



На правах рукописи

КОЗЛОВ
Иван Сергеевич

**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ
ПРОМЕЖУТОЧНЫХ РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ
НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА
СКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЛИНИЙ**

**Специальность 05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание и
проектирование железных дорог**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

1 0 ДЕК 2009

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2009

Работа выполнена на кафедре «Управление и технология строительства» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
ПРОКУДИН Иван Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ВИНОГРАДОВ Валентин Васильевич

кандидат технических наук, доцент
БЕКИШ Александр Александрович

Ведущая организация: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения».

Защита состоится 22 декабря 2009 г. в 13³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 218.008.03 при Петербургском государственном университете путей сообщения по адресу: 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, ауд. 7-520.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПГУПС.

Автореферат разослан 20 ноября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент



Колос А. Ф.

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. В настоящее время существует стратегия развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 г. В соответствии с данной программой планируется строительство новых и реконструкция действующих железных дорог, а также модернизация инфраструктуры. Одним из направлений стратегии является развитие сети скоростного и высокоскоростного движения поездов.

Организация скоростного движения на сети железных дорог России тесно связана с обеспечением необходимого уровня надежности железнодорожных линий, в особенности верхнего строения пути, как конструкции, оказывающей значительное влияние на безопасность движения поездов.

Увеличение вибродинамического воздействия от скоростного движения является одной из важнейших причин, влияющих на деформации земляного полотна. Известно, что на магистральных, где внедряется такое движение поездов, регистрируется увеличение числа больших мест земляного полотна, причем появление интенсивных деформаций совпадает с началом эксплуатации этих составов. Большую актуальность приобрели вопросы создания условий для надежной и стабильной работы железнодорожного пути при оптимизации затрат на его содержание и реконструкцию. Выполнение поставленных задач невозможно без тщательного анализа работы всех элементов железнодорожного пути. В последнее время усилилось внимание к узлу прикрепления рельса к шпале. Совершенствование промежуточного рельсового скрепления считается одним из основных направлений на пути улучшения работы верхнего строения пути.

Многолетние исследования и опытно-производственные работы ПГУПС, МИИТа, ДВГУПС, ВНИИЖТа и других организаций накопили немало знаний в области совместной работы верхнего строения пути и земляного полотна. Хорошо изучено влияние жесткости и состояния верхнего строения пути на уровень динамики, передающийся земляному полотну. Однако, анализ существующих работ показывает, что несущая способность земляного полотна в зависимости от конструкции и типа скреплений в условиях скоростного движения практически не изучена. В то же время известно, что существенное влияние на величину несущей способности грунтов земляного полотна оказывает уровень вибродинамического воздействия.

Таким образом, в предыдущих исследованиях не получили широкого рассмотрения вопросы, связанные с влиянием конструкции и типа промежуточных рельсовых скреплений на несущую способность грунтов земляного полотна в условиях скоростного движения.

Цель работы. Разработка методики расчета несущей способности земляного полотна с учетом влияния типа промежуточного рельсового скрепления на величину вибродинамической нагрузки, возникающей при скоростном движении поездов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать влияние конструкции и типа промежуточных рельсовых скреплений на величину вибродинамического воздействия при увеличении скорости движения поездов.

2. Выявить особенности и закономерности распространения колебаний в земляном полотне и за его пределами при скоростном движении поездов.

3. На основе методов математического анализа скорректировать и уточнить решение теории предельного равновесия в «особой точке» применительно к задаче об определении несущей способности земляного полотна.

4. Разработать методику расчета несущей способности земляного полотна с учетом влияния конструкции и типа промежуточных скреплений на величину вибродинамического воздействия.

Методика исследований. Для решения поставленных задач выполнялись полевые и теоретические исследования. Натурные эксперименты выполнялись на скоростной линии Санкт-Петербург – Москва Октябрьской железной дороги в 2007, 2008 и 2009 годах. При разработке основных принципов методики использовались в основном результаты российских ученых в области исследования работы железнодорожного пути, а также опыт эксплуатации отечественных железных дорог.

В работе выполнены многовариантные расчеты на ЭВМ по оценке несущей способности земляного полотна, воспринимающего вибродинамическую нагрузку, в зависимости от типа промежуточных рельсовых скреплений.

Научная новизна

1. Впервые решена задача теории предельного равновесия с учетом влияния типа промежуточного рельсового скрепления на несущую способность земляного полотна, воспринимающего повышенное вибродинамическое воздействие при скоростном движении поездов.

2. Сформулирована и решена задача теории предельного равновесия по расчету предельных напряжений в «особой точке».

3. Выявлено влияние конструктивных особенностей промежуточных рельсовых скреплений на величину вибродинамического воздействия, возникающего при движении скоростных поездов.

Практическая ценность работы заключается в возможности использования проектными организациями разработанной методики при расчетах несущей способности земляного полотна с учетом вибродинамического воздействия от скоростного движения поездов. Практическую ценность представляют результаты исследований по влиянию конструкции и типа скреплений на величину вибродинамического воздействия и несущую способность земляного полотна. Предложенная методика позволяет более обоснованно принимать решения об укладке в путь скреплений того или иного типа при проектировании новых и реконструкции существующих железных дорог с обязательным обоснованием несущей способности земляного полотна.

Достоверность и обоснованность результатов исследований определяется использованием апробированных теорий расчета, а также сходимостью полученных расчетных величин с данными экспериментов.

