{\text{в}}$  при углах набегания колеса на рельс  $\beta \leq 2^\circ$  может быть определена по приближенной формуле

$$b_{\text{н}}, b_{\text{в}} \approx \frac{\lambda r \text{tg}\tau}{R}, \quad (2.6)$$

где  $\lambda$ ,  $r$ ,  $\tau$ ,  $R$  – имеют те же значения, что и в формулах (2.2) и (2.3).



При углах набегания колеса на рельс  $\beta > 2^\circ$  значение  $b_n$  и  $b_v$  можно принимать по данным профессора К. П. Королева.

Следует заметить, что положение экипажа внутри колеи определяется не только размерами экипажа, но и скоростью его движения. С увеличением скорости последняя ось перемещается к наружной рельсовой нити. Одновременно меняется и положение центра поворота экипажа.

## 2.2 Определение оптимальной ширины колеи

Для экипажей с двухосной и трехосной жесткими базами без поперечных разбегов (рисунки 2.3 и 2.4) оптимальная ширина колеи

$$S_{\text{опт}} = q_{\text{max}} + f_n + 4 \text{ мм} \leq S_{\text{max}}, \quad (2.7)$$

где  $q_{\text{max}}$  – максимальная ширина колесной пары (таблица 1.2);

$S_{\text{max}}$  – максимальная нормативная ширина рельсовой колеи в кривых для заданного радиуса согласно [1];

4 мм – допуск на сужение рельсовой колеи;

$f_n$  – наружная стрела изгиба рельсовой нити, отсчитываемая от хорды, проведенной через точку касания набегающего колеса с наружной нитью кривой по линии рабочих граней гребней колес, мм.

Для экипажей с двухосной и трехосной жесткой базой, имеющих поперечные разбеги осей (рисунки 2.5 и 2.6), оптимальная ширина колеи

$$S_{\text{опт}} = q_{\text{max}} + f_n + 4 \text{ мм} - \Sigma\eta \leq S_{\text{max}}, \quad (2.8)$$

где  $\Sigma\eta$  – сумма поперечных разбегов осей, мм. Данные о разбегах осей колесных пар и другие параметры ходовых частей подвижного состава принимаются из приложения 1–3 [4], а также таблицы 2.1.

В данном случае  $f_n$  определяется по формуле (2.2), а  $b_n$  – по формулам (2.3) или (2.6). По приведенным формулам можно определить  $S_{\text{опт}}$  для любого количества осей в тележке, но следует помнить, что величина  $\lambda$  – это расстояние от центра поворота экипажа до геометрической оси первого колеса и в данном случае  $\lambda = L$ . Кроме того:

а) во всех случаях определенная расчетом ширина рельсовой колеи  $S_{\text{опт}}$  не должна превышать нормативной максимальной ширины колеи в кривых для заданного радиуса согласно [1];

б) если расчетная ширина колеи  $S_{\text{опт}}$  окажется больше нормативной максимальной ширины колеи в кривых для заданного радиуса, то это значит, что следует перейти к определению минимально допустимой ширины колеи;

в) если расчетная ширина колеи  $S_{\text{опт}}$  получается меньше нормальной ширины на прямом участке пути ( $S = 1520$  мм), то это будет означать, что конструктивные размеры и особенности ходовых частей рассматриваемого экипажа позволяют ему проходить кривую данного радиуса без уширения ее

колеи. В таком случае, ширина колеи должна приниматься по ПТЭ в зависимости от величины радиуса.

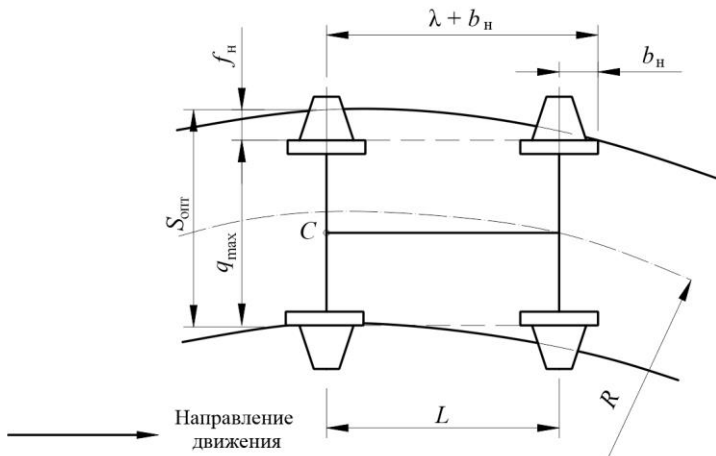


Рисунок 2.3 – Схема свободного вписывания экипажа с двухосной жесткой базой без поперечных разбегов осей

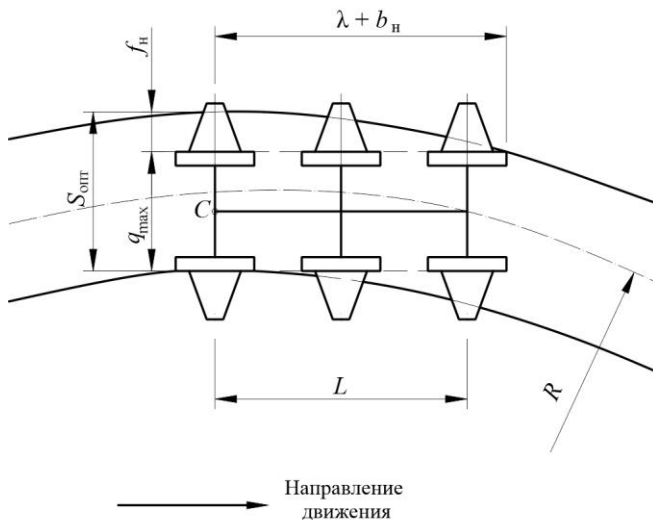


Рисунок 2.4 – Схема свободного вписывания экипажа с трехосной жесткой базой без поперечных разбегов осей

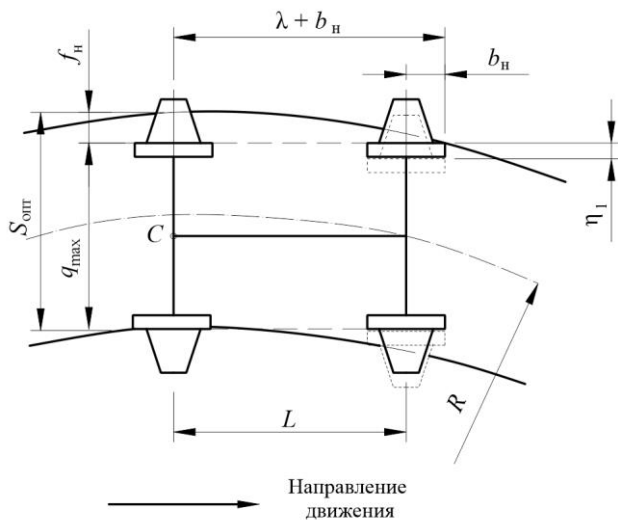


Рисунок 2.5 – Схема свободного вписывания экипажа с двухосной жесткой базой с поперечными разбегами осей

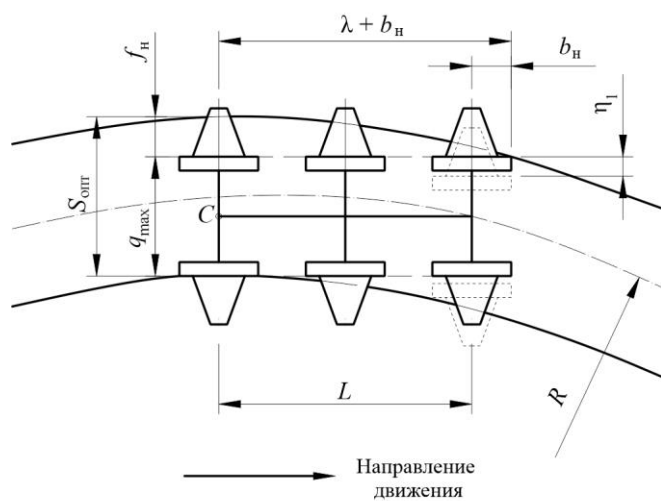


Рисунок 2.6 – Схема свободного вписывания экипажа с трехосной жесткой базой с поперечными разбегами осей

### 2.3 Определение минимально допустимой ширины колеи

За расчетную схему определения минимально допустимой ширины колеи принимают схему заклиненного вписывания железнодорожного экипажа, при которой наружные колеса крайних осей жесткой базы своими ребордами упираются в наружный рельс кривой, а внутренние колеса средних осей – в рельс внутренней нити. Центр поворота экипажа находится посередине жесткой базы либо стремится занять это положение.

Для того чтобы снизить силы трения, возникающие при движении экипажа по кривой в случае его заклиненного вписывания, необходимо к ширине рельсовой колеи прибавить зазор  $\delta_{\min}$  между боковой рабочей гранью рельса и гребнем колеса на прямом участке пути, потому что заклиненное вписывание в эксплуатации допустить нельзя (таблица 1.1). При этом:

а) во всех случаях определенная минимально допустимая ширина рельсовой колеи не должна превышать согласно [1] максимальной ширины колеи  $S_{\max} = 1535$  мм;

б) если полученная расчетом ширина колеи получится больше максимальной, то это значит, что данная кривая без специальных устройств в виде контррельсов не может обеспечить прохождения рассматриваемого железнодорожного экипажа;

в) если расчетная ширина колеи получится меньше нормальной  $S = 1520$  мм, то это будет означать, что конструктивные размеры и особенности ходовых частей рассматриваемого экипажа позволяют ему проходить кривую данного радиуса без уширения ее колеи. В таком случае ширина колеи должна приниматься по ПТЭ в зависимости от радиуса.

В качестве примера рассмотрим случай определения минимально допустимой ширины рельсовой колеи из условия вписывания двух- и трехосных тележек без разбегов и с разбегами, т. е. когда  $\sum \eta = 0$  и  $\sum \eta > 0$ .

#### *Двухосные жесткие базы*

Ширина рельсовой колеи, необходимая для обеспечения заклиненного вписывания двухосной тележки без разбегов (рисунок 2.7) в кривую,

$$S_{\text{закл}} = q_{\max} + f_{\text{н}} - f_{\text{в}} + 4 \text{ мм.} \quad (2.9)$$

С учетом разбегов формула (2.9) примет вид

$$S_{\text{закл}} = q_{\max} + f_{\text{н}} - f_{\text{в}} + 4 \text{ мм} - \Sigma \eta. \quad (2.10)$$

Для определения минимально допустимой ширины колеи к формулам (2.9) и (2.10) следует прибавить зазор  $\delta_{\min}$ .

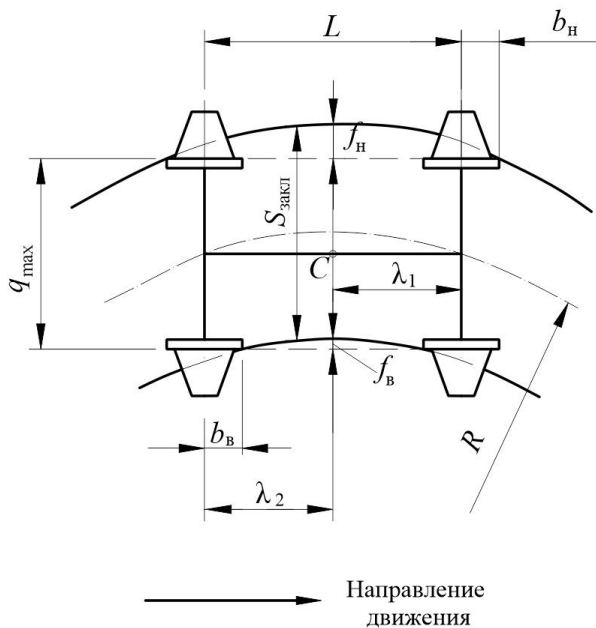


Рисунок 2.7 – Схема заклиненного вписывания экипажа с двухосной жесткой базой без поперечных разбегов осей

В случае двухосной жесткой базы с поперечными разбегами вместо суммы разбегов по осям  $\sum \eta$  в формулу (2.10) подставляется разбег по первой направляющей оси  $\eta_1$ , т. е.  $\sum \eta = \eta_1$ .

