

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»
(ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ(МИИТ))

На правах рукописи

Королев Вадим Вадимович

Проектирование стрелочных переводов нового поколения
для российских железных дорог
с учетом реализации перспективных задач
перевозочного процесса

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование
железных дорог

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор
Глюзберг Борис Эйнихович

Москва – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ.....	5
1	МЕТОДЫ И ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКЦИИ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ	14
	1.1 Поколения стрелочных переводов.....	27
	1.2 Этапы и последовательность разработки стрелочной продукции.....	32
	1.3 Разработка подхода к проектированию стрелочных переводов для переводов нового поколения.....	35
	1.4 Выбор концепции проектирования.....	37
	1.4.1 Проектирование стрелочных кривых, исходя из нормирования нескомпенсированного ускорения.....	37
	1.4.2 Проектирование стрелочных кривых, исходя из анализа изменения кинематических параметров движущегося экипажа.....	38
	1.4.3 Сопоставление методик и окончательный выбор концепции проектирования.....	44
	Выводы по главе 1.....	46
2	МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ В ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ РАБОТЕ	47
	2.1 Мониторинг геометрии рельсовой колеи стрелочных переводов и взаимного положения их элементов.....	47
	2.2 Анализ результатов мониторинга геометрии рельсовой колеи стрелочных переводов.....	49
	2.3 Анализ результатов мониторинга геометрии рабочих поверхностей элементов стрелочных переводов.....	51
	Выводы по главе 2.....	54
3	РЕЗУЛЬТАТЫ ДИНАМИКО-ПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ.....	55

	3.1 Критерии оценки прочности, деформативности и устойчивости стрелочного перевода.....	55
	3.2 Типовая методика динамико-прочностных испытаний стрелочных переводов.....	59
	3.3 Недостатки принятых методов оценки прочности стрелочного перевода.....	69
	Выводы по главе 3.....	70
4	ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВИДЫ ОСНОВАНИЯ ДЛЯ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ	72
	4.1 Разработка плитного основания стрелочных переводов нового поколения для современного железнодорожного транспорта.....	75
	4.2 Виды и особенности конструкции железобетонных оснований стрелочных переводов	79
	4.3 Моделирование поведения плитного основания стрелочного перевода нового поколения при действии внешней динамической нагрузки от экипажа.....	92
	Выводы по главе 4.....	126
5	СБОРКА, УКЛАДКА И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТАХ	130
	Выводы по главе 5.....	141
6	ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КОНТРЕЛЬСОВЫХ УЗЛОВ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ.....	143
	Выводы по главе 6.....	161
7	СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТЫ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД.....	163
	7.1 Теплораспределение на стрелочных переводах.....	173

	7.2 Определение распределения тепла внутри элементов стрелочного перевода.....	174
	7.3 Описание математической модели и свойств материалов.....	184
	7.4 Обоснование метода расчета плавления при заданном уровне снежного покрова.....	196
	7.5 Определение способности противостоять снегопаду при различной высоте снежной насыпи.....	203
	7.6 Определение влияния скорости ветра на способность противостоять снегопаду.....	205
	7.7 Результаты расчетов плавления при заданном уровне снежного покрова.....	206
	7.8 Методика расчёта динамики прогрева.....	217
	7.9 Методика расчёта достаточности обогрева при снегопаде.....	220
	Выводы по главе 7.....	222
8	ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СТРЕЛОЧНЫМ ПЕРЕВОДАМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ.....	224
	Выводы по главе 8.....	233
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	234
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	237
	Приложение А Патенты на полезные модели и изобретение.....	253

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования определяется необходимостью железнодорожного транспорта обеспечивать перевозки пассажиров и грузов в объемах современных и перспективных потребностей страны, использовать новые технологии, которые продиктованы развитием науки и техники.

Инфраструктура железных дорог является основой железнодорожного транспорта, определяющей возможности перевозочного процесса. Стрелочные переводы, представляющие собой важную часть технических средств инфраструктуры железных дорог, оказывают существенное влияние на реализацию программ развития железнодорожного транспорта.

Современный стрелочный перевод – сложное многоэлементное изделие. Разработка стрелочных переводов представляет собой комплекс работ, в которых участвуют, как правило, несколько научно-исследовательских, более пяти, конструкторских организаций, три основных завода-изготовителя и более десяти заводов-изготовителей комплектующих.

Стрелочные переводы, работающие на российских железных дорогах в настоящее время, в основном, удовлетворяют потребностям перевозочного процесса, однако, с учетом времени необходимого на подготовку стрелочного хозяйства к реализации перспективных задач, уже сегодня необходимо ускорить разработку и постановку на производство новых конструкций и модельных рядов стрелочной продукции. В связи с повышением скоростей движения, а также и нагрузок, наиболее важным при дальнейшем совершенствовании является выбор параметров, определяющих наилучшее сочетание свойств отдельных элементов конструкции верхнего строения пути. Так как конструкция верхнего строения пути работает под воздействием динамических нагрузок, то основными параметрами элементов верхнего строения являются жесткости, массы и их демпфирующая способность. Установление оптимальных величин этих параметров и особенно

рационального их сочетания требует всесторонних теоретических и экспериментальных исследований.

Современная экономическая обстановка требует особого подхода к разработке и использованию конструкций железнодорожного пути. При разработке конструкций учитываются условия их работы вместе с требованиями, связанными с динамико-кинематическими, эксплуатационными и технологическими характеристиками.

С учетом необходимости обеспечения независимости от импорта, стрелочная продукция должна изготавливаться на российских заводах-производителях. Кроме того, при разработке конструкций необходимо использовать комплектующие, разработанные в России или произведенные на территории страны.

Важной отличительной особенностью нового поколения стрелочной продукции должна стать единая элементная база, которая позволит упростить конструирование, производство и обслуживание стрелочной продукции в эксплуатационной работе.

Учитывая сказанное, проблема создания стрелочных переводов нового поколения для инфраструктуры отечественных железных дорог на сегодняшний день является одной из актуальных задач.

Степень разработанности темы. Во Всероссийском научно-исследовательском институте железнодорожного транспорта (ВНИИЖТе) научные коллективы проводили работы по созданию и улучшению серийных стрелочных переводов под руководством докторов технических наук Н.Н. Путри, Г.Г. Желнина, профессора Б.Э. Глюзберга, кандидатов технических наук А.М. Тейтеля, Л.Г. Крысанова, М.И. Титаренко, инженера В.Г. Донца; в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), бывшим Ленинградским институтом инженеров железнодорожного транспорта имени академика В. Н. Образцова (ЛИИЖТе) под руководством профессоров, докторов технических наук С.В. Амелина, В.Ф. Яковлева, М.П. Смирнова, кандидатов технических наук В.И. Абросимова, Л.Н. Фролова; в

Днепропетровском Государственном Техническом Университете Железнодорожного Транспорта (ДИИТе) - сотрудниками кафедры, возглавляемой профессором М.А. Фришманом, а затем профессором В.В. Рыбкиным. Проектные работы по созданию и совершенствованию стрелочных переводов проводились коллективом Проектно-технологического конструкторского бюро по пути и путевым машинам (ПТКБ ЦП МПС) под руководством кандидата технических наук Н.Н. Елсакова и инженерами Ю.Н. Петровым, А.К. Гучковым, С.О. Суриным.

В настоящее время работы по созданию новых стрелочных переводов ведутся специалистами АО «ВНИИЖТ» профессором Б.Э. Глюзбергом, кандидатами технических наук М.И. Титаренко, П.В. Трегубчаком, кафедрой «Транспортное строительство» РУТ МИИТ, возглавляемой профессором А.А. Локтевым, кандидатами технических наук Е.Ю. Минаковым, И.В. Шишкиной, конструкторскими подразделениями Новосибирского и Муромского стрелочных заводов.

Цель работы заключается в разработке современных методов расчета и научном обосновании на их основе параметров для стрелочных переводов нового поколения, как конструкций, имеющих преимущества существующих, но свободных от их недостатков, а также в формулировке технических требований к стрелочным переводам нового поколения для инфраструктуры отечественных железных дорог.

Задачами исследования являются: обоснование выбора современных элементов для конструирования стрелочных переводов нового поколения с увеличенным межремонтным ресурсом, а также обеспечение работы отечественных стрелочных переводов в зимний период для бесперебойной работы железнодорожного транспорта при отрицательных температурах.

Для достижения поставленных целей необходимо решение следующих задач:
– исследование фактического состояния стрелочных переводов в пути.

Задача подразумевает проведение динамико-прочностных и эксплуатационных испытаний стрелочных переводов массового применения для определения прочностных показателей их основных элементов.

– анализ эксплуатационных качеств стрелочных переводов в пути.

Задача подразумевает разработку методики динамико-прочностных и эксплуатационных испытаний стрелочного перевода для проведения испытаний стрелочного перевода на железобетонном подрельсовом основании, которые необходимо провести с целью оценки напряженно-деформированного состояния, прочности и эксплуатационных качеств, как в целом стрелочного перевода, так и его отдельных узлов и элементов, а также стабильности колеи и её соответствия нормативно-техническим требованиям.

– разработка модели для расчета плит основания стрелочных переводов.

Задача подразумевает разработку нескольких моделей, а также проведение с помощью этих моделей исследования плитного основания стрелочного перевода, которое позволит выявить влияние параметров основания на параметры динамического воздействия подвижного состава на стрелочный перевод. Полученные результаты позволят рассчитать параметры плит для обеспечения эксплуатации стрелочного перевода при различных скоростях движения экипажей, нагрузках на ось обращаемого подвижного состава, а также установить особенности устройства основания под плитные элементы.

– разработка технологии обслуживания стрелочных переводов на плитном основании.

Задача подразумевает разработку технологии сборки, укладки и технического обслуживания стрелочных переводов нового поколения на железобетонных плитах.

– оптимизация конструкции контррельсов для стрелочных переводов нового поколения.

Задача подразумевает, опираясь на современные подходы и разработанным автором методе получения эффективных и экономичных технических решений по

совершенствованию контрольных узлов стрелочных переводов массовых конструкций, получить эффект при минимальных затратах на их реализацию.

При этом, полученные результаты должны сохранять генеральные технологические схемы изготовления элементов, весь эффект должен достигаться за счет повышения инженерного уровня технических решений. Эти решения должны способствовать улучшению качества стрелочных переводов, а также снижению расходов на текущее содержание стрелочной продукции.

– обеспечение работы стрелочных переводов в зимний период.

Задача подразумевает проведение серии расчётов для выбора параметров конструкции систем, обеспечивающих работу стрелочных переводов в условиях наличия снега и льда. Так же необходима разработка методики расчёта систем обогрева (снегоудаления).

– формулировка технических требований к современным стрелочным переводам для инфраструктуры отечественных железных дорог.

Задача подразумевает формулировку технических требований к современным стрелочным переводам, применяемым на отечественных железных дорогах, а также формулировку задач, стоящих перед стрелочным хозяйством на российских железных дорогах с учетом реализации перспективных задач перевозочного процесса.

Научная новизна выполненных в данной работе исследований обеспечивается следующими положениями:

1. Разработана методика динамико-прочностных и эксплуатационных испытаний стрелочного перевода для проведения испытаний стрелочного перевода на железобетонном подрельсовом основании.

2. Разработаны и реализованы модели для обоснования выбора плит основания стрелочных переводов нового поколения, обеспечивающие оптимальные удельные нагрузки на подплитное основание и основную площадку земляного полотна.

3. Обоснованы оптимальные параметры соотношений геометрических, механических и конструктивных характеристик железнодорожного пути на стрелочных переводах нового поколения.

4. Разработана технология технического обслуживания стрелочных переводов нового поколения на железобетонных плитах.

5. Проведена оптимизация конструкции контррельсов для стрелочных переводов нового поколения.

6. Проведена серия расчётов для выбора параметров конструкции, обеспечивающей работу стрелочных переводов нового поколения в зимний период.

7. Сформулированы технические требования к стрелочным переводам нового поколения для российских железных дорог с учетом реализации перспективных задач перевозочного процесса.

Теоретическая и практическая значимость работы основана на комплексном применении математического моделирования и экспериментальных исследований. Этот подход позволяет получать практически полезные технические решения для разработки стрелочных переводов нового поколения для российских железных дорог с учетом реализации перспективных задач перевозочного процесса. В рамках этого подхода разрабатываются модельные ряды стрелочной продукции, предназначенные для решения современных и перспективных задач железнодорожного транспорта.

Методология и методы исследования включают в себя: обобщение опыта проектирования стрелочных переводов с учетом современных методов, используемых в инновационных разработках конструкций в нашей стране.

В данной работе использованы теоретические и практические методы сбора информации и ее анализа:

– методы математической статистики для определения ресурсных показателей стрелочных переводов на железобетонном основании;

– тензометрический метод исследования напряженно-деформированного состояния конструкций стрелочных переводов;

– метод математического моделирования использовался для решения задачи создания плитного основания стрелочных переводов, адаптированного под различные условия эксплуатации. Это позволило увеличить ресурс стрелочных переводов. Кроме того, благодаря этому методу была проведена оптимизация конструкции контррельсов для нового поколения стрелочных переводов;

– метод расчета теплопередачи, который использовался для проведения серийных расчетов и определения параметров системы, обеспечивающей надежную работу стрелочных переводов в зимних условиях. В результате расчетно-экспериментального анализа были предложены методы оценки критических параметров. На основе проведенных исследований были разработаны методики расчета, которые могут быть применены при дальнейшей разработке новых типов и видов основания в конструкции стрелочных переводов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модели для расчета плит основания стрелочных переводов нового поколения.

2. Оптимальные параметры соотношений геометрических, механических и конструктивных характеристик железнодорожного пути на стрелочных переводах для выбора параметров по снижению удельных нагрузок на основание плит и основную площадку земляного полотна.

3. Технология технического обслуживания стрелочных переводов нового поколения на железобетонных плитах.

4. Оптимизированная конструкция контррельсов для стрелочных переводов нового поколения.

5. Расчёты для выбора параметров конструкции, обеспечивающей работу стрелочных переводов на железобетонном основании в зимний период.

Степень достоверности результатов обеспечена соответствием используемых методов поставленным задачам, а также сходимостью результатов,

полученных методом моделирования с результатами экспериментальных исследований и практики эксплуатационной работы.

Апробация работы. Материалы, составляющие диссертационную работу, одобрены специалистами на научно-технических совещаниях кафедры «Транспортное строительство» РУТ (МИИТ), а также специалистами в данной области АО «ВНИИЖТ». Основные положения диссертационной работы докладывались на Всероссийских научно-практических конференциях: «Современные и перспективные конструкции железнодорожного пути для различных условий эксплуатации» АО «ВНИИЖТ», «Проблемы проектирования, строительства, диагностики и технического содержания объектов железнодорожного транспорта», «Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта», «Транспортное строительство» РУТ (МИИТ), «Путь XXI века», «Актуальные проблемы развития транспортной инфраструктуры», «История и перспективы развития транспорта на севере России» ПГУПС. На конференции с международным участием: «Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство» РУТ (МИИТ). На международной интернет-конференции «Современные проблемы железнодорожного транспорта» РУТ (МИИТ). На конференции «XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики».

По материалам исследований, представленных в диссертационной работе, получены два патента на полезную модель и один патент на изобретение:

– Патент на полезную модель № 198496 U1 Российская Федерация, МПК E01B 5/18. «Контррельсовый профиль» заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ)).

– Патент на полезную модель № 203554 U1 Российская Федерация, МПК E01B 7/22. «Плитное основание стрелочных переводов» заявитель Федеральное

государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ)).

– Патент № 2789281 С1 Российская Федерация, МПК E01B 27/18, E01B 29/04. «Способ подбивки стрелочного перевода на плитном основании» заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ)).

Результаты исследований. Результаты, изложенные в диссертационной работе, были приняты в качестве варианта для использования при разработке новых стрелочных переводов на АО «Новосибирский стрелочный завод», АО «Муромский стрелочный завод», АО «Мосгипротранс», АО «Росжелдорпроект», ОАО «РЖД».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано: 37 статей, 14 из которых входят в рекомендованный перечень ВАК и 5 – входящие в международную базу цитирования «Scopus» и «Web of Science».

Структура и объём работы. Работа включает в себя введение, 8 глав, заключение, список литературы и приложение. Общий объем составляет 255 страниц, содержит 17 таблиц и 100 рисунков. Список литературы состоит из 122 наименований.

1 МЕТОДЫ И ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЯ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Стрелочные переводы являются важным элементом железнодорожных путей и играют ключевую роль в обеспечении безопасности движения поездов. В связи с развитием технологий и требований к эффективности эксплуатации, проектирование стрелочных переводов нового поколения становится все более актуальным.

Характерные особенности устройства пути в местах, где расположены стрелочные переводы, включают в себя несколько аспектов. Во-первых, это короткие участки пути, которые имеют однородную структуру и протяженность, сопоставимую с длиной экипажей. Второй особенностью является отсутствие переходных кривых на этих участках, а также наличие углов в плане при входе и выходе из стрелочных кривых. Третья особенность – короткие прямые участки между смежными стрелочными кривыми. Кроме того, в стрелочных кривых отсутствует возвышение наружного рельса (хотя иногда может быть и обратное возвышение), а также присутствуют элементы стрелочных переводов, которые резко изменяют направление движения колесных пар и тележек, такие как набегание колес на острия, контррельсы и усовики крестовин. Все эти особенности делают эти участки железнодорожного пути отличными от других участков.

Наличие особенностей приводит к тому, что условия движения по стрелочным кривым и их сочетаниям значительно отличаются от условий движения по кривым на прямых участках пути [1]. В связи с этим возникает необходимость использовать специальные методики для проектирования стрелочных переводов, которые отличаются от методик, применяемых для расчета геометрии пути на прямых участках и станциях [2].

Основной целью проектирования стрелочных переводов и других видов стрелочной продукции является разработка конструкций, которые обеспечивают

выполнение требований безопасности движения, комфортабельности езды пассажиров и надежности функционирования в условиях планируемой системы обслуживания [3].

Проектирование стрелочных переводов является сложной инженерной задачей, требующей использования знаний из различных инженерных наук и опыта проектирования, а также анализа возможностей заводов-изготовителей и инженерных разработок в смежных областях техники.

Перед железнодорожным транспортом стоят задачи комплексного развития и повышения эффективности использования транспортных средств. В настоящее время активно ведутся работы по: созданию конструкций и технологии содержания железнодорожного пути, обеспечивающих наработку 2,5 млрд тонн брутто пропущенного тоннажа, а также конструкций и технологий работы инфраструктуры высокоскоростных железнодорожных магистралей [4]. По-прежнему, уделяется особое внимание оптимизации взаимодействия в системе «колесо-рельс», направленной на повышение несущей способности и эксплуатационного ресурса верхнего строения пути. Ведутся работы по разработке перспективных технологий: ускоренных грузовых перевозок, в том числе контейнерных и контрейлерных, технологий повышения энергоэффективности перевозок. Не остаются без внимания вопросы, связанные с конструкциями и технологиями формирования выделенных пассажирских железнодорожных линий, а также цифровые технологии прогнозирования поездной обстановки при изменении условий пропуска поездопотока (ЭЛЬБРУС-М).

К решению инженерных задач привлечено много организаций и предприятий, среди которых следует отметить: ИЦ ЖТ, ВНИИЖТ, ВНИКТИ, ФГБОУ ВО ПГУПС, РУТ (МИИТ), ПКБ И, БэтЭлТранс, ЕВРАЗ, МСЗ, НСЗ.

Стрелочные переводы представляют собой наиболее сложные и затратные компоненты железнодорожного пути. Каждый год ОАО «РЖД» тратит более 18 млрд рублей на приобретение стрелочной продукции, ее установку и обслуживание.

От надежной работы стрелочных переводов во многом зависит безопасность движения поездов, бесперебойность перевозочного процесса и экономические показатели путевого хозяйства.

На текущее содержание пути выделяется от 10 до 20 процентов всех затрат, а именно на ремонты и стрелочные переводы железных дорог. Ученые и специалисты в нашей стране и за рубежом постоянно работают над исследованиями и разработками, чтобы улучшить эксплуатационные характеристики существующих стрелочных переводов и создать новые конструкции [5].

Высокоскоростная программа ОАО «РЖД», включающая планы по реконструкции более 10 тысяч километров дорог для достижения скоростей пассажирских поездов до 160-200 км/ч, около 1,5 тысячи километров для скоростей до 250 км/ч и строительство новых линий со скоростями до 350-400 км/ч, требует соответствующей подготовки стрелочного хозяйства [6]. Подготовка стрелочного хозяйства, а также других хозяйств инфраструктуры дорог, имеет три основных составляющих. Это подготовка технических средств, разработка нормативно-технической документации и обучение персонала.

Рассмотрим подробно каждую из составляющих.

1 Подготовка технических средств стрелочного хозяйства

1.1 Улучшение конструктивных возможностей по стрелочным переводам массового применения.

Здесь возможны следующие направления разработок:

- модернизация непосредственно в пути эксплуатируемых стрелочных переводов и съездов;
- проведение модернизации стрелочных переводов и съездов, выпускаемых в настоящее время, с целью повышения их надежности и безопасности;
- модернизация в пути стрелочных переводов с целью увеличения скоростей движения по ним;

– организация профильной шлифовки рабочих поверхностей стрелочных переводов в рамках модернизации для снижения динамических эффектов при проходе поездов по ним [6].