Реализация исследований. Результаты исследований нашли практическое применение в проектном институте «Ленжелдорпроект» при проектировании ремонтов путей, а также в ПГУПСе при проектировании реконструкции участков пути Октябрьской железной дороги.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы были доложены: на V научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», посвященной памяти Г.М. Шахунянца (Москва, МИИТ, 19-20 ноября 2008 года); на международной научно-практической конференции «Современные технологии – транспорту» (Санкт-Петербург, ПГУПС, 28 апреля 2009 года); на международном научно-практическом семинаре (к 200-летию университета), посвященном 100-летию со дня рождения С.В. Амелина (Санкт-Петербург, ПГУПС, 4-5 июня 2009 года); на юбилейной научно-технической конференции «Инновации на железнодорожном транспорте-2009» к 200-летию Петербургского государственного университета путей сообщения (Санкт-Петербург, ПГУПС, 28-29 сентября 2009 года).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 6 печатных работ, в том числе две статьи представлены в источниках, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Общий объем составляет 166 страниц машинописного текста, в том числе 148 страниц основного текста, 51 рисунок, 7 таблиц, 3 приложения. Список литературы включает 138 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

Содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы, научная новизна и практическая ценность диссертационной работы, сформулированы цели, задачи и основные положения методики исследований, изложена реализация и апробация результатов исследований, отражено количество публикаций, структура и объем диссертации.

В первой главе проведен анализ существующих работ по изучению особенностей работы верхнего строения пути и земляного полотна при скоростном движении поездов. Проанализированы существующие методы расчета несущей способности, а также обобщены результаты многолетних исследований колебательного процесса в земляном полотне и его влияния на прочностные характеристики грунтов. Известны работы Е.С.Ашпиза, Д.Д.Баркана, А.А.Бекиша, Л.С.Блажко, М.Ф.Вериго, В.В.Виноградова, М.Н.Гольдштейна, П.П.Дыдышко, В.М.Ермакова, Н.Н.Ермолаева, В.А.Ершова, Г.Н.Жинкина, П.Л.Иванова, А.И.Кистанова, А.Я.Когана, А.Ф.Колоса, Г.Г.Коншина, И.И.Костюкова, Л.С.Лапидуса, В.Л.Лысюка, Н.Н.Маслова, А.В.Петряева, И.В.Прокудина, В.В.Пупатенко, О.А.Савинова, Е.С.Свинцова, Г.М.Стояновича, В.П.Титова, Г.М.Шахунянца, Т.Г.Яковлевой и других.

На основании исследования литературных источников сделаны следующие выводы:

1. Введение скоростного движения на сети железных дорог России влечет за собой увеличение вибродинамического воздействия на грунты земляного полотна, что вызывает снижение его несущей способности и может привести к появлению деформаций.
2. Состояние и конструкция промежуточных рельсовых креплений оказывают значительное влияние на уровень вибрации, возникающей при движении скоростных поездов.
3. На сегодняшний день практически не исследовано влияние конструкции промежуточных рельсовых креплений на несущую способность земляного полотна.
4. Характер колебательного процесса в значительной степени зависит от типа и состояния промежуточных рельсовых креплений. Увеличение жесткости пути ведет к росту амплитуды колебаний и наоборот.
5. С ростом скоростей движения поездов амплитуды колебаний, возникающие в земляном полотне, значительно возрастают.
6. В настоящее время отсутствует методика расчета несущей способности земляного полотна с учетом конструкции промежуточных рельсовых креплений в условиях скоростного движения поездов.

Анализ литературных источников не дает полного представления о влиянии конструкции верхнего строения пути на прочность земляного

полотна при скоростном движении поездов. В связи с этим соискателем ставятся следующие задачи исследования:

1. Провести полевые испытания и определить функциональные зависимости величины амплитуды колебаний грунтов земляного полотна от разных типов и конструкций промежуточных рельсовых скреплений при скоростном движении поездов.
2. Скорректировать методику расчета несущей способности земляного полотна в особой точке «О».
3. На основании теоретических и экспериментальных исследований усовершенствовать методику определения несущей способности земляного полотна с учетом применения различных типов и конструкций промежуточных рельсовых скреплений.
4. Оценить несущую способность земляного полотна в зависимости от конструкции промежуточных рельсовых скреплений в условиях повышенного вибродинамического воздействия.

Во второй главе приведены результаты натурных исследований колебательного процесса грунтов земляного полотна в зависимости от типа и конструкции промежуточных рельсовых скреплений, используемых в верхнем строении пути на экспериментальных участках. В рамках натурных исследований колебательного процесса земляного полотна необходимо выявить закономерности распространения колебаний в теле земляного полотна и за его пределами в условиях скоростного движения поездов с определением величины вибродинамического воздействия, передающегося на основную площадку земляного полотна.

Эксперименты проводились на линии Санкт Петербург – Москва Октябрьской железной дороги на станции Рябово при рельсовых скреплениях КБ, на станции Саблино при рельсовых скреплениях АРС, на перегоне Колпино – Поповка (28 километр 10 пикет) при рельсовых скреплениях Пендрол. Рельсовые скрепления Пендрол исследовались только на типовых прокладках-амортизаторах, а скрепления КБ и АРС на типовых и на опытных прокладках-амортизаторах. На всех экспериментальных участках уложена типовая конструкция пути: бесстыковые плети с рельсами Р65, железобетонными шпалами и щебеночным балластом твердых пород.

Исследования выполнялись при поддержке ООО «Институт полимеров», который разработал рецептуру нового материала, изготовил опытные прокладки-амортизаторы и предоставил их для проведения экспериментов.

Типовые конструкции скреплений КБ, АРС и Пендрол известны. Основные отличия типовых и опытных прокладок-амортизаторов для скреплений КБ и АРС заключаются в их жесткости и площади опирания. Жесткость опытных прокладок в скреплении КБ выше на 29 %, а площадь на 17 % больше, чем типовых. Жесткость типовых прокладок в скреплении

АРС больше на 18 %, а площадь контакта на 34 % меньше, чем опытных. Различия в жесткости в основном достигаются за счет использования различных составов материала для изготовления прокладок. Кроме того, значительной особенностью прокладок в скреплении КБ является то, что на опытной прокладке для рельсов Р65 рифление расположено снизу, а на типовой сверху и имеет разную форму. Рифление на прокладках под подкладку КБ одинаковое по форме, но расположено по всей площади на типовой прокладке и только в подрельсовом сечении на опытной. Прокладки в скреплении АРС отличаются по форме и глубине рифления.

Жесткости типовых и опытных прокладок-амортизаторов для исследуемых типов скреплений представлены в табл.1.