В приведенных формулах  $f_H$  и  $f_B$  определяются из выражений (2.2) или (2.4) с учетом того, что  $\lambda = L/2$ , т. е.

$$f_H = \frac{(L + 2b_H)^2}{8R_H}; \quad (2.11)$$

$$f_B = \frac{(L - 2b_B)^2}{8R_B}; \quad (2.12)$$

$$b_H \approx b_B \approx \frac{\lambda r \operatorname{tg} \tau}{2R}, \quad (2.13)$$

где  $L$  – длина жесткой базы, мм.

### Трехосные жесткие базы.

В случае заклиненного вписывания трехосной тележки, если бы ни одна ось трехосной жесткой базы не имела поперечных разбегов, то заклиненное вписывание ее имело бы вид, показанный на рисунке 2.8.

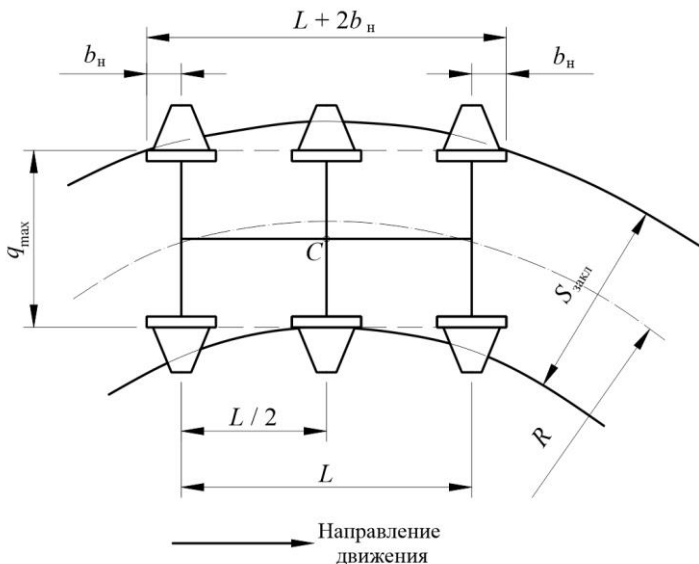


Рисунок 2.8 – Схема заклиненного вписывания экипажа с трехосной жесткой базой без поперечных разбегов осей

В этом случае ширина колеи определяется по формуле

$$S_{\text{закл}} = q_{\text{max}} + f_n - f_v + 4 \text{ мм}, \quad (2.14)$$

где  $f_n$  – находится из выражения (2.11).

В связи с тем, что обычно оси трехосных жестких баз имеют поперечные разбеги, представляется возможным вписывать их в кривые с меньшей шириной колеи, чем та, которая определяется по формуле (2.14). На практике в основном крайние оси этих баз имеют одинаковые симметричные разбеги  $\eta_1$  (рисунок 2.9), а средняя ось может иметь другой разбег  $\eta_2$ . В зависимости от радиуса кривой, длины жесткой базы и величины суммы разбегов  $\sum \eta$ , где

$$\sum \eta = \eta_1 + \eta_2$$

различают два случая расположения осей трехосной базы относительно наружной нити рельсов (рисунок 2.10).

Если  $\sum \eta \geq f_n$ , то наружной нити могут касаться все три оси жесткой базы (см. рисунок 2.10, а).

Если  $\sum \eta < f_n$ , то наружной нити касаются лишь крайние оси жесткой базы (см. рисунок 2.10, б).

Аналогичное размещение осей возможно по отношению к внутренней рельсовой нити (рисунок 2.11).

Если  $\sum \eta \geq f_b$ , то внутренней нити коснутся все три оси (см. рисунок 2.11, а).

Если  $\sum \eta < f_b$ , то возможно расположение осей, показанное на рисунке 2.11, б.

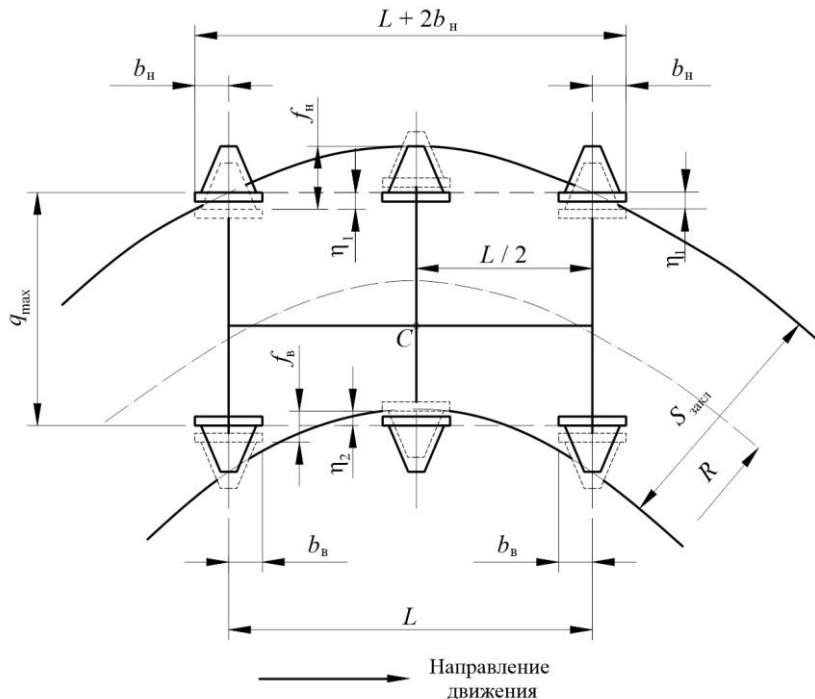


Рисунок 2.9 – Схема заклиненного вписывания экипажа с трехосной жесткой базой с поперечными разбегами осей

В большинстве случаев трехосная жесткая база при заклинном вписывании устанавливается так, как это показано на рисунке 2.9. Критерием возможности такой установки является выражение  $\sum \eta \geq f_b$ . Ширина колеи при этом рассчитывается по известной формуле 2.14. В случае, если  $\sum \eta < f_b$ , то ширина колеи

$$S_{\text{закл}} = q_{\text{max}} + f_n + 4 \text{ мм} - \sum \eta. \quad (2.15)$$

Значения  $f_n$ ,  $f_b$ ,  $b_n$ ,  $b_b$  определяются как и для двухосных тележек. Для определения минимально допустимой ширины колеи необходимо к  $S_{закл}$  прибавить  $\delta_{\min}$ .

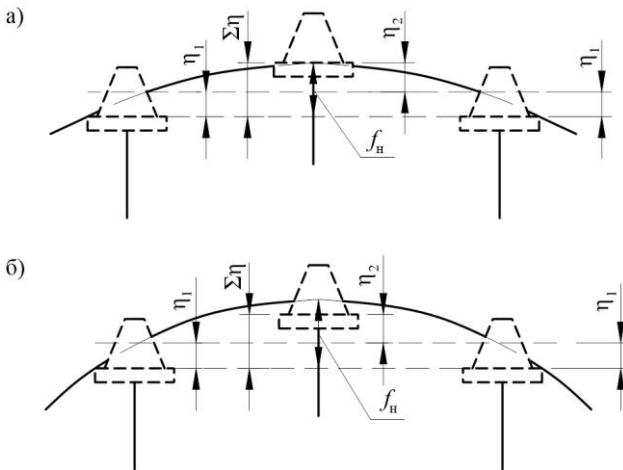


Рисунок 2.10 – Схема расположения осей трехосной тележки относительно наружной нити рельса

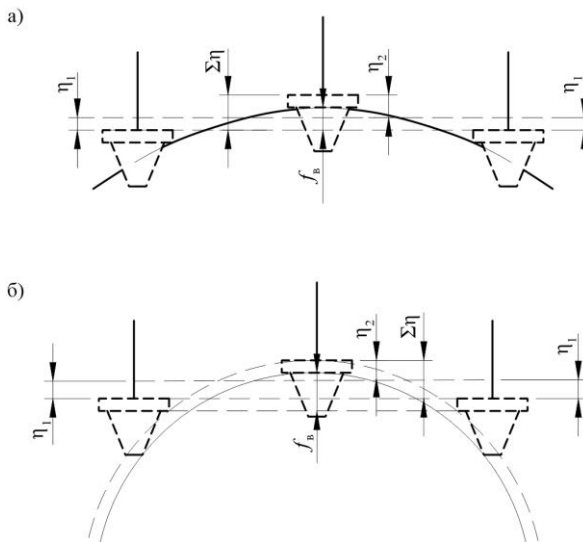


Рисунок 2.11 – Схема расположения осей трехосной тележки относительно внутренней нити рельса



## 2.4 Устройство контррельсов в кривых

Если радиус кривой настолько мал, что максимальная нормативная ширина колеи 1535 мм оказывается меньше минимально необходимой, определенной по схеме заклиненного вписывания с добавлением минимального зазора  $\delta_{\min}$ , то в таких кривых резко возрастает боковой износ рельсов и расстройство рельсовой колеи. Поэтому у внутренней рельсовой нити либо у обеих рельсовых нитей укладывают контррельсы.

Контррельс у внутренней рельсовой нити укладывается в целях уменьшения бокового износа рельса наружной рельсовой нити и во избежание отбоя рельсов. Из рисунка 2.12 видно, что

$$m = S - T - (h + \mu), \quad (2.16)$$

где  $m$  – ширина желоба между рабочими гранями контррельса и ходового рельса, мм;

$S$  – ширина колеи в кривой с учетом уширения, мм;

$T$  – насадка колесной пары, мм;

$h$  – толщина гребня колеса, мм;

$\mu$  – сбег колеса, мм.

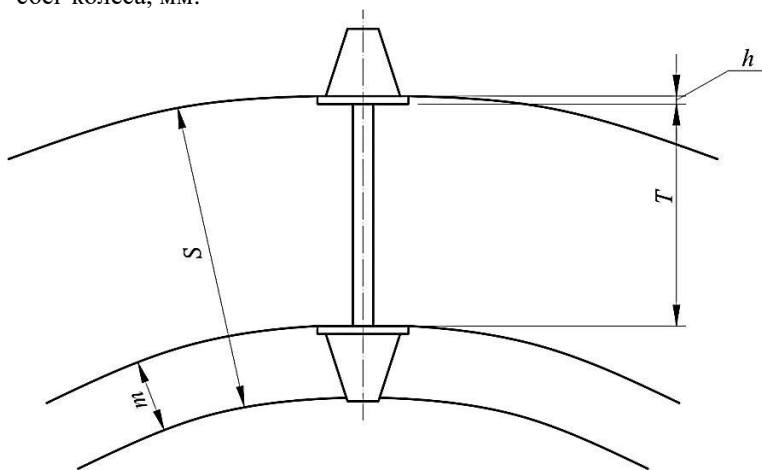


Рисунок 2.12 – Схема определения размера контррельсового желоба

На практике встречаются следующие возможные случаи укладки контррельса у внутренней рельсовой нити:

- 1) если  $m$  будет больше  $m_{\min}$ , то контррельс работать будет так, что ни одна ось не прижмется к наружному рельсу;
- 2) если  $m > m_{\max}$ , то контррельс работать не будет;

3) если  $m_{\min} < m < m_{\max}$ , то контррельс будет работать лишь от осей, для которых окажется  $m < m_{\min}$ .

Удовлетворяя разным требованиям, размер  $m$  должен находиться в пределах

$$S - T_{\min} - (h_{\max} + \mu) > m > f_k - f_n + h_{\max} + \mu + 3, \quad (2.17)$$

где  $f_k, f_n$  видны из рисунка 2.13.

В очень крутых кривых приходится иногда укладывать контррельсы у обеих нитей внутри колеи. Контррельсы увеличивают сопротивление движению, поэтому их укладку применяют лишь в кривых радиусом примерно 160 м и менее. Контррельсы у обеих рельсовых нитей укладывают также в тех случаях, когда ширину колеи в кривой приходится принимать более 1540 мм. Желоб между контррельсом и рельсом внутренней нити кривой должен иметь ширину 60–85 мм. Контррельсы должны быть надежно соединены с ходовыми рельсами посредством вкладышей и болтов. Однако на магистральных железных дорогах к такому решению не прибегают.

Все новые локомотивы рассчитываются на вписывание в кривые радиусом не менее 150 м при ширине колеи 1535 мм.

