

На правах рукописи

Кравченко Ольга Андреевна

**БИКЛОТОИДНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРИВОЛИНЕЙНЫХ
УЧАСТКОВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных
дорог

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (УрГУПС) Федеральное агентство железнодорожного транспорта.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Аккерман Геннадий Львович

Официальные оппоненты: Коган Александр Яковлевич –
доктор технических наук, профессор, главный
научный сотрудник отделения «Путь и
путевое хозяйство» ВНИИЖТ.

Замуховский Александр Владимирович –
кандидат технических наук, доцент,
заведующий научно-исследовательской
Путеиспытательной лаборатории кафедры
«Путь и путевое хозяйство» МГУПС (МИИТ)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Иркутский
государственный университет путей
сообщения» (ИрГУПС)

Защита диссертации состоится 17 января 2013 г. в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 218.005.11 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» (МГУПС) (МИИТ) по адресу: 127994, г. Москва, ГСП-4, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 1235.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета путей сообщения.

Автореферат разослан «13» декабря 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, канд.техн.наук.

Савин А. Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Сложившаяся методика проектирования железнодорожной линии, приводит к тому, что криволинейный участок железнодорожного пути в плане состоит из трех частей: круговой кривой и двух переходных кривых, в профиле: двух отводов возвышения наружного рельса h и участка, где $h=const$. Все эти элементы в плане и профиле необходимо совмещать.

При современных требованиях к проектированию кривых участков пути, особенно с повышением скоростей движения, возникает необходимость обеспечения большей плавности трассы и уменьшения вертикальных и горизонтальных сил воздействия на путь в кривых участках при прохождении по ним подвижного состава.

Актуальность исследования:

1. снижение затрат на текущее содержание пути;
2. необходимость увеличения надежности работы пути, безопасности и плавности движения поездов.

Цель исследования заключается в оценке возможности, целесообразности и экономической рациональности применения биклотоидных кривых вместо круговых кривых с двумя переходными участками.

Для достижения поставленной цели необходимо исследовать:

1. изменение сил, возникающих при движении экипажа по биклотоидной и круговой кривой с переходными участками с применением имитационного моделирования, для оценки динамического воздействия экипажа на путь;
2. возможность биклотоидного проектирования при ремонтах пути и при реализации высокоскоростного движения;
3. параметры и область применения биклотоидных кривых;
4. экономический эффект от применения биклотоидных кривых.

Объектом исследования диссертационной работы является железнодорожный путь в кривых участках.

Предметом исследования является биклотоидное проектирование одиночных кривых участков железной дороги с целью снижения силового взаимодействия пути и подвижного состава, уменьшения эксплуатационных затрат на содержание криволинейных участков.

Методы исследования. Диссертационная работа базируется на экспериментально-теоретических исследованиях, в основу которых легли результаты наблюдений за геометрией кривых на нескольких дистанциях пути Свердловской железной дороги, а также анализа данных, полученных при многовариантном имитационном моделировании на ЭВМ динамики вагона на основе теории дифференциальных уравнений при различных параметрах состояния пути в программном комплексе «Универсальный механизм» с использованием данных вагона-путеизмерителя на участках Свердловской железной дороги – филиала ОАО «Российские железные дороги», программного комплекса Table Curve, программного модуля «Пакет анализа» в Microsoft Excel, программного комплекса «Искра ПТР», модуля программного комплекса «GEONICS», программного комплекса «САПР КРП».

Научная новизна работы состоит в том, что:

1. При проектировании криволинейных участков железных дорог впервые предложена геометрия пути с использованием, так называемого биклотоидного проектирования.
2. Впервые с помощью имитационного моделирования проведено исследование взаимодействия подвижного состава и пути при движении его по биклотоидному сопряжению.
3. Определена тенденция в изменении геометрии кривой в результате ее эксплуатации.

4. Доказано уменьшение силового взаимодействия колеса и рельса при движении по биклотоиде, увеличение плавности.

5. Показана область проектирования криволинейных участков биклотоидами.

Практическая значимость исследования.

1. Замена круговой кривой с двумя переходными участками на биклотоидную кривую позволяет снизить возникающие в кривой боковые силы более чем в 2 раза при радиусах 350-450 м при движении поездов со скоростью 50 км/ч. С увеличением радиуса кривой 500-1200 м снижение боковых сил составит не менее 20-25% при движении поездов со скоростями 60-120 км/ч. А также позволит снизить вертикальные силы на 45-80% при движении поездов со скоростями 50-120 км/ч, повышая тем самым безопасность движения, уменьшение износа рельсов и колес подвижного состава, а также снижение затрат на текущее содержание пути в кривых.

2. При биклотоидном проектировании новой железнодорожной линии длину участка и объемы земляных работ в зависимости от ситуации можно уменьшить: длину на 1,5-2,4%, а объемы земляных работ на 2,4-5,6%.

3. При биклотоидном проектировании высокоскоростных магистралей (ВСМ) снизить возникающее в кривой среднее значение боковой силы на 18-56%.