Таблица 1

Прокладка	Жесткость прокладок-амортизаторов, кН/мм	
	КБ	АРС
Типовая	35,3	80,0
Опытная	45,6	68,0

Исследование колебательного процесса в грунтах земляного полотна осуществлялось сейсмоприемниками СМ-3. В комплект были включены три датчика, позволяющие измерять три составляющие амплитуды колебаний: вертикальную (Z), горизонтальную вдоль оси пути (X) и горизонтальную поперек пути (Y). Запись осуществлялась в цифровом формате с помощью аналого-цифрового преобразователя сигналов, записываемых в реальном времени в память компьютера.

Для получения достоверных результатов выполнялась статистическая обработка экспериментальных данных. В результате определялись средние и максимальные вероятные значения амплитуд колебаний при определенной скорости движения поездов.

На основании проведенных полевых экспериментов в районе станции Рябово, станции Саблино (опытные и типовые прокладки) и на перегоне Колино – Поповка (28 километр 10 пикет) (типовые прокладки) на участках железнодорожного пути со скреплениями типа КБ, АРС и Пендрол соответственно получены данные, представленные на рисунках 1, 2, 3, на которых приняты следующие условные обозначения:

- × – горизонтальные вдоль оси пути амплитуды колебаний (кривая 1);
- ▲ – горизонтальные поперек оси пути амплитуды колебаний (кривая 2);
- – вертикальные амплитуды колебаний (кривая 3);
- ◆ – результирующие амплитуды колебаний.

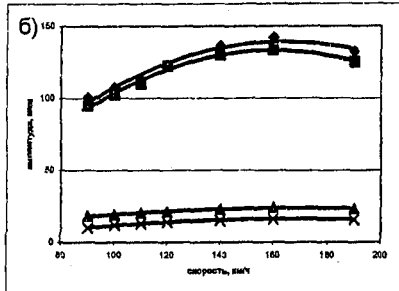
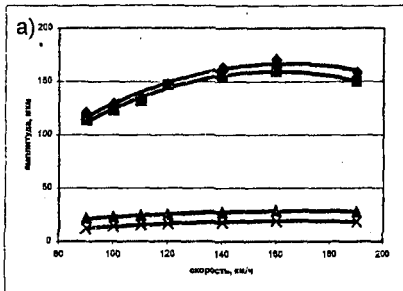


Рис.1 Влияние скорости движения пассажирских и скоростных поездов на максимально вероятные амплитуды колебаний грунтов основной площадки земляного полотна при опытных (а) и типовых (б) прокладках-амортизаторах в скреплении КБ.

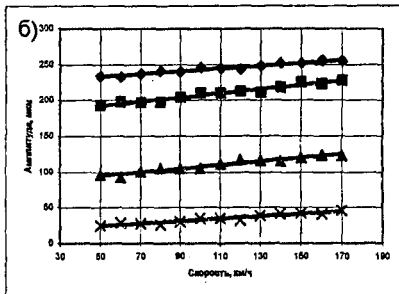
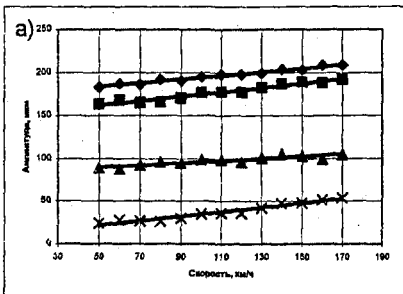


Рис.2 Влияние скорости на максимально вероятные амплитуды колебаний грунтов основной площадки земляного полотна при движении пассажирских и скоростных поездов по участку с опытными (а) и типовыми (б) прокладками-амортизаторами в скреплении АРС.

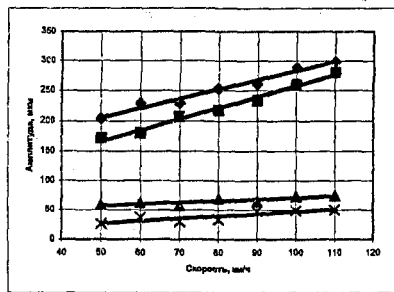


Рис.3 Влияние скорости на максимально вероятные амплитуды колебаний грунтов основной площадки земляного полотна при движении пассажирских поездов по участку со скреплениями Пендрол.

основной площадке земляного полотна; z – глубина от основной площадки земляного полотна; δ_1 – коэффициент затухания колебаний по глубине.

Заключения, сделанные на основе анализа данных рисунков 1, 2, 3, отражены в основных выводах по работе с 1 по 6 пункты.

Выявлено, что затухание колебаний по глубине балластного слоя и земляного полотна при движении скоростных поездов в пределах исследуемого диапазона скоростей описываются

одинаковой закономерностью, имеющей экспоненциальный характер:

$$A_z = A_0 \cdot \exp(z \cdot \lg \delta_1), \quad (1) \text{ где: } A_0 -$$

амплитуда смещений грунта на основной площадке земляного полотна; z – глубина от основной площадки земляного полотна; δ_1 – коэффициент затухания колебаний по глубине.

В результате исследований затухания колебаний в горизонтальном и вертикальном направлении доказано, что формула, описывающая затухание амплитуды колебаний в теле земляного полотна и за его пределами соответствует зависимости, полученной профессором И.В.Прокудиным:

$$A_{zy} = A_0 \cdot \exp[z \cdot \lg \delta_1 - (y - 1,35) \cdot \delta_2^2 + \delta_3 \cdot h - \delta_2^1 \cdot \varphi(y)], \quad (2)$$

где: A_{zy} - результирующая амплитуда колебаний грунта в точке с координатами Z и Y , мк; A_0 - максимальная вероятная результирующая амплитуда колебаний грунта основной площадки земляного полотна, мк; z - расстояние по вертикали от основной площадки до рассматриваемой точки; y - расстояние по горизонтали до рассматриваемой точки.

В третьей главе выполнена корректировка методики расчета несущей способности земляного полотна в особой точке «О».