Недостатком «модернизационного» подхода к решению проблемы технических средств стрелочного хозяйства является необходимость уделять повышенное внимание эксплуатации модернизированных переводов, поэтому для решения проблемы более эффективным является разработка модельных рядов специальных конструкций, которые будут соответствовать перспективным требованиям эксплуатационной работы [6].

1.2 Разработка новых модельных рядов стрелочной продукции

Рассмотрим проблемы создания модельного ряда для скоростного и высокоскоростного движения. В настоящее время разработаны стрелочные переводы и съезды, предназначенные для скоростей движения до 250 км/ч - это проекты 2956 и 2968. Переводы успешно прошли испытания под воздействием поездов со скоростями движения до 297 км/ч.

Разработка диспетчерских съездов и переводов марки 1/22, способных обеспечить скорость движения до 120 км/ч по ответвлению, уже завершена и успешно освоена в производстве. Без использования таких съездов невозможно гарантировать безопасность и соблюдение графика движения большого числа высокоскоростных поездов.

Для формирования всего модельного ряда необходимо разработать стрелочные переводы марки 1/9 с оптимизированной геометрией, которые позволят принимать высокоскоростные поезда на конечных станциях без необходимости реконструкции горловин [5].

Для линий со скоростями движения до 160 км/ч, на которых планируется движение как пассажирских, так и грузовых тяжеловесных поездов, необходимо установить специальные переводы, которые позволят сочетать эти два вида движения. Из-за высокой интенсивности движения на таких линиях, требуется разработка стрелочных переводов с равноресурсными элементами и нормативным

ресурсом порядка 700 млн т брутто. Уже имеются наработки по таким переводам. Кроме того, вновь проектируемые линии со скоростями движения 350–400 км/ч также потребуют использования специального модельного ряда стрелочных переводов [6].

Минимальный набор стрелочных переводов этого ряда включает переводы и съезды со скоростями движения по основному пути 400 км/ч и 120 км/ч на ответвление, а также переводы со скоростями движения 400 и 80 км/ч (соответственно по основному пути и ответвлению). Для этих стрелочных переводов уже разработаны методы расчета и основные конструктивные схемы. Кроме того, имеется конструкторская документация на стрелочные переводы и съезды марки 1/25 с улучшенными условиями комфортабельности езды для пассажиров [5]. Теперь необходимо изготовить опытные образцы и провести полный цикл испытаний, чтобы эти конструкции могли быть запущены в серийное производство.

1.3 Разработка надежных средств для обеспечения работы стрелочных переводов, средств безопасности и контроля их состояния.

Особенности обслуживания линий требуют создания высоконадежных технических средств, которые обеспечивали бы безопасность и контроль за состоянием конструкций, минимизируя вмешательство людей.

Испытания стрелочных переводов показали, что традиционные схемы и конструкции механизмов не отвечают требованиям высокоскоростного движения и требуют доработки. В настоящее время необходимые конструктивные проработки есть. Это новый способ крепления приводов, привод-шпала, роликовые системы для уменьшения переводных усилий и др. Необходимо изготовить и испытать опытные образцы всех этих компонентов конструкций, доработать их и запустить в серийное производство.

В наших условиях имеет смысл испытать системы гидроприводов и гидравлических переводных устройств, которые становятся все более распространенными на европейских дорогах. Современные внешние замыкатели,

применяемые в стрелочных переводах, можно оценить как удовлетворительные, однако нужно продолжать работать над повышением надежности их отдельных элементов. В настоящее время системы СЦБ, используемые на стрелочных переводах, ограничивают развитие. Для решения этой проблемы необходимо разработать и внедрить микропроцессорные варианты управления системами «многих приводов», иначе использование современных конструкций стрелочных переводов станет сложной задачей.

Необходимо продолжить работы над системами пассивного контроля положения подвижных элементов стрелочных переводов с использованием электромеханических устройств. Мировой опыт показал, что эти устройства являются неотъемлемой частью современных конструкций.

Одним из наиболее сложных условий работы стрелочных переводов являются зимние условия. В настоящее время применяемые устройства электрообогрева являются энергозатратными и ненадежными, однако есть предложения по использованию новых устройств, включая нанотехнологий и инфракрасных излучателей. Эти устройства следует внедрить в конструкцию и провести испытания. На основе результатов испытаний можно будет предложить РЖД перспективные конструкции повышенной надежности.

Один из важных аспектов обеспечения безопасности движения по стрелочным переводам – это обнаружение дефектов в элементах стрелок и крестовин, которые могут возникать в процессе эксплуатации. Учитывая серьезные последствия от схода поездов, необходимо уделить должное внимание разработке технических средств и методик дефектоскопного контроля состояния элементов стрелочных переводов. Особое внимание следует уделить остриям и сердечникам крестовин.

2 Разработка нормативно-технической документации

Необходимо разработать систему и нормативно-техническую документацию для эффективной подготовки стрелочных переводов к эксплуатации. Система должна включать в себя документацию по изготовлению на заводе,

транспортировку перевода и комплектующих, сборку в условиях стационарного места сборки, укладку перевода в путь и подготовку его к передаче эксплуатирующей организации.

2.1 Нормы изготовления и содержания стрелочных переводов

Для улучшения ситуации необходимо установить нормы и правила производства и обслуживания стрелочных переводов, а также улучшить взаимодействие между организациями, занимающимися их изготовлением, подготовкой к эксплуатации и эксплуатацией. Для этого необходимо переработать и структурировать нормативно-техническую документацию.

Необходимо пересмотреть нормы безопасности и методики контроля, которые определяют процесс сертификации производителя стрелочных переводов, чтобы они более точно отражали требования к конечному продукту. Особое внимание следует уделить нормативам по геометрии рельсовой колеи и пересмотреть допуски на изготовление и сборку стрелочных переводов, а также учесть взаимосвязь между допусками на комплектующие - металлические части, элементы креплений и железобетонное основание. При проектировании стрелочных переводов также целесообразно заложить возможность регулировки параметров геометрии рельсовой колеи непосредственно в пути.

В процессе эксплуатации стрелочных переводов неизбежно возникают расстройтва геометрии рельсовой колеи и различные дефекты. Для обеспечения безопасности движения поездов необходимо разработать нормативную базу, которая определит нормы содержания стрелочных переводов и критерии лимитирования условий движения при возникновении дефектов и неисправностей.

Взаимоотношения между производителями и потребителями стрелочных переводов, а также планирование поставок на линии переводов и запасных частей, должны основываться на нормативных сроках службы и гарантийных обязательствах поставщиков.

2.2 Технологии сборки, укладки и обслуживания стрелочных переводов

Как уже отмечалось ранее, существующая система подготовки стрелочных переводов к эксплуатации недостаточно эффективна. Необходимо разработать новую систему и технологию, которые позволят всем участникам процесса производства и поставки комплектующих обеспечивать высокое качество конечной продукции. Есть два возможных варианта решения:

1. Полная сборка и настройка каждого стрелочного перевода на заводе, с последующей маркировкой, разделением на блоки и доставкой на место окончательной сборки (подобная технология используется за рубежом).

2. Разработка новой системы сборки и обслуживания стрелочных переводов, которая будет удовлетворять требованиям конечных потребителей и обеспечивать высокое качество продукции.

Для обеспечения качества конечной сборки переводов и ответственности за их качество целесообразно организовывать подразделения заводов-изготовителей на дорогах. В этом случае наиболее эффективным способом является использование баз ПМС. Организационные формы могут быть различными, включая самостоятельные предприятия, находящиеся в совместной собственности заводов-изготовителей и дороги, или аутсорсинг.

Важной частью обеспечения работы стрелочного хозяйства является система контроля состояния и параметров колеи стрелочных переводов. Необходима система, основанная на автоматизированных технологиях, которая позволит обеспечить эффективное обслуживание стрелочных переводов. Для этого требуются специализированные технические средства, такие как специальные тележки и системы с путеизмерителями. К сожалению, разработка таких систем отечественного производства развивается медленно из-за ограниченного финансирования. В то же время, за рубежом такие системы уже давно являются неотъемлемой частью обслуживания пути.

В процессе эксплуатации стрелочных переводов различные их элементы могут выходить из строя из-за дефектов или других причин. Поэтому необходимы

технологии, позволяющие заменять отказавшие элементы и восстанавливать полные параметры стрелочных переводов после замены.

На данный момент существует инструкция по замене рельсовых элементов сварных стрелочных переводов, которая является инструктивным документом и содержит перечень необходимых действий. Однако, для полноценного обслуживания стрелочных переводов необходимо разработать технологические процессы, которые охватывали бы все элементы переводов.

Стрелочные переводы, их обслуживание и ремонт должны вписываться в общую систему, разработанную для всего пути. В то же время, уникальные особенности конструкции стрелочных переводов требуют дополнительных работ по их обслуживанию и ремонту.

Необходимо переработать порядок и периодичность осмотров и специальных работ на стрелочных переводах.

3 Обучение специалистов и руководителей

Опыт эксплуатации стрелочных переводов и съездов показал, что даже опытные сотрудники путевого хозяйства и службы СЦБ не всегда могут справиться с работой современными техническими средствами. Возникают проблемы в разграничении обязанностей и полномочий между различными службами.

Для решения этой проблемы необходимо организовать систему обучения и переподготовки персонала. Такая система должна включать в себя несколько аспектов:

1. Организационная сторона, включающая способы обучения и взаимодействие между различными организациями.
2. Разработка методической литературы, которая поможет сотрудникам освоить работу со стрелочными переводами и съездами.
3. Проведение практических занятий и тренингов, чтобы сотрудники научились применить полученные знания и навыки.

Только такая комплексная система обучения и переподготовки позволит эффективно решить проблемы, связанные с работой на стрелочных переводах и съездах.

РУТ МИИТ занимается разработкой и улучшением учебной базы для переподготовки специалистов разного уровня. Без хорошо подготовленных специалистов в стрелочном хозяйстве будет сложно обеспечить требования по состоянию стрелочных переводов на высокоскоростных линиях. Поэтому необходимо создать комплексную программу обучения, которая позволит эффективно решать все аспекты, связанные со стрелочным хозяйством. Исключение какой-либо составляющей из этой программы приведет к возникновению проблем, которые могут задержать выполнение высокоскоростной программы ОАО «РЖД» и потребовать дополнительных затрат. При разработке стрелочной продукции необходимо понимать, для каких задач будет использоваться каждый вид стрелочной продукции, и в каких условиях она будет эксплуатироваться. Поэтому требуются исходные данные для создания стрелочного перевода с соответствующими техническими характеристиками, которые полностью удовлетворят условиям эксплуатации.

Следующим этапом следует выбрать метод, который будет использоваться для проектирования. Сегодня наиболее распространены следующие методы: графический, модельно-макетный, макетно-графический и метод, основанный на использовании систем автоматизированного проектирования. Кроме того, необходимо учитывать методы расчета стрелочного перевода, включая математические модели и экспертные оценки.

За долгое время существования российских железных дорог все стрелочные переводы создавались под имевшие место на момент их проектирования условия эксплуатации, зависящие от ряда конкретных условий. Создаваемые стрелочные переводы имеют свою элементную базу, которая позволяет многим элементам стрелочных переводов различных проектов быть взаимозаменяемыми. Это свойство положительно сказывается на подготовке производства, текущем

содержании стрелочных переводов и стрелочном хозяйстве в целом. Унификация производства также позволяет стабилизировать цены на стрелочную продукцию, так как на одной элементной базе создается целый модельный ряд стрелочных переводов.

Модельным рядом стрелочных переводов следует считать набор проектов стрелочных переводов одного поколения, предназначенный для решения определенного круга задач.

Для создания стрелочной продукции необходимо учитывать возможности и мощности производства. Сегодня производители стрелочной продукции имеют на своем вооружении новейшие технологии производства. Для постановки на производство необходимо время для освоения выпуска не только опытных образцов, но и организации серийного выпуска стрелочной продукции.

Необходимо также учитывать предоставления гарантий производителю, что его продукция будет востребована у заказчика, который гарантирует приобретение оговоренного количества стрелочных переводов. Поэтому этот пункт является не мало важным в системе комплекса работ по созданию и применению стрелочной продукции, так как подразумевает существенные, не только экономические, но и временные затраты.

Следующие вопросы, которые необходимо учитывать в процессе разработки, связаны с эксплуатацией стрелочной продукции: замена и укладка стрелочного привода, обслуживание, диагностика, ресурс (надежность), методы ремонта, повторное использование [19].

Замена и укладка стрелочной продукции заслуживает особого внимания, так как в случае использования стрелочного перевода вновь строящейся линии, необходимо заложить его геометрические параметры в разрабатываемый проект. В случае замены эксплуатируемого стрелочного перевода на вновь спроектированный, необходимо учитывать геометрические характеристики эксплуатируемой стрелочной продукции с целью избежания реконструкции

путевого развития или ее минимизации в местах укладки нового стрелочного перевода.

Обслуживание стрелочной продукции безусловно зависит от условий эксплуатации. Если рассматривать высокоскоростные или скоростные стрелочные переводы, то обслуживание должно быть минимальное с минимальным вмешательством обслуживающего персонала. Если рассматривать грузовое движение, то желательно учитывать тот факт, что замена любого элемента стрелочной продукции требует технологических «окон», которые очень трудно организовывать из-за плотности движения. Каждое технологическое «окно» будет включать в себя не только затраты на проведение работ и материалы, но и экономические потери с точки зрения увеличения времени доставки грузов.

Правильная организация диагностики стрелочных переводов играет ключевую роль в обеспечении безопасности и эффективности железнодорожного транспорта. Это позволяет своевременно выявлять дефекты и принимать необходимые меры для продления срока службы элементов стрелочной продукции, своевременно изымать из эксплуатации остродефектные элементы, которые могут привести к крушению и простоям движения на длительный период времени. Важно, чтобы организация диагностики была согласована с организацией перевозочного процесса и учитывала его особенности.

Ресурс стрелочной продукции — это величина, характеризующая запас возможной эффективной работы элементов стрелочной продукции. Более точно, ресурс — время работы стрелочного перевода до достижения им предельного состояния.

Надёжность стрелочной продукции — это способность обеспечивать безопасное и комфортабельное движение по ней подвижного состава с установленными скоростями при существующей системе её содержания и ремонтов в течение установленного срока службы [7].

Эти два понятия между собой очень тесно связаны, и определяют качество стрелочной продукции, которое должно обеспечивать оптимальное соотношение

между требованием безопасной и безотказной работы стрелочного перевода, а также определять его конкурентоспособность.

Стрелочная продукция состоит из элементов, часть которых может быть отремонтирована без изъятия, непосредственно в пути и на путевых ремонтных базах. После пропуска нормативного тоннажа и определенного количества проведенных ремонтов элементов стрелочного перевода, необходимо рассмотреть вопрос о возможности его дальнейшей эксплуатации на малодеятельных участках пути. При правильной организации такой системы это послужит средством ресурсосбережения.

Конструирование стрелочных переводов осуществляется исходя из существующей элементной базы. Элементная база – необходимая основа для создания поколений стрелочных переводов. Она включает в себя: несущие рельсовые элементы, скрепления, основание стрелочных переводов, переводные и замыкающие устройства, привода и системы управления, а также различные комплектующие. Например, наиболее широко распространённый в эксплуатации на российских железных дорогах стрелочный перевод марки 1/11 включает в себя около 2,5 тысяч элементов.

Для решения перспективных задач требуются различные конструкции верхнего строения пути, включая стрелочные переводы. В настоящее время основным стрелочным переводом, предназначенным для эксплуатации в сложных условиях, является стрелочный перевод проекта 2750 с «жесткой» крестовиной. Этот перевод предназначен для работы в условиях высокой нагрузки, выдерживая нагрузки на ось подвижного состава до 24,5 тонн [2].

В целом, переводы данного проекта соответствуют современным требованиям перевозочного процесса, однако, специалисты, занимающиеся обслуживанием пути, выдвигают некоторые претензии и к ним. Основная проблема заключается в относительно низком ресурсе крестовин, а также в нестабильности геометрических параметров рельсовой колеи в процессе эксплуатации.

Стрелочные переводы, предназначенные для грузового движения, должны обладать повышенным нормативным ресурсом не менее 2,5 миллиарда тонн брутто и высокими нагрузками на ось подвижного состава до 27 тонн.

Российские производители стрелочной продукции уже сегодня активно работают над разработкой новых конструкций стрелочных переводов, чтобы обеспечить реализацию будущих проектов. Новосибирский и Муромский стрелочные заводы представляют перспективные разработки, включающие сборные крестовины с уширенной поверхностью литой части усювиков и моноблочные из высокомарганцовистой стали с четырьмя приварными рельсовыми окончаниями. Эти конструкции являются взаимозаменяемыми как с существующими массовыми крестовинами, так и между собой.

Для решения вышеупомянутых задач рекомендуется использование математического моделирования и новых альтернативных материалов для элементов стрелочных переводов.

Математическое моделирование не только экономит время, но и позволяет снизить затраты на дорогостоящие эксперименты, а также сконструировать подходящую и оптимальную конструкцию и отдельные элементы в целом.

Развитие отечественного производства стрелочной продукции имеет ключевое значение для обеспечения российских железных дорог качественной и достаточной продукцией в долгосрочной перспективе. Зарубежные элементы могут быть высокого качества, но их адаптация для использования на российских железных дорогах часто требует полной переделки не только самих элементов, но и всей конструкции, что экономически невыгодно.

1.1 Поколения стрелочных переводов

На российских железных дорогах используется широкий набор стрелочных переводов различных типов и марок [7].

В прошлом веке и в начале настоящего все проекты стрелочных переводов для магистрального железнодорожного транспорта разрабатывались в едином центре - проектном бюро ПТКБ ЦП МПС (в настоящее время - ПКБ И).

Ранее, производители стрелочной продукции не имели собственных проектных подразделений и выпускали переводы только по проектам ПТКБ ЦП. Однако, с появлением рыночной конкуренции они создали свои собственные проектно-конструкторские подразделения. Теперь они разрабатывают и выпускают стрелочные переводы, учитывая особенности своей технологии и понимания потребностей рынка. Именно таким образом появились проекты, включающие в себя аббревиатуры НСЗ (Новосибирский стрелочный завод) и МСЗ (Муромский стрелочный завод) [13].

Название стрелочного перевода, содержащее только тип, марку и аббревиатуру проекта, затрудняет выбор переводов для конкретных условий эксплуатации. Для решения этой проблемы необходимо разработать единую систему обозначений, которая учитывала бы актуальность проекта и его технические данные.

Актуальность стрелочной продукции определяется ее принадлежностью к определенному поколению. Стрелочное хозяйство железных дорог является неотъемлемой частью путевой инфраструктуры и развивается параллельно с ней. Исторически стрелочные переводы, используемые на российских железных дорогах, классифицируются на пять поколений.

Первое поколение стрелочных переводов было разработано для отдельных, несвязанных друг с другом железных дорог в России. Каждая дорога имела свои уникальные конструкции стрелочных переводов, часто заимствованные из опыта зарубежных железнодорожных компаний. Инженеры-путейцы каждой дороги сами разрабатывали проекты. В результате, в то время стрелочная продукция была очень разнообразной: использовались переводы с остряковыми и безостряковыми стрелками, с подвижными и поворотными рамными рельсами, а также безостряковые переводы с направляющими контррельсами [13].

Крестовины варьировались по своей конструкции, иногда имели «экзотический» вид, были стрелочные переводы, в которых использовались поворотные рубки вместо крестовин. Стрелочные переводы изготавливались в дорожных мастерских из рельсового и полосового проката.

Как результат, разные линии имели значительные отличия в конструкции стрелочных переводов, разрешенных скоростях движения, а также требованиях по их содержанию, эксплуатации и подготовке персонала.

В стрелочных переводах второго поколения использовались стрелки с прямыми или криволинейными поворотными острьями, которые крепились шкворневым или аналогичным креплением корневой части. Остряки изготавливались из рельсового проката. В основном использовались сборнорельсовые крестовины, состоящие из элементов, также изготовленных из типового рельсового проката и собранных вместе на специальных лафетах. Стрелочные переводы производились в дорожных мастерских каждой дорогой отдельно. Главным отличием второго поколения стрелочной продукции являлось то, что их параметры были унифицированы для различных дорог и при необходимости они могли использоваться не только на дороге, где были произведены, но и другими дорогами [13].

В связи с резким увеличением объемов перевозок и возникновением сети дорог, потребности в стрелочной продукции для инфраструктуры значительно возросли. Дорожные мастерские не могли справиться с таким объемом производства стрелочных переводов, поэтому появилась необходимость в специализированных предприятиях. Эти предприятия изначально выпускали стрелочные переводы по старым проектам. Однако, благодаря большому объему производства, была возможность разрабатывать специальные комплектующие, применять новые виды проката и специальное литье. Это позволило улучшить эксплуатационные характеристики стрелочных переводов и обновить устаревшие проекты.

Создание специализированных предприятий для производства стрелочной продукции с использованием новых технологических схем позволило организовать эффективное массовое производство. Постепенно переходя от выпуска стрелочных переводов второго поколения к новым проектам, эти заводы смогли удовлетворить возрастающие потребности в перевозках.

В результате возникло третье поколение стрелочной продукции. В конструкцию стрелок были внедрены острия из специального проката низкого профиля, а также удлиненные острия поворотного типа с безшкворневым креплением, что позволило избавиться от необходимости использования специальных лафетов.