4. При различных ремонтах железнодорожного пути, при устройстве биклотоидных кривых, возможен тот же результат, что и при проектировании новой железнодорожной линии.

5. При проектировании биклотоидных кривых улучшается плавность движения поездов.

На защиту выносятся.

1. Биклотоидное проектирование плана криволинейных участков железных дорог.

2. Исследование взаимодействия пути и подвижного состава с помощью имитационного моделирования при проектировании высокоскоростных магистралей, новых железнодорожных линий и при переустройстве существующих кривых в рамках ремонтов.

3. Исследование стабильности планового положения существующих элементов криволинейных участков при помощи программного комплекса Table Curve и программного модуля «Пакет анализа» в Microsoft Excel.

4. Определение и анализ величин боковых и вертикальных сил взаимодействия пути и подвижного состава при помощи имитационного моделирования.

5. Область практического применения биклотоидного проектирования криволинейных участков железнодорожного пути.

Реализация результатов работы. Разработанные в ходе исследований рекомендации по замене круговых кривых с двумя переходными участками на биклотоидные, учитывались при выполнении проекта модернизации с повышением скоростей движения на участке перегона Монзино – Анатольская на Свердловской железной дороге, филиале ОАО «РЖД», в 2011 году. Заложены в проект две опытные биклотоидные кривые. Акт внедрения № 467 от 26.04.2012 службы пути дирекции инфраструктуры Свердловской железной дороги, филиала ОАО «РЖД». А также в учебной работе в ФГБОУ ВПО УрГУПС при подготовке инженеров по специальности 270204 «Строительство железных дорог, путь и путевое хозяйство».

Апробация работы. Материалы диссертационной работы изложены, обсуждены и одобрены на конференциях, семинарах, совещаниях: межвузовской научно-технической конференции «Молодые ученые – транспорту», ФГОУ ВПО УрГУПС (Екатеринбург, 2010 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт – 2011», ФБГОУ ВПО РГУПС (Ростов-на-Дону, 2011 г.); международной научно-технической конференции «Транспорт 21 века: Исследования. Инновации.

Инфраструктура», ФГБОУ ВПО УрГУПС (Екатеринбург, 2011г.); международной научно-технической конференции «Роль путевого хозяйства в инфраструктуре железнодорожного транспорта», ПТКБ ЦП ОАО «РЖД» (Москва, 2012 г.); IX научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», ФГБОУ ВПО МГУПС (МИИТ), (Москва, 2012 г.); научно-практической конференции «Цели, задачи, перспективы развития и содержания объектов путевого хозяйства предприятий и организаций железнодорожного транспорта на современном этапе социально-экономических преобразований в Российской Федерации» УрГУПС (Екатеринбург, 2012); на семинарах кафедры «Путь и железнодорожное строительство» УрГУПС в 2009-2012 г.г., кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог» МГУПС (МИИТ) в 2012 г., кафедр «Изыскания и проектирование железных дорог», «Путь и путевое хозяйство» и «Промышленный транспорт» ПГУПС в 2012 г.,

Публикации.

Основные положения диссертационной работы и научные результаты опубликованы в девяти печатных работах (9 статей), в том числе две статьи опубликованы в научных журналах, входящих в «Перечень изданий рекомендованных ВАК для публикаций научных результатов диссертации» («Путь и путевое хозяйство» №10, 2010 г., «Железнодорожный транспорт» №5, 2011 г.); остальные статьи в сборниках научных трудов МИИТ, СГУПС, ПГТУ, КГУ, РГУПС, ПТКБ ЦП ОАО «РЖД», УрГУПС. Сделана заявка на получение патента на изобретение № 2011116016 приоритет 22.04.2011 Российская Федерация.

Объем и структура работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, приложений и содержит страниц 147, рисунков в тексте 45, таблиц 35, приложения представлены отдельным

томом – 69 страниц, рисунков 120, таблицы 4. Библиографический список содержит 103 наименования.

Автор выражает признательность научному руководителю доктору технических наук, профессору Г.Л. Аккерману за помощь и поддержку в работе; благодарит коллектив кафедры «Путь и железнодорожное строительство» УрГУПС; кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог» МГУПС (МИИТ); кафедр «Изыскания и проектирование железных дорог», «Путь и путевое хозяйство» и «Промышленный транспорт» ПГУПС (ЛИИЖТ) за плодотворное обсуждение и ценные замечания.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится обоснование актуальности темы, формулируются цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе «АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКОВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ» проведен краткий обзор исследований в области проектирования железнодорожного пути, трассирования, взаимодействия пути и подвижного состава, проанализирован отечественный опыт в области клотоидного проектирования автомобильных дорог, сформулированы задачи, решаемые в работе, обоснована их актуальность. При помощи имитационного моделирования проведено сравнение сил в кривой с прямолинейным и синусообразным отводом возвышения.

Значительный вклад в изучение вопросов трассирования железных дорог посвящены труды И.В. Турбина, А.В. Горинова, А.И. Иоаннисяна, Г.Л. Аккермана, Д.И. Федорова, Ф.А. Никитенко, А.П. Кондратченко, В.И. Струченкова и других ученых.