Применительно к земляному полотну железных и автомобильных дорог с учетом действия вибродинамических нагрузок и снижения под их влиянием прочностных характеристик грунтов теория предельного равновесия была применена впервые в ЛИИЖТе профессором И.В.Прокудиным. Основные расчетные формулы данной методики приведены ниже.

Основная система уравнений плоской задачи состоит из уравнений движения грунтовой среды и условия предельного равновесия Кулона и имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} = Z + \rho \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = Y + \rho \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \\ \sigma_1 - \sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_2 + 2 \cdot C_{\text{дн}} \cdot \text{ctg} \varphi_{\text{дн}}) \cdot \sin \varphi_{\text{дн}} \end{array} \right. \quad (3)$$

где σ_z , σ_y - составляющие нормальных напряжений, соответственно в вертикальной и горизонтальной плоскостях, m/m^2 ; τ_{zy} , τ_{yz} - составляющие касательных напряжений, m/m^2 ;

U , V - перемещения при колебаниях в направлении осей z и y ; σ_1 , σ_2 - максимальное и минимальное главные напряжения; $C_{\text{дн}}$, $\varphi_{\text{дн}}$ - сцепление и угол внутреннего трения грунта, воспринимающего вибродинамическую нагрузку; Z и Y - объемные силы, при направлении оси z вертикально вниз $Z = \gamma$, а $Y = 0$; γ - объемный вес грунта, m/m^3 .

Решение задачи о несущей способности земляного полотна осуществляется методом характеристик и приводит к построению сетки линий скольжения с вычислением координат узлов, значения угла наклона первого главного напряжения к положительной горизонтальной оси, δ и среднего напряжения в узлах сетки, σ . Все вычисления производятся с учетом инерционных сил, затухания амплитуд колебаний в теле земляного полотна и за его пределами, а также снижения под их влиянием прочностных характеристик грунтов. Уравнения характеристик в общем

виде выражаются формулами (4), а выражения соотношений вдоль линий скольжения зависимостями (5).

$$dz = dy \cdot \operatorname{tg}(\delta \mp \mu), \quad (4)$$

$$d\sigma \mp 2\sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{дн}} \cdot d\delta = \pm \frac{\left(B + \rho \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \right) \cdot \sin(\delta \pm \mu) - \left(D + \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \right) \cdot \cos(\delta \pm \mu)}{\cos \varphi_{\text{дн}} \cdot \cos(\delta \mp \mu)} \cdot dy, \quad (5)$$

где μ - угол, образованный между направлением первого главного напряжения и линиями скольжения, равный $\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_{\text{дн}}}{2} \right)$. В формулах (4) и (5)

верхние знаки относятся к линиям скольжения второго семейства, а нижние - к первому семейству.

В выражении (5) необходимо вычислить величины B и D . При описании предельного напряженного состояния грунтов зависимостью Кулона они определяются соотношениями вида:

$$B = 0.15 \gamma H - \quad (6)$$

$$- \Phi_1 [f \sin 2\delta + n \cos 2\delta] \cdot [\varphi_{\text{см}} K_\varphi (\sigma \cos \varphi_{\text{дн}} - C_{\text{дн}} \sin \varphi_{\text{дн}}) + C_{\text{см}} K_c \cos \varphi_{\text{дн}}],$$

$$D = 0.04 \gamma H + \quad (7)$$

$$+ \Phi_1 [n \sin 2\delta - f \cos 2\delta] \cdot [\varphi_{\text{см}} K_\varphi (\sigma \cos \varphi_{\text{дн}} - C_{\text{дн}} \sin \varphi_{\text{дн}}) + C_{\text{см}} K_c \cos \varphi_{\text{дн}}],$$

где: $H = \exp(n \cdot z - \delta_1^0 \cdot y + 1,35 \cdot \delta_1^0 / n) \cdot 0,667 \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 \cdot \varphi(h_1)$;

$$\Phi_1 = K \cdot A_0 \cdot \exp(n \cdot z - \delta_1^0 \cdot y + 1,35 \cdot \delta_1^0 / n) \cdot 0,667 \cdot \varphi(h_1) \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 - K \cdot A_x;$$

$$f = (\delta_1^0 - 1/n) \cdot 0,667 \cdot \varphi(h_1) \cdot \operatorname{tg} \alpha_1; \quad \varphi(h_1) \begin{cases} 0 & \text{при } y \leq 0,5 \cdot b_0 + a; \\ \operatorname{tg} \alpha_1 & \text{при } y > 0,5 \cdot b_0 + a; \end{cases}$$

n - сомножитель, появившийся при дифференцировании по оси z от экспоненты.

Анализируя (6) и (7) видно, что в случае решения задачи с учетом вибродинамического воздействия и его влияния на прочностные свойства грунтов земляного полотна величины удельного сцепления и угла внутреннего трения являются переменными и, следовательно, попадающими под знак дифференциала.

Снижение прочностных характеристик грунтов, слагающих земляное полотно, в зависимости от амплитуды колебаний определяется выражениями, полученными профессором И.В.Прокудиным:

$$C_{\text{дн}} = C_{\text{см}} \left[K'_c + K_c \cdot e^{(-K \cdot (A_0 - A_n))} \right], \quad (8) \quad \varphi_{\text{дн}} = \varphi_{\text{см}} \left[K'_\varphi + K_\varphi \cdot e^{(-K \cdot A_0)} \right], \quad (9)$$

где: $C_{\text{дн}}$, $\varphi_{\text{дн}}$ - прочностные характеристики грунтов, определенные при действии динамической нагрузки; $C_{\text{см}}$, $\varphi_{\text{см}}$ - то же, при действии статической нагрузки; K'_c , K'_φ - минимальные показатели соотношения

характеристик сцепления и внутреннего трения: $K'_c = \frac{C_{\text{мин}}}{C_{\text{см}}}$ и $K'_\varphi = \frac{\varphi_{\text{мин}}}{\varphi_{\text{см}}}$

(10); A_n - начальная амплитуда колебаний, при которой снижение

характеристик не превышает 3-5 %, мкм; C_{min} , φ_{min} – наименьшие величины, соответственно, сцепления и угла внутреннего трения, определяемые экспериментально при наибольшем вибродинамическом воздействии; K_c , K_φ – максимальные величины показателей относительного снижения прочностных характеристик: $K_c = 1 - K'_c$ и $K_\varphi = 1 - K'_\varphi$ (11); K – коэффициент виброразрушения.

