

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Изыскания и проектирование дорог»

Т. А. РУДЕНКО, В. С. МИРОНОВ

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПЛАНА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

**Учебно-методическое пособие
по курсовому и дипломному проектированию**

Гомель 2014

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Изыскания и проектирование дорог»

Т. А. РУДЕНКО, В. С. МИРОНОВ

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПЛАНА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

*Одобрено методической комиссией строительного факультета
в качестве учебно-методического пособия
по курсовому и дипломному проектированию*

Гомель 2014

УДК 625.11(075.8)

ББК 39.20

Р83

Р е ц е н з е н т – канд. техн. наук, доцент кафедры «Изыскания и проектирование дорог» *Е. К. Атрошко* (УО «БелГУТ»)

Руденко, Т. А.

Р83 Реконструкция плана железных дорог : учеб.-метод. пособие по курсовому и дипломному проектированию / Т. А. Руденко, В. С. Миронов ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2014. – 25 с.
ISBN 978-985-554-298-9

Приводятся краткие сведения из теории раздела «Реконструкция существующих железных дорог» дисциплины «Изыскания и проектирование железных дорог» в соответствии с типовой программой.

Предназначено для выработки практических навыков в решении задач по реконструкции плана линии при проектировании реконструкции железных дорог под скоростное движение у студентов специальности «Строительство железных дорог, путь и путевое хозяйство».

УДК 625.11(075.8)

ББК 39.20

ISBN 978-985-554-298-9

© Руденко Т. А., Миронов В. С., 2014
© Оформление. УО «БелГУТ», 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Цели реконструкции железной дороги	4
2 Анализ существующего технического состояния переустраиваемой железной дороги.	5
3 Проектирование реконструкции плана участка железной дороги	6
3.1 Состав работ по проекту реконструкции плана	6
3.2 Приведение параметров плана в соответствие нормам проектирования	7
3.2.1 Определение нормативных параметров плана	7
3.2.2 Обоснование параметров плана железных дорог при введении скоростного движения на существующих линиях	8
.	
3.2.3 Определение нормативных радиусов круговых кривых для проектов реконструкции железных дорог	16
.	
3.3 Длины переходных кривых при введении подвижного состава с наклоном кузова	19
3.4 Длины прямых вставок	22
4 Пример решения задачи	23
Список литературы	25

ВВЕДЕНИЕ

План железной дороги – один из основных элементов проекта. Он в значительной степени определяет транспортно-эксплуатационные качества и капиталовложения в проектирование реконструкции дороги.

Одним из важнейших мероприятий по повышению скорости движения поездов и увеличения пропускной способности магистралей является реконструкция. Проведение реконструктивных мероприятий по улучшению плана существующей железной дороги позволяет увеличить скорость движения грузовых и пассажирских поездов, улучшает плавность и повышает безопасность движения.

Учебно-методическое пособие предназначено для курсового и дипломного проектирования по дисциплине «Изыскания и проектирование железных дорог», выполняемого студентами специальности «Строительство железных дорог, путь и путевое хозяйство» в разделе «Реконструкция участка существующей железной дороги и проектирование второго пути», а также могут быть использованы проектными организациями при разработке проектов переустройства существующих железных дорог. В данном учебно-методическом пособии решены вопросы, касающиеся нормативных параметров плана реконструируемой железной дороги и второго (дополнительного) главного пути, включен анализ плана существующей линии.

Предоставлена возможность обоснованного выбора радиуса кривой, в результате которой часть ограничений, касающихся плана линии, может быть снята, что приведет к повышению скорости.

1 ЦЕЛИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Переустройство железнодорожной линии в современных условиях может быть вызвано необходимостью усиления её мощности (провозной или пропускной способности), увеличением максимальных скоростей движения пассажирских поездов (введение скоростного движения), а также

стремлением уменьшить эксплуатационные издержки за счет обновления и модернизации её устройств и сооружений, в том числе электрификации железных дорог, мероприятий по увеличению весовой нормы и т. д.

В результате анализа задания в курсовом проекте должна быть отмечена основная причина реконструкции. Как правило, задачей переустройства железной дороги является существенное увеличение грузо- и пассажиропотоков. Необходимо рассмотреть заданные размеры перевозок на расчетные годы эксплуатации, оценить их абсолютные значения и динамику изменения в течение расчетного срока эксплуатации.

Следует указать размеры перевозок и максимальные скорости движения в грузовом и пассажирском движении, которые должны быть реализованы после реконструкции линии.

Метод, изложенный в данном учебно-методическом пособии, позволяет выбирать оптимальный радиус кривых при проведении реконструктивных мероприятий с учетом использования различного типа подвижного состава (в частности, подвижного состава с наклоном кузова) для увеличения скоростей движения поездов.

2 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПЕРЕУСТРАИВАЕМОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Технические параметры линии. В этом разделе указываются *основные технические параметры линии* в существующем состоянии: максимальный уклон, число главных путей, вид тяги и тип локомотива, полезная длина приемоотправочных путей, устройства СЦБ и связи, характеристика графика движения поездов.

Раздельные пункты. Для анализа размещения и путевого развития раздельных пунктов целесообразно вычертить схему их размещения на переустраиваемом участке с указанием длин перегонов (рисунок 2.1).

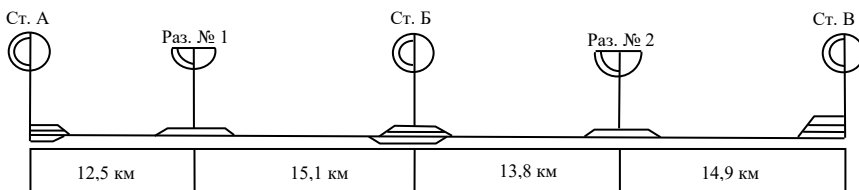


Рисунок 2.1 – Схема размещения раздельных пунктов на переустраиваемой железной дороге

В тексте пояснительной записки необходимо отметить виды отдельных пунктов (участковая или промежуточная станция, разъезд). Для каждого отдельного пункта надо показать пути приемоотправочного парка с учетом схемы их размещения и количества. Далее следует охарактеризовать план и продольный профиль трассы на отдельных пунктах.

План железной дороги. Анализ плана существующей линии необходимо выполнить на участке переустраиваемой линии, заданном подробным продольным профилем.

Данные по плану реконструируемой линии представлены в задании в виде результатов полевой съемки кривых. В процессе съемки могут быть получены углы поворота в пределах кривой, замеряемые, как правило, через 100 м, и стрелы на этих участках кривой, определяемые через 20 м. Эту информацию получают при съемке способом И. В. Гоникберга. Могут быть и другие виды съемки с иным представлением результатов.