Внедрение технологии выпрессовки корня острия привело к значительному упрощению конструкции. Корень острия был соединен с примыкающим рельсом с помощью обычных рельсовых накладок, которые были модифицированы. В результате этого появились гибкие острия, сначала с подстрожкой подошвы в корне, а затем без нее. Также был осуществлен переход от сборнорельсовых крестовин к крестовинам, в которых сердечник с наиболее изношенной частью усювиков изготавливался в виде единой отливки.

Крестовины стрелочных переводов третьего поколения были значительно усовершенствованы за счет использования специальной износостойкой высокомарганцовистой стали для отливки. Это позволило повысить их долговечность. Литейное производство было организовано на самих заводах, производящих стрелочную продукцию. Было достигнуто освоение производства цельнолитых крестовин и первых крестовин с непрерывной поверхностью катания [13].

Благодаря большому модернизационному потенциалу, стрелочные переводы третьего поколения широко применяются на нашей железнодорожной сети и в настоящее время.

Стрелочные переводы четвертого поколения были созданы для обеспечения работы в составе бесстыкового пути на больших участках нашей дорожной сети. В

этих стрелочных переводах рельсовые элементы могут быть сварены между собой и приварены к примыкающим рельсовым плетям, что позволяет им работать как элементам бесстыкового пути [5].

Для обеспечения бесстыкового пути на подходах к стрелочным переводам в горловинах станций были разработаны специальные конструкции – уравнильные стыки. Они позволяют компенсировать воздействие температурных сил от рельсовых плетей. Кроме того, для обеспечения работы стрелочных переводов в бесстыковом пути пришлось существенно изменить их конструкцию и технологию производства. Возникла необходимость в освоении алюминотермитного способа сварки рельсовых элементов стрелочных переводов непосредственно в пути, а также в разработке новых сварочных технологий на заводах-производителях стрелочной продукции [13].

Для реализации задачи по повышению скоростей движения поездов, ОАО «РЖД» были внедрены улучшенные конструкции переводных механизмов, оснащены переводы гибкими удлиненными острьяками и крестовинами с приварными рельсовыми окончаниями, включая моноблочные варианты с четырьмя рельсовыми окончаниями. Кроме того, рабочие и контрольные тяги этих стрелочных переводов были размещены в полых металлических брусках, что облегчает их выправку механизированным способом.

Для модернизации существующей линии Москва – Санкт-Петербург с возможностью достижения скоростей до 200 км/ч необходимо было разработать специальные стрелочные переводы с непрерывной поверхностью катания.

Эти переводы стали основой пятого поколения стрелочной продукции для российских железных дорог. Помимо изменений в конструкции стрелки и крестовины, в скоростные стрелочные переводы были внедрены переводные устройства с внешними замыкателями и фиксаторами, обеспечивающими безопасное движение скоростных поездов и согласованную работу ключевых компонентов на стрелке и крестовине [8].

Дальнейшая модернизация магистрали Москва – Санкт-Петербург для достижения скоростей до 250 км/ч показала, что необходим переход на новые типы стрелочных переводов, которые отличаются от предыдущих моделей. Проектная проработка вопроса обеспечения высоких скоростей движения выявила, что программа высокоскоростного движения не может быть реализована без использования специальных стрелочных переводов. Например, для повышения скоростей с 200 до 250 км/ч на участке Москва – Санкт-Петербург необходимо обеспечить такие стрелочные переводы, которые позволят поезду двигаться по ним со скоростями до 250 км/ч на отдельных участках пути [5, 8].

1.2 Этапы и последовательность разработки стрелочной продукции

Процесс разработки проекта стрелочного перевода представлен на рисунке 1.1.

Первый этап проектирования – формулировка задачи на основе анализа потребностей железных дорог в свойствах новых технических средств. Например, внедрение высокоскоростного движения требует разработки модельного ряда стрелочных переводов и сопутствующих устройств, обеспечивающих безопасное движение поездов с высокой скоростью [16].

Для обеспечения комфортабельности и безопасности проезда по стрелочным переводам необходимо учитывать следующие требования:

- динамико-кинематические требования, чтобы обеспечить пассажирам и грузам комфортабельное перемещение с заданными скоростями;
- качество изготовления стрелочных переводов, чтобы гарантировать их надежную работу в составе железнодорожного пути, включая соответствие свойствам и размерам;
- конструктивная прочность элементов стрелочного перевода, чтобы каждый элемент выдерживал нагрузки и обеспечивал прочность всей конструкции;

– ресурс безопасной работы, чтобы исключить дефекты, которые могут угрожать безопасности движения поездов в течение заданного срока эксплуатации.

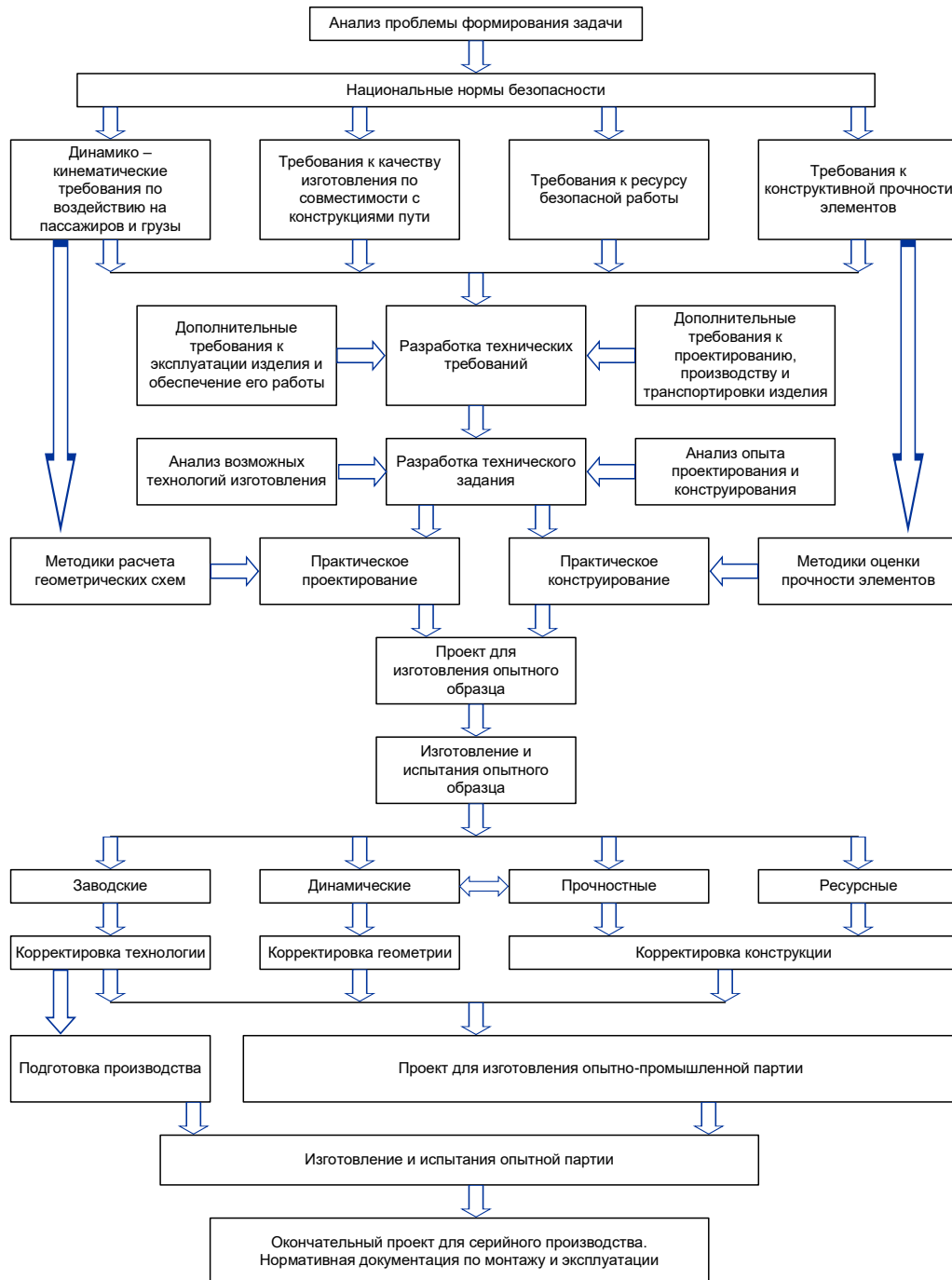


Рисунок 1.1 – Этапы разработки стрелочной продукции

Технические требования к проектируемому стрелочному переводу (ТТ) формируются на основе норм безопасности (НБ) и учитывают дополнительные требования, связанные с процессами проектирования, изготовления, транспортировки, эксплуатации и другими особенностями изделия. Эти

требования направлены на обеспечение конечных качеств и свойств стрелочного перевода [9].

На основе технических требований и с учетом опыта проектирования и технологических возможностей, планируемых изготовителем, разрабатывается техническое задание (ТЗ) для проектов. В рамках этого ТЗ осуществляется проектирование изделия, определяются сроки разработки каждого этапа и планируется производство изделия.

На каждом этапе, предусмотренном ТЗ, проводится практическое проектирование и конструирование каждого элемента. Это включает в себя расчет общих геометрических схем, геометрических схем каждого элемента, форм и уклонов неровностей рабочих поверхностей зон перекачивания элементов конструкции и другие аспекты. При отсутствии методик расчета они создаются в процессе проектирования.

Практическое конструирование – это процесс разработки и создания конструкции элементов, которые соответствуют определенным геометрическим схемам и могут быть изготовлены на заводах с использованием доступных технологий. При этом особое внимание уделяется обеспечению прочности каждого элемента в соответствии с техническими требованиями. Для этого применяются специальные методики расчета и опыт в области конструирования.

После практического проектирования и конструирования, создается конструкторская документация (КД-1), необходимая для производства и испытания опытного образца. В случае сложных конструкций предварительно выполняется макетирование и создание макетного образца.

Опытный образец стрелочного перевода проходит полный цикл испытаний, включающий заводские испытания, проводимые для проверки возможностей завода-изготовителя в соответствии с конструкторской документацией.

Проводятся динамические и прочностные испытания для проверки соответствия проекта и конструкции опытного образца требованиям норм безопасности. Также проводятся ресурсные испытания для оценки

технологических возможностей завода-изготовителя в производстве продукции с требуемой эксплуатационной надежностью. По результатам испытаний корректируется конструкторская документация и готовится производство к выпуску опытно-промышленной партии новых конструкций. Также проводится технологическая подготовка к серийному производству.

После выпуска и испытания опытной или опытно-промышленной партии продукции производится окончательная подготовка производства к выпуску серийной продукции по заказам дорог.

Конструкционные скорости движения по стрелочному переводу, для реализации которых он проектируется, являются исходными данными для его проектирования. Совместно с динамико-кинематическими характеристиками (величинами непогашенного ускорения, скоростью их изменения, параметрами потери кинетической энергии при набегании колес на направляющие элементы стрелочного перевода) они определяют геометрию стрелочного перевода. Как правило, конструкционные скорости, динамико-кинематические характеристики движения по стрелочному переводу, тип рельса, вид подрельсового основания, конструктивные особенности стрелки и крестовины входят в минимальный набор исходных данных, на основании которых может быть начата разработка стрелочного перевода. Порядок расчетов геометрии стрелочных переводов для путей со скоростями движения до 120 км/ч по основному направлению и до 80 км/ч на ответвление подробно описан в технической литературе [1, 17].

1.3 Разработка подхода к проектированию стрелочных переводов для переводов нового поколения

Разработка любой конструкции стрелочного перевода начинается с проектирования его геометрической схемы. Цель этого этапа работы – разработка общей геометрии перевода, удовлетворяющей главным требованиям

перевозочного процесса (обеспечение заданных скоростей движения расчетного экипажа по направлениям, при выполнении требований – к действию результатов этого движения на пассажиров и грузы).

Для решения этой задачи возможно два различных подхода.

В первом, в качестве исходных данных для определения скоростей движения задается набор динамико-кинематических характеристик (ускорения и скорости изменения ускорения расчетного экипажа, параметры потери кинетической энергии движения при взаимодействии экипажа с элементами стрелочного перевода), во втором, исходят из отличия устройства стрелочного перевода от устройства пути на перегонах (лимитирующими параметрами являются недостаток возвышения наружного рельса стрелочной кривой и интенсивность его изменения).

При высоких скоростях движения по прямому направлению стрелочных переводов условия движения определяются плавностью хода экипажей, которая обеспечивается применением конструкций с непрерывной поверхностью катания (должны отсутствовать разрывы рельсовой колеи, вредное пространство крестовин). Геометрия стрелочного перевода должна обеспечивать плавный проход колес через стрелку и крестовину (зоны перекатывания с рамного рельса на остяк и с усовика крестовины на ее сердечник). Помимо этого, должен обеспечиваться плавный отвод изменений геометрии рельсовой колеи в вертикальной и горизонтальной плоскостях в местах конструктивных особенностей стрелочного перевода (укрытие острия остяков и т.д.).

Повышение скоростей движения по ответвленному пути стрелочных переводов до уровня современных скоростных магистралей требует коренной переработки методики проектирования [9]. В первую очередь, это касается вопросов проектирования стрелочных кривых на переводах и их комбинациях – на скоростных съездах. Подход к проектированию здесь существенным образом отличается от подходов к проектированию обычных стрелочных кривых, так как стрелочные кривые скоростных конструкций имеют особенности, связанные с

высокими градиентами изменения кривизны в начале и в конце перевода [10, 14, 15].

При движении подвижного состава по ответвленному пути стрелочного перевода с высокой скоростью экипажи проходят этот перевод всего за несколько секунд. Из-за инерционных свойств время, в течение которого силы воздействуют на пассажиров или грузы, очень мало. Поэтому результаты воздействия в значительной степени зависят от скорости изменения действующих сил. Эта скорость изменения характеризуется величинами производных, относящихся к перемещению и имеющих более высокий порядок, чем вторая производная, которая оценивается по действующим ускорениям [10, 11, 14, 15].

1.4 Выбор концепции проектирования

1.4.1 Проектирование стрелочных кривых, исходя из нормирования некомпенсированного ускорения

При движении по кривым возникает центробежное ускорение, которое зависит от скорости и радиуса кривой [11]. Чтобы компенсировать действие этого ускорения на движущийся по кривой экипаж, наружный рельс в кривых поднимают, устраивая его возвышение над внутренним. В стрелочных кривых по конструктивным соображениям устроить возвышение наружного рельса не получается.

Национальное общество французских железных дорог рекомендует определять радиус кривой исходя из нормирования недостатка возвышения [10, 12]. Исходя из этой величины, радиус кривой можно определить по выражению:

$$R_0 = \frac{12,5v_{\max}^2}{H}, \quad (1.1)$$

где v_{\max} – максимальная скорость движения;

H – допустимая величина недостатка возвышения.

Конструкция таких стрелочных кривых следующая.

Классический высокоскоростной съезд французских железных дорог устроен следующим образом.

Вход на стрелочную кривую, в пределах зоны набегания колес на остряк, выполняется постоянным радиусом, определяемым по формуле (1.1). За пределами зоны набегания колес на криволинейный остряк, радиус стрелочной кривой плавно увеличивается до величины $R=\infty$ в середине съезда. Прямая вставка не устраивается. Отвод, как правило, производится с изменением кривизны по клотоиде.

Интенсивность отвода эквивалентна интенсивности отвода возвышения наружного рельса. На линиях Национального общества французских железных дорог принята величина изменения недостатка возвышения от времени или скорости подъема колес на возвышение $\Delta i / \Delta t = 30$ мм/с. Исходя из допускаемой величины этого показателя, длина отвода определяется по формуле:

$$L = H v_{\max} / (\Delta i / \Delta t). \quad (1.2)$$

1.4.2 Проектирование стрелочных кривых, исходя из анализа изменения кинематических параметров движущегося экипажа

При высоких скоростях движения динамические параметры взаимодействия пути и экипажа пропорциональны второй и третьей производным вектора перемещения. Поэтому в стрелочных кривых, характеризующихся высокими градиентами изменения кривизны, рассматриваемые ранее расчетные формулы и предельные значения дают большую погрешность.

При исследовании кинематики движения со скоростями более 50 км/ч, \vec{h} - вектор является определяющим (для стрелочных переводов).

Если считать заданную в естественных координатах скорость движения (вдоль кривой) постоянной, и не рассматривать касательную составляющую вектора ускорения, то для расчетов движения следует применять формулы (1.3) – (1.6).

При постоянной скорости движения вдоль кривой касательная составляющая вектора ускорения $a_\tau = 0$, тогда

$$h = v^3 \frac{dq}{dl}. \quad (1.3)$$

Если рассматривать движение не точки, а экипажа с базой d , то при входе с прямой в кривую, получим

$$\Delta q = \frac{1}{R} - \frac{1}{\infty} = \frac{1}{R}, \quad (1.4)$$

$$\frac{\Delta q}{\Delta l} = \frac{1}{R} / d = \frac{1}{Rd}, \quad (1.5)$$

тогда с учетом (1.3), получим

$$h = \frac{v^3}{Rd}. \quad (1.6)$$

В принципе эти соотношения позволяют проектировать кривизну стрелочной кривой по нормируемой величине модуля вектора ускорения (1.3) и соответствует движению по стрелочной кривой точечного экипажа, поэтому при практическом определении параметров, нужно исходить из того, что элементом, воспринимающим закругления пути, является база экипажа.

Формула (1.6) дает возможность определить начальный радиус остряков и совместно с (1.3) произвести подбор стрелочной кривой. Однако, анализ практических реализаций этой методики показывает, что она обладает рядом недостатков, которые целесообразно учесть при детальной отработке метода проектирования.

Так, при практическом анализе входа на стрелку, в расчет наибольшего допускаемого угла удара (угла набегания колеса на остряк) вводятся следующие допущения:

$$k \approx \frac{\tau}{d}, \quad \frac{dk}{dl} \approx \frac{\Delta k}{\Delta l} \approx \frac{\tau}{d^2}, \quad (1.7)$$

где τ – угол удара в остряк.

В результате соотношение (1.6) приобретает вид:

$$h \approx v^3 \frac{\tau}{d^2}. \quad (1.8)$$

Из этого соотношения находится наибольший допустимый угол удара в остряк. Если произвести обратный анализ соотношений (1.7) и (1.8), то легко видеть, что $\frac{\tau}{d^2}$ представляет, как среднее изменение кривизны острия за время, за которое база экипажа устанавливается на стрелочной кривой [10, 20]. При этом возможны два случая:

1. Если считать, что угол τ это наибольший возможный угол удара, то y – максимальный расчетный зазор между колесом, набегаящим на упорную нить стрелочной кривой, и рельсом при входе на стрелку. Для колеи 1520 мм расчетный зазор составляет 30 мм. То есть расстояние от начала стрелочной кривой до сечения острия с шириной головки 30 мм соизмеримо с длиной базы расчетного экипажа уже при радиусах 1600 м и более. При базе порядка 17 м длины остриев, рассчитанные исходя из этого, получаются существенно большими, чем длина стандартного рельса. Стрелочные переводы получаются неэкономичными, требуется специальная технология их изготовления [10].

2. Если же рассматривать угол τ просто, как угол поворота стрелочной кривой до места установки на ней базы экипажа (участок нестационарного движения), то, например, для скорости 120 км/ч величина y превышает 50 мм. Точка набегания колеса на упорную нить уже не может быть местом удара колес в остряк. То есть угол τ в этом случае уже нельзя идентифицировать с углом удара

– смысл нормирования динамики входа на стрелку по углу удара в данной методике теряется [10].

Важнейшим фактором является также то, что траектория движения базы экипажа при входе на стрелку может быть различной. Причем, при входе на стрелочную кривую задний (по ходу экипажа) конец жесткой базы может смещаться в зависимости от конкретных отношений размеров и скорости движения, как в сторону рамного рельса, так и от него [10].

Кроме того, если даже отвлечься от приведенных выше выкладок, сам принцип осреднения условий входа на стрелку и лимитирование этих условий осредненным или интегральным показателем практически исключает из рассмотрения геометрию остряка в местах, где происходят удары в него колес подвижного состава, то есть в самой ответственной его части [10].

Теоретический анализ кинематики движения базы экипажа после набегания его на остряк возможен, однако, следует иметь в виду, что фактическое движение экипажа зависит еще и от силового взаимодействия с путем и соседними по поезду экипажами, поэтому необходимо иметь систему требований, лимитирующих геометрию остряков в зоне, предшествующей входу базы экипажа на стрелочную кривую [10].

Исходя из этих соображений, целесообразно при проектировании остряков для скоростных съездов сохранить принятое в России нормирование величин внезапно появляющегося ускорения при набегании экипажа на остряк, дополнив этим показателем критерии проектирования по \vec{h} -вектору. Это позволит контролировать геометрию остряка на участке от острия до сечения 30 мм (то есть в наиболее ослабленной его части) [10].

Имеет смысл использовать также контроль средней скорости нарастания ускорения на участке входа базы экипажа в стрелочную кривую, принятый за рубежом [10].

Спроектированные таким образом остряки будут одновременно удовлетворять всем требованиям российских и зарубежных методик проектирования [10, 14, 15].

Кроме требований кинематики и динамики, геометрия остряков должна обеспечивать возможность их изготовления при минимальных дополнительных затратах на реконструкцию оборудования заводов-изготовителей стрелочных переводов и металлургических предприятий, изготавливающих остряковые спецпрофили. Выполнение этих требований достигается применением различных конструктивных решений [10].