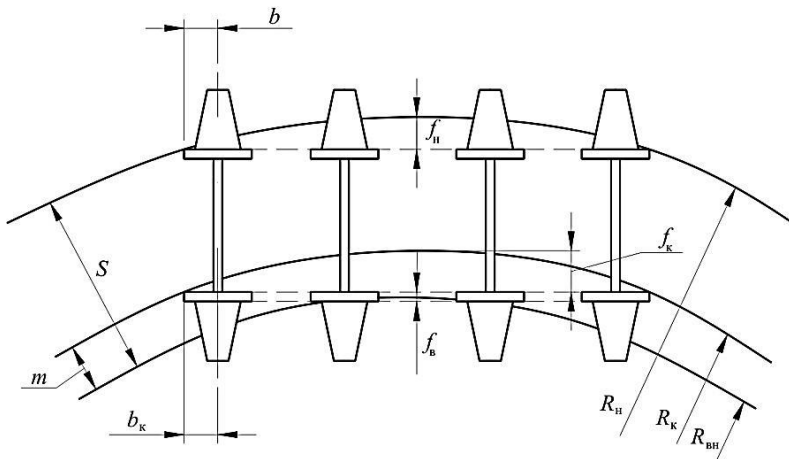


Рисунок 2.13 – Схема определения стрел изгиба при вписывании в кривую с применением контррельса

## 2.5 Примеры расчета

**Задача 1.** Определить ширину колеи, при которой обеспечивается заклиненное вписывание двухосного вагона с жесткой базой  $L = 3,81$  м в кри-

вую  $R = 250$  м. Радиус круга катания колеса  $r = 525$  мм,  $\tau = 60^\circ$  ( $\operatorname{tg}\tau = 1,73$ ),  $q_{\max} = 1511$  мм.

*Решение.* Как известно, при заклиненном вписывании  $\lambda = L / 2$ . Подставляя значения в формулы (2.13), (2.11), (2.9), находим

$$b_{\text{н}} \approx b_{\text{в}} \approx \frac{\lambda r \operatorname{tg}\tau}{2R} = \frac{3,81 \cdot 0,525 \cdot 1,73}{2 \cdot 250} \approx 0,0069\text{ м} \approx 6,9\text{ мм};$$

$$f_{\text{н}} = \frac{(L + 2b_{\text{н}})^2}{8R_{\text{н}}} = \frac{(3,81 + 2 \cdot 0,058)^2}{8(250 + 1,53/2)} \approx 0,0073\text{ м} \approx 7,3\text{ мм};$$

$$S_{\text{закл}} = q_{\max} + f_{\text{н}} - f_{\text{в}} + 4 = 1511 + 7,3 - 6,8 + 4 = 1515,5\text{ мм}.$$

Для определения минимально допустимой ширины колеи к ширине  $S_{\text{закл}}$  добавим  $\delta_{\min} = 7$  мм. В результате расчетов получим

$$S_{\min} = S_{\text{закл}} + \delta_{\min} = 1515 + 7 = 1522\text{ мм},$$

тогда

$$S_{\min} < S_{\max}.$$

В таком случае ширина колеи принимается по ПТЭ в зависимости от  $R$ , т. е.  $S_{\min} = 1535 (+8 - 4)$  мм.

**Задача 2.** Определить оптимальную ширину рельсовой колеи в кривой радиусом  $R = 200$  м для пропуска трехосных локомотивных тележек с жесткой базой  $L = 2000 + 2000 = 4000$  мм, имеющих сумму поперечных разбегов  $\sum \eta = 3$  мм и радиус катания колес  $r = 600$  мм.

*Решение.* По выражению (2.3) при  $\lambda = L = 4000$  мм;  $t = 10$  мм;  $\tau = 70^\circ$  ( $\operatorname{tg}\tau = 2,747$ ) находим  $b_{\text{н}}$

$$b_{\text{н}} = \frac{\lambda(r+t)\operatorname{tg}\tau}{R+S/2-(r+t)\operatorname{tg}\tau};$$

$$b_{\text{н}} = \frac{4000(600+10) \cdot 2,747}{200000+1520/2-(600+10) \cdot 2,747} = 33,7\text{ мм}.$$

Пользуясь формулой (2.2), найдем

$$f_{\text{н}} = \frac{(\lambda + b_{\text{н}})^2}{2R} = \frac{(4000 + 33,7)^2}{2 \cdot 200000} = 40,7\text{ мм};$$

Требуемую ширину колеи найдем из выражения (2.8):

$$S_{\text{отт}} = q_{\max} + f_{\text{н}} + 4\text{ мм} - \sum \eta = 1509 + 40,7 + 4 - 3 = 1550,7\text{ мм};$$

$$S_{\text{опт}} > S_{\text{max}} = 1535 \text{ мм.}$$

Так как требуемая ширина колеи получилась больше максимально допустимой (по ПТЭ), то в этом случае следует перейти к определению минимально допустимой ширины рельсовой колеи.

**Задача 3.** Определить ширину рельсовой колеи в кривой и характер вписывания в нее локомотива ТЭП60.

*Решение.* Согласно приложению 1–3 [4] колесная формула локомотива 3–3, жесткая база  $L = 460$  см, диаметр колеса по кругу катания 105 см; поперечный разбег осей: I, Ш, IV, VI –  $0 \pm 0,5$  мм; II, V –  $\pm 14$  мм, радиус кривой  $R = 840$  м.

Определим оптимальную ширину рельсовой колеи. Она характерна для свободного вписывания подвижного состава в кривые. При такой колее возникает минимальное сопротивление движению поезда. В этом случае мгновенный полюс поворота тележки находится на задней оси. Схема приведена на рисунке 2.6. Согласно расчетной схеме оптимальная ширина рельсовой колеи определяется по формуле (2.8).

Неизвестная в формуле (2.8) наружная стрела изгиба рельсовой нити определяется по формуле (2.2). Забег первого колеса  $b_n$  рассчитывается по формуле (2.3)

$$b_n = \frac{\lambda(r+t)\text{tg}\tau}{R+S/2-(r+t)\text{tg}\tau} = \frac{4600(525+10) \cdot 2,747}{840000+1520/2-(525+10) \cdot 2,747} = 8,1 \text{ мм.}$$

Находим

$$f_n = \frac{(\lambda + b_n)^2}{2R} = \frac{(4600 + 8,1)^2}{2 \cdot 840000} = 12,6 \text{ мм.}$$

Требуемая оптимальная ширина рельсовой колеи

$$S_{\text{опт}} = q_{\text{max}} + f_n + 4 \text{ мм} - \sum \eta = 1509 + 12,6 + 4 - 0,5 = 1525,1 \text{ мм.}$$

Принимаем 1525 мм.

При радиусе кривой  $R = 840$  м ширина рельсовой колеи согласно ПТЭ должна быть равной 1520 мм. Следовательно, свободное вписывание не обеспечивается, поскольку  $1525 \text{ мм} > 1520 \text{ мм}$ .

В таком случае необходимо перейти к определению минимально допустимой ширины рельсовой колеи. Расчетной схемой для этого является заклиненное вписывание (см. рисунок 2.8). Согласно теоретическим выкладкам в п. 2.3 необходимо сравнить  $\sum \eta$  и  $f_n$ . С учетом, что  $\lambda = L/2$  стрела изгиба наружной рельсовой нити  $f_n$  может определяться по формулам (2.2) или (2.11). Соответственно, забег первого колеса  $b_n$  также может рассчитываться по формулам (2.3) или (2.13).

Тогда

$$b_{\text{н}} = \frac{L/2(r+t)\text{tg}\tau}{R+S/2-(r+t)\text{tg}\tau} = \frac{(4600/2)(525+10) \cdot 2,747}{840000+1520/2-(525+10) \cdot 2,747} = 4,1 \text{ мм.}$$

$$f_{\text{н}} = \frac{(L/2+b_{\text{н}})^2}{2R} = \frac{(4600/2+4,1)^2}{2 \cdot 840000} = 3,2 \text{ мм.}$$

Сумма поперечных разбегов набегающих осей тележки

$$\sum \eta = 14 + 0,5 = 14,5 \text{ мм.}$$

Следовательно,  $\sum \eta > f_{\text{н}}$ , т. к.  $14,5 \text{ мм} > 3,2 \text{ мм}$ .

Размер  $b_{\text{в}}$  рассчитываем по формуле (2.5) или (2.13):

$$b_{\text{в}} = \frac{L/2(r+t)\text{tg}\tau}{R - \frac{S_{\text{max}}}{2} + (r+t)\text{tg}\tau} = \frac{(4600/2)(525+10) \cdot 2,747}{840000 - 1535/2 + (525+10) \cdot 2,747} = 4,0 \text{ мм.}$$

$$f_{\text{н}} = \frac{(L/2 - b_{\text{в}})^2}{2R} = \frac{(4600/2 - 4,05)^2}{2 \cdot 840000} = 3,1 \text{ мм.}$$

Следовательно,  $\sum \eta > f_{\text{в}}$ , т. к.  $14,5 > 3,1$ . Тогда ширина колеи при заклиненном вписывании по формуле (2.14)

$$S_{\text{закл}} = q_{\text{max}} + f_{\text{н}} - f_{\text{в}} + 4 = 1509 + 3,2 - 3,1 + 4 = 1513,1 \text{ мм.}$$

Минимально допустимая ширина колеи согласно формуле

$$S_{\text{min}} = S_{\text{закл}} + \delta_{\text{min}} = 1513,2 + 7 = 1520,2 \text{ мм.}$$

Принимаем 1520 мм.

Поскольку  $S_{\text{min}} = 1520 \text{ мм}$  и  $S_0 = 1520 \text{ мм}$ , то это означает, что конструктивные размеры и особенности ходовых частей рассматриваемого экипажа позволяют ему проходить данную кривую без уширения ее колеи. В таком случае, ширина колеи должна приниматься по ПТЭ в зависимости от величины радиуса  $R$ .

### 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗВЫШЕНИЯ НАРУЖНОГО РЕЛЬСА

При движении железнодорожного экипажа по кривой появляется центробежная сила. Эта сила создает дополнительное давление колес на наружную рельсовую нить, в связи с чем рельсы на ней изнашиваются быстрее, возникают отбои рельсовых нитей или увеличивается напряжение в них; появляется непогашенное центробежное ускорение, при больших значениях которого пассажиры испытывают неприятные ощущения.

Как известно, центробежная сила определяется по формуле

$$I = \frac{mv^2}{R} = \frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R}, \quad (3.1)$$

где  $m$  – масса экипажа;

$v$  – скорость движения экипажа;

$R$  – радиус кривой;

$G$  – вес экипажа;

$g$  – ускорение силы тяжести.

К горизонтальным силам следует отнести и силу ветра. Эту силу в виде давления ветра можно определить по формуле

$$W_{\text{в}} = kv_{\text{в}}^2, \quad (3.2)$$

где  $W_{\text{в}}$  – давление ветра;

$k$  – коэффициент, зависящий от форм поверхностей, воспринимающих давление, который для сплошных поверхностей (вагонов) находится в пределах 0,085–1,25, а для решетчатых – 0,078;

$v_{\text{в}}$  – скорость ветра.

Чтобы снизить боковое давление на рельсы наружной рельсовой нити, устраивают возвышение наружного рельса в кривой. Обычно оно, исходя из технико-экономических соображений, устанавливается таким, при котором были бы оптимальные условия работы рельсов как наружной, так и внутренней нитей и пассажиры были бы защищены от неприятных воздействий.

#### 3.1 Определение возвышения наружного рельса из условия обеспечения равномерного вертикального износа рельсов обеих нитей кривой

На рисунке 3.1 рассматривается положение экипажа в кривой радиусом  $R$ , имеющей возвышение наружного рельса  $h$ .

Приняты следующие обозначения:  $E_{\text{н}}$  и  $E_{\text{в}}$  – вертикальные реакции наружного и внутреннего рельсов;  $T_{\text{н}}$  и  $T_{\text{в}}$  – тангенциальные реакции наруж-

ного и внутреннего рельсов;  $a$  – расстояние от поверхности катания рельсов до центра тяжести экипажа весом  $G$ ;  $I'$ ,  $B$  – горизонтальные составляющие силы инерции и веса экипажа соответственно.