Для анализа существующего плана необходимо выполнить расчет выправки кривых (приведение их в правильное геометрическое очертание с минимумом рихтовок) при помощи программы «RailRoadCalc» или других программ, имеющихся на кафедре. Используя результаты расчетов, надо составить ведомость элементов существующего плана (таблица 2.1).

Нормы проектирования плана (последняя колонка) надо указать в соответствии с результатами разработки раздела 3.

Т а б л и ц а 2.1 – Ведомость элементов плана реконструируемой железной дороги

№ элемента	Вид элемента	Пикетное положение				Длина, м	Радиус, м	Направление, угол поворота	Нормативный параметр плана
		Начало		Конец					
		Пк	+	Пк	+				
1	Прямая								
2	Переходная кривая								
3	Круговая кривая								
4	Переходная кривая								
5	Прямая								

3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ПЛАНА УЧАСТКА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

3.1 Состав работ по проекту реконструкции плана

При разработке раздела плана трассы в проекте реконструкции железной дороги или строительства второго пути необходимо:

- выправить план существующего пути в правильное геометрическое очертание, определить его параметры и положение главных точек кривых;
- привести параметры плана существующего пути в соответствие требованиям норм проектирования;
- обеспечить реализацию групповых типов поперечных профилей, требующих смещения оси трассы (для сохранения одного из откосов существующего пути), габариты приближения строений, вынос трассы в связи с реконструкцией водопропускных сооружений и другие изменения положения оси пути;
- запроектировать план второго пути.

По каждому из указанных пунктов необходимо определить требуемые смещения оси пути в проектное положение на пикетах и плюсовых точках. Затем надо установить в каждой из названных точек минимальное смещение, удовлетворяющее всем требованиям изменения плана.

Далее, с использованием минимально необходимых смещений, намечают проектный план существующего пути и применительно к этому плану проектируют второй путь.

На последнем этапе необходимо детально определить проектные параметры плана существующего и второго пути: положения главных точек кривых, изменения длин трассы и необходимые для выноса трассы в проектное положение сдвиги существующего пути.

При проектировании второго пути необходимо определить проектные междупутные расстояния.

3.2 Приведение параметров плана в соответствие нормам проектирования

3.2.1 Определение нормативных параметров плана

По результатам анализа существующих параметров плана и требований современных норм проектирования, а также расчетов возвышений наружного рельса, определяющих длину переходных кривых, надо установить необходимые изменения параметров плана и, по возможности, указать, предварительно подсчитав, попикетные («маячные») смещения точек плана.

В реальных условиях целесообразность *увеличения радиуса круговой кривой* устанавливают на основании определения экономической эффективности этого мероприятия, сопоставив необходимые строительные затраты и снижение эксплуатационных издержек в результате увеличения радиуса.

Увеличение радиуса надо рассматривать в том случае, если в результате определения возвышения наружного рельса установлена необходимость снижения скоростей движения пассажирских поездов. Альтернативой этому снижению скоростей может быть увеличение радиуса круговой кривой или повышение скоростей движения грузовых поездов.

В рамках курсового проекта следует лишь выявить, до какого значения надо увеличить радиус, чтобы не было необходимости в ограничении скоростей.

Нормативные *длины переходных кривых* определяют в соответствии с рекомендациями СТН Ц-01-95 (п. 4.23). При этом величины возвышения наружного рельса принимаются по данным расчета в п. 2 курсового проекта.

Нормативную *длину прямых вставок* надо установить по п. 4.24 СТН Ц-01-95. В случае несоответствия существующих длин прямых вставок нормативным значениям в курсовом проекте надо предложить в виде эскизного рисунка плана возможные пути решения задачи (уменьшение одного или обоих радиусов, между которыми расположена прямая вставка, или изменение углов поворота со смещением кривых).

3.2.2 Обоснование параметров плана железных дорог при введении скоростного движения на существующих линиях

Подвижной состав с наклоном кузова. Внедрение скоростного движения пассажирских поездов, как показывает мировая практика, осуществляют в большинстве случаев на эксплуатируемых железнодорожных линиях. Эти линии были построены по нормам, обеспечивающим максимальные скорости движения до 100–120 км/ч. Поэтому для реализации скоростного движения (200–250 км/ч) необходима модернизация и реконструкция ряда постоянных устройств. В том числе подлежит переустройству трасса железной дороги, к параметрам плана которой при скоростном движении предъявляют более высокие требования из условия комфортабельной езды пассажиров. Использование вагонов с наклоном кузова позволяет реализовать при существующем плане более высокие скорости движения и сократить объемы переустройства трассы.

Обзор литературы по данному вопросу показал, что поезда с использованием вагонов с наклоном кузова широко применяют в странах Западной Европы и Азии. Впервые этот специализированный подвижной состав для повышения скорости движения на линиях с кривыми малого радиуса появился в 70-х годах прошлого века. Но дебют не был успешным. Поезд Turbotrain, введенный в эксплуатацию в 1972 г., находился в обращении совсем короткое время. Его модификация в Канаде продержалась несколько дольше, обслуживая маршрут Монреаль – Торонто, но и она оказалась ненадежной. Всего неделю находился в

постоянной эксплуатации британский поезд Advanced Passenger Train. Основной причиной неудач с этими поездами была, по-видимому, слишком большая концентрация неотработанных должным образом технических новшеств.

Первым примером подвижного состава, в котором технология наклона кузовов оправдала себя, был шестивагонный электропоезд серии 381, введенный в эксплуатацию в Японии в 1973 г. на маршруте Нагано – Нагоя. Пассивный наклон кузовов вагонов на угол до 6° обеспечивался за счет возможности кузова поворачиваться вокруг продольной оси на роликах, установленных над пневматическими баллонами второй ступени рессорного подвешивания. Однако скоро возникла проблема симптома морской болезни (укачивания пассажиров), и замысел повышения скорости движения со 120 до 130 км/ч на линии колеи 1067 мм, проходящей в гористой местности, остался нереализованным.

Вагоны с наклоном кузова предполагалось использовать прежде всего на поездах региональных сообщений. Для повышения скорости движения поездов на основных направлениях сети был выбран вариант строительства специализированных высокоскоростных магистралей без кривых малого радиуса. Однако не отказались и от альтернативного решения – реконструкции действующих линий под скоростное движение с использованием подвижного состава, в котором использована указанная технология, усовершенствованная должным образом.