Методика, разработанная профессором И.В.Прокудиным, прекрасно зарекомендовала себя, показывая хорошую сходимость расчетных данных с фактическими.

При разработке методики определения несущей способности земляного полотна с целью упрощения расчетов были приняты некоторые допущения. В частности, при расчете в зоне особой точки «О», а также при определении граничных условий с учетом пригрузки. Сегодня возможности вычислительной техники значительно возросли и позволяют усовершенствовать методику, сделав расчет еще более точным.

Точка «О» называется особой потому, что в ней происходит скачкообразное изменение угла δ от α до $\pi/2$ и величины напряжений σ от q_{np} до P_0 предельного. Точка «О» является центром расчетной схемы. Справа от нее расположены сдвигающие силы, а слева – удерживающие.

В зоне особой точки «О» наблюдается скачок угла δ от α до $\pi/2$, который равномерно распределяется по характеристикам первого семейства. Угол δ определяется по формуле:

$$\delta = \frac{\pi - 2\alpha}{2n} \cdot i + \alpha \quad \text{где } n - \text{количество частей, на которое разбивается скачок угла; } i - \text{порядковый номер рассматриваемой части.}$$

Ранее определять напряжения в особой точке «О» предлагалось, используя следующую формулу:

$$\sigma_i = \sigma_{100} \cdot \exp(2 \cdot \delta_i \cdot tg \varphi_{on}) = \frac{C_{on} \cdot \cos \varphi_{on}}{1 - \sin \varphi_{on}} \cdot \exp(2 \cdot \delta_i \cdot tg \varphi_{on}) \quad (12)$$

В соответствии с рисунком 5 необходимо отметить, что раньше не была учтена пригрузка от балластной призмы в зоне особой точки «О», что оказывало влияние на занижение расчетной несущей способности земляного полотна.

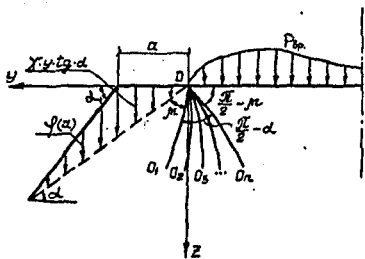


Рис.4 Схема к построению сетки характеристик насыпи во второй зоне.

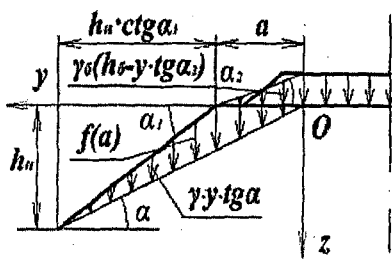


Рис.5 Схема к определению граничных условий с учетом пригрузки «особой точки».

Для решения уравнений (4) и (5) необходимо определить условия на границе. Схема действия внешних сил и пригрузки на откосе принимается в соответствии с рисунком 4. Так как в этой схеме не учтена пригрузка балластной призмой особой точки «О», предложена новая расчетная схема, представленная на рисунке 5.

Пригрузка условной поверхности откоса и расчетной обочины (включая особую точку «О») определится в соответствии с рисунком 5. Расчет необходимо осуществлять в координатных осях, проходящих через точку «О», лежащую на границе зоны загрузки основной площадки.

С целью упрощения учета пригрузки на обочине и в особой точке «О» от балластного слоя, трапецидальную эпюру напряжений заменим треугольной, распределенной по всей ширине расчетной обочины (a). Эта замена является равноценной, так как площади трапецидальной и треугольной эпюр равны. При этом расчет заметно упрощается.

$$q_{np} = f(a), \quad f(a) = \begin{cases} \gamma_b(h_b - y \cdot \operatorname{tg} \alpha_2) + \gamma \cdot y \cdot \operatorname{tg} \alpha & y \leq a \\ \gamma \cdot y(\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \alpha_1) + \gamma \cdot a \cdot \operatorname{tg} \alpha, & \text{при } a < y \leq a + h_n \cdot \operatorname{ctg} \alpha_1, \\ 0 & y > a + h_n \cdot \operatorname{ctg} \alpha_1 \end{cases} \quad (13)$$

где: α - угол наклона условной поверхности откоса к горизонту, рад.; α_1 - угол наклона откоса насыпи к горизонту, рад.; α_2 - угол в треугольной эпюре напряжений, характеризующий распределение пригрузки на обочине (a), рад.; γ - объемный вес грунта; γ_b - объемный вес балласта; h_n - высота насыпи; h_b - толщина балласта.

Из рисунка 5 и формулы 13 следует, что пригрузка в особой точке «О» равна произведению толщины балласта на его объемный вес ($h_b \cdot \gamma_b$).

Учет пригрузки в особой точке «О» и на обочине приводит к повышению несущей способности основной площадки земляного полотна.

В теории предельного равновесия характеристика напряжений σ , как правило, определяется зависимостью, предложенной В.А.Флориным:

$$\sigma = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} + C \cdot \operatorname{ctg} \varphi, \quad (14)$$

В теории расчета несущей способности земляного полотна, воспринимающего вибродинамическую нагрузку, И.В.Прокудин принял величину средних напряжений как:

$$\sigma = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2}, \quad (15)$$

то есть без учета второго слагаемого. Такое допущение было принято с целью облегчения процессов дифференцирования уравнений (3). Однако, в качестве первого приближения, расчет в особой точке «О» предложено было выполнять исходя из решения В.А.Флорина. Учитывая вышеизложенное, возникает необходимость корректировки решения задачи в особой точке «О», приняв за характеристику напряжений выражение (15). Корректировка должна базироваться на строгом

математическом решении, путем интегрирования уравнения дифференциального соотношения вдоль линии скольжения второго семейства.