Чтобы имел место равномерный износ рельсов обеих нитей, необходимо выбрать такое  $h$ , при котором выполнялось бы следующее равенство:

$$\sum E_n = \sum E_b; \quad \sum E_n - \sum E_b = 0. \quad (3.3)$$

Согласно (3.3) при  $W_b = 0$  логично принять  $I' = B$ , т. е.

$$I \cos \alpha = G \sin \alpha. \quad (3.4)$$

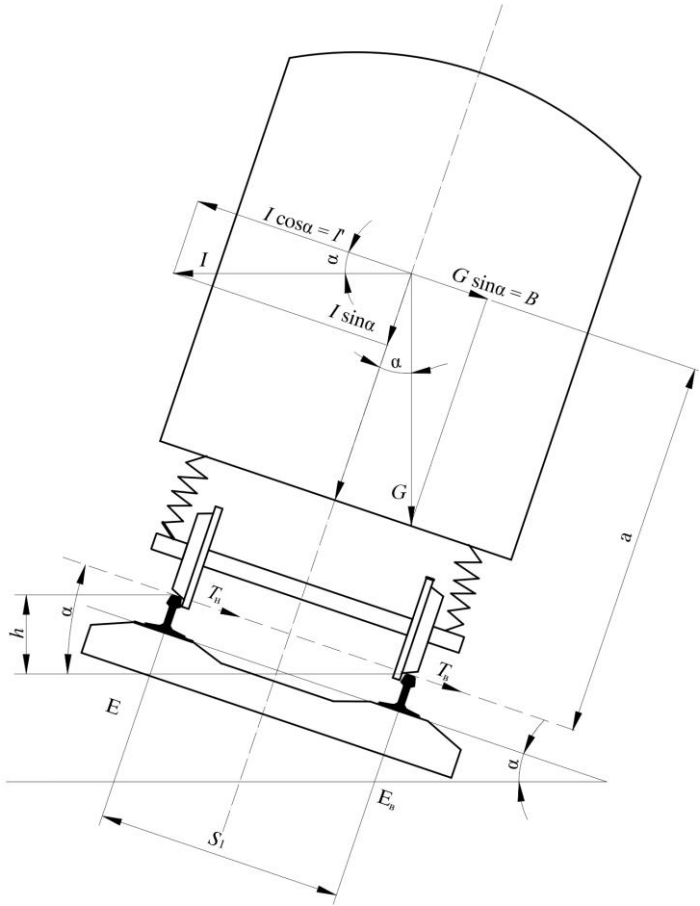


Рисунок 3.1 – Положение экипажа в кривой с возвышением наружного рельса

При малости угла  $\alpha$  –  $\cos \alpha = 1$ ,  $\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha$ , т. е.  $\sin \alpha = h / S_1$ , где  $S_1$  – расстояние между осями рельсов.

Подставим значения  $\cos \alpha$  и  $\sin \alpha$  в выражение (3.4) и получим

$$I = G \frac{h}{S_1},$$

откуда

$$h = \frac{S_1}{G} I.$$

Из выражения (3.1)

$$I = \frac{mv^2}{R} = \frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R},$$

следовательно

$$h = \frac{S_1}{g} \cdot \frac{Gv^2}{GR}.$$

Имея в виду воздействия на путь в кривой многих экипажей и исходя из условия (3.3), примем

$$G = \sum N_i P_i v_i^2.$$

Отсюда

$$h = \frac{S_1 N_i P_i v_i^2}{g R N_i P_i}. \quad (3.5)$$

Подставляя сюда  $S_1 = 1,6$  м,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>, вводим переводные коэффициенты для того, чтобы, подставив  $v$ , км/ч,  $R$ , м и  $P$ , т, получить  $h$ , мм, находим

$$h = \frac{12,5 \sum N_i P_i v_i^2}{\sum R N_i P_i}. \quad (3.6)$$

Или в развернутом виде

$$h = \frac{12,5(N_1 P_1 v_1^2 + N_2 P_2 v_2^2 + N_3 P_3 v_3^2 + \dots + N_n P_n v_n^2)}{R(N_1 P_1 + N_2 P_2 + N_3 P_3 + \dots + N_n P_n)},$$

где  $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$  – число поездов определенного вида (например, межрегиональные, пригородные, городские, междугородные, скорые и т. д.);

$P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$  – массы поездов соответственно указанных видов, т;

$v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$  – скорости движения указанных поездов, км/ч;

$R$  – радиус рассматриваемой кривой, м.



Выражение  $\frac{\sum N_i P_i v_i^2}{\sum N_i P_i} = v_{\text{срв}}^2$  есть средневзвешенная квадратичная скорость

по тоннажу. В этом случае формула (3.6) примет вид

$$h = \frac{12,5v_{\text{срв}}^2}{R}. \quad (3.7)$$

С учетом допущения о жесткости экипажа в формулу (3.7) следует ввести поправочный коэффициент или сделать поправку  $\Delta h$ , которые отражали бы реальную работу экипажа. Формула примет вид

$$h = \frac{12,5v_{\text{срв}}^2}{R} k, \quad (3.8)$$

или

$$h = \frac{12,5v_{\text{срв}}^2}{R} + \Delta h. \quad (3.9)$$

При  $v \leq 120$  км/ч  $k = 1$ , при  $v = 121 \dots 160$  км/ч  $k = 1,2$ .

### 3.2 Определение возвышения наружного рельса из условия обеспечения комфортабельности езды пассажиров

Многолетний опыт работы железных дорог и длительные исследования показывают, что большие значения непогашенных горизонтальных ускорений неприятно ощущаются пассажирами. Экспериментальными исследованиями В. С. Шаройко и А. Н. Курошвили было установлено, что длительное и повторное воздействие непогашенного центробежного ускорения в пределах от 0,4 до 0,8 м/с<sup>2</sup> включительно переносится людьми удовлетворительно. непогашенное центробежное ускорение, равное 1 м/с<sup>2</sup>, переносится удовлетворительно при немногочисленных и непродолжительных воздействиях.

В странах СНГ допустимое непогашенное ускорение принято  $a_{\text{доп}} = 0,7$  м/с<sup>2</sup>. Для вывода возвышения наружного рельса воспользуемся формулами (3.3), (3.4). Если  $\sum E_{\text{н}} \neq \sum E_{\text{в}}$  и  $I' \neq B$ , то в этом случае возникнут дополнительные давления в кривой, т. е.  $I' - B = \Delta P$ .

Согласно закону Ньютона,  $F = ma$ ,  $\Delta P = ma_{\text{нп}}$ , тогда

$$I' - B = ma_{\text{нп}}. \quad (3.10)$$

Поставив значения всех сил в формулу (3.10), получим

$$\frac{mv_{\max}^2}{R} - \frac{Gh}{S_1} = ma_{\text{нп}},$$

или

$$\frac{mv_{\max}^2}{R} - \frac{mgh}{S_1} = ma_{\text{нп}}.$$

Здесь  $v_{\max}$  принимается для поезда с максимальной скоростью, при которой сила инерции  $I$  не будет превышать допустимую величину непогашенного ускорения  $a_{\text{доп}}$ .

Возвышение наружного рельса, учитывая, что для комфортабельности необходимо  $a_{\text{нп}} \leq a_{\text{доп}}$  определяется по формуле

$$h \geq \frac{S_1}{g} \frac{v_{\max}^2}{R} - \frac{S_1}{g} a_{\text{доп}}.$$

Принимая  $S_1 = 1,6$  м,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> и выражая  $h$  в мм,  $a_{\text{доп}}$  – в м/с<sup>2</sup> и  $v$  – в км/ч, получим

$$h = \frac{12,5v_{\max}^2}{R} - 163a_{\text{доп}}, \quad (3.11)$$

или

$$h = \frac{12,5v_{\max}^2}{R} - 115, \quad (3.12)$$

где 115 – недостаток возвышения, соответствующий непогашенному допускаемому ускорению  $a_{\text{доп}} = 0,7$  м/с<sup>2</sup>;

Из формулы (3.12) можно получить  $v_{\max} = f(h, R)$ , если решить ее относительно скорости

$$v_{\max} \geq \sqrt{0,08h + 9,1R}. \quad (3.13)$$

При  $h_{\max} = 150$  мм

$$v_{\max} = 4,6 \sqrt{R}. \quad (3.14)$$

За окончательное возвышение наружного рельса принимается большее из полученных по формулам (3.8) и (3.12) и округляется до значения, кратного пяти.

На участках скоростного движения величину  $h$ , найденную из выражения (3.8), проверяют на соблюдение нормы непогашенного ускорения по формуле

$$a = \frac{v_{\max}^2}{3,6^2 R} - 0,00613h_p. \quad (3.15)$$

Если ускорение, подсчитанное по формуле (3.15), окажется больше установленной нормы непогашенного ускорения, равной  $0,7 \text{ м/с}^2$ , то скорость движения по кривой ограничивается. В отдельных случаях величина непогашенного ускорения может допускаться до  $1 \text{ м/с}^2$ .

Фактическое максимальное возвышение наружного рельса с учетом допусков на содержание не должно превышать 150 мм. При превышении этой величины движение поездов закрывается. В необходимых случаях, по разрешению руководства Белорусской железной дороги, максимально допустимые величины возвышения могут быть увеличены [6].

На стрелочных переводах, расположенных в кривых на главных путях, при ответвлении бокового пути внутрь кривой возвышение наружного рельса устраивается, как правило, не более 75 мм. При ответвлении бокового пути наружу кривой возвышение наружного рельса главного пути допускается не более 20 мм. Скорость движения поездов по ответвленной переводной кривой в таких случаях должна быть не более 15 км/ч [6]. Переводные кривые стрелочных переводов, расположенных на прямых участках, содержатся без возвышения наружного рельса.

Отвод возвышения наружного рельса кривой устраивается плавно на протяжении всей переходной кривой, а при ее отсутствии – на прямой с уклоном не более 0,9 ‰ (0,9 мм на 1 м пути) при скорости движения не более 140 км/ч [6]. На участках скоростного движения в переходных кривых минимальной длины отводы возвышения делаются с уклоном не более 0,00083 (1 мм на 1,2 м пути). В конце переходной кривой, а при ее отсутствии – в начале круговой кривой возвышение наружного рельса должно быть полным.

Правильное соотношение величины возвышения наружного рельса и отвода возвышения оказывают большое влияние на плавность движения поездов и установленную скорость. Анализ путейской практики показывает, что основными недостатками в данном вопросе являются крутые отводы возвышения и отставание нарастания возвышения от кривизны. Отставание нарастания возвышения наружного рельса от кривизны особенно чувствуется в конце переходной кривой, когда круговой элемент уже начался, а возвышение наружного рельса еще не достигло необходимой величины.

Расчет возвышения наружного рельса производится при составлении проекта ремонта пути или при изменении условий эксплуатации (ввод нового типа тяги или новой более мощной серии ведущего локомотива, повышение скоростей движения поездов на участке и т. д.).

В кривых, расположенных на руководящих подъемах и близких к ним, для компенсации продольных растягивающих сил целесообразно уменьшать полученное расчетом возвышение на величину до 15 %. При этом должны соблюдаться нормативы по предельным непогашенным ускорениям.

Практика показывает, что в кривых радиусом 1200 м и более величина  $h_{\min}$ , подсчитанная по формуле (3.12), всегда меньше величины  $h$ , подсчитанной по формуле (3.8). Поэтому для кривых радиусом 1200 м и более величину  $h_{\min}$  подсчитывать не требуется.

Скорости проходящих по кривой поездов устанавливаются тяговыми расчетами, по лентам скоростемеров или проездом на локомотиве. Так как в графике движения поездов заложен определенный резерв времени хода, то фактические скорости движения, как правило, ниже скоростей, полученных по тяговым расчетам. Особенно это заметно на участках, где исчерпана пропускная способность, так как в этом случае пассажирские поезда двигаются со скоростями грузовых поездов. Поэтому расчет возвышения наружного рельса следует производить по фактически реализуемым скоростям. Производить расчет возвышения наружного рельса по скоростям, полученным с тяговых расчетов, можно рекомендовать при составлении проекта на ремонт пути для участков, на которых предусматривается повышение скоростей движения. Ни в коем случае нельзя производить расчет возвышения наружного рельса по скоростям движения поездов, установленным приказом начальника дороги.

### **3.3 Анализ величины непогашенного ускорения в современных конструкциях подвижного состава**

Доказано, что в качестве одного из основных критериев определения скорости движения в кривых является непогашенное ускорение  $a_{\text{нп}}$ , м/с<sup>2</sup>. Для пассажирских поездов  $a_{\text{нп}}$  принято равным 0,7 м/с<sup>2</sup>. Этот критерий является характеристикой плавности хода и условием комфортабельности езды пассажиров. Поднять скорость в кривых можно следующими способами:

- увеличив возвышение наружного рельса;
- увеличив существующий радиус кривых;
- повысив норму непогашенного ускорения и т. д.