Таким образом, появились поезда Talgo Pendular в Испании (1980 г.), LRC (модернизированный Turbotrain) в Канаде (1982 г.), ETR 450 Pendolino в Италии (1988 г.) и X2000 в Швеции (1990 г.) [1].

В 1990-х годах технология наклона кузовов вагонов достигла такого уровня развития, который позволил ей стать общепринятой и найти применение на железных дорогах 15 стран, включая 10 стран Европы. Компании – изготовители подвижного состава включают системы наклона кузовов в конструкцию подвижного состава многих серий, предназначенного для обслуживания как региональных, так и дальних сообщений.

Изучение вопросов проектирования скоростных железных дорог с использованием вагонов с наклоном кузова в России (в составе СССР) осуществлялось еще в 70-х годах прошлого столетия [2]. Исследования, в том числе и экспериментального характера, проводятся и в настоящее время. В декабре 2010 г. введен в эксплуатацию электропоезд «Аллегро», курсирующий в настоящее время по маршруту Санкт-Петербург – Хельсинки. Вагоны электропоезда оборудованы системой принудительного наклона в кривых до 8° . Предусматривается расширение этого скоростного

полигона с включением г. Турку, в том числе за счет строительства участков новой железной дороги.

Величина радиуса круговых кривых обуславливает безопасность и плавность движения, комфортабельность поездки и самочувствие пассажиров, а также износ верхнего строения пути и подвижного состава и другие технико-экономические показатели.

При движении экипажа по кривой (рисунок 3.1) на него действует центробежная сила I , направленная по радиусу от центра кривой.

Эта сила прижимает экипаж к наружной нити, затрудняет его поворот и увеличивает вертикальное давление на наружный рельс, в результате чего возрастает износ наружного рельса.

Сила G_x действует также на пассажиров, ухудшая комфортабельность езды. Эти два условия и ограничивают величину радиусов круговых кривых.

Для обеспечения равномерного вертикального износа обеих рельсовых нитей необходимо обеспечить одинаковое вертикальное воздействие на обе нити рельсов. Для этого устраивается возвышение наружного рельса h . На рисунке 3.1 показана расчетная схема для определения величины возвышения из условия одинакового давления на обе нити рельсов [5].

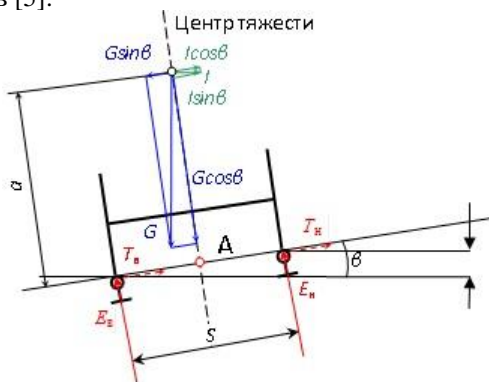


Рисунок 3.1 – Схема расчета возвышения для обеспечения одинакового износа рельсов при обычном подвижном составе

Центробежная сила определяется по формуле

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

Тогда

$$\left(\frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R} - G \frac{h}{S} \right) = 0,5(E_n - E_z)S; \quad (3.2)$$

$$E_{в} - E_{н} = \left(\frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R} - G \frac{h}{S} \right) / (0,5S) = 0$$

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{v^2}{R} - \frac{h}{S} = \frac{v^2}{R} - \frac{gh}{S} = 0,$$

где v – скорость движения поезда в м/с;

Наряду с этим необходимо внести ряд поправок, учитывающих влияние продольных сил, эксцентриситетов расположения колесных пар в колее и др.

В окончательном виде расчет возвышения (в мм) для уравнивания сил воздействия на наружную и внутреннюю нити рельсов рекомендуется выполнять по формуле

$$h = \frac{1,6v^2}{gR} = \frac{1,6 \cdot 1000v^2}{3,6 \cdot 3,6 \cdot 9,81R} = \frac{12,5v_{\text{нб}}^2 \hat{E}}{R}, \quad (3.3)$$

где K – коэффициент, учитывающий названные выше поправки (для скоростного движения $K = 1,2$).

При движении по кривой подвижного состава с наклоном кузова возможно смещение центра тяжести экипажа.

На рисунке 3.2 показана схема приложения сил, действующих на путь при смещении центра тяжести e .

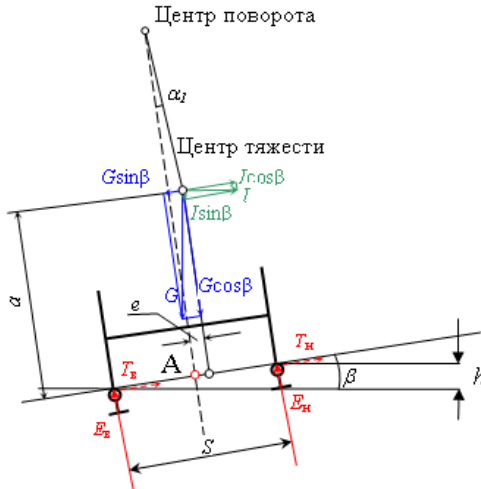


Рисунок 3.2 – К расчету необходимого возвышения при смещении центра тяжести

Уравнение моментов относительно точки А (пересечение оси пути и линии уровня головки рельсов)

$$(I \cos \beta - G \sin \beta)a + (G \cos \beta + I \sin \beta)e = 0,5(E_b - E_n)S ;$$

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

$$\left(\frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R} - G \frac{h}{S} \right) a + \left(G + \frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \frac{h}{S} \right) e = 0,5(E_b - E_n)S ;$$

$$E_b - E_n = \left[\left(\frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R} - G \frac{h}{S} \right) a + \left(G + \frac{G}{g} + \frac{v^2}{R} \cdot \frac{h}{S} \right) e \right] / (0,5S) = 0 ;$$

$$\left(\frac{1}{g} \cdot \frac{v^2}{R} - \frac{h}{S} \right) a + \left(1 + \frac{1}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \frac{h}{S} \right) e = 0 ;$$

$$\left(\frac{1}{9,81} \cdot \frac{v^2}{R} - \frac{h}{1,6} \right) a + \left(1 + \frac{1}{9,81} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \frac{h}{1,6} \right) e = 0 ;$$

$$h = \frac{1,6(av^2 + egR)}{agR - v^2e} = \frac{1,6(av^2 + egR)}{agR - v^2e} , \dot{\alpha} ;$$

$$h = \frac{1,6 \cdot 1000(av^2 / (3,6 \cdot 3,6) + e \cdot 9,81R)}{a \cdot 9,81R - v^2 / (3,6 \cdot 3,6)e} = \frac{1600(av^2 / 12,96 + e \cdot 9,81R)}{a \cdot 9,81R - v^2e / 12,96} =$$

$$= \frac{123,456av^2 + 15696eR}{9,81aR - v^2e / 12,96} = \frac{12,5av^2 + 1600eR}{aR - 0,00787v^2e} ;$$

$$h = \frac{12,5av^2 + 1600Re / \dot{\alpha}}{R - 0,00787v^2e / \dot{\alpha}} , \quad (3.2)$$

где a – расстояние от уровня головок рельсов до центра тяжести вагона, м;

e – смещение центра тяжести вагона из-за наклона кузова, м;

α – угол наклона кузова вагона при движении по кривой;

v – скорость движения поезда, км/ч.