В применяемых в настоящее время стрелочных переводах используются разные варианты геометрии остряков. Наиболее распространены остряки, выполненные по одной из следующих схем:

- остряки с постоянной или скачкообразной изменяющейся кривизной, однорадиусные, двухрадиусные;
- клотоидные с увеличением кривизны, с уменьшением кривизны;
- комбинированные;
- остряки в виде комбинации клотоиды и круговой кривой с увеличением кривизны или с уменьшением кривизны;
- остряки с косинусоидальным изменением кривизны с нулевой начальной кривизной или с ненулевой начальной кривизной.

Каждый из названных видов остряков может быть выполнен по касательной или секущей схеме. Кроме того, для каждого вида возможны различные подвиды, связанные с оформлением практического остряка остряка.

Выполнение динамико-кинематических требований можно обеспечить применением практически всех названных схем, поэтому в процессе проектирования стрелочного съезда должны быть рассмотрены и сопоставлены конструктивные решения всех этих видов. Задача состоит в выборе оптимального варианта конструктивного решения.

Большинство из возможных видов стрелочных кривых реализовано в конструкциях, применяемых или применявшихся на дорогах мира. Используя эти кривые совместно с вариантами геометрии остряков, описанными выше, можно получить несколько десятков видов кривых для стрелочных переводов и съездов. Наилучшим вариантом является тот, который при выполнении всех условий обеспечивает минимальные длину и стоимость съезда [18].

В качестве примера, рассмотрим проектирование стрелочной кривой для перевода и для съезда, обеспечивающего движение на ответвленное направление со скоростями 120 км/ч (такая задача стоит в связи с проектированием ВСЖМ-1).

При проектировании остряков для скоростных стрелочных переводов, где скорость движения на ответвленный путь превышает 100 км/ч, важным фактором является то, что вход экипажа на стрелочную кривую полностью осуществляется в пределах остряка. Поэтому проектирование стрелочной кривой на остряке можно производить отдельно.

Выбор величин предельных значений ограничений определяет качество технического решения. В России опыт проектирования стрелочных переводов со скоростями свыше 100 км/ч на ответвленное направление ограничен. В связи с этим, критерии и параметры, определяющие ограничения, следует выбирать опираясь на советский и зарубежный опыт проектирования.

Величины внезапно появляющегося ускорения и предельного ускорения следует принимать на основании имеющегося в нашей стране опыта проектирования [10, 11].

Наибольшая величина скорости изменения ускорения для зарубежных конструкций при скорости движения 120–130 км/ч составляет 0,85–1,24 м/с³. По решению научно-технического совета ОАО «РЖД» в последней версии исходных данных для высокоскоростных стрелочных переводов, эта величина принята - 0,75 м/с³ [10].

Такой величиной рекомендуется ограничивать скорость нарастания ускорения в начале и в конце клотоидных участков стрелочной кривой и на участке входа экипажа в стрелочную кривую [10].

Стрелочная кривая за корнем острьяка продолжает собой кривую в пределах острьяка. Ее параметры определяются значением нормируемой скорости нарастания ускорения и предельным значением установившегося ускорения. После достижения предельного значения ускорения (установившегося) кривая имеет участок постоянной кривизны (он может отсутствовать). Прилегающие к нему участки имеют переменную кривизну, зависящую, как уже указывалось, от скорости нарастания ускорения. Затем, следует участок кривой, обеспечивающий симметричные, или не хуже, условия входа в кривую, чем на стрелке. После этого в пределах полусъезда располагается прямая вставка (ее также может не быть), сопрягающая смежные стрелочные переводы съезда [10].

Поскольку возможны различные комбинации сочетаний участков, составляющих съезд, то задача проектирования стрелочной кривой вне острьяка также представляет собой оптимизационную задачу [10].

1.4.3 Сопоставление методик и окончательный выбор концепции проектирования

Для решения вопроса выбора концепции проектирования были выполнены сравнительные расчеты стрелочных кривых и съездов по концепции некомпенсированного ускорения и по концепции \vec{h} -вектора для скорости движения на ответвленное направление 120 км/ч.

Результаты расчетов для скорости движения на ответвленное направление 120 км/ч и ширине междупутья 4,5 м представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Показатели по вариантам скоростного съезда (междупутье 4,5 м, $V = 120$ км/ч)

№ п/п	Показатель	Ед. изм.	Концепция некомпенсированного ускорения	Концепция \vec{h} -вектора
1	Идея проекта	-	Недостающее возвышение наружной нити и его «отвод» нормируются	Наибольшее ускорение и скорость его нарастания нормируются
2	Прототипы	-	Французский перевод для скорости на боковой путь $V = 220$ км/ч	Переводы ФРГ, Австрии, Швейцарии, Венгрии и др. для $V = 120-160$ км/ч
3	Схема съезда, (кривизна упорной нити)	-	Сопряженные клотоиды	Клотоиды и круговые кривые
4	Теоретическая длина съезда	м	220	172
5	Длина остряка	м	19,8	21
6	Место возникновения наибольшего бокового ускорения	-	Вход на стрелку	Середина переводной кривой
7	Показатель потери кинетической энергии	м/с	0,266	0,225
8	Угол удара в остряк	рад.	0,0067	0,0067
9	Марка съезда	-	1/34	1/22
10	Сочетание переводов в съезде	-	Прямая вставка отсутствует	Прямая вставка 26,5 м
11	Внезапно появляющееся ускорение при входе на стрелку	м/с ²	0,51	0,40
12	Радиус входа на стрелку	м	2200	2800
13	Минимальный радиус	м	2200	1600

Как видно из данных, приведенных в таблице 1.1, предпочтительным является проект, исходящий из концепции нормирования \vec{h} -вектора. Стрелочные съезды и переводы, спроектированные по данной методике, имеют лучшие динамико-кинематические показатели и значительно экономичнее, чем полученные исходя из концепции некомпенсированного ускорения. Длина съезда, спроектированного по концепции нормирования \vec{h} -вектора короче, чем по концепции некомпенсированного ускорения. Недостатком является то, что длина остряка у этого проекта несколько больше (на 1,2 м), однако, это компенсируется значительным уменьшением угла крестовины (марки 1/22 вместо 1/34), что уменьшает ее длину и значительно упрощает конструкцию гибкого подвижного сердечника и крестовины в целом.

Важным фактором является также то, что наибольшее воздействие на пассажира возникает не сразу в момент входа экипажа на стрелку, а постепенно нарастает по мере движения к середине стрелочной кривой.

Здесь следует отметить, что недостатком данного варианта является относительно малое время между возникновением максимумов двух разнонаправленных воздействий (в 2 раза меньше, чем у варианта спроектированного, исходя из концепции нескомпенсированного ускорения). Тем не менее, этот параметр не превышает аналогичный для стрелочных переводов и съездов, применяемых на дорогах большинства стран Европы, для скоростей до 160 км/ч на ответвленное направление.

В целом, анализ данных таблицы 1.1 говорит о безусловном преимуществе концепции проектирования, опирающейся на нормирование кинематических параметров до третьего порядка от вектора перемещения.

Эту концепцию следует принять для проектирования геометрии стрелочных переводов нового поколения.

Выводы по главе 1

1. Актуальность стрелочной продукции определяется принадлежностью к определенному поколению, что в значительной мере влияет на ее востребованность.

2. После сравнения различных методик проектирования, таких как проектирование стрелочных кривых на основе нормирования нескомпенсированного ускорения и проектирование стрелочных кривых на основе анализа изменения кинематических параметров движущегося экипажа, была выбрана концепция проектирования, которая основывается на нормировании кинематических параметров до третьего порядка от вектора перемещения.

2 МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ

Важнейшим фактором, определяющим способность стрелочного перевода выполнять эксплуатационную работу с требуемыми параметрами перевозочного процесса, является состояние геометрии его рельсовой колеи. Нормативы параметров геометрии рельсовой колеи определяются конструкторской документацией на перевод (Руководством по эксплуатации) и нормативными документами эксплуатационной работы (ПТЭ и Инструкцией по текущему содержанию пути).

Фактическое состояние геометрии рельсов на стрелочных переводах в процессе эксплуатационной работы может отличаться от нормативного. Для оценки фактического состояния геометрии рельсов на стрелочных переводах были проведены специальные исследования.

2.1 Мониторинг геометрии рельсовой колеи стрелочных переводов и взаимного положения их элементов

Обследования состояния стрелочных переводов проводились на Московской и Октябрьской железных дорогах. Объектами исследования являлись стрелочные переводы, эксплуатируемые в главных и приемоотправочных путях, по которым не установлено каких-либо ограничений перевозочного процесса.

Обследовались стрелочные переводы: новые и с износом рельсовых элементов до 2 мм; стрелочные переводы с износом рельсовых элементов более 2 мм; переводы с износом рельсовых элементов, близким к предельно допустимым в соответствии с Инструкцией по текущему содержанию пути, утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 14 ноября 2016 г. № 2288р.

Всего были обследованы 162 стрелочных перевода, причем 102 стрелочных перевода обследовались дважды с промежутком 6–9 месяцев. Число обследованных стрелочных переводов определено статистической достаточностью для получения достоверных данных исследуемых распределений размеров (по результатам обработки данных данной работы, это число составляет от 87 до 101 стрелочных переводов, в зависимости от исследуемого параметра).

Таким образом, всего были обмерены и обследованы 162 стрелочных перевода при минимально необходимом количестве 150 стрелочных переводов. Цель обследования – проверить стабильность статистических характеристик параметров рельсовой колеи в эксплуатации.

Согласно методике, измерялись параметры рельсовой колеи во всех сечениях, лимитируемых Инструкцией по текущему содержанию пути: – ширина рельсовой колеи в стыках рамных рельсов; – ширина рельсовой колеи в острие остряков; – ширина рельсовой колеи в конце строжки остряков по прямому и боковому пути; – ширина рельсовой колеи в корне остряков по прямому и боковому пути; – ширина рельсовой колеи в соединительной части стрелочного перевода по прямому и боковому пути; – ширина рельсовой колеи на входе, в сечении сердечника 40 мм и на выходе крестовины по прямому и боковому пути; – размер желоба отведенного остряка по прямому и боковому пути; – размер желобов контррельсов на входах (раструбах), отгибах и в средней части; – размер желоба крестовины в горле, сечении 20 мм и 50 мм по прямому и боковому пути, на отгибах и входах (со стороны хвостовой части крестовины) усовиков; – расстояние между контррельсом и «нерабочим» усовиком крестовины (как разность между шириной колеи и размером желобов крестовины и контррельса в соответствующем сечении); – расстояние между контррельсом и сердечником крестовины (как разность между шириной колеи и размером желоба контррельса в соответствующем сечении) [21].

2.2 Анализ результатов мониторинга геометрии рельсовой колеи стрелочных переводов

Первичные материалы о техническом состоянии стрелочных переводов в эксплуатации обрабатывались с применением методов математической статистики. Для каждого параметра рельсов на стрелочном переводе определяли распределение значений и строили по нему гистограмму. Анализировались следующие параметры распределения: среднее значение (математическое ожидание), среднеквадратическое отклонение (дисперсия значений), максимальное и минимальное вероятные значения ($P = 0,996$), максимальное и минимальное значения, реально выявленные при проведении обмеров.

Помимо обработки конкретно измеренных параметров производилась обработка их комбинаций, используемых при оценке условий прохода колесных пар по стрелочным переводам. При этом составлялись распределения сумм и разностей значений по каждому замеру (размеры T и E) на каждом стрелочном переводе, то есть в каждом случае вначале определялась величина, а затем производилась статистическая обработка данных по этой величине. Статистические параметры отдельных распределений величин для суммирования не использовались. Кроме непосредственного использования результатов для статистической обработки, результаты обмеров могут быть использованы для оценки соответствия фактического состояния стрелочных переводов в пути требованиям нормативной документации [3, 7].

Полученный результат показывает, что, в основном, состояние геометрии рельсовой колеи на стрелочных переводах находится в пределах величин, не требующих введения ограничений перевозочного процесса, однако, имеются отступления от допускаемых нормативной документацией значений практически по каждому из параметров (до 20 %) в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения.

Учитывая, что нормативные значения параметров рельсовой колеи назначены из условий недопущения неблагоприятных явлений при наложении случаев совпадения предельных сочетаний состояния геометрии рельсовой колеи и геометрии колесных пар, при таких случаях могут возникать расстройтва состояния стрелочных переводов (вплоть до недопустимых) и, даже, возможность угрозы безопасности движения поездов [1].

Особенно это усугубляется случаями ненормативного состояния подвижного состава, которые, как показывают массовые обследования, выполненные специалистами АО «ВНИИЖТ», имеют место на дорогах. В частности, к наиболее опасным состояниям колесного парка следует отнести остроконечный накат на гребнях колес и нарушение требований по предельной величине наклона, образующей гребня, возникающее при больших их износах.

Основной причиной появления сверхнормативных отклонений состояния геометрии рельсовой колеи на стрелочных переводах является повышенное воздействие подвижного состава.

Современные конструкции стрелочных переводов на железобетонном основании имеют незначительные возможности для регулировки параметров геометрии рельсов при их расстройтвах в процессе эксплуатации. Это снижает общий ресурс стрелочных переводов и требует повышенных затрат на их обслуживание. При больших величинах расстройств (и невозможности их ликвидировать) приходится лимитировать перевозочный процесс, за счет установления ограничения скоростей движения поездов по направлению, на котором расположен стрелочный перевод.

2.3 Анализ результатов мониторинга геометрии рабочих поверхностей элементов стрелочных переводов

Помимо параметров рельсовой колеи важное влияние на безопасность прохода подвижного состава по стрелочному переводу имеют формы рабочих поверхностей (новых и изношенных) рельсов, расположенных на стрелочном переводе.

Формы поверхностей стрелочных переводов в процессе износа претерпевают значительные изменения. Вместе с этими изменениями меняются условия контактирования колес и рельсов и соответственно условия обеспечения безопасности движения экипажей по стрелочному переводу. Особое значение имеет геометрия рабочих поверхностей рельсовых элементов в местах, где возможно вкатывание колес на рельс с последующим сходом колесной пары с рельсов [22, 23].

Геометрия рабочих поверхностей рельсовых элементов стрелочных переводов в местах возможного вкатывания на них колес исследовалась с помощью профилографов. Характерный вид профилограмм рамных рельсов в наиболее опасном сечении (острие остряка) представлен на рисунках 2.1 и 2.2.

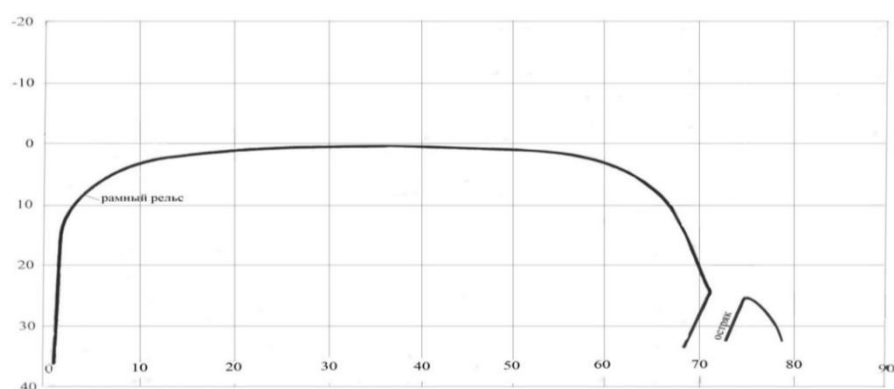


Рисунок 2.1 – Профилограмма остряка и рамного рельса в зоне остряка остряка (износ рамного рельса 1,2 мм, неприлегание остряка 3,8 мм)

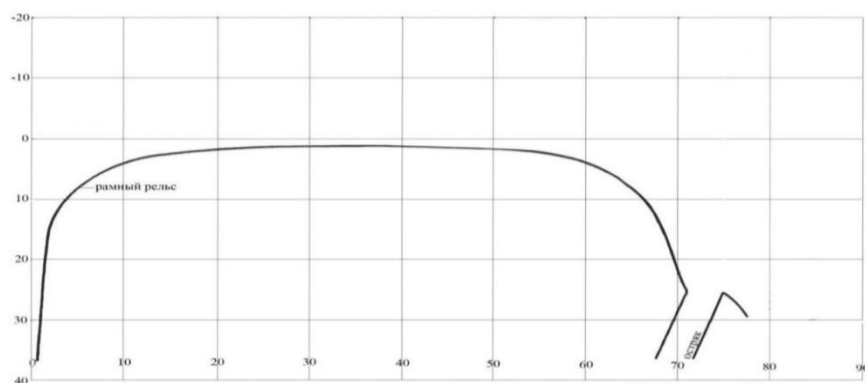


Рисунок 2.2 – Профилограмма остряка и рамного рельса в зоне остряка остряка (износ рамного рельса 2,5 мм, неприлегание остряка 3,5 мм)

Для того чтобы колесо не вкатывалось на остряк, необходимо чтобы оно одновременно касалось рабочей поверхности рамного рельса и остряка остряка. Поэтому угол наклона гребня колеса должен быть меньше угла наклона касательной к рабочей поверхности рамного рельса, проходящей через вершину остряка в его острие. В процессе работы стрелочного перевода в пути наклон этой линии для пары «остряк - рамный рельс» может меняться, так как происходит износ рельсов, что изменяет их взаимное положение с остряками. В таблице 2.1 приведены результаты обработки профилограмм рамных рельсов и остряков, полученные по результатам обмеров.

Таблица 2.1 – Углы наклона линии, проходящей через вершину головки остряка и касательной к поверхности катания на рамном рельсе

Неприлегание остряка к рамному рельсу, мм	Угол наклона в градусах при боковом износе рамного рельса, мм				
	0	2	4	6	8
0	90	90	90	90	90
2	90	90	84	65	59
4*	85	76	65	59	54
6*	75	66	60	54	49
8*	67	60	55	50	45

* - Не допускается отставание остряка от рамного рельса строганной частью, измеряемое против второй соединительной тяги более 4 мм,

- при просвете от 4-6 мм включительно скорость ограничивается 50 км/ч,
- от 6-8 мм ограничивается скорость 25 км/ч,
- при 8-10 мм включительно ограничение скорости 15 км/ч,
- более 10 мм движение закрывается.

При вычислении приведенных в таблице 2.1 углов наклона использовались средние величины, характеризующие форму поверхностей катания изношенных рамных рельсов, по результатам обмеров [24, 25].

Представленные в таблице 2.1 данные показывают, что при увеличении бокового износа угол между боковой рабочей поверхностью рамного рельса и острием остряка резко уменьшается. При неприлегании остряка 4 мм (нормативная величина) и боковом износе рамного рельса, равного 8 мм, он составляет 54° , а при боковом износе рамного рельса 6 мм – 59° . Этой же величине угла наклона соответствует сочетание бокового износа рамного рельса 8 мм и неприлегание остряка 2 мм или же бокового износа рамного рельса 4 мм и неприлегания остряка 6 мм.

При допустимых значениях бокового износа рамного рельса в 6 мм и неприлегания остряка к рамному рельсу в 4 мм, угол наклона касательной к выкружке головки рамного рельса и головки остряка, равный 60 градусам, следует использовать в качестве контрольного значения для проверки положения головки остряка относительно рамного рельса при текущем содержании стрелочных переводов. Этот угол контролируется с помощью специального шаблона КОР.

По результатам обработки профилограмм изношенных рамных рельсов следует отметить, что при преимущественном боковом износе рамного рельса, вертикальный износ не превышает 3–4 мм. Если при этом развивается еще и вертикальный износ более 4 мм, значения полученных углов будут отличаться от углов, приведенных в таблице 2.1, в сторону уменьшения, однако уменьшение не значительно. Так при боковом износе рамного рельса 6 мм и вертикальном его износе 8 мм и неприлегании остряка 4 мм, угол наклона с 59° уменьшится до 56° .

Полученные результаты показывают, что наибольшую опасность, с точки зрения возможности попадания колес на остряк, представляют колеса, у которых угол наклона образующей гребня колеса больше, чем проанализированный выше угол наклона боковой изношенной грани рамного рельса. В этом случае гребень колеса контактирует только с краем боковой поверхности рамного рельса, и в

случае опирания (контакта) вершиной гребня колеса на головку остряка вся вертикальная нагрузка будет передаваться только на головку остряка, что вызовет наезд колеса на остряк. Ситуация усугубляется, если в зоне расположения вершины гребня колеса на нем имеется остроконечный накат.

Выводы по главе 2

1. Проведенный анализ результатов позволяет сделать вывод, что состояние параметров рельсовой колеи на стрелочных переводах на всем пути соответствует требованиям перевозочного процесса и гарантирует безопасность движения поездов при текущей системе содержания пути.

2. Отклонения от нормативных размеров происходят из-за интенсивного давления движущегося состава на стрелочные переводы. Эти отклонения связаны с недостатками в системе крепления металлических частей стрелочных переводов к основанию рельсов и сложностью их настройки.