Первый и второй варианты требуют удлинения переходных кривых и переукладки пути, что дорого и не всегда возможно осуществить. В частности, это трудно сделать на линиях с интенсивными грузоперевозками.

Третий из предложенных вариантов решения проблемы может быть реализован только при использовании специального подвижного состава, у которого в допуске к эксплуатации будет иметь место разрешение эксплуатироваться с непогашенным ускорением большим, чем 0,7 м/с<sup>2</sup>. На сегодняшний день таким разрешением обладает подвижной состав ЭС2Г «Ласточка» (рисунк 3.2) ( $a_{\text{нп}} = 0,9$  м/с<sup>2</sup>) и ЭП20 «Стриж (Talgo)» (рисунок 3.3) ( $a_{\text{нп}} = 1,0$  м/с<sup>2</sup>), курсирующие по территориях Российской Федерации и Республики Беларусь.



Рисунок 3.2 – Подвижной состав «Ласточка»



Рисунок 3.3 – Подвижной состав «Стриж»

Данный подвижной состав («Ласточка» или «Стриж») за счет увеличения допускаемого непогашенного ускорения до  $0,9 \text{ м/с}^2$  и до  $1,4 \text{ м/с}^2$  соответственно позволяют сократить время пассажиров в пути в среднем на 15–20 %. При этом, как показали исследования АО ВНИИЖТ, длительное и повторное воздействие непогашенного центростремительного ускорения величиной до  $0,9 \text{ м/с}^2$  включительно при современных конструкциях подвижного состава большинство людей переносит удовлетворительно. Непогашенное центростремительное ускорение, равное  $1 \text{ м/с}^2$ , переносится удовлетворительно при многократных и непродолжительных воздействиях.

Между Белорусской железной дорогой и компанией «Stadler», работающей на территории Республики Беларусь, подписан договор о производстве

десяти подвижных составов ЭПм «Stadler» с допускаемой величиной непогащенного ускорения  $0,9 \text{ м/с}^2$ . Такая конструкция вагона имеет свои динамические особенности.

### 3.4 Пример расчета

**Задача.** Определить необходимое возвышение наружного рельса в кривой радиусом  $R = 1000 \text{ м}$ , расположенной на участке дороги, по которому проходит в среднем в сутки количество поездов, указанное в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Количество поездов за сутки

Поезда	Количество поездов	Масса поезда брутто, т	Установленная скорость по участку, км/ч
Пассажирские скорые	$N_1 = 2$	$P_1 = 1000$	$v_1 = 130$
Пассажирские межрегиональные	$N_2 = 2$	$P_2 = 1000$	$v_2 = 120$
Пригородные	$N_3 = 18$	$P_3 = 750$	$v_3 = 80$
Грузовые	$N_4 = 20$	$P_4 = 3600$	$v_4 = 80$

*Решение.* По формуле (3.8) определим возвышение наружного рельса при  $W_B = 0$  из условия обеспечения равномерного вертикального износа рельсов обеих нитей кривой:

$$h = \frac{12,5k v_{\text{ср}}^2}{R} = \frac{12,5k(N_1 P_1 v_1^2 + N_2 P_2 v_2^2 + N_3 P_3 v_3^2 + \dots + N_n P_n v_n^2)}{R(N_1 P_1 + N_2 P_2 + N_3 P_3 + \dots + N_n P_n)} =$$

$$= \frac{12,5(2 \cdot 1000 \cdot 130^2 + 2 \cdot 1000 \cdot 120^2 + 18 \cdot 750 \cdot 80^2 + 20 \cdot 3600 \cdot 80^2)}{1000(2 \cdot 1000 + 2 \cdot 1000 + 18 \cdot 750 + 20 \cdot 3600)} = 82 \text{ мм.}$$

По формуле (3.12) найдем  $h$  по условию обеспечения комфортабельности езды пассажиров:

$$h = \frac{12,5v_{\text{max}}^2}{R} - 115 = \frac{12,5 \cdot 130^2}{1000} - 115 = 97 \text{ мм.}$$

Окончательно принимаем наибольшее значение  $h$  с округлением кратным 5 мм в большую сторону. Таким образом,  $h = 100 \text{ мм}$ .

## 4 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДЛИНЫ ПЕРЕХОДНОЙ И КРУГОВОЙ КРИВЫХ И ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ИХ РАЗБИВКИ

### 4.1 Назначение и форма переходных кривых

Переходные кривые имеют назначение обеспечить такой переход с прямолинейного пути на криволинейный радиуса  $R$  и с кругового пути радиуса  $R$  на круговой путь радиуса  $R_1$ , чтобы появляющиеся в кривой дополнительные силы не возникли внезапно.

На переходной кривой должны быть осуществлены полностью отвод возвышения наружного рельса и отвод уширения колеи.

Основной силой, связанной с наличием кривой, является центробежная сила. В начале переходной кривой (НПК) эта сила должна быть равна нулю, а в конце переходной кривой (КПК) она имеет максимальное значение. Очевидно, радиус переходной кривой должен быть в НПК  $\rho = \infty$ , а в КПК  $\rho = R$ .

Если отвод возвышения наружного рельса делать по закону прямой с вертикальным углом, то при движении колёса экипажа, катящиеся по наружному рельсу в начале и конце переходной кривой, будут ударяться в вертикальной плоскости в этот рельс. Во избежание этого необходимо, чтобы в НПК и КПК угол  $\gamma$  был равен нулю, т. е.  $dh / dl = 0$  (рисунок 4.1).

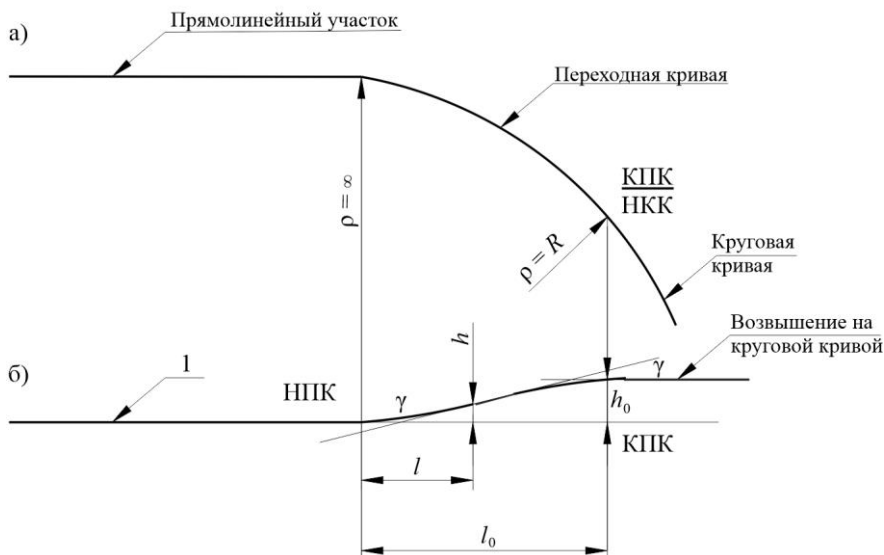


Рисунок 4.1 – Схема положения переходной кривой:  
а – в плане; б – в профиле

Известно, что при силе ветра  $W_v = 0$  возвышение наружного рельса в круговой кривой

$$h = \frac{S_1}{g} \cdot \frac{v_{\text{срв}}^2}{R}. \quad (4.1)$$

По аналогии – для переходной кривой при переменном радиусе  $\rho$  в любой ее точке

$$h = \frac{S_1}{g} \cdot \frac{v_{\text{срв}}^2}{\rho}. \quad (4.2)$$

Обозначив  $S_1 / g$  через  $A$  и  $1 / \rho$  через  $K$  и, имея в виду, что произведение  $Av_{\text{срв}}^2$  можно считать постоянным (const), напомним

$$dK / dl = 0.$$

В настоящее время считают практически возможным пренебречь некоторыми из указанных условий. Так, обычно допускают отвод возвышения наружного рельса по закону прямой, т. е. при малости угла  $\gamma$  принимают в НПК и КПК:

$$dK / dl \neq 0.$$

При устройстве отвода возвышения по прямой с уклоном  $i = \text{tg } \gamma$  для любой текущей точки переходной кривой можно написать

$$l = h / i.$$

А так как

$$h = Av_{\text{срв}}^2 / \rho,$$

то, следовательно,

$$l = Av_{\text{срв}}^2 / (i\rho).$$

Обозначим  $Av_{\text{срв}}^2 / i$  через  $C$  и назовем эту величину параметром. Тогда выражение для определения  $l$  получит такой вид:

$$l = \frac{C}{\rho} = CK, \quad (4.3)$$

где  $l$  – текущая длина переходной кривой от ее начала, м;

$C$  – параметр переходной кривой;

$\rho$ ,  $K$  – переменный радиус и кривизна в пределах переходной кривой.

Этому уравнению удовлетворяет кривая, называемая радиоидальной спиралью (клотоидой). При  $\rho = R$  и  $l = l_0$  в КПК

$$C = l_0 R. \quad (4.4)$$

Здесь  $C$  – параметр переходной кривой.



Иногда параметр

$$C = Av_{\text{срв}}^2 / i$$

называют физическим параметром, если в формуле присутствуют геометрические характеристики  $l_0$  и  $R$ , то тогда параметр  $C$  можно назвать геометрическим.

Найдем уравнение радиоидальной спирали в прямоугольной системе координат (рисунок 4.2). Запишем

$$dx = dl \cos \varphi; \quad dy = dl \sin \varphi, \quad (4.5)$$

где  $x, y$  – прямоугольные координаты;

$l$  – текущая длина дуги, м;

$\varphi$  – угол наклона кривой в данной точке.

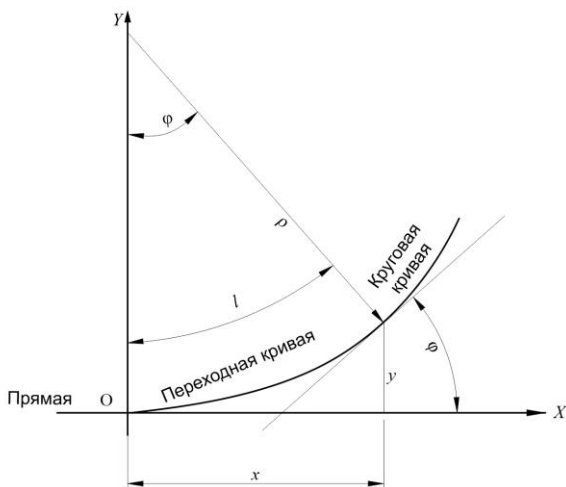


Рисунок 4.2 – Схема к определению радиоидальной спирали в прямоугольной системе координат

Имея в виду, что при  $l = 0$ , а также  $x = 0$  и  $y = 0$ , получим

$$x = \int_0^l \cos \varphi dl; \quad y = \int_0^l \sin \varphi dl. \quad (4.6)$$

Для возможности интегрирования выразим  $dl$  через  $d\varphi$ , т. е.  $dl = \rho d\varphi$ . Отсюда  $d\varphi = dl / \rho$ . Но из выражения (4.3)  $\rho = C / l$ , следовательно,  $d\varphi = l dl / C$ .

Тогда 
$$\varphi = \int_0^l \frac{l dl}{C}. \quad (4.7)$$

Это и будет выражение для определения угла наклона радиоидальной спирали в любой точке. Для переходной кривой

$$\varphi_0 = \frac{l_0^2}{2C}. \quad (4.8)$$

Подставляя значение  $\varphi$  в подынтегральные выражения  $x$  и  $y$ , получим

$$x = \int_0^l \cos \frac{l^2}{2C} dl; \quad y = \int_0^l \sin \frac{l^2}{2C} dl. \quad (4.9)$$

Раскладывая их в степенной ряд и, произведя интегрирование, окончательно найдем уравнение радиоидальной спирали

$$\begin{aligned} x &= l - \frac{l^5}{40C^2} + \frac{l^9}{3456C^5} - \dots; \\ y &= \frac{l^3}{6C} - \frac{l^7}{336C^3} + \frac{l^{11}}{42240C^5} - \dots \end{aligned} \quad (4.10)$$

Во многих случаях представляется возможным ограничиваться первым членом в каждом ряду, т. е. принимать  $x \approx l$  и  $y = l^3/(6C)$ . Заменяя  $l$  его значением через  $x$ , получим

$$y = \frac{x^3}{6C}, \quad (4.11)$$

что представляет собой уравнение кубической параболы и достаточно часто применяется для разбивки переходных кривых.