Исследованию вопросов взаимодействия пути и подвижного состава в кривых участках посвящены труды А.Я. Когана, К.П. Королева, О.П. Ершкова, С.В. Вершинского, Е.П. Блохина и других исследователей. Особую

лепту в становлении норм проектирования продольного профиля и плана железнодорожных линий внесли сотрудники ВНИИЖТа, МИИТа, ЛИИЖТа и др.

Еще в 1937-1939 г.г., во всех странах мира (в первую очередь в Германии), было проведено большое количество исследований, касающихся формы и длин переходных кривых, методам проектирования и их выправки, а также по устройству отводов возвышения и уширения колеи. В этих исследованиях рассматривались «идеальные» схемы экипажей, производились сложные математические выкладки.

Во всех случаях, а особенно в связи с повышением скоростей движения возникает необходимость в современном подходе к вопросам проектирования криволинейных участков пути с обеспечением большей плавности трассы и уменьшением вертикальных и горизонтальных сил воздействия на путь при прохождении подвижного состава. На современном этапе развития техники и САПР задача подбора и расчета плана трассы существенно упрощается.



Рис. 1— Определение положения и величин углов поворота трассы в плане при клотоидном трассировании.

Согласно «Указаниям по архитектурно-ландшафтному проектированию автомобильных дорог ВСН 18-84» угол поворота трассы, состоящей из двух клотоид, определяется расчетом через угол поворота в конце клотоиды (рис. 1)

$$\omega = \frac{L}{2R}, \quad (1)$$

где L — полная длина кривой, м;

R – радиус кривизны в середине биклотоидной кривой, м, т.е. кривой, состоящей из двух клотоид без вставки круговой кривой.

Отмечается (Булдаков С.И. «Проектирование основных элементов автомобильной дороги»), что движение автомобиля по клотоиде наиболее соответствует комфортабельной и безопасной траектории его движения в кривой. Клотоида «более чем другие математические кривые соответствует траектории автомобиля».

Основные отличия трассы автомобильных и железных дорог:

1. После строительства автомобильной дороги геометрическое положение трассы в пространстве достаточно стабильно, в то время как железнодорожный путь постоянно изменяет свою пространственную геометрию, включая плановое положение, под воздействием подвижного состава, текущего содержания ремонтно-путевых работ и других факторов.

2. В отличие от автомобилей поезд может одновременно располагаться на нескольких элементах плана.

3. Поперечные, вертикальные и продольные силы по длине поезда чаще всего неодинаковы.

4. Автомобиль в кривой, если нет виража, удерживается только силами сцепления между колесами и дорожным покрытием. У поезда помимо сил сцепления между колесами и поверхностью катания головок рельсов, возникает взаимодействие между гребнем колеса и рабочим кантом головки рельса. Увеличение боковых сил при проходе криволинейных участков у рельсовых экипажей приводит к возрастанию сопротивления движению и к интенсивному боковому износу головки рельса и гребней колес подвижного состава.

5. Возможность условий биклотоидного проектирования трассы железных дорог требует дальнейшего исследования: при проектировании новой линии плавности вписывания в рельеф местности смежных кривых, возможности использования при проведении ремонтно-путевых работ,

силового воздействия экипажей при устройстве биклотоид, стоимости строительства, эксплуатационных расходов и т.д.

Основные выводы по первой главе: во-первых, траектория движения экипажей в кривой близка к биклотоиде. Во-вторых, на современном этапе развития техники и САПР задача подбора и расчета плана трассы существенно упрощается, и вариантное проектирование криволинейных участков находится на качественно новом уровне, что позволяет перейти от «классической трассы» к биклотоидному проектированию железных дорог.

На основании результатов имитационного моделирования: целесообразно применять прямолинейный отвод возвышения наружного рельса в кривой при движении поездов со скоростями до 100 км/ч, а свыше 120 км/ч – синусообразный. При этом боковые силы можно уменьшить в среднем на 20 %. При проектировании биклотоидных кривых, учитывая практику Российских железных дорог, принимается прямолинейный отвод возвышения наружного рельса в кривой.

Во второй главе «ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ БИКЛОТОИДНЫХ КРИВЫХ» проведены аналитические исследования параметров биклотоидных кривых, рассчитаны затраты энергии на тягу поездов для преодоления сил сопротивления от кривой при движении по круговой кривой и биклотоиде, сформулированы условия точности разбивки переходной кривой и вписывания биклотоидной кривой взамен круговой при одинаковых углах поворота.

Рассмотрено два случая:

1. Длина биклотоиды ($2l_{ПК}$) равняется длине круговой кривой ($l_{КК}$).
2. Угол поворота биклотоиды равен углу поворота круговой кривой, но $2l_{ПК}$ больше $l_{КК}$.

Для второго случая: при одинаковом угле поворота.

Для кривой

$$\int_0^{\varphi_K} d\varphi = \int_0^{l_K} \frac{dS}{\rho}, \quad (2)$$

где φ_K и l_K – соответственно угол поворота круговой кривой и ее длина.