3. При проектировании нового поколения стрелочных переводов рекомендуется использовать подрельсовое основание, обеспечивающее меньшие деформации рельсовой колеи. Кроме того, необходимо предусмотреть систему крепления, которая облегчит регулировку параметров рельсовой колеи на стрелочном переводе. Таким видом основания является подрельсовое основание, выполненное в виде плит.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ДИНАМИКО-ПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ

В процессе разработки и постановки на производство стрелочный перевод проходит в обязательном порядке различные испытания. Цель каждого вида испытаний определяется их местом в последовательности работ по созданию стрелочного перевода.

Поскольку стрелочный перевод является техническим средством инфраструктуры, то основным показателем, характеризующим его работоспособность и качество, является способность обеспечивать требуемые параметры перевозочного процесса. Наиболее важные из них — это безопасность движения подвижного состава с заданными нагрузками и скоростями, заложенными в проект при расчете и проектировании данного перевода.

Проверяются эти показатели с помощью динамико-прочностных испытаний стрелочного перевода, которые входят неотъемлемой частью в систему разработки и постановки на производство стрелочной продукции.

Соответствие стрелочного перевода требуемым параметрам определяется с помощью специальных критериев.

3.1 Критерии оценки прочности, деформативности и устойчивости стрелочного перевода

Оценка стрелочного перевода основывается на критериях прочности его элементов, которые являются наиболее важными. Для обеспечения безопасности прочностные параметры конструкции стрелочного перевода должны соответствовать нормам. Для сопоставления с этими критериями прочности анализируются напряжения в кромках подошвы рельсовых элементов в наиболее нагруженных сечениях стрелочного перевода [27].

Величины напряжений не должны превышать величин, приведенных в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Допускаемые напряжения в основных элементах стрелочного перевода

№ п/п	Элемент стрелочного перевода	Допускаемые напряжения, МПа
1	Рамный рельс	240
2	Остряк	275
3	Соединительная тяга	125
4	Рельс соединительного пути	240
5	Рельс крестовины	240
6	Крестовина (литая часть)	110
7	Крестовина (рельсовые окончания)	240
8	Контррельс	330

Проверка соблюдения требований к прочности имеет важное значение на практике, так как это гарантирует безопасность и длительный срок службы технических устройств, однако, в реальных условиях не всегда удается полностью соблюдать эти требования. Проведенные специальные исследования, в которых использовался подвижной состав с отклонениями от нормы (полученный из эксплуатации), показали, что такое состояние приводит к превышению допустимых значений напряжений в элементах стрелочного перевода [1].

Критериальные значения напряжений в элементах стрелочного перевода представляют собой значения напряжений, которые они могут выдерживать при многократном нагружении. При однократном превышении этих значений обычно не происходит немедленного отказа, однако, если допустимые напряжения превышены, это может привести к нарушению геометрии рельсовой колеи или снижению ресурса элементов перевода, а также представлять угрозу для безопасности движения поездов.

Деформации и перемещения рельсовых элементов под нагрузкой поезда включают упругие и остаточные вертикальные и горизонтальные перемещения.

Остаточные деформации являются недопустимыми. Упругие деформации, такие как изменение ширины рельсовой колеи, размеров желобов и динамики

взаимного положения остряка и рамного рельса, положения стрелочной кривой и других параметров на стрелочных переводах, в настоящее время не регламентируются нормами безопасности, однако, они имеют важное значение, так как позволяют оценить возможность возникновения условий для вкатывания колес на рельсовые элементы стрелочного перевода или неправильного их движения, что может привести к сходу подвижного состава. Например, анализ изменения взаимного положения остряка остряка и рамного рельса при движении поезда позволяет оценить вероятность вкатывания колеса с неблагоприятной формой износа на остряк [1, 28].

В процессе испытаний измеренные деформации сравниваются с предыдущими данными. Это позволяет оценить, насколько конструктивные решения способны обеспечить долговременную стабильность рельсовой колеи и регламентируемое положение элементов перевода. Данные о перемещениях и деформациях из испытаний являются дополнительными параметрами, которые характеризуют работу конструкции в целом и ее возможность длительной эксплуатации при условии существующей системы обслуживания [29].

Критерий запаса устойчивости против схода колесной пары с рельсов является важным параметром. Он определяется по величинам вертикальных и горизонтальных поперечных сил, передаваемых колесами подвижного состава на рельсовые элементы стрелочного перевода. Эти данные позволяют оценить устойчивость колесной пары и возможность ее вкатывания на остряк, рельсовый элемент или сердечник крестовины. Для измерения вертикальных и горизонтальных поперечных сил используются различные методы, включая «метод Шлупфа», который основан на размещении датчиков на шейке рельса, а также тензометрическую колесную пару.

Из-за больших градиентов изменений силового взаимодействия на стрелочных переводах использование этих методик ограничено. Для определения вертикальных и боковых сил, действующих на элементы стрелочного перевода со стороны колес подвижного состава, применяются системы датчиков, аналогичные

методу Шлупфа. Однако, эти датчики располагаются в определенных сечениях, где силовое воздействие колес проявляется в наибольшей степени. Расположение измерительных схем определяется на начальных этапах испытаний и может значительно изменяться в зависимости от конструкции стрелочного перевода, его расположения на пути и условий движения конкретных экипажей.

При этом необходимо обеспечить, чтобы наибольшие горизонтальные поперечные силы, вызванные воздействием колес подвижного состава на рельсовые элементы стрелочных переводов, не превышали 120 кН. Этот критерий используется для определения допустимых скоростей движения по стрелочным переводам для конкретного типа подвижного состава. Испытания стрелочных переводов на воздействие подвижного состава проводятся ВНИИЖТом уже несколько десятков лет [1, 28].

Ранее, при использовании стрелочных переводов с рельсами легких типов, деревянными брусками и песчаным балластом, наблюдались сдвиги рельсошпальной решетки. Однако, после перехода на железобетонное основание и щебеночный балласт, информации о возможных остаточных сдвигах на стрелочных переводах типа Р65 на щебеночном балласте при движении по ним подвижного состава с конструкционными скоростями не получено. В настоящее время этот критерий для оценки конструкции стрелочного перевода уже не является актуальным.

Комфортабельность езды по стрелочному переводу оценивается с помощью критерия, основанного на ускорениях, возникающих в кузове пассажирских и грузовых вагонов. Исследования, проведенные ВНИИЖГ и ВНИИЖТ на российских железных дорогах, показали, что ускорения, действующие на пассажира в кузове вагона при прохождении стрелочного перевода, не должны превышать $2,0 \text{ м/с}^2$, чтобы соответствовать требованиям безопасности и комфорту пассажиров и грузов. Для проверки соответствия стрелочного перевода данным критериям необходимо проведение специальных испытаний [30, 31].

3.2 Типовая методика динамико-прочностных испытаний стрелочных переводов

Динамико-прочностные испытания стрелочного перевода проводятся непосредственно в пути под воздействием испытательного поезда. Допускается проводить испытания под воздействием графиковых поездов, обращающихся на участке, где условия эксплуатации соответствуют расчетным, принятым в качестве исходных данных при проектировании стрелочного перевода.

Ввиду различия в конструкциях и назначении различных видов стрелочной продукции для проведения испытаний каждого конкретного проекта разрабатывается своя методика, которая является главным документом, определяющим ход и последовательность проведения испытаний [32].

Рассмотрим особенности формирования методик проведения динамико-прочностных и эксплуатационных испытаний стрелочных переводов на примере одной из массовых конструкций – типового стрелочного перевода на железобетонных брусках. Для стрелочного перевода была выбрана усиленная конструкция корневого узла, а крестовина оснащена сборными элементами и улучшенным сопряжением литой и рельсовой частей. Контррельс не связан с путевым рельсом, а все подкладки имеют высокие реборды. Остряки и рамные рельсы подвергаются термической обработке закалкой. Подрельсовое основание данного стрелочного перевода представляет собой железобетонные бруска [33]. Эпюра и схема геометрических размеров стрелочного перевода на железобетонных брусках массового применения показаны на рисунке 3.1.

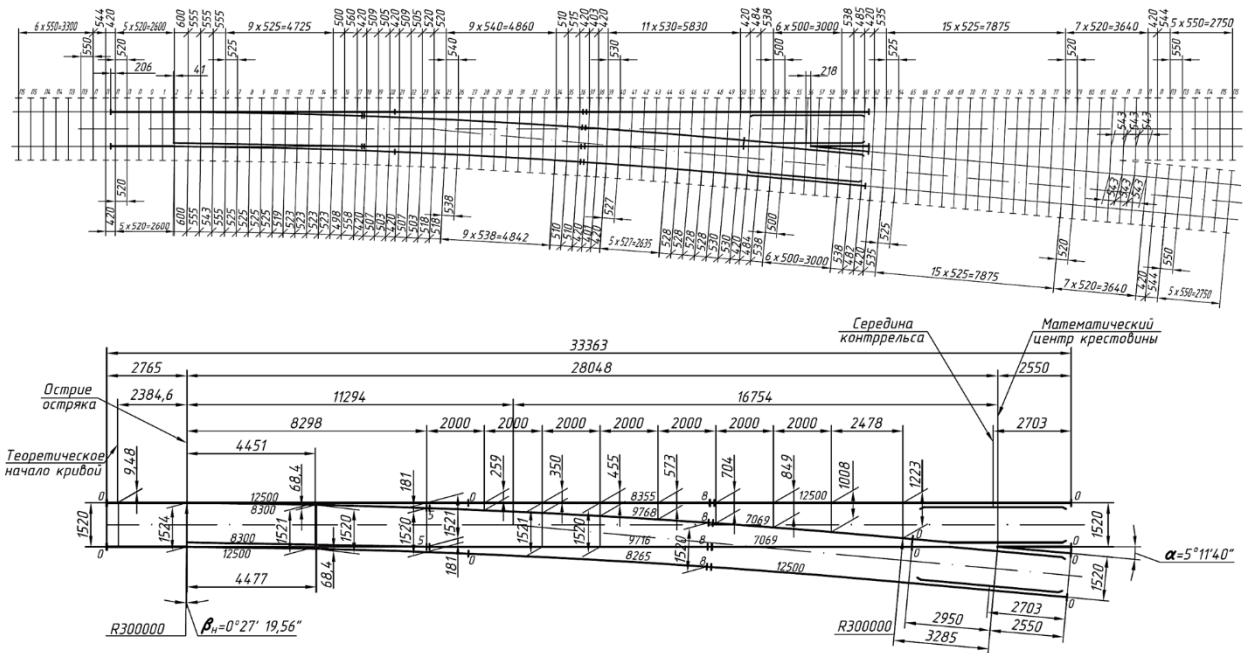


Рисунок 3.1 – Эпюры и схема геометрических размеров типового стрелочного перевода на железобетонных брусьях массового применения

Ширина колеи на стрелочном переводе - 1520 мм. Радиус бокового пути 300 м. Максимальная скорость движения: пассажирских поездов по прямому пути 140 км/ч, подвижного состава по боковому пути 50 км/ч. Максимальная статическая нагрузка на рельс от оси локомотива 245 кН [34].

Перевод имеет раздельное скрепление; клеммы типа ПК; подкладки с ребордами.

Стрелка оснащена поворотным острым, который имеет вкладышно-накладочное крепление корня. Кроме того, у нее есть упругие П-образные пружинные клеммы для крепления рамных рельсов, сварные башмаки, распорная втулка с буртиком и регулируемая соединительная тяга.

Крестовина типа общей отливки сердечника с изнашиваемой частью усовиков закреплена к основанию на отдельных подкладках. Контррельс из уголка контррельсового СП-850.

Динамико-прочностные испытания стрелочного перевода проводятся с целью оценки напряженно-деформированного состояния прочности, как в целом стрелочного перевода, так и его отдельных узлов и элементов, а также параметров

геометрии рельсовой колеи и её соответствия нормативно-техническим требованиям.

Динамико-прочностные и эксплуатационные испытания стрелочного перевода проводятся в условиях интенсивной эксплуатации железной дороги от воздействия обращающихся поездов [35].

При проведении динамико-прочностных испытаний предусматривается оценка напряжённо-деформированного состояния стрелочного перевода [9, 35].

Эксплуатационные условия характеризуются данными: грузонапряжённость участка, на котором расположена станция; скорости движения поездов по прямому и по боковому путям стрелочного перевода, наработка к моменту проведения испытаний [2, 36].

Для проведения динамико-прочностных испытаний используется опытный состав, как правило, формируемый по схеме «челнока» (локомотив – необходимое количество грузовых (пассажирских) вагонов с заданными нагрузками и характеристиками – локомотив).

В качестве испытательных, для проведения динамико-прочностных испытаний, используются также графиковые поезда, обращающиеся на участке, на котором расположен испытываемый стрелочный перевод, в установленном режиме скоростей.

При проведении динамико-прочностных испытаний с использованием испытательного поезда поездки осуществляются по прямому и боковому путям стрелочного перевода в пошерстном (ПШ) и противощерстном (ПРШ) направлениях. Для испытательного поезда предусматривается не менее шести циклов (ПШ-ПРШ) поездок с каждой градацией скоростей.

Градации скоростей движения устанавливаются этапами, начиная с минимальной (зависит от конструктивных особенностей) с последующим этапным повышением, с интервалом 20 км/ч, до величин на 10 % превышающих конструкционные скорости для испытываемой конструкции [2].

Объём регистрируемых данных по каждому измеряемому параметру должен обеспечивать получение статистически достоверных результатов.

Для оценки напряжённо-деформированного состояния элементов стрелочного перевода при проведении динамико-прочностных испытаний необходима регистрация: напряжений в элементах стрелки (в остриях и рамных рельсах), крестовины (в усовиках и сердечнике), контррельсового узла и рельсах соединительного пути, упругих деформаций и перемещений элементов стрелки, крестовины и рельсов соединительного пути, упругие изменения ширины колеи.

Величины измеряемых параметров регистрируются аттестованными приборами (усилителями и датчиками) электротензометрическим методом.

Напряжения регистрируются с использованием тензорезисторов, перемещения – прогибомерами (измерителями перемещений) [2].

Размеры основных частей стрелочного перевода соизмеримы с размерами подвижного состава. Это приводит к тому, что движение по стрелочному переводу не является стационарным, поэтому определить заранее места возникновения наибольших воздействий не представляется возможным. В связи с этим, для определения мест размещения измерительных систем, с помощью которых фиксируются напряжения и деформации на стрелочном переводе, проводится предварительный этап испытаний.

Во время выполнения этого этапа, в наиболее нагруженных частях стрелочного перевода (в переднем вылете рамного рельса, на острие в его остроганной части и в месте выпрессовки корня, упорной нити переводной кривой, литой части крестовины, тыльной стороне рабочей грани контррельса) располагаются датчики напряжений через определенное расстояние.

Затем производится запись показаний этих датчиков в точках их установки, от воздействия не менее трех – пяти проходов испытательного поезда.

По результатам обработки показаний этих датчиков определяются места наибольших воздействий, в которых оборудуются измерительные системы для проведения основной части испытаний [36].

Типовые схемы расположения приборов, после определения мест их расположения для основной части испытаний, представлены на рисунках 3.2–3.5.

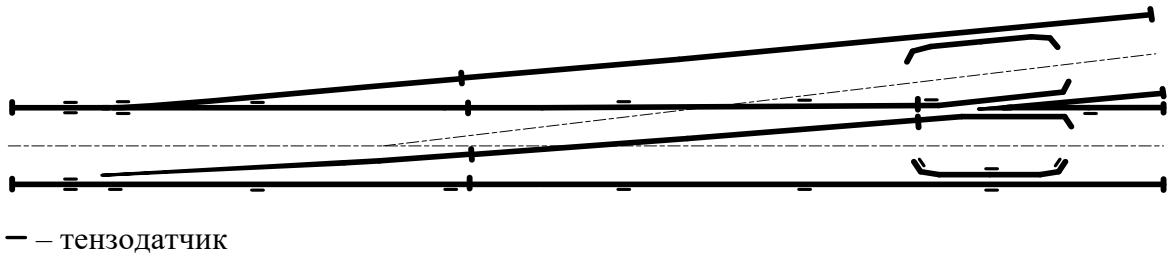


Рисунок 3.2 – Типовая схема установки тензодатчиков на стрелочном переводе на железобетонных брусках по прямому пути

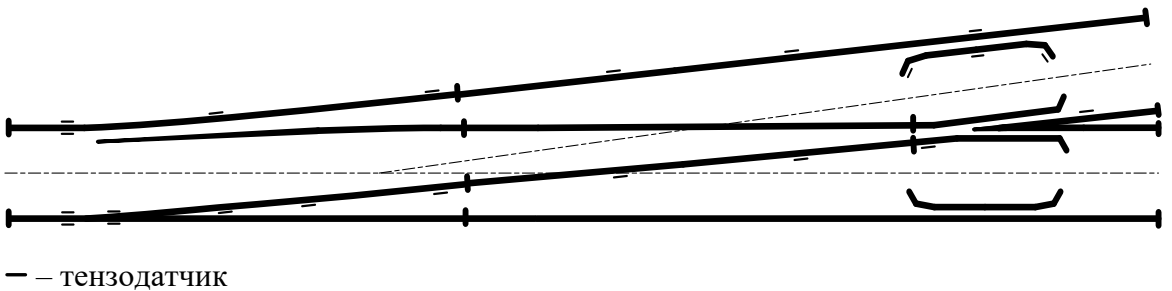


Рисунок 3.3 – Типовая схема установки тензодатчиков на стрелочном переводе на железобетонных брусках по боковому пути

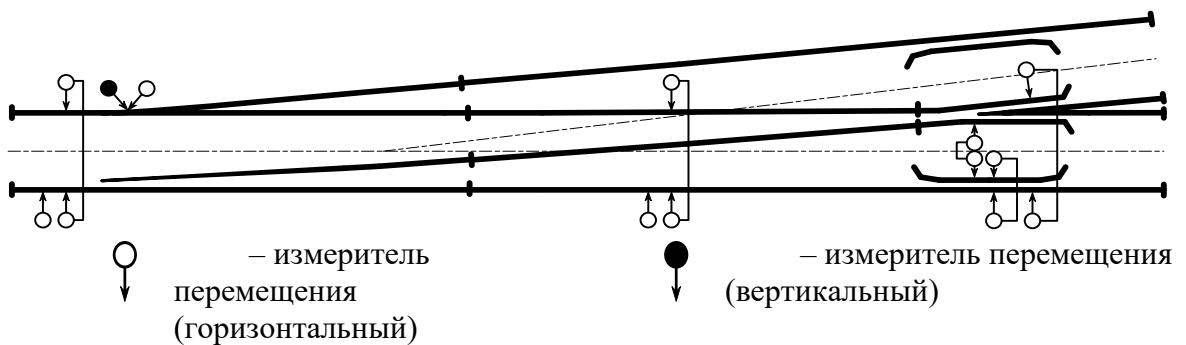


Рисунок 3.4 – Типовая схема измерения деформаций на стрелочном переводе на железобетонных брусках по прямому пути

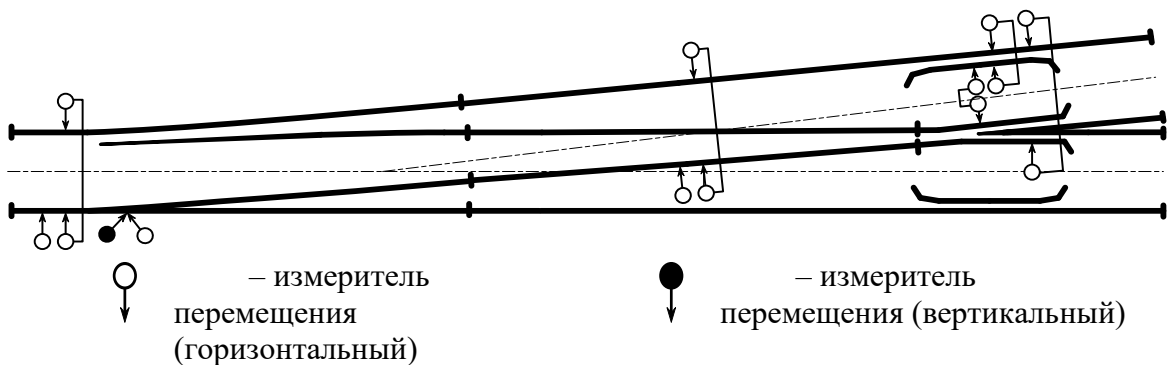


Рисунок 3.5 – Типовая схема измерения деформаций на стрелочном переводе на железобетонных брусках по боковому пути

Обработка результатов динамико-прочностных испытаний производится по правилам математической статистики с получением: максимальных наблюдаемых значений; средних значений; среднеквадратического отклонения; максимальных вероятных значений.

Оценка прочности элементов стрелочного перевода производится сопоставлением полученных в испытании максимальных значений с допускаемыми величинами по нормам безопасности НБ ЖТ ЦП 015–99 и НБ ЖТ ЦШ 136-2003 (Таблица 3.1).

Помимо рассмотренных разделов методика содержит ряд других: характеристика объекта испытаний, измерительная аппаратура, методы измерений и т.д., однако, эти разделы не имеют прямого отношения к рассматриваемому вопросу и в настоящей работе не анализируются.

Результаты проведения испытаний представляются в виде отчета, содержащего набор разделов, полностью характеризующих конструкцию и ее технические характеристики.

Ниже, в качестве примера, показан краткий образец результатов испытаний, приводимых в таком отчете, по одной из наиболее массовых конструкций стрелочных переводов на железобетонных брусках – стрелочному переводу проекта 2768.00.000.