## 4.2 Выбор длины и параметра переходной кривой

Длина переходной кривой определяется рядом условий, связанных с отводом возвышения наружного рельса в пределах переходной кривой, наличием зазоров между гребнями колес и рельсовыми нитями, необходимостью обеспечения практической возможности разбивки и дальнейшего содержания переходной кривой. Приведем здесь три критерия выбора длины переходной кривой, дающих обычно ее наибольшее значение.

1 По допустимой крутизне отвода возвышения наружного рельса

$$l_0 = \frac{h}{i}, \quad (4.12)$$

где  $h$  – расчетное возвышение наружного рельса в круговой кривой мм;

$i$  – расчетный уклон отвода возвышения, мм/м. Обычно на практике принимают  $i_1 = 1 \text{ ‰}$ , а в трудных условиях –  $i_1 = 2 \text{ ‰}$ , максимальный отвод –  $i_1 = 3,2 \text{ ‰}$ .

На однопутных линиях и на наружном пути двухпутных линий при скорости движения до 140 км/ч согласно [6] рекомендуется определять значение  $l_0$  по формуле (4.12). При этом наибольший уклон отвода не должен превышать величин, приведенных в таблице 4.1.

**Таблица 4.1 – Рекомендуемые (при сплошной выправке переходных кривых и производстве ремонтных работ) и предельно допускаемые уклоны отводов возвышения наружного рельса в кривых**

Уклоны отвода возвышения		Установленная скорость движения поездов, км/ч
рекомендуемые	допускаемые	
0,5	0,9	140
0,8	1,0	120
0,9	1,2	110
1,0	1,4	100
1,2	1,6	90
1,4	1,7	85
1,6	1,9	80
1,8	2,1	75
1,9	2,3	70
2,0	2,5	65
2,1	2,7	60
2,3	2,9	55
2,5	3,0	50
2,7	3,1	40
3,0	3,2	25
	Более 3,2	Закрывается движение поездов

Минимальная длина переходной кривой в эксплуатации определяется по предельно допустимым уклонам.

Длина переходных кривых на внутреннем пути двухпутного участка

$$l_{\text{вн}} = \sqrt{24Rd + l_{\text{н}}^2}, \quad (4.14)$$

где  $R$  – радиус кривой, м;

$d$  – уширение междупутья в кривой, м;

$l_{\text{н}}$  – длина переходной кривой наружного пути, м.

2 По допустимой скорости подъема колес по наружному рельсу.

При малой длине переходной кривой взаимодействие колеса и рельса наружной нити в пределах отвода возвышения наружного рельса близко к ударному. Чтобы не допустить этого, ограничивают вертикальную составляющую скорости подъема колеса величиной  $f$ .

На железных дорогах стран СНГ для нормальных условий принято значение  $f = 38$  мм/с, скорость подъема колеса по отводу возвышения наружного рельса не должна превышать  $f \leq 50$  мм/с. Если принять для скоростей движения  $v_{\max} \leq 140$  км/ч,  $f = 38,9$  мм/с, то получим

$$i_2 \leq \frac{f}{v_{\max}}.$$

3 По допустимой скорости нарастания непогашенного горизонтального ускорения  $\psi$ .

По третьему условию длина переходной кривой должна удовлетворять следующему требованию:

$$l_0 \geq \frac{a_{\text{доп}} v_{\max}}{\psi}, \quad (4.15)$$

где  $\psi$  – скорость нарастания поперечного ускорения, м/с<sup>3</sup>.

При  $a_{\text{нп}} = 0,7$  м/с<sup>2</sup>,  $\psi = 0,6$  м/с<sup>3</sup> и  $v$ , км/ч

$$l_0 \geq 0,32v_{\max}. \quad (4.16)$$

Крутизна отвода возвышения должна быть не более  $i_0 \leq 1$  ‰ при скоростях до 140 км/ч,  $i_0 \leq 0,67$  ‰ при скоростях 141–160 км/ч и  $i_0 \leq 0,5$  ‰ при скоростях движения 161–200 км/ч.

Длины переходных кривых находятся в границах от 20 до 180 м с интервалами по 10 м и зависят от категории линии и скоростей движения по кривым. Определив  $l_0$ , окончательно принимают ближайшее (обычно большее) значение по [7].

По значению радиуса круговой кривой и принятой величины  $l_0$  определяется параметр переходной кривой  $C = l_0 R$ .

### 4.3 Расчет разбивки переходной кривой

Разбивка переходных кривых может быть осуществлена следующими способами:

- сдвиги центра круговой кривой вовнутрь;
- уменьшения радиуса без изменения центра кривой;
- смещения центра и изменения радиуса кривой (предложен Н. В. Харламовым).

Наибольшее распространение получил первый и третий из названных способов. Обычно способ сдвигки центра применяется на новых линиях. В условиях эксплуатации он может быть использован, если имеется возможность осуществления требуемых сдвижек пути. На эксплуатируемых линиях чаще всего пользуются способом Н. В. Харламова, поскольку он дает возможность разбивки переходных кривых при наименьших сдвижках пути. Ниже приводится расчет разбивки кривой способом сдвигки.

Разбивка переходных кривых возможна лишь при выполнении условия

$$2\varphi_0 \leq \beta, \quad (4.16)$$

где  $\varphi_0$  – угол поворота линии в пределах переходной кривой, рад;

$\beta$  – угол поворота линии, град.

Как известно, значение  $\varphi_0$  определяется по формуле

$$\varphi_0 = \frac{l_0^2}{2C} = \frac{l_0}{2R}. \quad (4.17)$$

Для осуществления разбивки кривой необходимо вычислить основные ее элементы по рисунку 4.3, где  $T_c$  – суммарный тангенс кривой;  $B_c$  – суммарная биссектриса,  $K_c$  – полная длина кривой с переходными кривыми;  $m$  – расстояние от начала переходной кривой до проекции нового центра круговой кривой;  $m_0$  – расстояние от начала переходной кривой до тангенсного столбика круговой кривой;  $P$  – сдвигка круговой кривой в новое положение. Значения этих элементов кривой определяются по формулам:

$$T_c = (R+P)\operatorname{tg}(\beta / 2) + m; \quad (4.18)$$

$$B_c = R(\sec(\beta / 2) - 1) + P \sec(\beta / 2); \quad (4.19)$$

$$K_c = l_0 + \pi R\beta / 180^\circ; \quad (4.20)$$

$$m = x_0 - R\sin\varphi_0; \quad (4.21)$$

$$m_0 = m + P\operatorname{tg}(\beta / 2); \quad (4.22)$$

$$P = y_0 + R\cos\varphi - R = y_0 - R(1 - \cos\varphi_0) = y_0 - 2R\sin^2(\varphi_0 / 2); \quad (4.23)$$

где  $x_0$  – абсцисса, соответствующая полной длине переходной кривой (см. рисунок 4.3);

$y_0$  – ордината конца переходной кривой, определяемая по формуле (4.9)

при  $l = l_0$ .

Приближенное значение  $P$  может быть получено из выражения

$$P = \frac{l_0^2}{24R}. \quad (4.24)$$

Для разбивки на местности переходной кривой и сдвинутой круговой кривой необходимо вычислить координаты отдельных точек указанных кривых по приведенным выше уравнениям. На практике значения координат определяют по таблицам для разбивки железнодорожных кривых. При отсутствии таблиц координаты переходной кривой  $x$  и  $y$  могут вычисляться по формулам (4.9), принимая длину отрезков от начала переходной кривой, кратную 10 или 20 м.

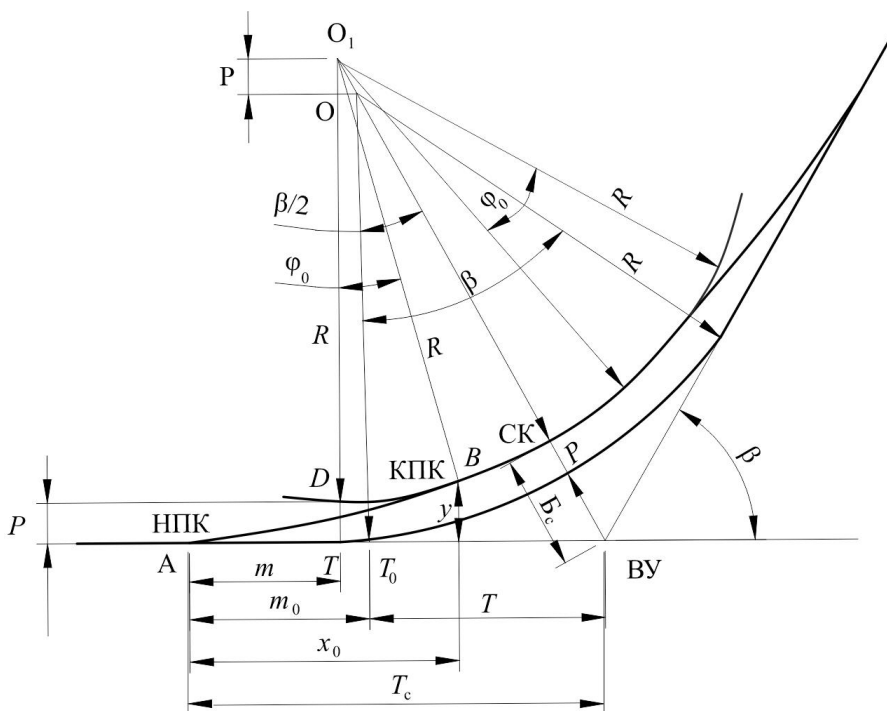


Рисунок 4.3 – Расчетная схема разбивки переходных кривых способом сдвигки круговой кривой вовнутрь

#### 4.4 Пример расчета

**Задача.** Требуется произвести расчет элементов переходных кривых для круговой кривой радиусом  $R = 1000$  м, находящейся на участке пути, подлежащему ремонту. При этом известны центральный угол круговой кривой ( $\beta = 32^\circ$ ) и размеры плановых перевозок после ремонта пути (см. таблицу 3.1).

*Решение.* Расчеты выполняют в такой последовательности.

1 Прежде всего необходимо определить возвышение наружного рельса  $h$  по выражению (3.6).

Поскольку исходные данные для определения  $h$  (плановое число поездов в сутки и их характеристики) в настоящем задании те же, что и в предыдущем примере, то, чтобы не повторять численных подсчетов, мы сразу напишем значение этого возвышения, определенного в указанном примере, т. е. примем  $h = 100$  мм, что соответствует 0,1 м.

2 Определим длину переходной кривой  $l_0$ . Из условия равномерного роста возвышения наружного рельса на длине переходной кривой в учебных целях можно принять уклон отвода  $i = 1$  ‰, что равнозначно  $i = 0,001$ . Тогда

$$l = h / i = 0,1 / 0,001 = 100 \text{ м.}$$

Этой длине переходной кривой при  $R = 1000$  м будет соответствовать параметр

$$C = l_0 R = 100 \cdot 1000 = 100000 \text{ м}^2.$$

3 Определим вид переходной кривой и координаты для ее разбивки в прямоугольной системе. В качестве переходной можно применить кривую, разбиваемую по закону кубической параболы в соответствии с выражением (4.11)  $y = x^3 / 6C$ . Пользуясь этим уравнением, вычислим ординаты переходных кривых (4.9), сведя подсчеты в таблицу 4.2.

**Таблица 4.2 – Ординаты переходных кривых**

В метрах			
$x$	$y = \frac{x^3}{6C}$	$x$	$y = \frac{x^3}{6C}$
$x_1 = 10$	$y_1 = 0,0016(6)$	$x_6 = 60$	$y_6 = 0,360$
$x_2 = 20$	$y_2 = 0,013$	$x_7 = 70$	$y_7 = 0,572$
$x_3 = 30$	$y_3 = 0,045$	$x_8 = 80$	$y_8 = 0,853$
$x_4 = 40$	$y_4 = 0,107$	$x_9 = 90$	$y_9 = 1,216$
$x_5 = 50$	$y_5 = 0,208$	$x_0 = 100$	$y_0 = 1,666$
Примечание – $x_0$ – конечная абсцисса; $y_0$ – конечная ордината переходной кривой.			