У круговой кривой

$$\varphi = \frac{1}{R} l_{KK} \quad (3)$$

У переходной кривой

$$\varphi_{ПК} = a l_{ПК}^2 \quad (4)$$

Если: $2\varphi_{ПК} = \varphi$ или $2a l_{ПК}^2 = \frac{l_{KK}}{R}$, отсюда

$$\begin{aligned} l_{ПК} &= \sqrt{\frac{l_{KK}}{2aR}} \\ l_{ПК} &= \sqrt{\frac{\varphi}{2a}} \\ 2l_{ПК} &= \sqrt{\frac{2\varphi}{a}} \end{aligned} \quad (5)$$

В диссертационной работе доказано, что при равных углах поворота соотношение длины биклотоиды и круговой кривой при $2l_{ПК} \geq l_{KK}$ следующее:

$$\beta = \frac{2l_{ПК}}{l_{KK}} = 2 \frac{\sqrt{\frac{l_{KK}}{2aR}}}{l_{KK}} = \frac{2}{R\sqrt{2a\varphi}} \quad (6)$$

Работа сил сопротивления при движении поезда по кривой (A), где dA – элементарная работа:

$$dA = Q \cdot \frac{700}{\rho} dS \quad (7)$$

где $\omega_r = \frac{700}{\rho}$ – удельное сопротивление поезда при движении в кривой, кг/т;

Q - вес поезда, т.

На основании проведенных исследований в данной диссертационной работе, с учетом:

$$\frac{1}{\rho} = 2aS,$$

где $l_{ПК}$ – длина переходной кривой;

$2a$ – коэффициент пропорциональности;

S – текущая длина переходной кривой;

$\frac{1}{\rho}$ – кривизна переходной кривой в точке на расстоянии S от начала переходной кривой;

При движении по биклотоиде:

$$A_{ПК} = 1400 \cdot Q \cdot a \cdot l_{ПК}^2 \quad (8)$$

Для круговой кривой:

$$A_{КК} = \frac{700}{R} l_{КК} Q \quad (9)$$

Обозначим

$$\gamma = \frac{A_{ПК}}{A_{КК}}, \quad (10)$$

получим следующее соотношение $\gamma = \frac{1400 \cdot Q \cdot a \cdot l_{КК} \cdot R}{2aR \cdot 700 \cdot l_{КК} Q} = 1$. Таким образом, если

биклотоида длиннее круговой кривой при одном и том же угле поворота и «идеальном» пути, затраты энергии поезда на преодоление сил сопротивления от кривой одинаковы.

Таким образом, условие вписывания биклотоидной кривой взамен круговой кривой с двумя переходными участками при одинаковых углах поворота, следующее

$$\frac{\varphi}{2} = \frac{K}{2R}, \quad (11)$$

где φ – угол поворота кривой, рад.;

K – длина круговой кривой постоянного радиуса, м;

R – радиус кривой, м.

$$l_{ПК} = K \text{ при условии, что переходная кривая «закрывает» } \frac{\varphi}{2}$$

$$l_{БК} = 2K \quad (12)$$

Поэтому, если $l_{БК} = K$, то угол поворота кривой в 2 раза меньше. Доказано, что средний радиус биклотоиды в два раза больше, чем на круговой кривой, следовательно, действие сил в кривой уменьшается, повышается безопасность движения экипажей, уменьшается износ боковых граней рельсов и гребней колес подвижного состава.

Исследование показало, что расстояние от начала биклотоиды до точки, где необходимо уширение земляного полотна S_{Δ} обратно пропорционально радиусу в точке стыкования клотоид.

В третьей главе «ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭКИПАЖА НА ПУТЬ В КРУГОВЫХ И БИКЛОТОИДНЫХ КРИВЫХ ПРИ ПОМОЩИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ» определено силовое воздействие экипажа на путь в круговых кривых с двумя переходными участками и биклотоидных с использованием данных вагона-путеизмерителя на участках Свердловской железной дороги – филиала ОАО «Российские железные дороги». Произведена оценка плавности движения поезда по круговым и биклотоидным кривым по критерию среднеквадратического отклонения непогашенного и вертикального мгновенных ускорений от среднего на участке – шума ускорения. Определены расход топлива и механическая работа локомотива при движении по круговым кривым и биклотоидным кривым в программном комплексе «Искра ПТР».

Для исследования динамики экипажей в кривых участках посредством имитационного моделирования была взята математическая модель движения грузового вагона в программном комплексе «УМ». Для этого выбран груженный четырехосный цельнометаллический полувагон. В модели принят среднеизношенный профиль колес без дефектов по радиусу катания. Расчеты

производились с шагом записи результатов 0,002 сек и погрешностью расчетных величин 10^{-5} , радиусы кривых приняты 350-1200 м, скорости движения экипажа 50-100 км/ч.

По результатам проведенного моделирования были получены расчетные величины боковых и вертикальных сил воздействия экипажа на путь при круговой кривой и биклотоиде, а также графики (рис. 2).