В соответствии с приемом, рекомендованным В.А.Флориним, вырежем точку «О» характеристикой второго семейства, проходящей от центра точки на расстоянии dz , как показано на рисунке 6.

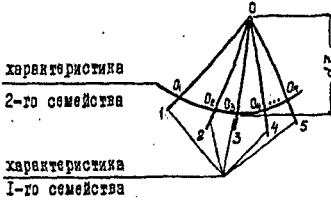


Рисунок 6 Сетка характеристик в особой точке.

Неограниченное уменьшение размера dz обуславливает преимущественное уменьшение объема области вокруг точки «О» в сравнении с ее поверхностью, и при минимальных размерах вырезанной области действующие на нее силы собственного веса грунта и силы инерции в процессе колебаний будут пренебрежимо малы по сравнению с

действующими напряжениями. Кроме того, при минимальных размерах рассматриваемой области, явлением загасания колебаний по глубине можно пренебречь и считать грунт однородным по прочностным характеристикам.

Следовательно, бесконечно малую область вокруг точки «О» можно считать невесомой с постоянными характеристиками грунта, а правую часть уравнения соотношений вдоль линий скольжения приравнять к нулю.

Предельная величина σ_i в зоне точки «О» определяется интегрированием дифференциального соотношения вдоль характеристики второго семейства в невесомой зоне при стремлении dz и dy к нулю и стягивании вырезанной зоны в точку (рисунок 6). Тогда линия скольжения $O_1 - O_3$ стремится к нулю, а интегрирование проводится в точке, где наблюдается скачок напряжений от $\sigma_{10,0}$ до σ_i и угла δ от α до δ_i :

$$\int_{\sigma_{10,0}}^{\sigma_i} d\sigma - 2 \int_{\alpha}^{\delta_i} \sigma_{дн} \cdot tg \varphi_{дн} \cdot d\delta = 0 \quad (16) \quad \text{где} \quad \sigma_{дн} = \sigma + C_{дн} \cdot ctg \varphi_{дн}$$

Проведем ряд преобразований и упрощений над формулой (16) и проинтегрируем ее:

$$\int_{\sigma_{10,0}}^{\sigma_i} d\sigma - 2 \int_{\alpha}^{\delta_i} (\sigma + C_{дн} \cdot ctg \varphi_{дн}) \cdot tg \varphi_{дн} \cdot d\delta = 0$$

$$\int_{\sigma_{10,0}}^{\sigma_i} d\sigma - 2 \int_{\alpha}^{\delta_i} (\sigma \cdot tg \varphi_{дн} + C_{дн} \cdot ctg \varphi_{дн} \cdot tg \varphi_{дн}) \cdot d\delta = 0$$

$$\int_{\sigma_{10,0}}^{\sigma_i} d\sigma - 2 \int_{\alpha}^{\delta_i} (\sigma \cdot tg \varphi_{дн} + C_{дн}) \cdot d\delta = 0$$

$$\int_{\sigma_{10,0}}^{\sigma_i} d\sigma - 2 \int_{\alpha}^{\delta_i} \sigma \cdot tg \varphi_{дн} \cdot d\delta - 2 \int_{\alpha}^{\delta_i} C_{дн} \cdot d\delta = 0$$

$$\int_{\sigma_{10,0}}^{\sigma_i} d\sigma - 2 \cdot tg \varphi_{дн} \int_{\alpha}^{\delta_i} \sigma \cdot d\delta - 2 \cdot C_{дн} \int_{\alpha}^{\delta_i} d\delta = 0$$

$$\sigma = \frac{\sigma_{10,0}}{\exp(2 \cdot \alpha \cdot tg \varphi_{дн})} \cdot \exp(2 \cdot \delta \cdot tg \varphi_{дн})$$

$$\begin{aligned}
& \int_{\sigma_{10.0}}^{\sigma_i} d\sigma - 2 \cdot tg\varphi_{дн} \int_{\alpha}^{\delta_i} \frac{\sigma_{10.0}}{\exp(2 \cdot \alpha \cdot tg\varphi_{дн})} \cdot \exp(2 \cdot \delta \cdot tg\varphi_{дн}) \cdot d\delta - 2 \cdot C_{дн} \int_{\alpha}^{\delta_i} d\delta = 0 \\
& \sigma \Big|_{\sigma_{10.0}}^{\sigma_i} - \frac{2 \cdot tg\varphi_{дн} \cdot \sigma_{10.0}}{\exp(2 \cdot \alpha \cdot tg\varphi_{дн})} \cdot \frac{\exp(2 \cdot \delta \cdot tg\varphi_{дн})}{2 \cdot tg\varphi_{дн}} \Big|_{\alpha}^{\delta_i} - 2 \cdot C_{дн} \cdot \delta \Big|_{\alpha}^{\delta_i} = 0 \\
& \sigma \Big|_{\sigma_{10.0}}^{\sigma_i} - \sigma_{10.0} \cdot \exp(2 \cdot tg\varphi_{дн} (\delta - \alpha)) \Big|_{\alpha}^{\delta_i} - 2 \cdot C_{дн} \cdot \delta \Big|_{\alpha}^{\delta_i} = 0 \\
& (\sigma_i - \sigma_{10.0}) - (\sigma_{10.0} \cdot \exp(2 \cdot tg\varphi_{дн} (\delta_i - \alpha)) - \sigma_{10.0} \cdot \exp(2 \cdot tg\varphi_{дн} (\alpha - \alpha))) - \\
& - (2 \cdot C_{дн} \cdot \delta_i - 2 \cdot C_{дн} \cdot \alpha) = 0 \\
& (\sigma_i - \sigma_{10.0}) - (\sigma_{10.0} \cdot \exp(2 \cdot tg\varphi_{дн} (\delta_i - \alpha)) - \sigma_{10.0}) - (2 \cdot C_{дн} (\delta_i - \alpha)) = 0 \\
& \sigma_i - \sigma_{10.0} - \sigma_{10.0} \cdot \exp(2 \cdot tg\varphi_{дн} (\delta_i - \alpha)) + \sigma_{10.0} - 2 \cdot C_{дн} (\delta_i - \alpha) = 0 \\
& \sigma_i - \sigma_{10.0} \cdot \exp(2 \cdot tg\varphi_{дн} (\delta_i - \alpha)) - 2 \cdot C_{дн} (\delta_i - \alpha) = 0 \\
& \sigma_i = 2 \cdot C_{дн} (\delta_i - \alpha) + \sigma_{10.0} \cdot \exp(2 \cdot tg\varphi_{дн} (\delta_i - \alpha)), \quad (17)
\end{aligned}$$

В результате интегрирования получено выражение для определения предельных напряжений σ_i в особой точке «О». Сравнение формул (12) и (17) показывает, что появилось дополнительное слагаемое $2C_{дн}(\delta_i - \alpha)$, которое увеличивает расчетную несущую способность.