Пробные расчеты по формуле (3.2) показали, что составляющей $0,00787v^2e/a$ можно пренебречь. Тогда, в общем случае, формула приобретает вид

$$h = \frac{12,585Kv^2}{R} \pm 1600 \frac{\dot{\alpha}}{a} . \quad (3.3)$$

Знак второго слагаемого формулы зависит от направления смещения центра тяжести: «+» – от центра кривой, «-» – к центру кривой.

Во многих вагонах с принудительным наклоном кузова поворот предусмотрен вокруг центра тяжести при $e = 0$.

Надо иметь в виду, что величина фактического e меньше полученного из треугольника с углом α (см. рисунок 3.2), так как смещение связано только с наклоном кузова вагона.

Тогда радиус по износу

$$R_{\text{из}} = \frac{v_{\text{н0}}^2 \cos\left(\frac{h}{S}\right) K}{12,585}. \quad (3.4)$$

Обеспечение комфортабельной езды пассажиров. Возвышение, обеспечивающее комфортабельную езду пассажиров при обычном подвижном составе, определяют по формуле

$$h = 12,5 \frac{v_{\text{max пс}}^2}{R} - a_{\text{н}} \frac{S}{g}. \quad (3.5)$$

Если за возвышение принимать его максимальную для условий железных дорог Беларуси величину ($h = 150$ мм), при $a_{\text{н}} = 0,7$ м/с², $S = 1600$ мм, $g = 9,81$ м/с² из формулы (3.4) можно определить максимально допускаемую по условиям комфортабельности скорость движения

$$v_{\text{max пс}} = 3,6 \sqrt{R(a_{\text{н}} + 0,00613h)} = 4,6 \sqrt{R}. \quad (3.6)$$

Расчеты по формуле (3.5) показывают, что для реализации скоростей порядка 160–200 км/ч необходимы радиусы круговых кривых 1200 м и более. Рассматривая отдельные линии, можно убедиться в том, что увеличение скоростей до вышеупомянутого уровня может потребовать значительной реконструкции плана железнодорожного пути.

У экипажа с наклоном кузова в кривой появляется дополнительный угол α (рисунок 3.3). Заменяв величину возвышения её значением $h = S \sin(\beta)$ и увеличив угол наклона на α , получаем

$$v_{\text{max пс}} = 3,6 \sqrt{R[a_{\text{нп}} + g \sin(\alpha + \beta)]}. \quad (3.7)$$

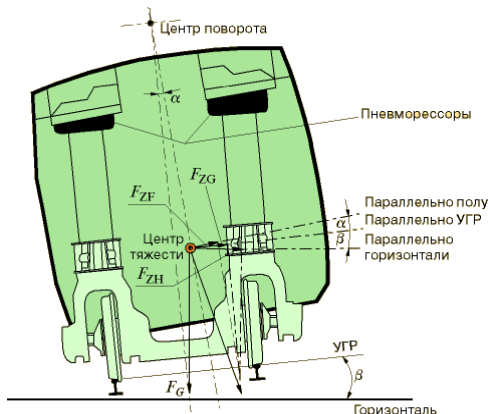


Рисунок 3.3 – Кинематика системы наклона кузова в поезде Talgo:

F_{ZF} – поперечная сила, действующая параллельно полу вагона;
 F_{ZG} – то же, параллельно уровню головки рельсов; F_{ZH} – то же, параллельно горизонтали;
 F_G – сила тяжести

Угол наклона вагона может достигать существенных значений, например, у испанского семейства поездов с наклоном кузова Talgo угол доведен до 8° . В таблице 3.1 приведены формулы для расчета при разных углах наклона кузова вагона.

Анализ этих формул показывает, что увеличение допускаемой скорости по условию обеспечения комфортабельности езды пассажиров может составить до 35 % (при $\alpha = 8^\circ$).

Т а б л и ц а 3.1 – Формулы для расчета $v_{\max \text{ пас}}$ при различном угле наклона подвижного состава

$\alpha,^\circ$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$v_{\max \text{ пас}}, \text{ км/ч}$	$4,6\sqrt{R}$	$4,8\sqrt{R}$	$5,0\sqrt{R}$	$5,2\sqrt{R}$	$5,5\sqrt{R}$	$5,7\sqrt{R}$	$5,8\sqrt{R}$	$6,0\sqrt{R}$	$6,2\sqrt{R}$

На рисунке 3.4 приведена зависимость максимально возможных скоростей движения по условию комфортабельности от величины радиуса кривой при непогашенном ускорении, равном $0,5 \text{ м/с}^2$.

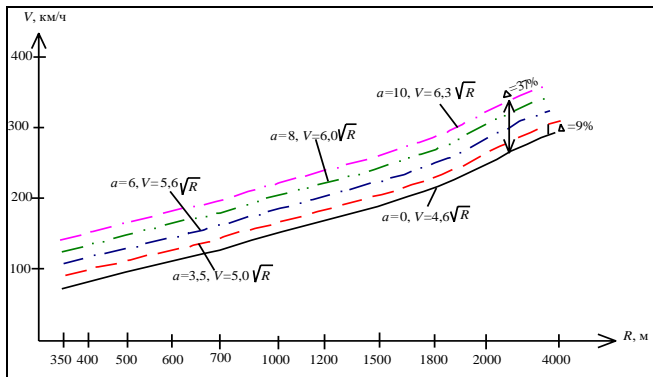


Рисунок 3.4 – Зависимость $v_{\max \text{ пас}} = f(R)$ при различных углах наклона кузова при $a_n = 0,5 \text{ м/с}^2$

В формулах (3.3)–(3.7) принято допущение $\cos \beta \approx 1$, что может повлиять на результаты расчетов при высоких скоростях движения.