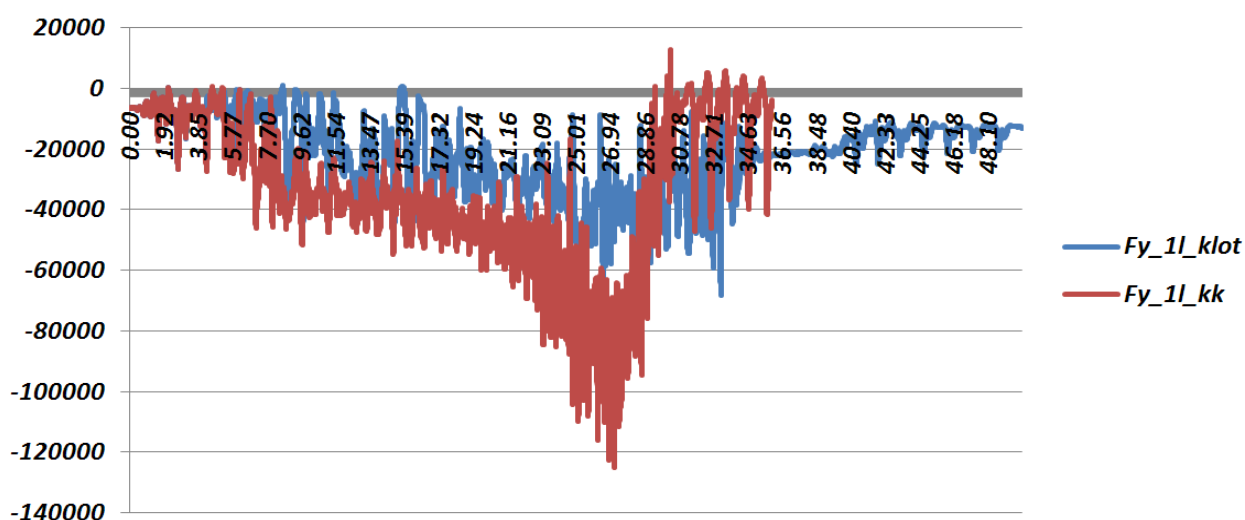


Рис. 2– Графики изменения боковой силы F_y , H при движении поезда по биклотоиде (F_{y_klot}) и круговой кривой (F_{y_kk}) при скорости движения 50 км/ч.

Результаты моделирования показали: замена круговой кривой с двумя переходными участками на биклотоидную кривую позволяет снизить возникающие в кривой боковые силы более чем в 2 раза при радиусах 350-450 м при движении поездов со скоростью 50 км/ч. С увеличением радиуса кривой 500-1200 м снижение боковых сил составит не менее 20-25% при движении поездов со скоростями 60-120 км/ч. А также позволит снизить вертикальные силы на 45-80% при движении поездов со скоростями 50-120 км/ч, повышая тем самым безопасность движения, уменьшение износа рельсов и колес подвижного состава, а также снижение затрат на текущее содержание пути в кривых.

Шум ускорения определяется:

$$III^2 = \frac{1}{\tau} \int_0^{S_K} \left(\frac{dV}{d\tau} \right)^2 \frac{dS}{V} - a^2, \quad (13)$$

где τ – время движения подвижного состава по соответствующему участку круговой и биклотоидной кривой при условии вписывания в один и тот же угол поворота при разной длине кривых, сек.;

$\frac{dV}{d\tau}$ – мгновенное ускорение поезда в любой точке участка, м/с²;

$a = const$ – среднее ускорение подвижного состава на участке S_K , м/с²;

Δt – время движения на элементарном участке или шаг интегрирования, $\Delta t = 0,002$ сек.

Шум ускорения III^2 (м²/с⁴) рассчитан для двух скоростей движения подвижного состава 50 км/ч и 80 км/ч и радиусах кривых 350÷1200 м. При движении по биклотоиде плавность увеличивается практически в 2 раза. Исследования д. т. н., профессора Аккермана Г. Л. показали, что расход энергии и механическая работа силы тяги локомотива тесно связаны с шумом ускорения. Коэффициент корреляции между этими величинами достигает 0,8 и более. С увеличением шума ускорения увеличивается расход энергии и механическая работа силы тяги локомотива.

В четвертой главе «ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ БИКЛОТОИДНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ» выполнено биклотоидное проектирование криволинейных участков железнодорожного пути на существующих линиях в рамках ремонтов и при новом строительстве, а также проведен анализ стабильности планового положения элементов кривых на существующих участках дистанций пути на Свердловской железной дороге. Определены виды ремонтов железнодорожного пути, при которых возможна реализация биклотоидного проектирования, а также рассмотрен вопрос содержания биклотоидных кривых с использованием современных выправочных машин, оснащенных системой «Навигатор». Проведены численные исследования по определению силового воздействия экипажа на путь путем имитационного

моделирования движения экипажа в кривых участках в программном комплексе «Универсальный Механизм» при проектировании высокоскоростных магистралей (ВСМ). Произведен расчет экономического эффекта при применении биклотоидных кривых.