Образцы осциллограмм напряжений в кромках подошвы прямого и криволинейного острия от воздействия на него подвижного состава в поперстном направлении представлены на рисунках 3.6 и 3.7.

Максимальные зарегистрированные напряжения в кромках подошвы прямого острия стрелочного перевода на железобетонных брусках от воздействия электровоза 2ЭС6 и грузовых вагонов при скоростях движения до 80 км/ч достигают величин соответственно 136 МПа и 128 МПа. Максимальные напряжения в кромках подошвы криволинейного острия от воздействия маневрового локомотива ТЭМ18Д и грузовых вагонов при скоростях движения до 40 км/ч достигают величин соответственно 174 МПа и 180 МПа. Допускаемые напряжения в кромках подошвы острия составляют 275 МПа. Таким образом,

наибольшие зарегистрированные напряжения в острых краях не превышают допустимые [2].

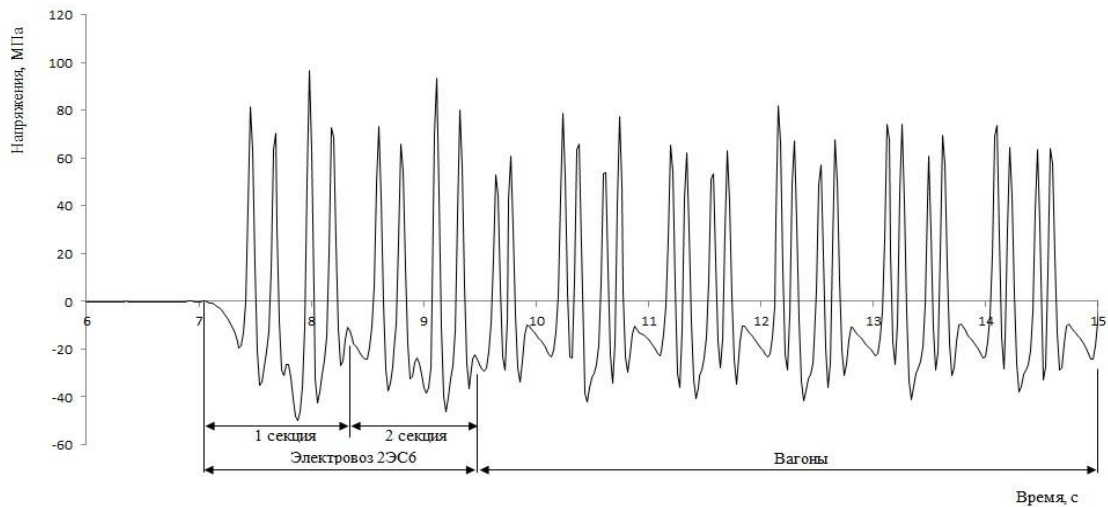


Рисунок 3.6 – Осциллограмма напряжений в кромке подошвы прямого острья от воздействия электровоза 2ЭС6 и грузовых вагонов

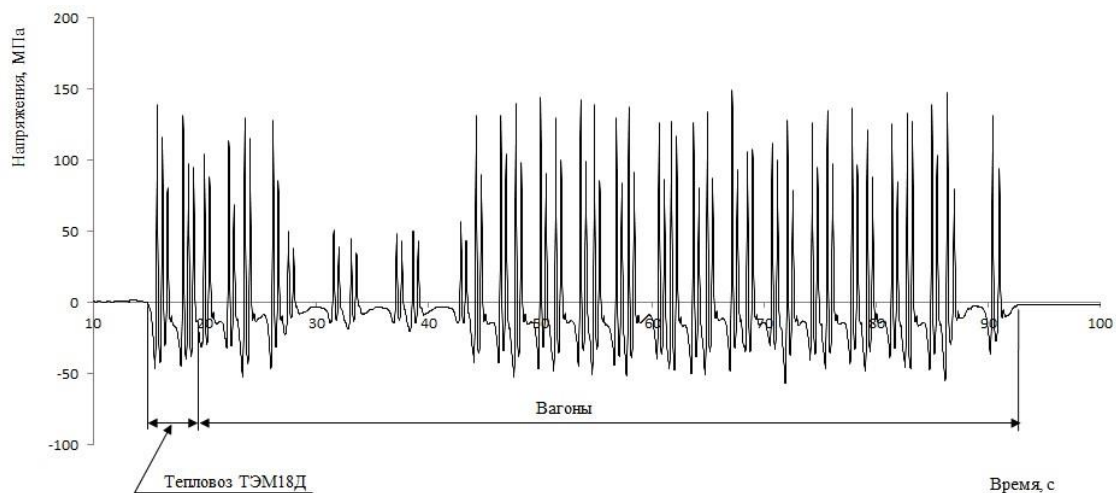


Рисунок 3.7 – Осциллограмма напряжений в кромке подошвы кривого острья от воздействия тепловоза ТЭМ18Д и грузовых вагонов

Осциллограммы напряжений в кромке подошвы рамного рельса от воздействия подвижного состава представлены на рисунке 3.8 и 3.9.

Максимальные напряжения в кромках подошвы рамного рельса стрелочного перевода на железобетонных брусках от воздействия электровоза 2ЭС6 и грузовых вагонов поезда при скоростях движения по прямому пути до 80 км/ч достигают величин соответственно 118 МПа и 115 МПа. Максимальные напряжения от

воздействия маневрового локомотива ТЭМ18Д и грузовых вагонов при движении опытного поезда по боковому пути в пошерстном направлении при скоростях до 40 км/ч достигают соответственно 148 МПа и 160 МПа. Допускаемые напряжения в кромках подошвы рамных рельсов составляют 240 МПа. Наибольшие зарегистрированные напряжения в рамных рельсах не превышают допускаемые [2].

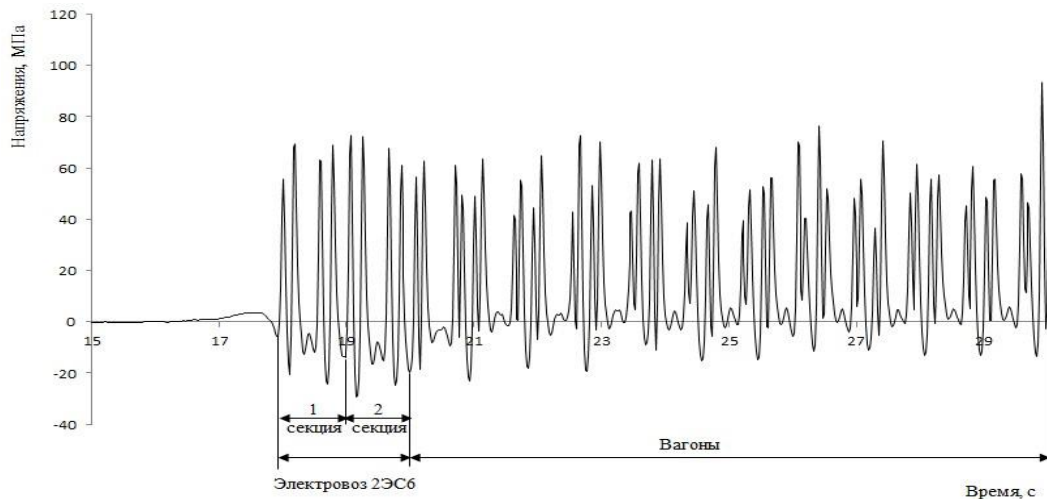


Рисунок 3.8 – Осциллограмма напряжений в кромке подошвы рамного рельса от воздействия электровоза 2ЭС6 и грузовых вагонов поезда, обращающихся по прямому пути стрелочного перевода на железобетонных брусьях

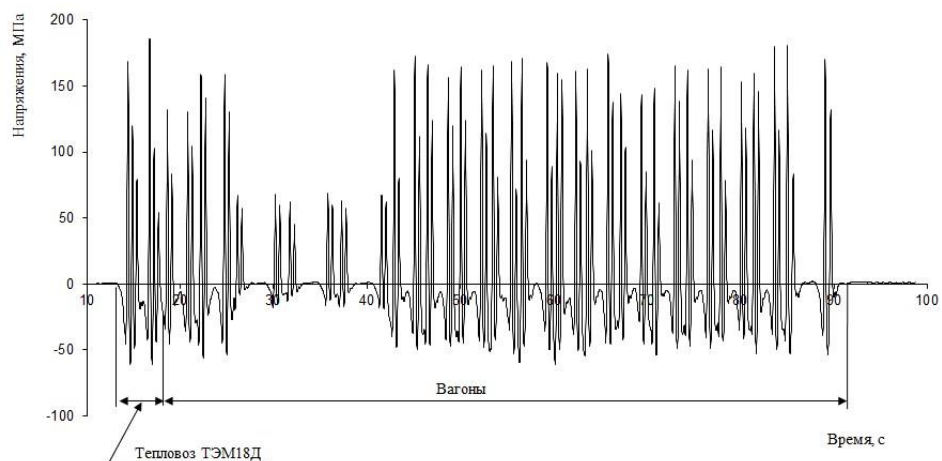


Рисунок 3.9 – Осциллограмма напряжений в кромке подошвы рамного рельса от воздействия тепловоза ТЭМ18Д и грузовых вагонов поезда, обращающихся по боковому пути стрелочного перевода на железобетонных брусьях

Максимальные зарегистрированные напряжения в кромках подошвы крестовины стрелочного перевода на железобетонных брусках от воздействия электровоза 2ЭС6 и грузовых вагонов, обращающихся по прямому пути при скорости 80 км/ч, достигают величины от воздействия локомотива – 132 МПа, от воздействия вагонов – 117 МПа. Максимальные зарегистрированные напряжения от воздействия маневрового локомотива ТЭМ18Д опытного поезда при движении по боковому пути при скоростях движения до 40 км/ч достигают 125 МПа, от воздействия вагонов – 114 МПа. Наибольшие зарегистрированные напряжения в хвостовике крестовины не превышают допусковые, составляющие 240 МПа [2].

Максимальные зарегистрированные напряжения в кромках подошвы крестовины стрелочного перевода на железобетонных брусках от воздействия электровоза 2ЭС6, тепловоза ТЭМ18Д и грузовых вагонов, обращающихся по прямому и боковому путям стрелочного перевода, не превышают 80 МПа. Наибольшие зарегистрированные напряжения в кромках подошвы крестовины не превышают допусковые, составляющие 110 МПа [2, 38, 39].

Осциллограмма напряжений в кромках подошвы крестовины представлена на рисунке 3.10.

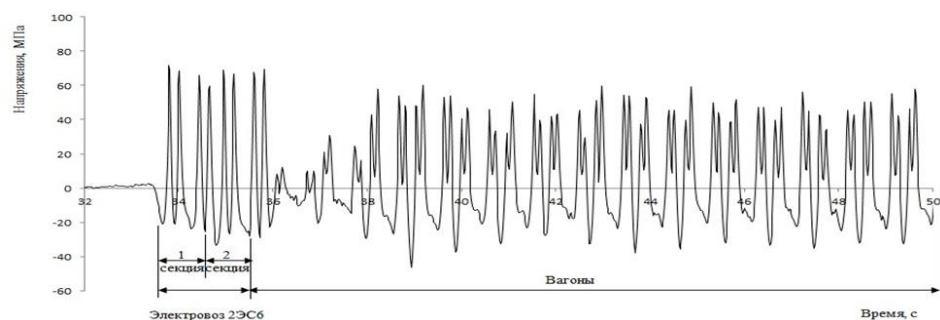


Рисунок 3.10 – Осциллограмма напряжений в кромках подошвы крестовины от воздействия электровоза 2ЭС6 и грузовых вагонов

Напряжения в контроле углового профиля регистрировались от воздействия подвижного состава, обращающегося по прямому пути (электровоз 2ЭС6, грузовые вагоны) и боковому пути (маневровый тепловоз ТЭМ18Д и грузовые вагоны) стрелочного перевода со скоростями соответственно до 80 км/ч и 40 км/ч. Максимальные напряжения в контроле прямого пути от воздействия

подвижного состава поезда, обращающегося по прямому пути стрелочного перевода, достигают величины 155 МПа. В контррельсе бокового пути наибольшие напряжения достигают 167 МПа. Наибольшие зарегистрированные напряжения в контррельсе не превышают допусковые, составляющие 330 Мпа [40]. Максимальные зарегистрированные напряжения в кромках подошвы рельсов соединительного пути от воздействия подвижного состава, обращающегося по прямому пути стрелочного перевода, достигают величины 132 МПа. В кромках подошвы рельса упорной нитки бокового соединительного пути наибольшие напряжения достигают 155 МПа. Наибольшие зарегистрированные величины напряжений в рельсах соединительных путей не превышают допусковые, составляющие 240 МПа [2].

Оценка упругих изменений ширины колеи производилась по результатам их регистрации прогибомерами в зонах стрелки, соединительных путей и крестовинного узла.

Наибольшие упругие изменения ширины колеи величиной до 4,0 мм в сторону её уширения получены в зоне соединительных путей стрелочного перевода на железобетонных брусках при движении поезда по боковому пути, как от воздействия локомотивов, так и от воздействия вагонов. При движении поезда по прямому пути наибольшие упругие изменения ширины колеи в зоне соединительного пути не превышают величины 2,5 мм.

Упругие изменения ширины колеи в сторону уширения в зоне стрелки и крестовинного узла не превышают величины 3,0 мм.

Зарегистрированные наибольшие величины упругих изменений ширины колеи отвечают требованиям обеспечения безопасности движения поездов.

Осциллограмма упругих изменений ширины колеи в зоне соединительных путей стрелочного перевода на железобетонных брусках при движении поезда по боковому пути представлена на рисунке 3.11.

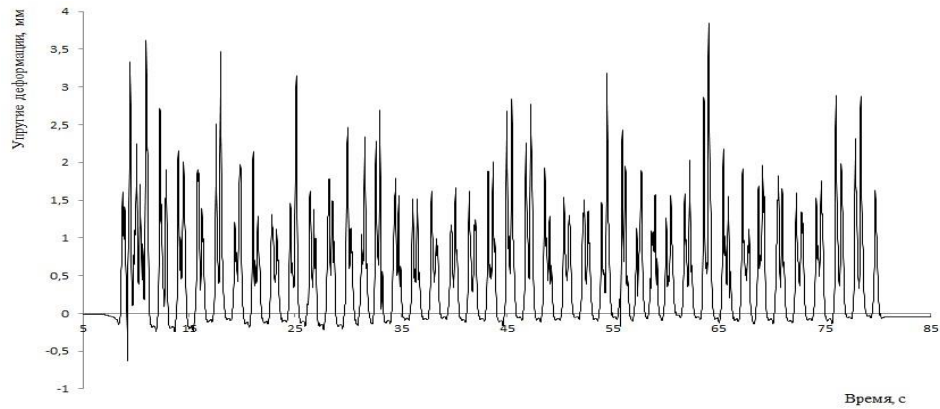


Рисунок 3.11 – Осциллограмма упругих изменений ширины колеи по боковому соединительному пути стрелочного перевода на железобетонных брусках

3.3 Недостатки принятых методов оценки стрелочного перевода

Отсутствие нормативов предельных величин упругих деформаций и перемещений рельсовых элементов стрелочного перевода следует считать недостатком современных методов оценки их конструкции.

Вопрос нормирования упругих деформаций элементов стрелочного перевода при проходе по нему подвижного состава тесно связан с определением допустимых форм и величин износа рельсовых элементов и колес подвижного состава [1].

Нормированию, в первую очередь, подлежат параметры, напрямую связанные с безопасностью движения поездов по стрелочному переводу. Опыт расследований случаев сходов колесных пар с рельсов на стрелочных переводах показывает, что причинами такого нарушения безопасности движения поездов являются:

- вертикальные перемещения острия остряка под проходящим поездом;
- горизонтальные перемещения острия остряка под проходящим поездом;
- отжатия тыльной частью колеса отведенного остряка в месте наименьшего желоба;
- отжатия упорной нити переводной кривой (и ширины колеи в месте наибольшего отжатия);

– упругие изменения расстояния между рабочими гранями сердечника крестовины и контррельсом;

– упругие изменения расстояния между рабочими гранями усовика крестовины и контррельсом.

Нормирование этих величин позволит предъявлять требования к конструкции узлов стрелочного перевода с точки зрения безусловного обеспечения безопасности движения поездов, что особенно важно при разработке конструкций стрелочных переводов для высокоскоростного и тяжеловесного движения.

Как видно из приведенного выше материала, техника измерения перечисленных параметров отработана и может быть включена в программы и методики динамико-прочностных испытаний.

Введение этих норм нужно считать необходимым при очередном пересмотре и редактировании нормативных документов.

Выводы по главе 3

1. Из примера результатов испытаний стрелочного перевода на железобетонных брусьях массового применения видно, что по прочностным показателям такие переводы удовлетворяют современным требованиям перевозочного процесса.

2. Одним из недостатков стрелочных переводов массового применения является необходимость проведения периодических работ по обслуживанию основания из железобетонных брусьев, включая выправку и регулировку параметров рельсовой колеи. Кроме того, контррельс крестовинного узла имеет избыточную жесткость. На перспективу следует рассмотреть возможность использования основания с более равномерным распределением нагрузки, такого как плитное основание. Также стоит изучить возможность оптимизации

контррельсового проката для увеличения срока его службы и уменьшения интенсивности износа.

3. В современной базе оценки стрелочных переводов по результатам динамико-прочностных испытаний отсутствуют критерии деформативности, что ограничивает возможности всесторонней оценки конструкции с позиции обеспечения безопасности движения поездов. При очередном пересмотре нормативной базы необходимо внести в нее критерии безопасности по деформациям в узлах стрелочных переводов.

4 ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВИДЫ ОСНОВАНИЯ ДЛЯ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В современной железнодорожной инфраструктуре вопрос выбора основания для стрелочных переводов нового поколения стоит особенно остро. Стрелочные переводы, являющиеся элементами путевой инфраструктуры, требуют особого подхода в плане материалов и технологий их укладки [3].

Последние инновации в области материаловедения и строительных технологий открывают новые перспективы для разработки и внедрения оснований стрелочных переводов следующего поколения. Рассмотрим наиболее перспективные виды оснований, их технические характеристики, преимущества и возможные области применения [41].

Современные технологии позволяют создавать основания, которые обладают улучшенными эксплуатационными характеристиками, способны выдерживать более высокие нагрузки и обеспечивать максимальную надежность работы стрелочных переводов.

С учетом возрастающих скоростей поездов и растущего объема железнодорожных перевозок, требования к основаниям стрелочных переводов также увеличиваются. Кроме того, актуальность разработки и внедрения перспективных видов оснований для стрелочных переводов нового поколения обуславливается необходимостью уменьшения времени на техническое обслуживание и ремонт. Использование инновационных материалов и технологий в производстве оснований позволяет добиться значительного сокращения времени на обслуживание без ущерба для качества и безопасности [41].

На текущий момент вопрос проектирования и применения новых технологий для основания стрелочных переводов железных дорог считается одной из приоритетных задач в разработке инфраструктуры железнодорожного транспорта. Развитие и интеграция инновационных решений в этой области направлены на повышение долговечности, надежности и экономической эффективности

стрелочных переводов нового поколения.

Тема современных оснований для стрелочных переводов уже нашла свое отражение в многочисленных научных исследованиях, проектных разработках и инженерных решениях. Основные направления в этих работах связаны с использованием высокопрочных бетонов, композитных материалов, а также инновационных методов укладки и фиксации рельсов и шпал для увеличения срока службы стрелочных устройств и уменьшения затрат на их обслуживание.

Не менее важной является и задача минимизации негативного воздействия на окружающую среду, что требует внедрения экологичных технологий и материалов. В этой связи, значительное внимание уделяется разработке таких оснований для стрелочных переводов, которые бы не только обладали высокой функциональной и эксплуатационной эффективностью, но и способствовали бы снижению уровня шума и вибрации, а также были бы изготовлены из перерабатываемых или мало вредных для природы материалов [42].

Ключевым фактором, на который опирается успех в данной области, является междисциплинарный подход, включающий в себя как углубленное изучение специфических свойств материалов, так и применение передовых инженерных и технологических решений. Все это требует активного сотрудничества между научно-исследовательскими институтами, университетами, проектными организациями и предприятиями железнодорожной отрасли, а также поддержки государства в виде финансирования фундаментальных и прикладных исследований [42].

Непрерывное обновление и улучшение существующих решений, адаптация к меняющимся условиям эксплуатации и требованиям безопасности делает эту область одной из наиболее динамично развивающихся в сфере железнодорожного транспорта.

Одной из приоритетных целей является минимизация деформаций основания под воздействием динамических нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации стрелочных переводов. Это касается как вертикальных, так и горизонтальных

поперечных перемещений, которые могут привести к нарушению геометрии пути и, как следствие, к ухудшению условий движения. Решение данной проблемы предполагает применение новых конструктивных решений и материалов, способных эффективно воспринимать и распределять нагрузку, сохраняя при этом устойчивость на протяжении всего срока эксплуатации.

Важнейшей задачей является обеспечение высокой устойчивости стрелочных переводов к воздействию агрессивных сред и экстремальных погодных условий. Разработка и применение материалов с повышенными антикоррозионными свойствами, способностью противостоять замерзанию и тающему снегу позволяет значительно продлить срок службы оснований и сократить затраты на их техническое обслуживание [42].