4 Проверим возможность разбивки переходных кривых способом сдвиги круговой кривой вовнутрь и определим элементы переходных кривых, необходимые для этой разбивки (рисунок 4.4):

а) угол наклона переходной кривой в точке  $B$  (в ее конце) найдем согласно выражению (4.17):

$$\varphi_0 = \frac{l_0^2}{6C} = \frac{100^2}{2 \cdot 100000} = 0,5 \text{ рад} = 2^\circ 51' 53''.$$

Тогда  $2\varphi_0 = 5^\circ 43' 46''$ , что меньше  $\beta = 32^\circ$ , т. е. разбивка переходных кривых данным способом (сдвижки) возможна, так как условие (4.16) соблюдено;

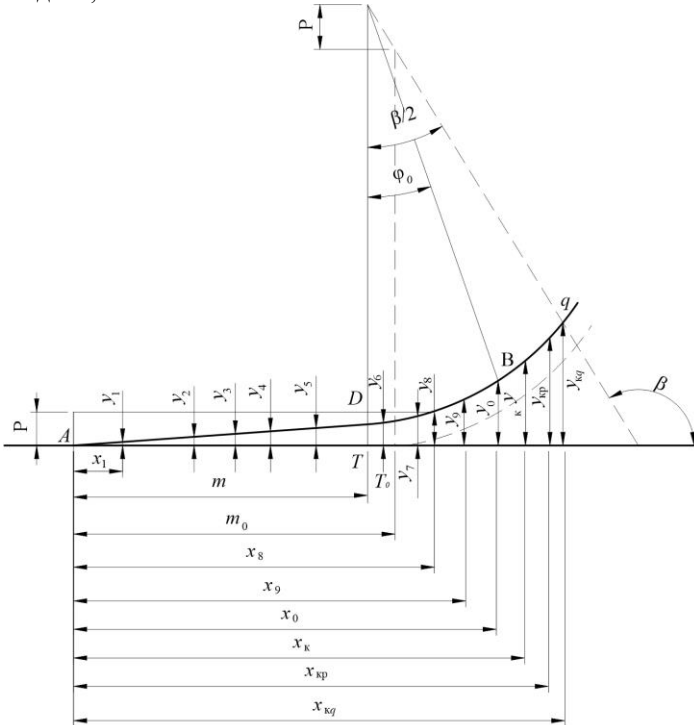


Рисунок 4.4 – Координаты переходной и круговой кривых при разбивке способом сдвижки круговой кривой вовнутрь

б) расстояние  $m$  от начала переходной кривой (от точки А) до нового положения тангенсного столбика (до точки Т) определим по выражению (4.18) в соответствии с рисунком 4.4:

$$m = x_0 - R \sin \varphi_0 = 100 - 1000 \cdot 0,049978 = 50,022 \text{ м};$$

в) сдвигка  $P$  определяется по формуле (4.22):

$$P = y_0 - R(1 - \cos \varphi_0) = 1,666 - 1000(1 - 0,99875) = 0,416 \text{ м}.$$

Как видно, сдвигка получилась значительных размеров;



г) расстояние  $m_0$  от начала переходной кривой (от точки А) до первоначального положения тангенсного столбика  $T_0$  найдем по формуле (4.23):

$$m_0 = m + R \operatorname{tg} \beta / 2 = 50,022 + 0,416 \cdot 0,2867 = 50,141 \text{ м};$$

д) вычислим длину оставшейся части круговой кривой после устройства переходных кривых:

$$\frac{\pi R}{180^\circ} (\beta - 2\varphi_0) = \frac{3,14 \cdot 1000}{180^\circ} (32^\circ - 2 \cdot 2^\circ 51' 53'') = 458,667 \text{ м}.$$

Дуга  $Bq$  как равная половине оставшейся части круговой кривой будет равна

$$458,667 / 2 = 229,333 \text{ м}.$$

Координаты  $x_k$  и  $y_k$  этой части круговой кривой находятся с использованием таблиц для разбивки железнодорожных кривых:

$$x_k = m + x_{\text{таб}}; y_k = P + y_{\text{таб}}.$$

При этом необходимо помнить, что  $x_{\text{таб}}$  и  $y_{\text{таб}}$  есть координаты круговой кривой относительно точки Д.

В таблицах для разбивки железнодорожных кривых даются готовые ординаты  $y_k$  через интервалы абсцисс в 10 м для кривой и  $R = 1000$  м при  $l_0 = 100$  м. Воспользовавшись ими для нашего случая, найдем

$$y_{k1} = 2,25 \text{ м ( при } x_{k1} = 110 \text{ м)}, y_{k2} = 2,87 \text{ м ( при } x_{k2} = 120 \text{ м)} \text{ и т. д.}$$

## 5 УКЛАДКА УКОРОЧЕННЫХ РЕЛЬСОВ В КРИВЫХ

### 5.1 Расчет укороченных рельсов

Укладка укороченных рельсов по внутренней нити кривой имеет целью установление рельсовых стыков на одной нити в соответствии с положением рельсовых стыков на другой нити и вызвана тем, что длина кривой по внутренней нити меньше, чем по наружной. Это означает, что стыки правой и левой нитей располагаются на одной нормали к оси пути, т. е. по наугольнику.

Так как обеспечить точное совпадение по наугольнику стыков внутренней и наружной нитей достаточно трудно, допускают некоторое их несовпадение, иначе пришлось бы иметь рельсы разной длины.

На Белорусской железной дороге принято пять типов укорочений рельсов  $K_i$ :  $K_1 = 40$  мм,  $K_2 = 80$  мм и  $K_3 = 120$  мм для рельсов длиной 12,5 м и  $K_2 = 80$ ,  $K_4 = 160$  мм для рельсов длиной 25 м. При этом несовпадение стыков допускают на величину, не превышающую половины укорочения  $K_i$ .

Определим для любого вида кривой величину, на которую внутренняя нить будет короче наружной для любого отрезка кривой между сечениями  $AA_1$  и  $BB_1$ , заключенного в угле  $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  (рисунок 5.1).

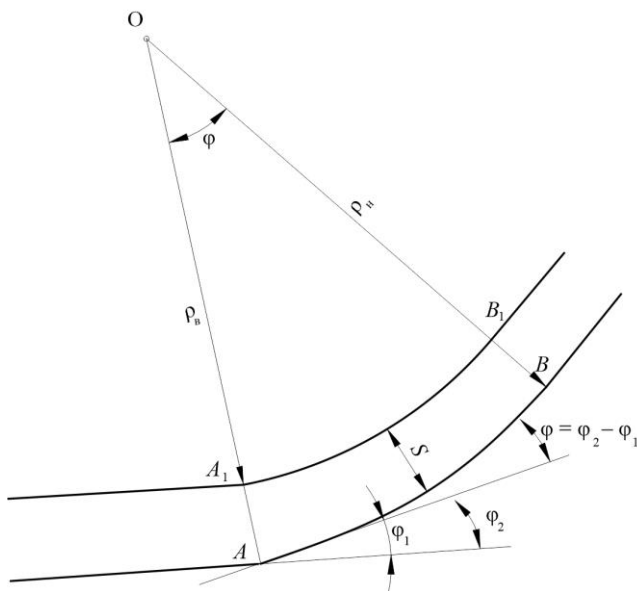


Рисунок 5.1 – Расчетная схема для определения укорочения внутренней рельсовой нити кривой

Длина дуги  $AB$  по наружной нити

$$\cup AB = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \rho_H d\varphi.$$

Длина дуги  $A_1B_1$  по внутренней нити

$$\cup A_1B_1 = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \rho_B d\varphi.$$

Укорочение при этом будет

$$e = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \rho_H d\varphi - \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \rho_B d\varphi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (\rho_H - \rho_B) d\varphi.$$

Но  $(\rho_H - \rho_B) = S_1$ , следовательно

$$e = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} S_1 d\varphi = S_1(\varphi_2 - \varphi_1) = S_1\varphi, \quad (5.1)$$

где  $S_1$  – расстояние между серединами головок рельсов, мм. Принимается  $S_1 = 1600$  мм;

$\beta$  – угол поворота линии, рад.

В тех случаях, когда кривая состоит из переходных и круговой кривых, угол поворота линии

$$\beta = \beta_1 + 2\varphi_0, \quad (5.2)$$

где  $\beta_1$  – центральный угол круговой кривой, рад.

$$\beta_1 = L_{\text{кк}} / R;$$

$L_{\text{кк}}$  – длина круговой кривой после устройства переходных кривых, м;

$\varphi_0$  – угол между направлением прямого пути и касательной в конце переходной кривой, рад. Для радиоидальной спирали угол поворота линии

$$\varphi_0 = \frac{I_0^2}{2C}.$$

Длина круговой кривой после устройства переходных кривых

$$L_{\text{кк}} = R(\beta - 2\varphi_0). \quad (5.3)$$

Следует отметить, что общее укорочение внутренней нити не зависит от формы элементов, из которых состоит кривая, так как сумма углов, соответствующих каждому элементу, равна общему углу поворота линии. Укорочение внутренней нити кривой подсчитывается по формулам:

– для переходной кривой

$$e_{\text{пк}} = \frac{S_1 l_0^2}{2C}; \quad (5.4)$$

– для оставшейся части круговой кривой после устройства переходных кривых

$$e_{\text{кк}} = \frac{S_1 L_{\text{кк}}}{R}. \quad (5.5)$$

Полное укорочение внутренней нити для кривой, состоящей из круговой кривой длиной  $L_{\text{кк}}$  и двух одинаковых переходных кривых длиной  $l_0$ , определяется по формуле

$$e_{\text{п}} = e_{\text{кк}} + 2e_{\text{пк}}. \quad (5.6)$$

С достаточной точностью укорочения на круговой и переходных кривых можно подсчитать, подставляя в формулы (5.4) и (5.5) радиус кривой по оси пути  $R_0$ . В этом случае формула (5.6) после подстановки значений будет иметь вид

$$e_{\text{п}} = S_1 \left( \frac{L_{\text{кк}}}{R_0} + \frac{l_0^2}{C} \right), \quad (5.7)$$

где  $R_0$  – радиус дуговой кривой по оси пути, м;

$C$  – параметр переходной кривой.  $C = l_0 R_0$ .

Расчет количества и порядка укладки укороченных рельсов в кривой выполняется обычно в такой последовательности:

а) определяют длины и углы переходных кривых по формулам (4.12)–(4.16);

б) находят оставшуюся длину круговой кривой после устройства переходных кривых по формуле (5.3);

в) подсчитывают полное укорочение внутренней нити по формуле (5.6) или (5.7);

г) определяют необходимое количество укороченных рельсов

$$N = \frac{e_{\text{п}}}{K_i}, \quad (5.8)$$

где  $K_i$  – принятая величина стандартного укорочения рельса, мм.

Если число  $N$  оказывается дробным, принимают ближайшее целое число. В пределах одной кривой целесообразно укладывать рельсы одного типа укорочения. Это позволяет иметь в километровом запасе для кривого участка пути однотипные укороченные рельсы. Критерием применимости того или иного типа укорочения для кривой заданного радиуса может служить следующая зависимость:

$$K_i \geq \frac{S_i l_n}{R}, \quad (5.9)$$

где  $l_n$  – длина укладываемого стандартного рельса с учетом зазора, м.

При длине рельсов 25 м можно укладывать укороченные на 80 мм рельсы в кривых радиусом  $R \geq 500$  м, а на 160 мм – в кривых  $R \geq 250$  м;

д) затем определяют порядок укладки укороченных рельсов.

Все расчеты удобно выполнять в табличной форме.

Расчеты и заполнение таблицы ведутся в следующем порядке.

1 Устанавливается положение стыков  $A_1, A_2, A_3, A_4$  на переходных, круговой кривых и на прямой (рисунок 5.2), определяется расстояние до них.

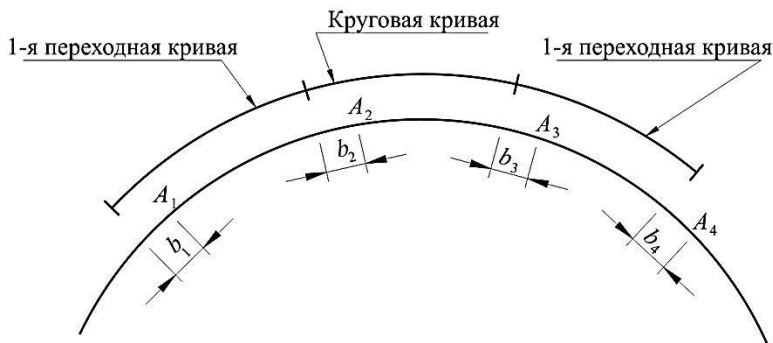


Рисунок 5.2 – Схема по установлению положения стыков на переходных и круговой кривых

2 Записываются в графу 1 таблицы 5.1 номера звеньев, полностью или частично располагающихся на кривой. Во второй графе указывается место расположения звена – первая переходная, круговая или вторая переходная кривая, а в третьей – длина рельсов, укладываемых на наружной нити кривой с учетом зазоров. Величина стыковых зазоров принимается равной 8–10 мм. На стыке переходных кривых с прямой и круговой кривой в третьей графе соответственно месту расположения отдельно указывается каждая часть длины рельса.