На рисунке 3.5 приведена схема действия сил на пассажира при проследовании кривого участка пути.

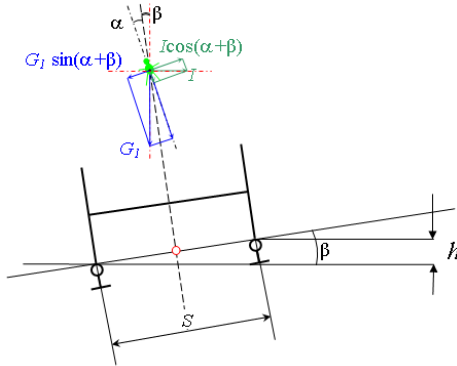


Рисунок 3.5 – Схема к расчету минимального значения радиуса по условию комфортабельности пассажиров

При движении в кривой на пассажира в вагоне с наклоном кузова действуют следующие силы:

$G \sin(\alpha + \beta)$ – составляющая веса пассажира, направленная к центру кривой;

$I \cos(\alpha + \beta)$ – составляющая центробежной силы, направленная от центра кривой, равная $\frac{G v_{nc}^2}{gR} \cos(\alpha + \beta)$;

F – непогашенная центробежная сила, равная

$$\frac{G}{g} a_{nn} \cos(\alpha + \beta).$$

Баланс сил, действующих на пассажира:

$$\frac{G v_{nc}^2}{gR} \cos(\alpha + \beta) - G \sin(\alpha + \beta) = \frac{G}{g} a_{nn} \cos(\alpha + \beta).$$

$$(v_{nc} / R) \cos(\alpha + \beta) - g \sin(\alpha + \beta) = a_{nn} \cos(\alpha + \beta)$$

$$v_{nc}^2 \cos(\alpha + \beta) = (a_{nn} \cos(\alpha + \beta) + g \sin(\alpha + \beta)) R;$$

$$R = \frac{v_{in}^2}{a_{in} + g \operatorname{tg}(\alpha + \beta)} = \frac{0,0772 v^2}{a_{in} + g \operatorname{tg}(\alpha + \beta)}.$$

Таким образом, точные формулы для определения минимального радиуса, обеспечивающего комфортабельность пассажиров, имеют вид:

- подвижной состав с наклоном кузова:

$$R_{\min nc} = \frac{0,0772 v^2}{a_{nn} + 9,81 \cdot \operatorname{tg}(\pi \alpha^\circ / 180 + \arcsin(h/S))}; \quad (3.8)$$

при $h = 150$ мм
$$R_{\min \text{ in}} = \frac{0,0772v^2}{a_{\text{нп}} + 9,81 \cdot \text{tg}(\pi\alpha^\circ/180 + 0,09389)} ;$$

- обычный подвижной состав:

$$R_{\min \text{ пс}} = \frac{0,0772v^2}{a_{\text{нп}} + 9,81 \cdot \text{tg}(\pi\alpha^\circ/180 + \arcsin(h/S))} ; \quad (3.9)$$

при $h = 150$ мм
$$R_{\min \text{ пс}} = \frac{0,0772v^2}{a_{\text{нп}} + 9,81 \cdot \text{tg}(0,09389)} .$$

Приближенные формулы:

- подвижной состав с наклоном кузова:

$$R_{\min \text{ пс}} = \frac{0,0772V^2}{a_{\text{нп}} + 9,81 \cdot \sin(\pi\beta/180 + \arcsin(h/S))} ; \quad (3.10)$$

при $h = 150$ мм

$$R_{\min \text{ пс}} = \frac{0,0772V^2}{a_{\text{нп}} + 9,81 \cdot \sin(\pi\beta/180 + 0,09389)} ;$$

- обычный подвижной состав:

$$R_{\min \text{ пс}} = \frac{0,0772v^2}{a_{\text{нп}} + 9,81h/S} ; \quad (3.11)$$

при $h = 150$ мм

$$R_{\min \text{ пс}} = \frac{0,0772v^2}{a_{\text{нп}} + 0,9197} .$$

На рисунке 3.6 приведены зависимость радиуса кривой от максимальной скорости движения пассажирских поездов по условию обеспечения комфортабельной езды.

Расчеты выполнены при $h = 150$ мм, $a_{\text{нп}} = 0,5$ м/с² и $\alpha = 6^\circ$ для различного подвижного состава по точным и приближенным формулам.

Анализ результатов позволяет отметить, что точные и приближенные формулы дают примерно один и тот же результат. Использование подвижного состава с наклоном кузова существенно уменьшает требуемую величину радиуса круговой кривой. В рассмотренном примере при $v_{\max \text{ пс}} = 200$ км/ч потребные величины радиусов уменьшились на 43 %.

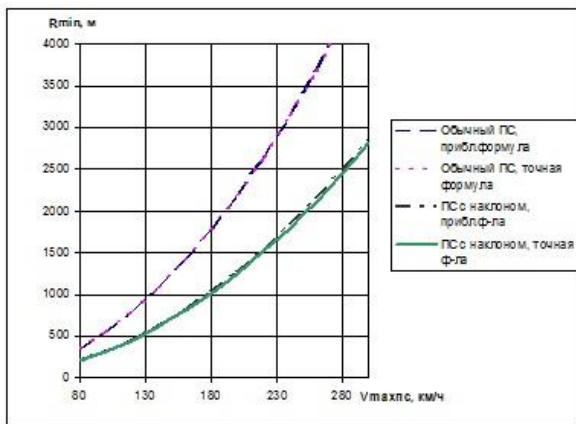


Рисунок 3.6 – График зависимости минимально необходимого радиуса по комфортности езды от максимальной скорости R_{\min} пс, м

3.2.3 Определение нормативных радиусов круговых кривых для проектов реконструкции железных дорог

Наиболее благоприятные условия эксплуатации будут реализованы при выполнении условий равномерного давления колес вагона на рельсы обеих нитей и необходимой комфортности езды пассажиров. Величина радиуса при этом соответствует точке пересечения кривых зависимостей $R_{\text{из}}(h)$ и $R_{\text{ком}}(h)$ на рисунке 3.7. Для аналитического выражения этого радиуса необходимо приравнять правые части формул (3.1) и (3.4) и выразить R из полученного уравнения [5]

$$R = \frac{12,5(v_{\text{пс}}^2 - v_{\text{ср}}^2 K)}{163,1a_{\text{нп}}}. \quad (3.12)$$

Однако при некотором соотношении скоростей движения, значениях K и $a_{\text{нп}}$ этот радиус соответствует неприемлемым значениям возвышения (за рамками 0–150 мм). В этом случае необходимо принимать больший из радиусов $R_{\text{из}}(h)$ и $R_{\text{ком}}(h)$ при $h = 150$ мм. При этом, если $R_{\text{из}} > R_{\text{ком}}$, то, приняв проектное значение радиуса равным $R_{\text{из}}$, мы обеспечиваем равномерное давление на рельсы и непогашенное ускорение меньше нормативного значения.