Как известно, кривая с течением времени под динамическим воздействием проходящих по ней поездов меняет свое плановое положение. В данной оценке стабильности состояния принято 60 кривых на двух дистанциях пути, для примера (рис. 3) приведены изменения длин «элементов» кривых.

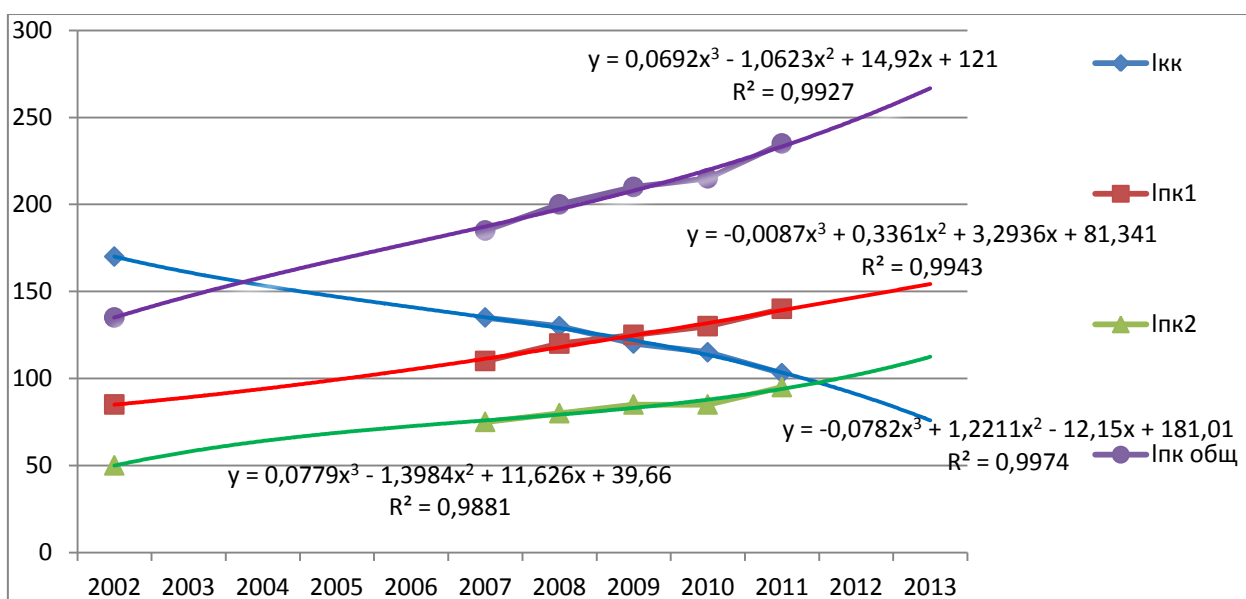


Рис.3 – Графики изменения составных элементов криволинейного участка №2: а – изменение длины КК, б – изменение длины ПК 1, в – изменение длины ПК 2, г – изменение суммарной длины ПК 1 и ПК 2.

Для обработки массива данных дистанций пути с целью получения математической зависимости, которая позволяла бы с необходимой точностью определить динамику изменения параметров кривых участков железнодорожного пути, по всем кривым использовались программный модуль «Пакет анализа» в Microsoft Excel и программный комплекс Table Curve. Наиболее точно описывает полученную совокупность точек полином третьей степени, то есть функция вида $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$, также была рассмотрена прямолинейная аппроксимация. При прямолинейной

аппроксимации доля переходных участков в длине представленной кривой на последний год прогнозируемого периода составляет 81,5 %, а при полиномиальной – 97,2 %. Расхождение полученных результатов по всем кривым составляет не более 15 %.

На участке модернизации перегона Монзино – Анатольская на Свердловской железной дороге заложены две опытные кривые (рис. 4, а, б).

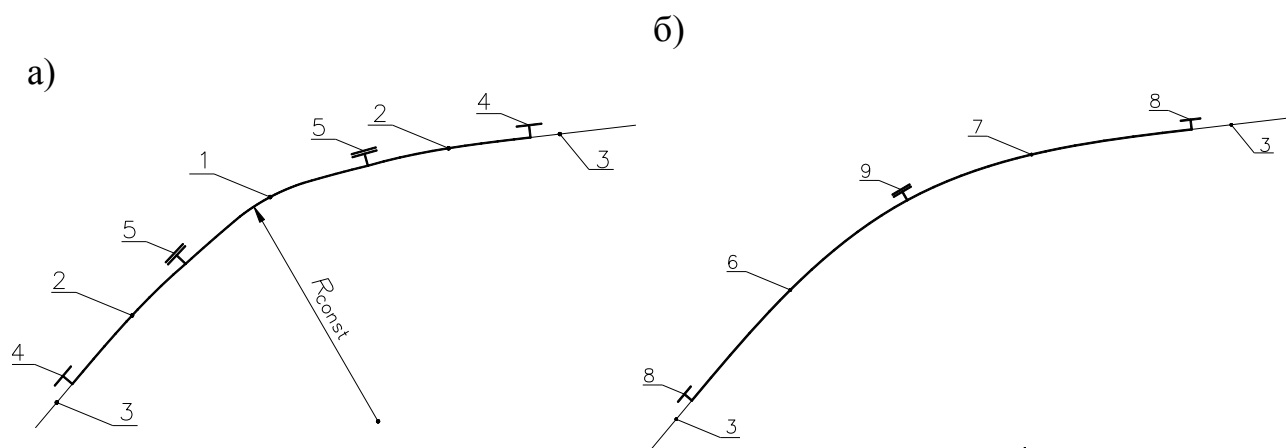


Рис. 4 – Замена круговой кривой с двумя переходными участками на биклотоидную:

а) – круговая кривая с двумя переходными участками; б) – биклотоидная кривая: 1 – круговая кривая постоянного радиуса; 2 – переходные участки; 3 – прямой участок железнодорожного пути; 4 – начало переходного участка; 5 – начало круговой кривой постоянного радиуса; 6 – первая переходная кривая переменного радиуса; 7 – вторая переходная кривая переменного радиуса; 8 – начало переходного участка клотоид; 9 – точка сочленения двух клотоид.

На этом участке установлены скорости движения до 140 км/ч, параметры кривых и сдвижки в плане рассчитаны автоматически согласно всем действующим нормам при помощи программного комплекса САПР КРП, используемым при проектировании. Общая длина биклотоиды больше, чем на круговой кривой с двумя переходными участками, следовательно, в предложенной кривой более плавный уклон отвода возвышения наружного рельса, действие сил в кривой уменьшается, повышается безопасность движения экипажей, уменьшается износ боковых граней рельсов и гребней колес подвижного состава. Устройство опытных кривых на перегоне

Монзино – Анатольская (первый главный путь) было согласовано службой пути Свердловской железной дороги, филиала ОАО «РЖД».

Для оценки возможности применения биклотоидного проектирования для высокоскоростных магистралей проведены исследования по определению силового воздействия экипажа на путь путем имитационного моделирования движения экипажа в кривых участках в программном комплексе «Универсальный Механизм». Для моделирования выбран скоростной электропоезд, исходные данные: радиусы кривых R 5000÷7000 м, непогашенное ускорение $a_{неп} = 0,4 \text{ м/с}^2$, скорости движения экипажа $V_{max} = 200 \text{ км/ч}$ и 250 км/ч , шаг записи результатов 0,01 сек. Для примера, средние боковые силы F_y , Н воздействия экипажа на путь для радиусов 6000 м и 7000 м (табл. 1) .

Таблица 1

Радиус кривой, м	F_y (Н) при $V=200 \text{ км/ч}$ для		F_y (Н) при $V=250 \text{ км/ч}$ для	
	классической кривой (КК)	биклотоидной кривой (БК)	классической кривой (КК)	биклотоидной кривой (БК)
6000	34143	23314	24755	17193
7000	15879	6909	10897	5803

Результаты моделирования позволяют судить о целесообразности применения биклотоидного проектирования криволинейных участков высокоскоростных магистралей.

В данной диссертационной работе рассмотрена эффективность применения биклотоиды вместо круговой кривой с двумя переходными участками радиусом 400 м. Ежегодная экономия составит свыше 30 000 рублей на 1 км пути.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Проведенные исследования в диссертационной работе позволили сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Средний радиус биклотоиды в два раза больше, чем на круговой кривой, следовательно, действие сил в кривой уменьшается, повышается

безопасность движения экипажей, уменьшается износ боковых граней рельсов и гребней колес подвижного состава.

2. Замена круговой кривой с двумя переходными участками на биклотоидную кривую позволяет снизить возникающие в кривой боковые силы более чем в 2 раза при радиусах 350-450 м при движении поездов со скоростью 50 км/ч. С увеличением радиуса кривой 500-1200 м снижение боковых сил составит не менее 20-25% при движении поездов со скоростями 60-120 км/ч. Вертикальные силы уменьшаются на 45-80% при движении поездов со скоростями 50-120 км/ч, повышая тем самым безопасность движения, снижение износа рельсов и колес подвижного состава, а также снижение затрат на текущее содержание пути в кривых.

3. При идеальном железнодорожном пути и подвижном составе затраты энергии на преодоление сил сопротивления по биклотоидной и «классической» кривой одинаковы.

4. При биклотоидных кривых уменьшается шум ускорения, который является критерием плавности движения экипажей.

5. Если длина клотоиды равняется длине круговой кривой постоянного радиуса $l_{БК} = K$, то угол поворота клотоиды в 2 раза меньше.

6. Анализ динамики изменения планового положения существующих кривых на дистанциях пути Свердловской железной дороги показал, что все кривые изменяются посредством увеличения длин переходных участков, уменьшения круговых кривых. Изменение длин элементов криволинейных участков происходит по закону: функции вида $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$.

7. Согласно исследованию целесообразно применять прямолинейный отвод возвышения наружного рельса в кривой при движении поездов со скоростями до 100 км/ч, а с большими – синусообразный. При этом боковые силы уменьшаются в среднем на 20 %.