В четвертой главе по уточненной методике выполнено исследование по определению влияния конструкции промежуточных рельсовых креплений на несущую способность земляного полотна скоростных железнодорожных линий с учетом вибродинамического воздействия.

Определение несущей способности земляного полотна в зависимости от конструктивных особенностей промежуточных рельсовых креплений должно базироваться на основе теории предельного равновесия с учетом повышенного вибродинамического воздействия при скоростном движении поездов.

Расчетами на ЭВМ подтверждено, что изменения в методике определения несущей способности увеличивают расчетные предельные напряжения. Увеличение обусловлено учетом пригрузки обочины, включая «особую точку», и использованием новой формулы, в которой содержится дополнительное слагаемое, для определения напряжений в «особой точке».

Установлено, что конструктивные особенности верхнего строения пути скоростных магистралей оказывают влияние на несущую способность земляного полотна.

Определено влияние типа промежуточного рельсового крепления и жесткости прокладки-амортизатора в его конструкции на величину

несущей способности земляного полотна, сложенного из дренирующих и не дренирующих грунтов, в зависимости от скорости движения поездов. Самой высокой несущей способностью обладает земляное полотно при использовании промежуточных рельсовых скреплений типа КБ-65.

Сравнение несущей способности земляного полотна из различных грунтов в зависимости от типов и конструкций скреплений при скорости 200 км/ч по абсолютным величинам представлено в табл.2.

Таблица 2

Тип грунта	Несущая способность земляного полотна, т/м ²					
	При действии статической нагрузки	При действии вибродинамической нагрузки				
		КБ (штатная)	КБ (опытная)	АРС (штатная)	АРС (опытная)	Пендрол
Дренирующий	23,03	14,44 37	13,71 40	12,69 45	13,1 43	11,71 49
Не дренирующий	24,87	13,98 44	12,98 48	11,27 55	11,98 52	9,81 61

Примечание: в числителе несущая способность, в знаменателе процент снижения относительно статики.

Увеличение жесткости прокладки-амортизатора в скреплении приводит к снижению несущей способности земляного полотна (табл.1, рис.7 а, б).

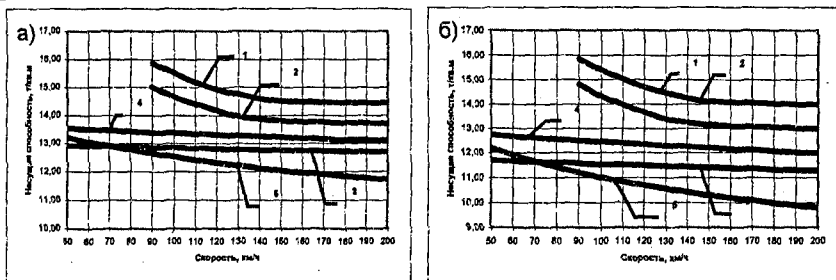


Рис.7 Влияние скорости движения пассажирских и скоростных поездов на несущую способность насыпи из дренирующего грунта (а) и не дренирующего грунта (б) на участках пути со скреплениями: 1 – КБ с типовой прокладкой; 2 – КБ с опытной прокладкой; 3 – АРС с типовой прокладкой; 4 – АРС с опытной прокладкой; 5 – Пендрол с типовой прокладкой.

Расчетана несущая способность земляного полотна из различных типов грунтов в зависимости от амплитуды колебаний (рисунок 8). Типы исследуемых грунтов и их характеристики приведены в табл.3.

Таблица 3

Тип грунта	Характеристики грунта		
	Объемный вес	Сцепление	Угол внутреннего трения
Песок гравелистый и крупный	1,85	0,2	40
Песок мелкий	1,95	0,5	36
Суглинок полутвердый	2,05	3,1	24
Глина полутвердая	2,10	4,0	19

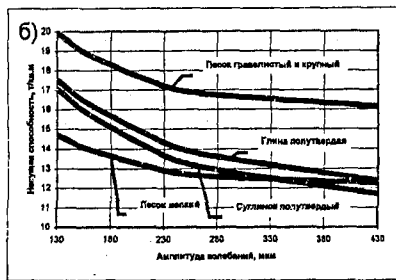
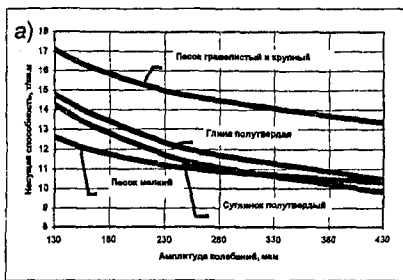


Рис.8 Влияние типа грунта на несущую способность земляного полотна, представленного насыпью (а) и нулевым местом (б), в зависимости от величины амплитуды колебаний.

Таким образом, в диссертационной работе сформулирована и решена задача теории предельного равновесия по определению несущей способности земляного полотна, представлены все необходимые данные, определена последовательность действий и показан пример расчета несущей способности земляного полотна с учетом вибродинамического воздействия, типов и конструкций промежуточных рельсовых скреплений при скоростном движении поездов.