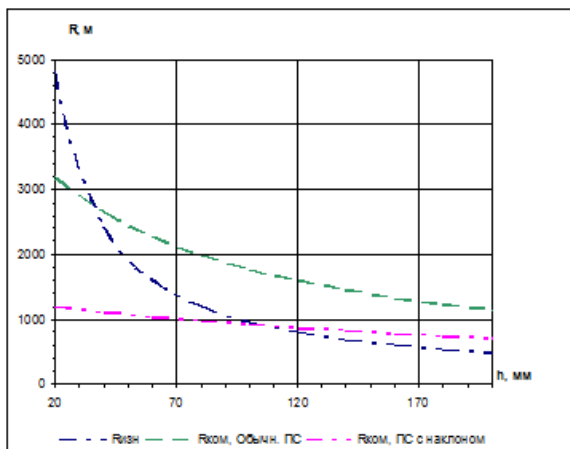


Рисунок 3.7 – К определению нормативных величин радиуса круговой кривой

Если $R_{ком} > R_{из}$, то будут обеспечены комфортабельные условия, а давление на внутренний рельс и его износ будут большими.

На рисунке 3.8 приведена блок-схема определения минимально необходимых радиусов круговых кривых в зависимости от условий эксплуатации.

Описание блок-схемы

Определение нормативных величин радиусов кривых выполняется для каждой i -й кривой проектируемого участка с учетом скоростей проследования её поездами разных категорий.

Предварительно необходимо выполнить тяговые расчеты для всех категорий поездов и установить скорости движения по каждой из кривых (блок 1, рисунок 3.8). Для наиболее быстрых поездов надо принять максимальную скорость, а для других поездов – среднюю при проследовании кривой.

С использованием данных тяговых расчетов и заданных на 10-й год размеров перевозок определяется средневзвешенная скорость потока поездов (блок 2):

$$V_{срi} = \sqrt{\frac{\Gamma_{бр} v_{грi}^2 + 365 n_{пс} Q_{пс} v_{псi}^2 \cdot 10^{-6}}{\Gamma_{бр} + 365 n_{пс} Q_{пс} \cdot 10^{-6}}}, \quad (3.13)$$

где $\Gamma_{бр}$ – грузонапряженность 10-го года брутто, млн т·км;

$Q_{пс}$ – масса пассажирского поезда, т;

$n_{пс}$ – число пар пассажирских поездов в сутки.

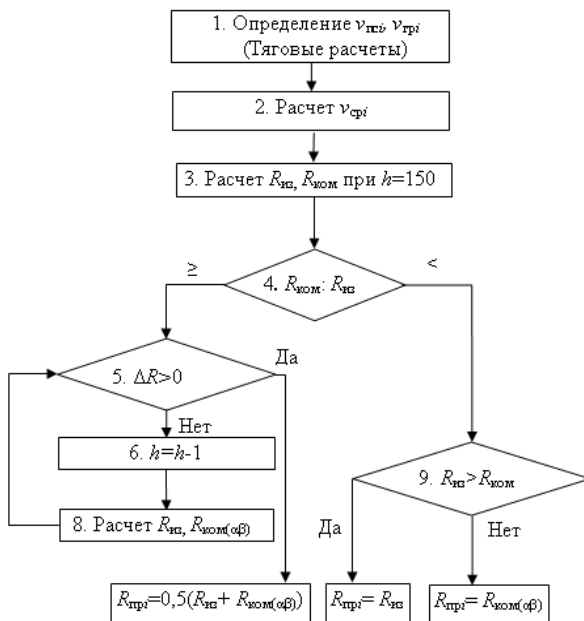


Рисунок 3.8 – Блок-схема алгоритма определения нормативных радиусов кривых

В блоке 3 выполняется расчет радиуса кривой по условию одинакового износа условию комфортабельной езды при максимально-возможном возвышении 150 мм.

В блоке 4 выполняется сравнение радиусов, полученных по равномерному износу и по комфортабельности. При $R_{ком} \geq R_{из}$ необходимо установить положение точки пересечения кривых $R_{ком}(h)$ и $R_{из}(h)$. Для этого используется циклическая операция расчета до тех пор, пока разность между $R_{ком}$ и $R_{из}$ не будет меньше 1 м (блоки 5–8).

При $R_{ком} < R_{из}$ установление радиуса производится в блоке 9.

В этом случае необходимо принимать больший из радиусов $R_{из}(h)$ и $R_{ком}(h)$ при $h = 150$ мм. При этом, если $R_{из} > R_{ком}$, то, приняв проектное значение радиуса равным $R_{из}$, мы обеспечиваем равномерное давление на рельсы и непогашенное ускорение меньше нормативного значения.

Если $R_{ком} > R_{из}$, то будут обеспечены комфортабельные условия, а давление на внутренний рельс и его износ будут большими.

Весь расчет автоматизирован, что позволяет ускорить операции вычисления.

3.3 Длины переходных кривых при введении

ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С НАКЛОНОМ КУЗОВА

Длины переходных кривых при существующем состоянии железнодорожных линий не всегда соответствуют требованиям исследований и СТН. При применении пассажирского подвижного состава с наклоном кузова вагона ($3-8^\circ$), который позволяет увеличить скорость движения на направлениях с большим количеством кривых без коренного их переустройства, теоретически можно повысить скорость в кривых с малыми возвышениями наружного рельса на величину, большую чем 25 %. Но с другой стороны, необходимо снижать скорость движения из-за превышения непогашенного ускорения кузова и скорости его изменения при преодолении переходной кривой. Этот факт может привести к тому, что система принудительного наклона не в полной мере будет себя оправдывать и увеличение скорости прохождения таких кривых может оказаться менее 20 %.