8. При биклотоидном проектировании из-за сдвижки трассы внутрь

кривой, длина ее уменьшается, сокращаются материальные затраты при строительстве линейной инфраструктуры.

9. Расстояние от начала биклотоиды до точки, где необходимо уширение земляного полотна S_{Δ} обратно пропорционально радиусу в точке стыкования клотоид биклотоидного участка. S_{Δ} изменяется: $8,3 \leq S_{\Delta} \leq 99$. На величину $2S_{\Delta}$, м можно уменьшить длину биклотоиды, что важно в стесненных условиях проектирования плана. В случае проектирования смежных кривых эти участки можно использовать для размещения прямой вставки или части ее.

10. Область применения биклотоидных кривых: в рамках различных видов ремонтов при помощи выправочных комплексов, оснащенных системой «Навигатор»: существующие круговые кривые с двумя переходными участками могут быть заменены на биклотоидные согласно проектной документации (например, проект капитального ремонта) при капитальных ремонтах, а также усиленном среднем и среднем, а выправку уже уложенных биклотоидных кривых можно проводить в рамках усиленного подъемочного и подъемочного ремонтов, а также при планово-предупредительной выправке. При проектировании высокоскоростных магистралей (ВСМ) биклотоидное проектирование позволит снизить средние боковые силы на 18-56%.

11. Имитационное моделирование позволяет учесть реальное состояние пути и влияние этого состояния на взаимодействие колеса и рельса. При одной и той же геометрии пути, но при различном его состоянии, силы взаимодействия разные, что невозможно учесть при «классическом проектировании».

12. С применением биклотоиды вместо круговой кривой с двумя переходными участками радиусом 400 м ежегодная экономия составит свыше 30 000 рублей на 1 км пути.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах: (список печатных работ)

1. Аккерман Г. Л., Аккерман С. Г., Кравченко О. А. Биклотоидное проектирование криволинейных участков железной дороги [Текст] // Путь и путевое хозяйство: научно-популярный, производственно-технический журнал. – 2010. – №10. – С. 28-30.
2. Аккерман Г. Л., Аккерман С. Г., Кравченко О. А. Метод снижения затрат на содержание криволинейных участков пути [Текст] // Железнодорожный транспорт. – 2011. – №5. – С. 41-42.
3. Аккерман Г. Л., Кравченко О. А. Сравнительный анализ переходных кривых с прямолинейным и S-образным отводом возвышения [Текст] // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2010. – Вып. 22. – С. 82-86.
4. Кравченко О. А., Полищук И.В. Численные исследования по определению силового воздействия экипажа на путь в круговых и биклотоидных кривых [Текст] // Инновации в транспортном комплексе. Безопасность движения. Охрана окружающей среды: Труды международной научно- практической конференции. – 2010. – Том I. – «Инновации в проектировании и эксплуатации транспортных систем». – С. 40-45.
5. Кравченко О. А. Сравнительная оценка круговых кривых и биклотоидных путем моделирования системы «экипаж-путь» в программном комплексе «Универсальный механизм» [Текст] // Актуальные проблемы современной науки и практики: Труды международной научно- практической конференции, посвященной 85-летию транспортного образования в Зауралье. – 2011. – С. 98-101.
6. Кравченко О. А. Оценка возможности применения клотоидного проектирования кривых участков пути на железной дороге [Текст] // Транспорт-2011: Труды Всероссийской научно- практической конференции. – 2011. – Ч. 3: «Технические науки». – С. 230-233.

7. Кравченко О. А. Численные исследования силового взаимодействия «колесо-рельс» при замене правильной круговой кривой переходными кривыми [Текст] // Транспорт XXI века: исследования, инновации, инфраструктура: материалы научно-технической конференции, посвященной 55-летию УрГУПС: в 2 т. / УрГУПС. – Екатеринбург, 2011. – Вып. 97 (180), т.1. – 1 электронный опт. диск (CD ROM). – С. 863-869.

8. Аккерман Г. Л., Кравченко О. А. Оценка возможности применения биклотоидного проектирования кривых участков железнодорожного пути для высокоскоростных магистралей в программном комплексе «UM» [Текст] // Роль путевого хозяйства в инфраструктуре железнодорожного транспорта: Труды международной научно- технической конференции. / ПТКБ ЦП ОАО «РЖД». – Москва, 2012. – С. 319-322.

9. Кравченко О. А. К вопросу о биклотоидном проектировании криволинейных участков железных дорог [Текст] // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации земляного полотна железных дорог: Труды IX научно-технической конференции с международным участием, посвященные 108-летию профессора Г. М. Шахунянца. / МИИТ. – Москва, 2012. – С. 260-262.

Кравченко Ольга Андреевна

БИКЛОТОИДНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРИВОЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКОВ
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

05.22.06 – Железнодорожный путь,
изыскание и проектирование железных дорог

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Подписано к печати _____.

Объем 1,5 п.л.

Тираж 80 экз. Заказ №____

Формат 60x84 1/16

УПЦ ГИ МИИТ, Москва, 127994, ул. Образцова, д. 9, стр. 9