Таким образом, целью разработки перспективных видов основания для стрелочных переводов нового поколения является достижение оптимального сочетания надежности, безопасности, экономичности и экологичности. Общая задача – разработка таких технологий и материалов, которые позволят реализовать эти цели с учетом всех современных требований и тенденций развития железнодорожного транспорта.

Основой исследования является задача анализа существующих видов оснований стрелочных переводов, выявление их достоинств и недостатков в эксплуатации. Этот анализ предполагает сбор и систематизацию данных о различных материалах и конструкциях, применяемых в разных странах, их износостойкости, а также способности сопротивляться динамическим и статическим нагрузкам [41, 42].

Следующей задачей является разработка критериев для оценки эффективности новых материалов и технологий, предназначенных для использования в основаниях стрелочных переводов. Важность этой задачи обусловлена необходимостью создания объективных методик для сравнения различных решений, что позволит отобрать наиболее перспективные варианты для детального тестирования и последующего внедрения.

Проработка технологии укладки и монтажа основания стрелочных переводов нового поколения также стоит в списке приоритетов. Эта задача включает в себя разработку новых методов фиксации, которые должны обеспечивать быстрый монтаж и демонтаж элементов без значительных затрат времени и ресурсов, при этом сохраняя или даже увеличивая общую надежность конструкции.

Решая эти задачи следует акцентировать внимание на необходимости комплексного подхода, включающего как инновационные разработки в области материаловедения, так и усовершенствование конструктивных и монтажных решений [41, 42].

В заключение анализа проблематики перспективных видов основания для стрелочных переводов нового поколения, важно подчеркнуть, что разработка и внедрение современных оснований для стрелочных переводов способствуют повышению пропускной способности и надежности железнодорожной инфраструктуры, что критически важно в условиях постоянно растущего объема грузоперевозок и потребности в увеличении скоростей движения поездов.

4.1 Разработка плитного основания стрелочных переводов нового поколения для современного железнодорожного транспорта

Актуальность разработки плитного основания стрелочных переводов нового поколения отражается в нескольких ключевых аспектах. Во-первых, современный железнодорожный транспорт стал более сложным и требовательным, что требует обновления инфраструктуры для обеспечения безопасности и эффективности движения поездов. Развитие технологий и увеличение грузоперевозок поднимают вопрос о необходимости совершенствования стрелочных переводов.

Во-вторых, эксплуатационная нагрузка на стрелочные переводы постоянно увеличивается, особенно на участках с интенсивным движением поездов. Это требует разработки новых конструкций и материалов, способных выдерживать

большие нагрузки и сохранять свои характеристики на протяжении длительного периода эксплуатации.

Третий аспект, подтверждающий актуальность разработки плитного основания стрелочных переводов нового поколения, связан с требованиями экологической безопасности [44].

За последние годы было проведено много исследований в данной области. Были созданы новые технологии и материалы, которые позволяют значительно увеличить срок службы стрелочных переводов и снизить необходимость их регулярного обслуживания. Применение современных материалов и технологий позволяет создавать плитные основания с повышенными характеристиками прочности и износостойкости.

Тем не менее, несмотря на значительные успехи в области разработки плитного основания стрелочных переводов нового поколения, еще остается много не решенных вопросов. Необходимо проводить дальнейшие исследования и тестирования новых материалов и технологий, а также оптимизировать конструкцию стрелочных переводов для минимизации износа и увеличения срока службы. Важным направлением является разработка методов мониторинга и диагностики состояния стрелочных переводов для своевременного выявления проблем и предотвращения аварийных ситуаций [44].

Задачами исследования в области разработки плитного основания стрелочных переводов нового поколения для современного железнодорожного транспорта являются широкий спектр вопросов и проблем, требующих комплексного исследования и разработки решений. Основными задачами данного исследования являются:

1. Анализ современных требований и стандартов в области железнодорожного транспорта. Исследование актуальных нормативных документов, технических требований к стрелочным переводам и основаниям, используемым в современных системах железнодорожной инфраструктуры. Формулировка основных технических требований к плитному основанию

стрелочных переводов и их соответствие современным стандартам безопасности и эффективности.

2. Оценка недостатков существующих плитных оснований стрелочных переводов. Проведение технического анализа и испытаний с целью выявления проблемных зон, слабых мест и факторов, влияющих на долговечность и надежность работающих систем. Изучение причин возникновения различных деформаций, просадок, износов и других повреждений, связанных с эксплуатацией плитного основания.

3. Разработка новых концепций и технологий плитного основания. Создание инновационных подходов к проектированию и конструированию плитных оснований для стрелочных переводов, направленных на увеличение их надежности, долговечности и эксплуатационной эффективности. Внедрение современных материалов, технологий обработки и конструктивных решений для оптимизации работы стрелочных переводов.

4. Моделирование и испытания новых технических решений. Проведение комплексных испытаний на специализированных испытательных полигонах и в лабораториях с целью проверки эффективности, прочности и безопасности новых плитных оснований. Анализ результатов испытаний, выявление достоинств и недостатков разработанных конструкций, корректировка предварительных решений.

5. Разработка рекомендаций и регламентов по применению новых плитных оснований. Подготовка рекомендаций по внедрению новых технологий и конструкций в существующие системы железнодорожной инфраструктуры. Создание регламентов по обслуживанию, ремонту и эксплуатации плитных оснований, обеспечивающих их безопасную и эффективную работу на протяжении всего жизненного цикла.

Таким образом, основной целью исследования является разработка инновационных и эффективных плитных оснований для стрелочных переводов нового поколения.

Другим важным аспектом научной новизны данной разработки является применение инновационных методов моделирования и расчетов. С использованием современных программных комплексов и технологий, специалисты могут проводить более точные и эффективные расчеты для оптимизации конструкции плитного основания и улучшения его характеристик. С учетом современных требований к железнодорожному пути, инженеры и ученые разрабатывают новые методики контроля и мониторинга состояния основания, что позволяет оперативно выявлять и устранять возможные дефекты или повреждения.

Разработка плитного основания стрелочных переводов нового поколения для современного железнодорожного транспорта имеет как теоретическую, так и практическую значимость. Эта работа является важным шагом в совершенствовании инфраструктуры железнодорожного транспорта, так как плитное основание обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными бетонными основаниями.

Практическая значимость заключается в том, что плитное основание обладает большей прочностью и устойчивостью к воздействию внешних факторов, таких как температурные колебания, проседание грунта и динамические нагрузки от проходящих поездов. Это позволяет снизить риск аварийных ситуаций и уменьшить затраты на техническое обслуживание и ремонт инфраструктуры.

Теоретическая значимость исследования заключается в изучении основных принципов и технологий разработки плитного основания, в том числе материалов, методов укладки и фиксации плит, а также оптимальных размеров и формы плит. Это позволяет провести комплексный анализ преимуществ данного типа основания и выявить его потенциальные недостатки или ограничения [45].

Практическая значимость заключается в применении разработанных рекомендаций и технологий для создания эффективных и надежных стрелочных переводов нового поколения. Это, в свою очередь, способствует повышению безопасности и комфортности путешествий пассажиров, увеличению пропускной способности железнодорожных путей и сокращению времени и затрат на

техническое обслуживание и ремонт.

В ходе исследования разработки плитного основания стрелочных переводов нового поколения для современного железнодорожного транспорта были выявлены несколько ключевых аспектов. Во-первых, использование плитного основания способствует более эффективной работе стрелочных переводов за счет повышенной прочности и долговечности конструкции. Это особенно важно в условиях высокой интенсивности движения поездов и изменчивых погодных условий [45].

Кроме того, разработка нового поколения плитного основания учитывает современные технологические требования и стандарты железнодорожного транспорта. Это позволяет обеспечить более плавное и безопасное движение поездов, снижая риск возникновения аварийных ситуаций и увеличивая общую проходимость железнодорожной инфраструктуры [45].

4.2 Виды и особенности конструкции железобетонных оснований стрелочных переводов

На данный момент на российских железных дорогах большинство новых проектов стрелочных переводов использует основание в виде железобетонных брусьев. С целью повышения их прочности и надежности проводятся мероприятия по оптимизации конструкции, улучшению технологии изготовления брусьев и обеспечению возможности применения современных методов крепления металлических частей стрелочных переводов к брусьям. Проведенный анализ данных показал, что при проезде по железобетонным брусьям, комплектуемым болтовыми скреплениями типа КБ, наблюдается тенденция к постепенному увеличению ширины рельсовой колеи со временем, особенно в острее остряков, корне остряков и в переводной кривой.

Пример использования железобетонных брусьев в качестве основания пологих стрелочных переводов можно увидеть на высокоскоростной железнодорожной магистрали Санкт-Петербург – Москва. На Октябрьской железной дороге используются стрелочные переводы типа Р65 марки 1/22 (проект 2832), которые были изготовлены АО «Новосибирский стрелочный завод» (АО «НСЗ»). Эти переводы оснащены железобетонными брусьями с клеммно-болтовыми креплениями и представляют собой пологий стрелочный перевод модельного ряда четвертого поколения (Рисунок 4.1).

С применением современных элементов и опираясь на опыт эксплуатации и технологические возможности производителей, была усовершенствована конструкция стрелочного перевода марки 1/22.

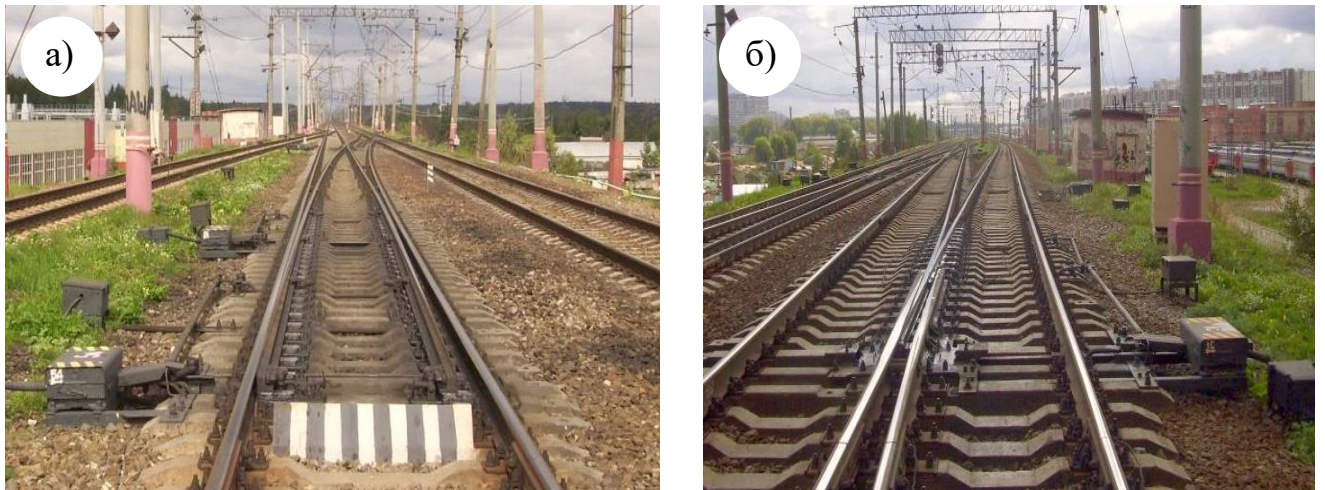


Рисунок 4.1 – Стрелочный перевод типа Р65 марки 1/22 (проект 2832):

а) стрелка стрелочного перевода; б) крестовина с НПК с подвижным сердечником

В рамках программы повышения скоростей движения по заданию ОАО «РЖД» были разработаны и изготовлены опытные образцы стрелочных переводов типа Р65 марки 1/22 проектов Н03.002 (Рисунок 4.2) и МС3.8364 (Рисунок 4.3) Новосибирского и Муромского стрелочных заводов соответственно.



Рисунок 4.2 – Стрелочный перевод типа Р65 марки 1/22 АО «НСЗ» (проект Н03.002) собственная разработка Новосибирского стрелочного завода: а) стрелка перевода, оборудованная двумя комплектами гарнитур электроприводов с внешними замыкателями; б) крестовина марки 1/22 перевода, оборудованная двумя комплектами гарнитур электроприводов с внешними замыкателями

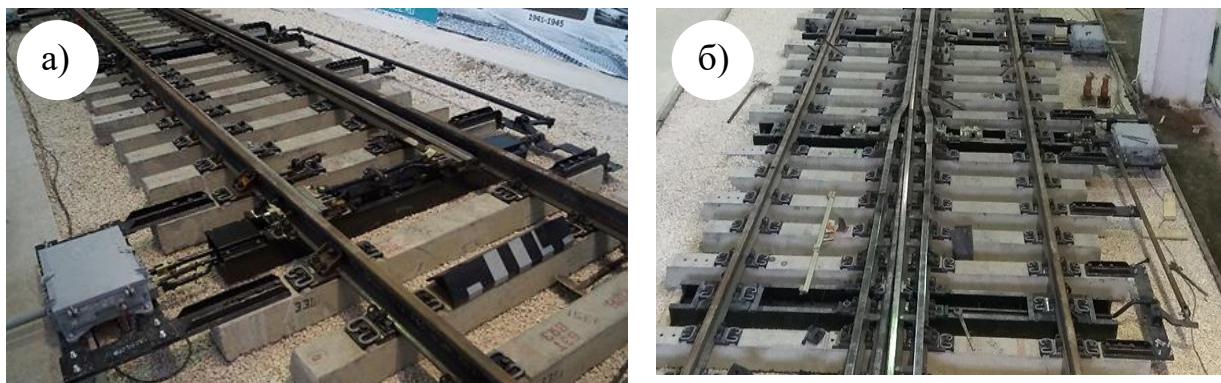


Рисунок 4.3 – Стрелочный перевод типа Р65 марки 1/22 АО «МСЗ» (проект МСЗ.8364) собственная разработка Муромского стрелочного завода: а) стрелка стрелочного перевода с 4 точками приложения усилий для перевода подвижных элементов; б) крестовина марки 1/22 с 3 точками приложения усилий для перевода подвижных элементов

На этих стрелочных переводах по основному пути максимальная скорость движения составляет 250 км/ч. Эксплуатация пологих стрелочных переводов с основанием в виде железобетонных брусьев на сети отечественных железных дорог показала, что проблема уширения рельсовой колеи также возникает при эксплуатации стрелочных переводов для высокоскоростного движения, где скорости по прямому пути могут достигать 250 км/ч, а по боковому – 120 км/ч.

В целом, практический опыт использования железобетонных подрельсовых оснований в виде брусьев показывает, что они обеспечивают надежные конструкции основания для стрелочных переводов. Однако, для линий с высокой скоростью движения и высокой осевой нагрузкой, целесообразно рассмотреть другие виды железобетонных оснований для стрелочных переводов. Например, одним из вариантов, может быть, использование конструкции стрелочных переводов на би-блочных полушпалках [46].

LVT (Low Vibration Track) – это инновационное решение, которое позволяет снизить вибрацию на пути, благодаря двум уровням эластичности. Это означает, что LVT уменьшает вибрацию во всех частотных диапазонах. Более того, скорость укладки пути с использованием технологии LVT достигает 200 метров в сутки.

Преимущество LVT заключается в его высокой точности геометрических параметров. Благодаря монтажу сверху вниз и глубокому заглублению блоков LVT в бетон, достигается точность в пределах $\pm 0,5$ мм. Это обеспечивает стабильность и надежность пути.

Кроме того, LVT требует минимального технического обслуживания. В случае необходимости замены отдельных компонентов или корректировки высоты пути, легкий доступ ко всем компонентам обеспечен. Это позволяет быстро и эффективно провести необходимые работы.

В результате LVT представляет собой высокоэффективное и надежное решение для создания путей с пониженной вибрацией [47].

Конструкция на би-блочных полушпалах включает в себя бетонные блоки, которые укладываются на эластичные прокладки. Эти прокладки помещены в резиновые чехлы, которые затем замоноличиваются в бетонное основание пути. Такая конструкция предназначена для гашения вибраций и снижения воздействия на обратный свод тоннеля (Рисунок 4.4).

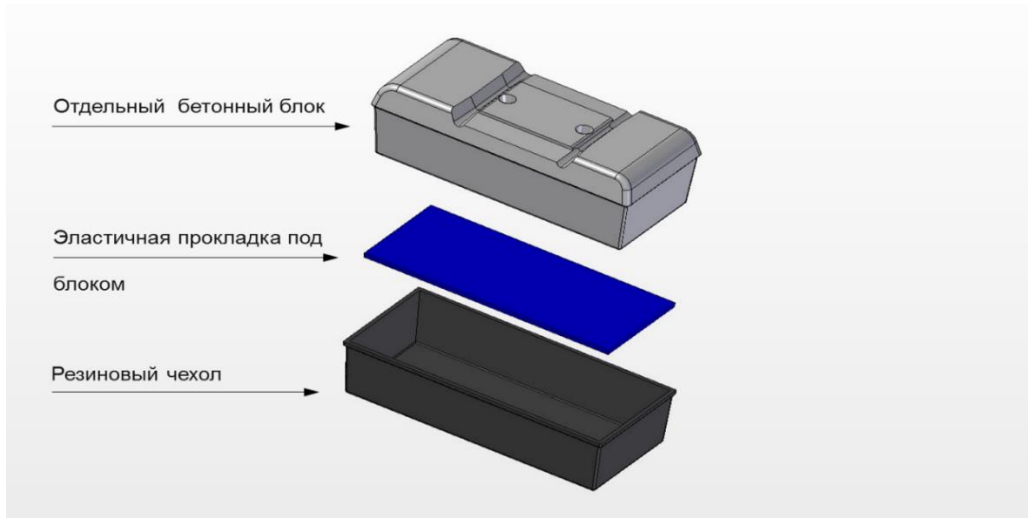


Рисунок 4.4 – Бетонный блок (полушпала) с резиновым чехлом и прокладкой

Имея в распоряжении 5 стандартных блоков системы LVT, можно выдержать любую геометрию пути (Рисунок 4.5). Применение подблочных эластичных прокладок с разной степенью жесткости позволяет добиться одинаковых ходовых качеств на всем пути (Рисунок 4.6).

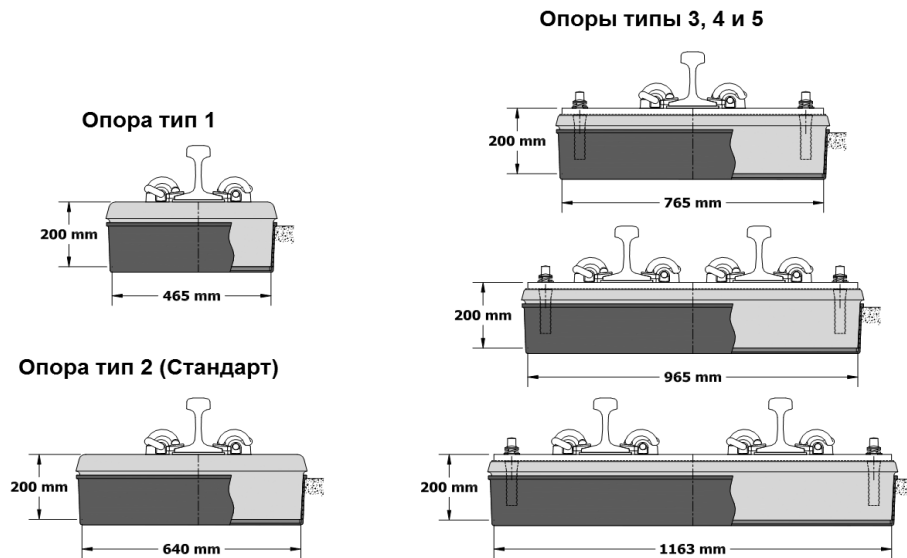


Рисунок 4.5 – Размеры би-блочных полушпал для стрелочных переводов

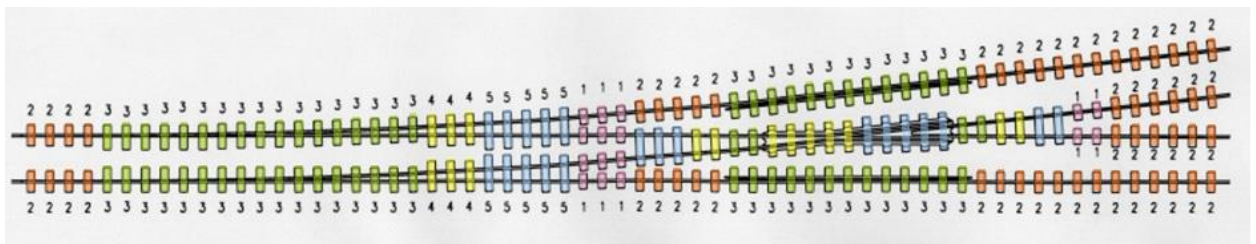


Рисунок 4.6 – Схема установки би-блочных полушпал на стрелочные переводы

Единство рельсовой колеи при использовании блочного основания обеспечивается:

- углублением выемки в бетонном основании. Под бетонные блоки укладываются усовершенствованные микропористые прокладки.
- использованием опорных блоков с переменным по длине поперечным сечением. Это позволит регулировать ширину пути.
- укладыванием подрельсовых резиновых или резинокордовых прокладок.

На участках, где плети крепятся без заземления подошвы рельса, на каждой подрельсовой опоре укладываются металлические П-образные пластины для снижения коэффициента трения между подошвой рельса и основанием.