Одним из путей решения данной проблемы является переустройство пути, которое будет заключаться в установлении необходимой длины переходной кривой до уровня, при котором время ее прохождения будет не меньше времени, складывающегося из времени на обнаружение начала кривого участка пути (времени нарастания непогашенного ускорения кузова вагона до порогового значения) и времени срабатывания механизма наклона (приведения кузова в наклонное положение).

Длина переходной кривой, необходимая для приведения кузова в наклонное положение, зависит не только от возвышения наружного рельса в круговой кривой (по стандартным методикам расчета), но и от порогового значения непогашенного ускорения и угла наклона кузова вагона (от постоянных величин для механизма наклона), а также радиуса круговой кривой и принятого допустимого значения непогашенного ускорения.

Устройства переходных кривых связано с необходимостью плавного сопряжения кривой с примыкающей прямой как в плане, так и в профиле. Переходная кривая в плане представляет собой кривую переменного радиуса, уменьшающегося от ∞ (бесконечно большого) до R – радиуса круговой кривой с уменьшением кривизны пропорционально изменению длины. Кривая, обладающая таким свойством, представляет собой радиоидальную спираль, уравнение которой выражается в виде

$$y = \frac{x^3}{6C} \left(1 + \frac{2x^4}{35C^2} + \frac{293x^8}{237000C^4} + \dots \right), \quad (3.14)$$

где C – параметр переходной кривой ($C = IR$).

В связи с тем, что длина переходной кривой l мала по сравнению с C , практически достаточно ограничиться двумя первыми членами ряда приведенной формулы. В профиле переходная кривая в обычных условиях представляет собой наклонную линию с однообразным уклоном $i = h/l$.

На некоторых дорогах Германии, Франции, Японии и других стран используется криволинейный отвод возвышения наружной нити, преимущество которого в наибольшей мере проявляется при высокоскоростном движении поездов.

Длины переходных кривых принимаются исходя из условия:

1) обеспечение безопасности от схода колеса с рельсов при отводе возвышения;

2) отсутствия у пассажиров неприятных ощущений при входе и следовании по переходной кривой.

Требования, которые учитываются при определении длины переходных кривых, сформулированы еще в [4]. Определяющими формулами длины переходных кривых являются

$$f > [f] \text{ или } (dh/dt) < [dh/dt]; \quad (3.15)$$

$$(da_{\text{нп}}/dt) < [da_{\text{нп}}/dt]; \quad (3.16)$$

$$\Delta K < [\Delta K], \quad (3.17)$$

где f – скорость подъема колеса по отводу возвышения, мм/с;

$da_{\text{нп}}/dt = \psi$ – скорость изменения непогашенного ускорения во времени, м/с³;

ΔK – потеря кинетической энергии при ударе колеса о рельс наружной нити в данной кривой;

$[\Delta K]$ – допускаемое значение этой потери.

В соответствии с первым требованием уклон отвода возвышения при $f = 28$ мм/с, $i \leq 1/10v$; при $f = 35$ мм/с, $i \leq 1/8v$, соответственно

$$l_{\text{п}} \geq 10vh \text{ либо } l_{\text{п}} \geq 8vh. \quad (3.18)$$

В соответствии со вторым требованием при скоростях 160–200 км/ч, $a_{\text{нп}} = 0,7$ м/с², $\psi = 0,6$ м/с³ имеем $l_{\text{п}} \geq 0,32v_{\text{max}}$; при v свыше 200 км/ч, $a_{\text{нп}} = 0,6$ м/с², $\psi = 0,6$ м/с³ имеем $l_{\text{п}} \geq 0,28v_{\text{max}}$.

Третье требование приводится к виду

$$l_{\text{п}} \geq 0,032 v_{\text{max}}^2 / R. \quad (3.19)$$

Длина переходной кривой в результате исследований в функции от возвышения при скоростях 160–200 км/ч

$$l_{\text{п}} \geq 6,6h_{\text{ов}}. \quad (3.20)$$

Для подвижного состава с наклоном кузова длина переходных кривых, исходя из отсутствия у пассажиров неприятных ощущений при входе и

следовании по переходной кривой определяется по условиям (3.18)–(3.20) с учетом дополнительного угла наклона (рисунок 3.9):

$$l_i \geq \frac{(h_0 + S \sin \beta) v_{\max}^2}{f} \quad \text{и} \quad l_i \geq \frac{a_i}{\Psi}. \quad (3.21)$$

Таблица 3.2 - Длина переходной кривой для вагонов с наклоном кузова

В метрах

v, км/ч	h = 50 мм			h = 100 мм			h = 150 мм		
	β = 0°	β = 3,5°	β = 8°	β = 0°	β = 3,5°	β = 8°	β = 0°	β = 3,5°	β = 8°
80	26	78	144	53	105	171	79	131	197
100	33	98	181	60	131	214	99	164	247
120	40	117	217	79	157	256	119	197	296
140	46	137	253	93	183	299	139	230	345
160	53	157	289	106	210	342	159	262	395
180	60	176	325	119	236	385	179	295	444
200	66	196	361	132	262	427	198	328	493

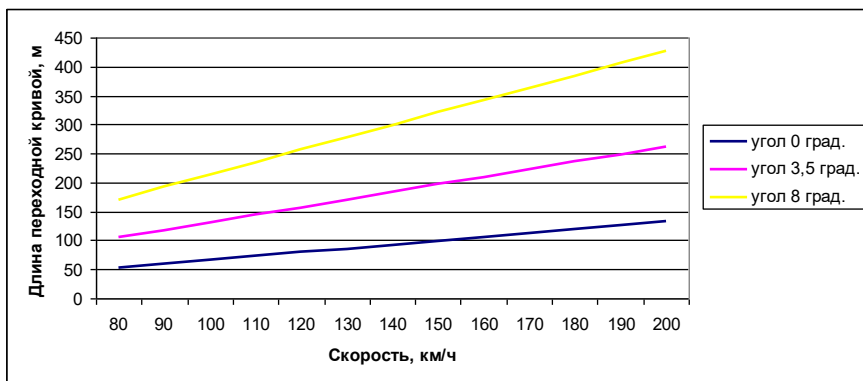


Рисунок 3.9 – Зависимость длины переходной кривой от скорости при различном угле наклона подвижного состава (h = 150 мм)

Таким образом, для сохранения уровня комфортабельности езды пассажиров при движении поезда с наклоняемым кузовом в переходных кривых необходимо существенно увеличивать длины переходных кривых (в 2–3 раза).

Для специальных высокоскоростных пассажирских линий при скоростях движения от 200 до 300 км/ч возможно применение специальных форм переходных кривых.