3 В графе 4 записывается с нарастающим итогом сумма длин рельсов по каждому участку кривой, что является контролем для графы 3. Сумма длин рельсов в конце участка переходной кривой должна равняться длине переходной кривой, а в конце круговой – длине круговой кривой по наружной рельсовой нити.

4 В графе 5 записывается с нарастающим итогом сумма потребных укорочений, вычисленных по формулам (5.4) и (5.5).

Расчет потребных значений укорочений по длине второй переходной кривой выполняется по формуле

$$e_i = e_n - \frac{S_1(l_0 - x_i)^2}{2C_0}, \quad (5.10)$$

где  $x_i$  – расстояние от конца переходной кривой до данного стыка, т. е. сумма длин рельсов на участке второй переходной кривой по графе 4, м.

5 В графе 6 записывается место фактической укладки укороченного рельса и величину его укорочения.

6 В графе 7 дается сумма фактических укорочений, т. е. сумма величин графы 6.

7 В графе 8 записывается разность величин граф 5 и 7. Эта разность по абсолютному значению не должна превышать половины принятого укорочения. В графе 8 знак плюс перед величиной несовпадения стыков стоит, когда потребное укорочение больше фактического, что соответствует забегу стыка по в утренней нити относительно стыка по наружной нити. При отставании стыка внутренней нити будет знак минус.

## 5.2 Пример расчета

**Исходные данные:** рельсы типа Р65;  $R = 1000$  м;  $\beta = 15^\circ$ ;  $S_1 = 1600$  мм;  $l_0 = 160$  м;  $b_1 = 3$  м; длина рельсов 25 м.

*Решение.* Определим параметр переходной кривой  $C$  и угол  $\varphi_0$  по формулам (4.4) и (4.17):

$$C = l_0 R = 160 \cdot 1000 = 160000 \text{ м}^2.$$

$$\varphi_0 = \frac{l_0^2}{2C} = \frac{160^2}{2 \cdot 160000} = 0,08 \text{ рад} = 4^\circ 34' 48'' = 4,58.$$

Длина переходной кривой по наружной рельсовой нити

$$l_0 = 2R\varphi = 2 \cdot 1000,8 \cdot 0,08 = 160,13 \text{ м}.$$

Оставшуюся часть круговой кривой по наружной нити после устройства переходных кривых определим по формуле (5.3):

$$L_{\text{кк}} = R_n(\beta - 2\varphi_0) = 1000,8 \cdot (15^\circ - 2 \cdot 4,58^\circ) \cdot 0,017453 = 102,0 \text{ м}.$$

По формулам (5.4)–(5.6) определим полное укорочение внутренней нити кривой:

$$e_{\text{н}} = e_{\text{кк}} + 2e_{\text{пк}} = \frac{S_1 L_{\text{кк}}}{R} + 2 \frac{S_1 l_0^2}{2C} = \frac{1600 \cdot 102,0}{1000} + \frac{1600 \cdot 160,13^2}{160000} = 419,6 \approx 420 \text{ мм.}$$

Определим укорочение на длине рельса  $l = 25$  м (5.9):

$$K \geq \frac{S_1 l_{\text{н}}}{R} = \frac{1600 \cdot 25}{1000} = 51 \text{ мм.}$$

Принимаем стандартное укорочение 80 мм.

Количество укороченных рельсов, которое необходимо уложить в кривом участке пути, вычисляем по формуле (5.8)

$$N = \frac{e_{\text{н}}}{K_i} = \frac{420}{80} = 5,25 \approx 5 \text{ рельсов.}$$

Определим значения забегов  $b_1, b_2, b_3, b_4$  при укладке по наружной кривой рельсов длиной 25 м (с учетом зазора 10 мм – 25,01 м). По заданию  $b_1 = 3,0$  м. На первой переходной кривой полностью укладывается

$$n = \frac{l_0 - b_1}{l_{\text{н}}} = \frac{160,13 - 3,0}{25,01} = 6 \text{ рельсов (в остатке 7,07 м).}$$

Седьмой рельс зайдет на круговую кривую на величину  $b_2 = 25,01 - 7,07 = 17,94$  м.

На круговой кривой разместится

$$n_2 = \frac{L_{\text{кк}} - b_2}{l_{\text{н}}} = \frac{102,0 - 17,94}{25,01} = 3 \text{ рельса (в остатке 9,03 м).}$$

Одиннадцатый рельс зайдет на вторую переходную кривую на длину  $b_3 = 25,01 - 9,03 = 15,98$  м.

На второй переходной кривой разместится

$$n_3 = \frac{l_0 - b_3}{l_{\text{н}}} = \frac{160,13 - 15,98}{25,01} = 5 \text{ рельсов (в остатке 19,1 м).}$$

Семнадцатый рельс зайдет на прямую на длину  $b_4 = 25,01 - 19,10 = 5,91$  м.

Общее количество рельсов нормальной длины на наружной нити будет

$$N_{\text{н}} = n_1 + n_2 + n_3 + 2 = 16 \text{ рельсов.}$$

Общая длина наружной нити кривой

$$L' = 160,13 + 102,0 + 160,13 = 422,26 \text{ м.}$$

При этом семнадцатый рельс заходит на прямую на величину

$$b_4 = 25,01 \cdot 17 + 3 - 422,26 = 5,91 \text{ м.}$$

Этот расчет служит контролем правильности вычислений.

Для заполнения графы 5 таблицы 5.1 выполним расчет укорочений внутренней нити от начала кривой до каждого стыка по формулам (5.4)–(5.6).

Участок первой переходной кривой

$$e_i = \frac{S_1 l_i^2}{2C} = \frac{1600 l_i^2}{2 \cdot 160000} = 0,005 l_i^2,$$

где  $l_i$  – расстояние от начала переходной кривой до стыка, для которого определяется величина укорочения, м,

$$e_0 = 0,005 \cdot 3,0^2 = 0;$$

$$e_1 = 0,005 \cdot 28,01^2 = 4 \text{ мм};$$

$$e_2 = 0,005 \cdot 53,02^2 = 14 \text{ мм};$$

$$\dots\dots\dots$$

$$e_5 = 0,005 \cdot 153,02^2 = 118 \text{ мм};$$

$$e_6 = 0,005 \cdot 160,06^2 = 128 \text{ мм}.$$

Участок круговой кривой

$$e_i = e_{нк} + \frac{S_1 l_i}{2C} = \frac{1600 l_i^2}{2 \cdot 160000} = 0,005 l_i^2,$$

где  $l_i$  – расстояние от начала круговой кривой до рассматриваемого стыка, м,

$$e_{7(2)} = 128 + 1,6 \cdot 17,94 = 157 \text{ мм};$$

$$e_8 = 128 + 1,6 \cdot 42,95 = 197 \text{ мм};$$

$$e_9 = 128 + 1,6 \cdot 67,96 = 237 \text{ мм};$$

$$e_{10} = 128 + 1,6 \cdot 92,97 = 277 \text{ мм};$$

$$e_{11(1)} = 128 + 1,6 \cdot 102,00 = 291 \text{ мм}.$$

Участок второй переходной кривой

$$e_i = e_{н} - \frac{S_1 (l_0 - x_i)^2}{2C} = 420 - \frac{1600(100,15 - x_i)^2}{2 \cdot 160000} = 420 - 0,005(160,13 - x_i)^2,$$

где  $x_i$  – расстояние от конца переходной кривой до данного стыка, т. е. сумма длин рельсов на участке второй переходной кривой по графе 4, м,

$$e_{11} = 420 - 0,005(160,13 - 15,98)^2 = 316 \text{ мм};$$

$$e_{12} = 420 - 0,005(160,13 - 40,99)^2 = 349 \text{ мм};$$

.....



$$e_{16} = 420 - 0,005(160,13 - 141,03)^2 = 418 \text{ мм};$$

$$e_{17} = 420 - 0,005(160,13 - 160,13)^2 = 420 \text{ мм}.$$

Весь расчет выполнен в таблице 5.1.

**Таблица 5.1 – Расчет порядка укороченных рельсов**

№ рельсов (звена)	Место расположения рельсов	Длина рельсов с учетом зазоров, м	Суммарная длина рельсов по элементам кривой, м	Сумма потребных укорочений, мм	Величина фактического укорочения каждого рельса, мм	Сумма Фактических укорочений, мм	Величина несовпадения стыков, мм
1	2	3	4	5	6	7	8
0	Первая переходная кривая $l_0 = 160,13 \text{ м}$	3,0	3,0	0	0	0	0
1		25,01	28,01	4	0	0	4
2		25,01	53,02	14	0	0	14
3		25,01	78,03	30	0	0	30
4		25,01	103,04	53	80	80	-27
5		25,01	128,06	81	0	80	.1
6		25,01	153,06	118	118	80	68
7	7,07	160,13	128	128	80	160	-32
7	Круговая кривая $L_{кк} = 102,0 \text{ м}$	17,94	17,94	157	0	160	-3
8		26,01	42,95	197	0	160	37
9		26,01	67,96	237	80	240	-3
10		26,01	92,97	277	0	240	37
11	9,03	102,00	291	291	80	320	-29
11	Вторая переходная кривая $l_0 = 160,13 \text{ м}$	16,98	16,98	316	0	820	-4
12		26,01	40,99	349	0	320	29
13		25,01	66,00	376	80	400	-24
14		26,01	91,01	396	0	400	-4
15		26,01	116,02	410	0	400	10
16		26,01	141,03	418	0	400	18
17		19,00	160,13	420	420	0	400

В результате вычислений найден порядок укладки укороченных рельсов, что показано на рисунке 5.3.

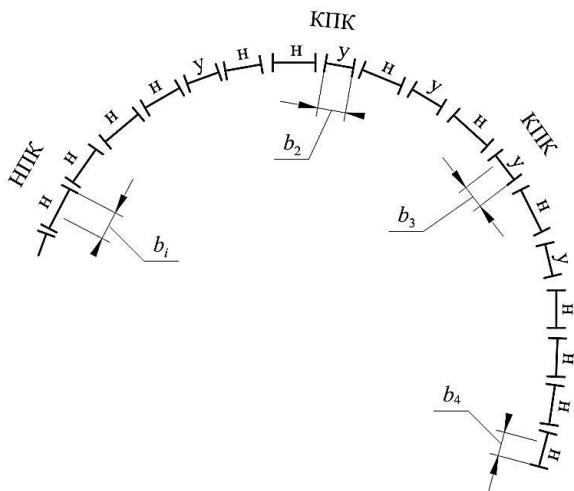


Рисунок 5.3 – Схема укладки укороченных рельсов

### Список литературы

- 1 Правила технической эксплуатации железной дороги в Республике Беларусь : утв. М-вом трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь 25.10.2015. – Минск, 2016. – 190 с.
- 2 Об изменении постановления Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь от 25.10.2015 №52 : утв. М-вом трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь 28.05.2020. – Минск, 2020. – 28 с.
- 3 Железнодорожный путь / под ред. Т. Г. Яковлевой. – 2-е изд., с изм. и доп. – М. : Транспорт, 2001. – 407 с.
- 4 Шахуняц, Г. М. Проектирование железнодорожного пути : учеб.-метод. пособие / Г. М. Шахуняц. – М. : Транспорт, 1972. – 320 с.
- 5 Виноградов, В. В. Расчеты и проектирование железнодорожного пути : учеб. пособие для студентов вузов ж.-д. трансп. / В. В. Виноградов ; под ред. В. В. Виноградова, А. М. Никонова. – М. : Маршрут, 2003. – 486 с.
- 6 СТП 09150.56.010–2005. Текущее содержание железнодорожного пути. Технические требования и организация работ; введ. 29.06.2006. – Минск : Белорусская железная дорога, 2005. – 284 с.
- 7 СНБ 3.03.01–98. Железные дороги колеи 1520 мм. – Взамен СНиП П-39-76, СНиП Ш-38-75 и СН 468-74; введ. 01.07.1998. – Минск : М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 1998. – 39 с.