Основные выводы по работе:

На основании анализа результатов полевых и теоретических исследований сделаны следующие выводы:

1. Состояние и конструкция промежуточных рельсовых скреплений оказывают значительное влияние на уровень вибрации, возникающей при движении скоростных поездов. Сравнение эффективности работы опытных и типовых прокладок-амортизаторов на экспериментальном участке со скреплениями КБ по результирующим амплитудам при увеличении скорости движения пассажирских поездов показывает, что на опытных прокладках при скорости 170 км/ч амплитуды колебаний (165 микрон) на 21 % выше, чем на типовых (136 микрон), рисунок 1 (а, б).
2. Сравнение эффективности работы опытных и типовых прокладок на экспериментальном участке со скреплениями АРС по результирующим амплитудам при увеличении скорости движения пассажирских поездов показывает, что на типовых прокладках при скорости 170 км/ч амплитуды колебаний (258 микрон) на 23 % выше, чем на опытных (210 микрон), рисунок 2 (а, б).
3. Основной причиной изменения уровня вибродинамического воздействия, передающегося грунтам земляного полотна, является изменение жесткости прокладок-амортизаторов в промежуточном рельсовом скреплении. Различие в величине амплитуд колебаний объясняется тем, что опытные прокладки в скреплении КБ имеют жесткость (45,6 кН/мм) на 29 % большую, чем типовые (35,3 кН/мм), а в скреплении АРС типовые прокладки-амортизаторы имеют жесткость (80 кН/мм) на 18 % большую, чем опытные (68 кН/мм).

4. Сравнительный анализ амплитуд колебаний при различных типах креплений показывает, что КБ, АРС и Пендрол работают с разной степенью эффективности гашения вибродинамического воздействия. При движении пассажирских поездов по участку с типовыми прокладками-амортизаторами со скоростью 110 км/ч и креплениями КБ результирующие амплитуды колебаний на основной площадке земляного полотна составили 111 микрон, креплениями АРС – 246 микрон, креплениями Пендрол – 300 микрон (рисунок 3).

5. При увеличении скорости движения пассажирских поездов увеличивается уровень вибродинамического воздействия и проявляется различие в эффективности работы прокладок в различных видах креплений. При жестких прокладках АРС (80 кН/мм) земляное полотно воспринимает вибродинамического воздействия в 1,9 раза больше, чем при мягких КБ (35,3 кН/мм).

6. При всех типах прокладок в креплении АРС зависимости, отражающие изменения величин амплитуд с увеличением скоростей движения пассажирских и скоростных поездов, являются линейными. В то время как в креплении КБ для скоростных поездов при скоростях выше 160 км/ч зависимость перестает быть линейной. Изменение характера нарастания амплитуд колебаний объясняется тем, что в креплении типа АРС анкер жестко замоноличен в шпале, а в креплении КБ имеет место закладной болт. В силу этого при указанных скоростях движения поездов усилие, возникающее в узле крепления КБ, начинает превосходить усилие затяжки болтов, и конструкция работает как шарнир, снижая уровень динамики.

7. Характер распространения колебаний в теле земляного полотна и за его пределами описывается экспоненциальной зависимостью (формула 2).

8. Скорректировано и уточнено решение теории предельного равновесия в «особой точке» применительно к задаче об определении несущей способности земляного полотна.

9. На основе экспериментальных и теоретических исследований решена задача по определению несущей способности земляного полотна в зависимости от конструкции промежуточных рельсовых креплений с учетом действия повышенных вибродинамических нагрузок и снижения прочностных свойств грунтов под их влиянием при скоростном движении поездов.

10. Сравнение несущей способности земляного полотна из дренирующего грунта при действии статической и динамической нагрузок показывает, что при креплении КБ с типовой прокладкой-амортизатором снижение несущей способности составило 37%, КБ с опытной прокладкой-40%, АРС с типовой прокладкой-45%, АРС с опытной прокладкой-43% и Пендрол с типовой прокладкой-49%.

11. Полученные результаты свидетельствуют о негативном влиянии на несущую способность креплений типа АРС и Пендрол, что, однако, не является единственным показателем для принятия решения об их использовании в конструкции пути на скоростных участках. Окончательный выбор должен производиться на основе технико-экономического сравнения.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Прокудин И.В., Козлов И.С. Влияние промежуточных креплений на колебания грунтов земляного полотна // Путь и путевое хозяйство. – 2009. – №6. – С.31-33.

2. Козлов И.С. Исследование колебаний грунтов земляного полотна под стрелочными переводами // Транспорт Урала. – 2009. – №3. – С.81-83.

3. Прокудин И.В., Козлов И.С., Шульгин В.И. Зависимость вибродинамического воздействия, передающегося на железнодорожный путь, от конструкции крепления // Труды пятой междунар. науч.-тех. конф. «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», посв. памяти Г.М. Шахунянца (19-20 ноября 2008 года). – М.: МИИТ, 2008. – С.192-194.

4. Прокудин И.В., Козлов И.С. Колебание материалов балластного слоя и земляного полотна под стрелочными переводами // Труды пятой междунар. науч.-тех. конф. «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», посв. памяти Г.М. Шахунянца (19-20 ноября 2008 года). – М.: МИИТ, 2008. – С.90-93.

5. Козлов И.С. Корректировка методики расчета несущей способности земляного полотна в особой точке // Материалы международной научно-практич. конф. «Современные технологии – транспорту» (28 апреля 2009 года). – СПб.: ПГУПС, Известия ПГУПС. – 2009. – №3. – С.84-90.

6. Козлов И.С. Несущая способность земляного полотна при скоростном движении поездов в зависимости от конструкции верхнего строения пути // Труды международного научно-практического семинара (к 200-летию университета), посвященного 100-летию со дня рождения профессора С.В. Амелина (4-5 июня 2009 г.). – СПб.: ПГУПС. – 2009. – С.46-54.

Подписано к печати 16.11.09 г.

Печ.л. – 1,25

Печать офсетная. Бумага для множит. апп.

Формат 60x84 1/16

Тираж 100 экз. Заказ № 947.

Тип. ПГУПС

190031, С-Петербург, Московский пр. 9