3.4 Длины прямых вставок

Исследования [4] указывают на двойственный характер наличия прямых вставок. Экипажи, не склонные к интенсивному вилянию, движутся в кривых достаточно спокойно (несколько «угнетенно») и довольно плавно выходят из кривой. Здесь достаточно иметь прямую вставку, необходимую для затухания поперечных плавных колебаний или устранения крена кузова экипажа наружу или внутрь кривой. Экипажи, склонные к вилянию при выходе из кривой, начинают сильно вилять, что ухудшает и их вход в последующую кривую. Например, при скоростях движения 80–100 км/ч, прямая вставка короче или длиннее 40 м не обеспечивает плавность движения экипажа.

При реконструкции существующей линии длина прямой вставки должна быть не менее 75 м, а для специальных пассажирских линии, сооружаемых для скоростей движения до 250 км/ч и более, – порядка 150–200 м. Короткие прямые вставки (менее 25–30 м) между кривыми, направленными в одну сторону, переустраиваются в общую кривую. В стесненных условиях в целях повышения допускаемых скоростей движения приходится даже выносить трассу в обход, а это значительно повышает стоимость реконструкции.

Длины переходных кривых, принятые в качестве норм, имеют следующие численные значения: Япония – 200–250 м; Англия – 150–200 м; Франция – 175 м.

Прямые вставки проектируются как между кривыми, направленными в одну сторону, так и между кривыми, направленными в разные стороны [5]. Длины прямых вставок между смежными кривыми должны обеспечивать затухание колебаний экипажа, вызванное проследованием его по кривой. Полное затухание возможно при длине вставки

$$d_{\text{необх}} = \frac{vq}{3,6q_1}, \quad (3.22)$$

где v – скорость экипажа, м/с;

q – частота затухания колебаний боковой качки, Гц;

q_1 – собственная частота колебаний экипажа, Гц.

При подготовке существующих железнодорожных линий для высоких скоростей движения и при сооружении новых стремятся иметь прямые вставки большей длины, чем полученной по формуле (3.22).

Длина прямой вставки регламентируется нормами СТН и для скоростных дорог равна 150 м.

Так, в Японии длина вставки для скоростных и высокоскоростных линий принимается 100–150 м; в Чехии и Дании $l_{\text{п}} = 0,5v_{\text{max}}$, в Германии $l_{\text{п}} = 0,2v_{\text{max}}$.

4 ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Рассмотрим участок со смешанным грузовым и пассажирским движением. Скорости по грузовому и пассажирскому движению определяются тяговыми расчетами. Средняя скорость движения грузовых поездов составляет 80 км/ч; максимальная скорость движения пассажирских поездов принята $v_{\max \text{ пс}} = 160$ км/ч. Элементы плана линии сводим в ведомость (таблица 4.1).

Т а б л и ц а 4.1 – Ведомость элементов плана реконструируемой железной дороги

№ элемента	Вид элемента	Пикетное положение				Длина, м	Радиус, м	Направление, угол поворота	Нормативный параметр плана
		Начало		Конец					
		Пк	+	Пк	+				
1	Прямая	0	0	2	66,55	66,55			
2	Переходная кривая	0	66,55	1	66,55	100,00			
3	Круговая кривая	1	16,55	6	42,65	526,10	855	Лево 27°43'	
4	Переходная кривая	5	92,65	6	92,65	100,00			
5	Прямая	6	92,65	8	00	107,35			

Для введения скоростного движения на существующей линии при смешанном движении применим подвижной состав с наклоном кузова Talgo. Данный подвижной состав проходит круговые кривые со скоростью большей, чем обычный подвижной состав за счет дополнительного наклона кузова β во внутрь кривой.

Согласно алгоритму по формулам (3.4) и (3.9) определяем радиус круговой кривой по условию комфортабельной езды пассажиров и одинаковому износу рельсовых нитей при $\alpha = 0$, $\beta = \max$. Максимальное значение для состава фирмы Talgo – 8° .

$$R_{\text{ком}} = \frac{0,0772 \cdot 160^2}{0,5 + 9,81 \cdot \text{tg}(\pi \cdot 6^\circ / 180 + \arcsin(150/1600))} = 799 \text{ м};$$

$$R_{\text{из}} = \frac{12,585(160^2 - 80^2 \cdot 1,2)}{163,1 \cdot 0,5} = 642 \text{ м}.$$

Следующим этапом определяем абсолютную разность радиусов и находим точку пересечения $R_{\text{ком}}(h)$ и $R_{\text{из}}(h)$ (блок 3).

$$\Delta R = |R_{\text{ком}} - R_{\text{из}}| = 799 - 642 = 157 \text{ м}.$$

$$R_{\text{рек}} = \frac{\Delta R}{2} = \frac{799 + 642}{2} = 720 \text{ м}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 СТН Ц-01-95. Строительно-технические нормы МПС РФ. Железные дороги колеи 1520 мм. – М. : МПС России, 1995. – 86 с.
- 2 Скоростной и высокоскоростной железнодорожный транспорт. В прошлом, настоящем и будущем. Т. 1 / В. И. Ковалев [и др.] ; под ред. В. И. Ковалева. – СПб. : Питер, 2001. – 320 с.
- 3 Скоростной и высокоскоростной железнодорожный транспорт. Т. 2 / В. И. Ковалев [и др.] ; под ред. В. И. Ковалева. – СПб. : Питер, 2003. – 448 с.
- 4 Расчет допускаемых скоростей движения поездов по данным о фактическом состоянии пути : учеб. пособие / Н. И. Карпушенко [и др.] ; под ред. Н. И. Карпушенко. – Новосибирск : СибГУПС, 2006. – 74 с.
- 5 **Шахуняц, Г. М.** Железнодорожный путь / Г. М. Шахуняц. – М. : Транспорт, 1969 г. – 536 с.
- 5 **Кантор, И. И.** Высокоскоростные железнодорожные магистрали: трасса, подвижной состав, магнитный подвес / И. И. Кантор. – М. : Маршрут, 2004. – 51 с.
- 6 **Кантор, И. И.** Проектирование высокоскоростных железнодорожных магистралей : пособ. по курс. и дипл. проектир. / И. И. Кантор. – М. : МИИТ, 1996. – 67 с.
- 7 **Миронов, В. С.** Техничко-экономическая эффективность использования вагонов с наклоном кузова в проектах реконструкции железных дорог для скоростного движения поездов / В. С. Миронов, Т. А. Руденко // Вестник транспорта Поволжья. – 2013. – № 6 – С. 96–102.