После укладки и регулирования положения рельсов относительно оси пути и их выравнивания по высоте, заливают вокруг каждого рельса эластомер. Застывая, он фиксирует рельсы в конечном положении и обеспечивает им непрерывное и упругое опирание.

Применение данной технологии позволит снизить затраты на текущую эксплуатацию пути до 20 %. Она предусматривает замену вышедших из строя бетонных блоков би-блочными полушпалками, без необходимости разрезания рельсов и уборки путевого бетона.

В настоящее время этот метод используется при строительстве новых и модернизации старых линий Московского метрополитена, особенно в отношении стрелочных переводов [48-49]. На рисунке 4.7 показан стрелочный перевод, уложенный в Московском метрополитене.



Рисунок 4.7 – Стрелочный перевод на би-блочных полушпалках

Благодаря высокой износостойкости всех элементов и надежности конструкции, прогнозируется срок службы до капитального ремонта в 40 лет или 1,8-2,2 млрд тонн брутто.

Использование плитного основания, изготовленного в заводских условиях, обеспечивает высокую точность и качество изготовления плит, благодаря стационарному производству. Это положительно сказывается на дальнейшей эксплуатации стрелочных переводов в целом (Рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Монтаж из формы бетонной плиты при заводском изготовлении

Подрельсовые опоры бетонных плит идентичны подрельсовым опорам железобетонных шпал, оснащенным упругими рельсовыми скреплениями. Форма и расположение опор определены проектом (Рисунок 4.9).

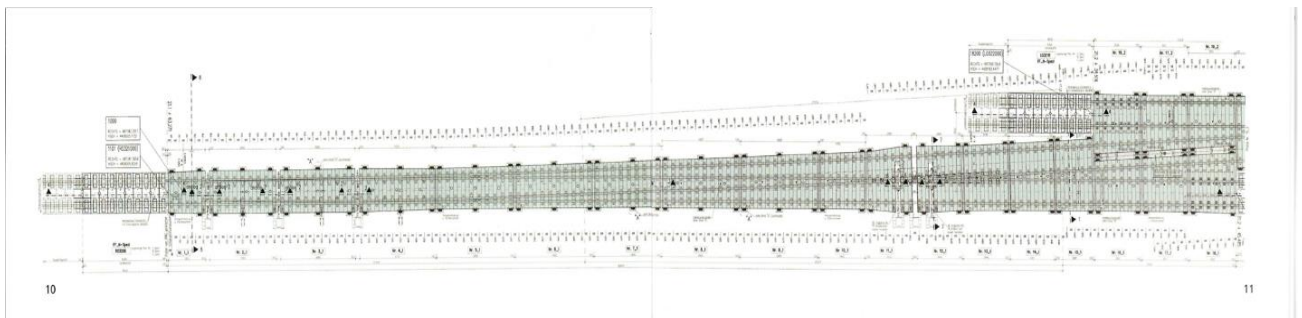


Рисунок 4.9 – Схема стрелочного перевода на бетонных плитах заводского изготовления

Возможны два варианта плитного основания – плиты на безбалластном основании и плиты, основанием которых является уплотненный балласт.

В первом варианте в соответствии с проектом, на торцах плит могут быть созданы прямоугольные или полукруглые выемки. Они симметричны относительно продольной оси плиты и служат для соединения плит с анкерными выступами, которые формируются на опорном бетонном слое при его укладке. Кроме того, на торцах плит могут быть предусмотрены пазы с муфтовыми соединителями. Они используются для стягивания плит после укладки и их точной подгонки. После стягивания плит, эти пазы, а также стыковые щели и технологические отверстия заполняются отверждающей смесью.

Возможна также технология, при которой в плите имеются специальные сквозные технологические отверстия, которые расположены перпендикулярно плоскости плиты. Через эти отверстия заливается отверждающая смесь, которая заполняет промежутки между плитой и опорным бетонным слоем. Высота выступов, которые образуются при заливке, соответствует толщине плиты, а расстояния между центрами выступов соответствуют длине плиты с учетом допуска, указанного в проекте строительства. Эти выступы служат для предотвращения смещений плит в продольном и боковом направлениях. Плита доставляется на место укладки с помощью специальных грузовых автомобилей (Рисунок 4.10).



Рисунок 4.10 – Разгрузка стрелочного перевода на бетонных плитах заводского изготовления с грузового автомобиля

Плита устанавливается на специально подготовленную бетонную основу. После закрепления плиты в нужном положении выполняется заливка отверстий, специально предусмотренных при изготовлении плиты, битумно-цементной смесью. При установке безбалластного железнодорожного пути на бетонные плиты необходимо соблюдать все требования проекта строительства и выполнять работы в соответствии с ними, включая устройство верхнего строения пути (Рисунок 4.11).



Рисунок 4.11 – Стрелочный перевод на бетонных плитах заводского изготовления

Установка стрелочного перевода может потребовать площадь неправильной формы длиной до 25 метров и шириной от 3,0 до 5,5 метров для однопутных линий. Изготовление таких плит в заводских условиях с последующей доставкой не представляется сложным.

Второй вариант – плиты на балластном слое в нашей стране апробирован уже с середины прошлого века. В этом направлении проводятся работы по разработке различных видов железобетонного подрельсового основания. Варианты основания, такие как продольные лежни, соединенные в рамы, отдельные плиты и сплошное железобетонное основание (монолитная плита), уже были рассмотрены [48, 49].

Полученные результаты эксплуатации стрелочных переводов типа Р50 марок 1/11 и 1/18 и Р65 марки 1/11 были в целом положительными (Рисунок 4.12). Однако, в процессе эксплуатации были выявлены некоторые недостатки, которые были

устранены при разработке новых проектов. Кроме того, были разработаны проекты стрелочных съездов типа Р65 марки 1/11 для различных расстояний между осями путей [50].

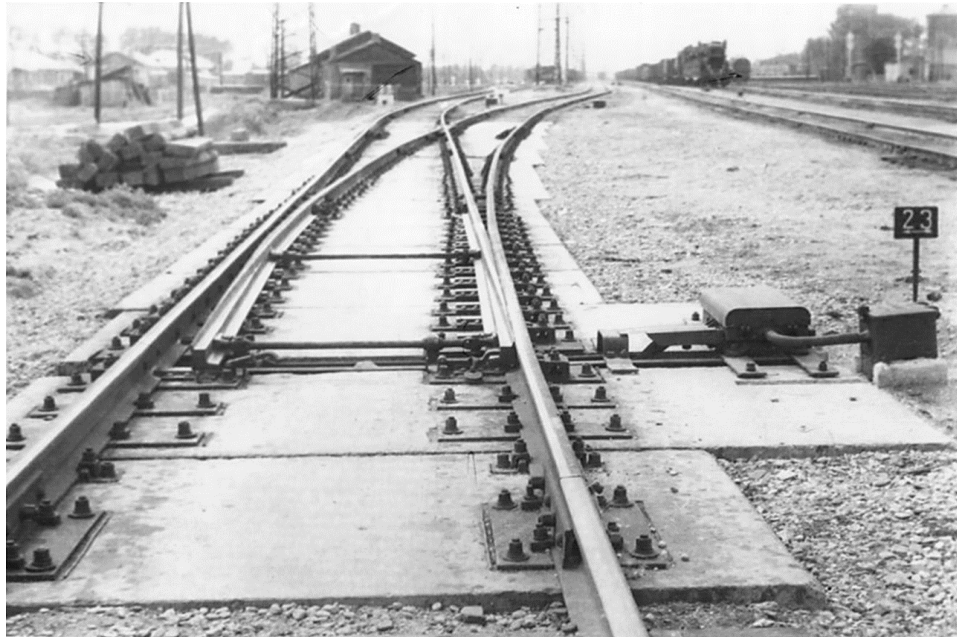


Рисунок 4.12 – Общий вид стрелочного перевода типа Р65 марки 1/11 на железобетонных плитах

Под один стрелочный перевод укладывается 25 плит при рельсах Р50, 27 плит – при рельсах Р65 и марке 1/11 и 46 плит – при марке 1/18 (Рисунок 4.13).

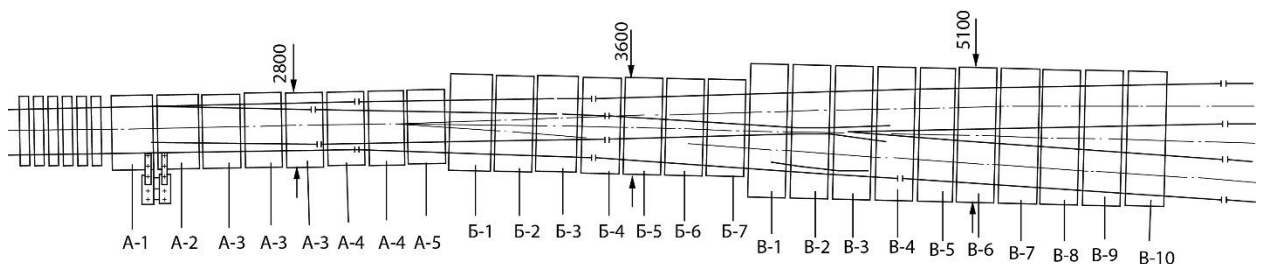


Рисунок 4.13 – Схема раскладки плит в стрелочном переводе марки 1/11 с рельсами типа Р50

Стрелочные переводы на плитном основании были собраны из типовых металлических частей, которые широко использовались в проектах массового производства. Железобетонные плиты для основания изготавливались на заводах, специализирующихся на производстве железобетонных шпал. Их изготовление проводилось по той же технологии, что и для обычных железобетонных подрельсовых оснований. Плиты формовались на вибростолах в специальных

формах, предусмотренных для предварительного натяжения арматуры. Окончательная обработка бетона проводилась в специальных пропарочных камерах, обеспечивающих необходимую термовлажностную обработку.

Плиты изготавливались из бетона марки 500 и армировались предварительно напряженной арматурой в продольном направлении и ненапряженной арматурой в поперечном направлении. В первых проектах стрелочных переводов типа Р50 марки 1/11 использовались шурупы в качестве крепежителей металлических частей, для чего в железобетонных плитах устанавливались деревянные дюбели. Однако, из-за неудовлетворительной работы шурупов в этих проектах, начиная с 1963 года, в плитах было предусмотрено использование крепежителей типа креплений КБ.

Для удобства подъемки и переноски плит при монтаже стрелочного перевода на звеносборочной базе, а также для выправки плит в профиле и по уровню, были созданы специальные ниши. Внутри них были установлены строповочные петли и упорные уголки для использования домкратов.

Конструкция металлических частей стрелочного перевода осталась неизменной, за исключением размещения отверстий для крепления шурупов и болтов в металлических подкладках. Металлические подкладки крепились к железобетонным плитам при помощи двух крепежителей.

Для сокращения типоразмеров плит в левых и правых стрелочных переводах, они были разложены перпендикулярно биссектрисе стрелочного угла.

Перед укладкой стрелочных переводов на плитах необходимо провести очистку и уплотнение балласта, на который они будут укладываться. Для достижения более точной планировки поверхности балластного слоя и возможности корректировки положения отдельных плит, на основной слой балласта наносится 5 см мелкого щебня фракции 7-25 мм без уплотнения.

Производство опытной партии плит, их укладка и результаты эксплуатации показали, что необходимо тщательно соблюдать прямолинейность верхней

поверхности плит, а также размеры по высоте и расположение закладных деталей для скреплений.

Отклонение верхней поверхности плит от плоскости на более чем 1 мм негативно влияет на опирание рельсов, ухудшает взаимодействие между путями и подвижным составом, требует подбора прокладок для скреплений по высоте. В некоторых случаях отклонение высоты плит значительно увеличивает объем работ по коррекции положения плит в профиле и выравниванию.

С 1961 по 1965 год было уложено в путь 90 стрелочных переводов на плитах, включая 16 переводов типа Р65 (Рисунок 4.14). Результаты динамико-прочностных испытаний показали, что напряжения в элементах стрелочных переводов, упругие деформации рельсовой колеи и напряжения в бетоне плит не превышают допустимых значений [50].

В процессе эксплуатационных наблюдений были выполнены измерения геометрии рельсовой колеи в различных участках стрелочных переводов. Измерения проводились на расстоянии 1000 мм от острия, у острия острияков, по оси 7-ой подкладки с подушкой, в корне острияков по прямому и боковому пути, в середине переводной кривой, в крестовине: передний стык, в сечении 40 мм и задний стык, при этом расстояние в крестовине составляло 1477 мм. Проектная колея в переводах составляла 1524 мм и 1435 мм по прямому и боковому пути соответственно.

Из анализа характеристик состояния стрелочных переводов за 4-х летний период (с 1970 по 1973 год), можно сделать вывод, что отклонения ширины рельсовой колеи на стрелке в среднем составили 1,7 мм в сторону уширения и 0,1 мм в сторону сужения. На крестовине отклонения составили соответственно 0,9 мм и менее 0,1 мм.

При переводах по прямому направлению средние отклонения ширины колеи от допусков составили 2,9 мм в сторону уширения и 0,1 мм в сторону сужения. На переводной кривой (боковое направление) отступления составили 1,1 мм в сторону

уширения и 11,3 мм в сторону сужения. Из анализа этих данных видно, что в процессе эксплуатации ширина колеи увеличивалась.

Опыт эксплуатации показал, что на плитном основании наиболее уязвимыми местами стрелочных переводов являются скрепления. Для обеспечения стабильного положения рельсовых нитей на плитах рекомендуется использовать более совершенные промежуточные скрепления.



Рисунок 4.14 – Вид стрелочного перевода со стороны его закрестовинной части

В процессе эксплуатации бетонных плит не были превышены допустимые для бетона напряжения, однако возникли дефекты в виде сколов бетона на продольных и торцевых краях, а также трещин вглубь бетона с обнажением арматуры. Некоторые плиты имели сквозные трещины, образовавшиеся как при укладке, так и в процессе эксплуатации [50].

Анализ затрат труда на текущее содержание стрелочных переводов на железобетонных плитах с 1970 по 1973 годы показал, что на исправление уровня средние затраты труда составили 13,8 % от общего объема затрат, на исправление ширины рельсовой колеи - 36,6 %, а на прочие виды работ - 49,6 %.

Анализ опыта применения стрелочных переводов на плитном основании позволяет сделать следующий вывод: целесообразно вновь использовать стрелочные переводы на плитном основании, опираясь на современные типы скреплений и конструктивные элементы металлических частей.

4.3 Моделирование поведения плитного основания стрелочного перевода нового поколения при действии внешней динамической нагрузки от экипажа

В мировой практике используются различные виды железобетонного подрельсового основания – шпалы, блоки, рамы, плиты, монолитный бетон и т.д.

В настоящее время перспективными конструкциями верхнего строения пути на отечественных железных дорогах является путь на железобетонном подрельсовом основании в виде шпал или плит.

Железобетонные плиты могут использоваться как основание и опора для традиционных конструкций пути с балластом, так и для безбалластных вариантов пути [51, 52].

Исследования эксплуатации подрельсовых оснований в виде железобетонных брусьев показали, что в целом они обеспечивают надежность конструкции и эффективность перевозочного процесса, однако, для линий с высокими скоростями движения поездов и линий с тяжеловесным движением, возможно стоит рассмотреть использование других видов железобетонного основания, как для путей на перегоне, так и для стрелочных переводов. Одно из важных направлений развития использования железобетонного основания – создание переводов, полностью основанных на плитном основании.

Специалистами было проведено исследование опытной эксплуатации стрелочных переводов на основании в виде плит. В целом, результаты анализа позволяют положительно оценить такую конструкцию. Однако, были выявлены недостатки, большая часть из которых была устранена при последующей разработке модернизированных версий стрелочных переводов [51, 52].

Конструкция железобетонных плит основания стрелочных переводов была выполнена с постоянным поперечным сечением и размером вдоль рельсовой нити 1,625 м. Это позволило разместить три рельсовые опоры на одной плите. В направлении, перпендикулярном рельсам, плиты имели размеры от 2,8 до 5,2 м, в зависимости от их положения относительно стрелочного перевода. Для переводов

типа P50 толщина железобетонных плит составляла 0,16 м, а для переводов типов P65, P50 и марки 1/18 – 0,18 м. Общий вес плитных элементов с такими геометрическими характеристиками варьировался от 2 000 до 3 750 кг, что позволяло устанавливать их с помощью небольших грузоподъемных машин.

Расчет плиты был выполнен в несколько этапов. Сначала было проведено моделирование воздействия от подвижного состава. Затем произведен расчет плиты на статическую нагрузку, с учетом внутренних усилий, включая изгибающие моменты. На последнем этапе была произведена оптимизация арматуры и проверка на прочность и трещиностойкость. Рассмотрение воздействия нагрузки от подвижного состава осуществлялось в квазистатической постановке [53].

Проведенный анализ ретроспективных документов показал, что стрелочные переводы на плитном основании рассчитывались на воздействие локомотива с нагрузкой 235 кН и вагонов с нагрузкой 215 кН. Для расчета использовалось значение модуля упругости U железнодорожного пути, которое было принято равным 5 Т/см^2 .

Внутренние усилия в плите, включая изгибающие моменты и поперечные силы, определялись при условии, что плита лежит на сплошном равномерном упругом винклеровском основании. Коэффициент постели этого основания принимался - 10 кГ/см^3 .

Основание стрелочного перевода принималось состоящим из прямоугольных элементов, которые воспринимают продольную расчетную нагрузку, соответствующих положению колесной пары на рельсовой нити. Исходя из этого, можно предположить, что деформации плиты на упругом основании происходят по цилиндрической поверхности, и плиту под нагрузкой можно представить, как набор балок, уложенных на таком же упругом основании [53].

Расчет железобетонных плит на статическую нагрузку проводился методом сечений. Схема расчета элемента приведена на рисунке 4.15.

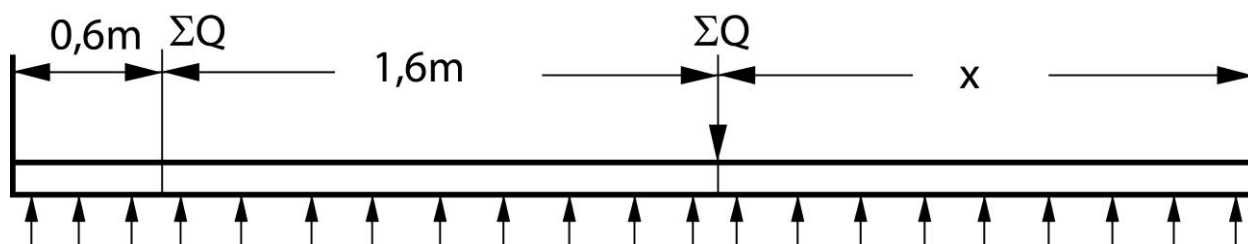


Рисунок 4.15 – Расчетная схема плиты стрелочного перевода

Необходимая для расчета по условиям равновесия сумма реакций опор, в пределах геометрических размеров одной плиты, обозначается как ΣQ . Величина X , представленная на рисунке 4.15, может меняться по длине плитного элемента и принимать значения в диапазоне от 0,6 до 3,0 м.

При исследовании поведения и проектировании плитного основания стрелочного перевода важным фактором является передача динамической нагрузки от подвижного состава на само основание. В данном исследовании предлагается следующий алгоритм расчета: сначала рассматривается динамический контакт колеса и рельса (с определением сил, действующих на рельс), затем изучается деформация рельса, и после этого моделируется динамическое поведение плиты. Такой алгоритм позволяет построить временные зависимости всех основных составляющих функций напряженно-деформированного состояния верхнего строения пути в области стрелочного перевода [53].

Современное развитие железнодорожного транспорта требует увеличения скоростей поездов, нагрузок на колесные пары, массы и длины составов, при сохранении высокого уровня безопасности. Для успешной реализации этих целей, необходимо разработать и протестировать модель контакта колеса и рельса, учитывающую параметры движения поезда (скорость и ускорение), волновые и температурные процессы в рельсах, геометрию железнодорожного пути (прямые участки, кривые, подъемы и т.д.) и наличие дефектов в контактирующих элементах [53, 54].

Для определения внешней нагрузки, передаваемой на рельсы от колесных пар, необходимо рассмотреть контактную задачу и учесть местную деформацию материала рельса, а также его деформацию из-за изгиба и кручения. В литературе

можно найти различные зависимости между силой контактного взаимодействия и распределением нагрузки в пределах контактной зоны, которые могут быть разделены на несколько групп. Каждая из этих зависимостей может быть представлена одним из выражений, причем значения входящих параметров могут различаться в зависимости от начальных условий контакта и воздействия. Для сравнения результатов, полученных с использованием предлагаемого подхода, было выбрано несколько моделей. Это контактная модель Герца – Беляева (4.46а), линейно-упругая сила (4.46б) и вязкоупругая модель с экспоненциальным ядром релаксации (4.46в):

$$P = k \cdot \alpha^{3/2}, \quad (4.46а)$$

$$P = E_1 \cdot (\alpha - w), \quad (4.46б)$$

$$P = E_1 \cdot (\alpha - w) - \frac{E_1}{\tau_1} \int_0^t (\dot{\alpha} - \dot{w}) \cdot e^{-\frac{t-t'}{\tau_1}} dt' \quad (4.46в)$$

где α – местная деформация материалов рельса и колеса, k – коэффициент, определяющий геометрию контактирующих тел и упругих характеристик их материалов, E_1 – модуль упругости области взаимодействия колесной пары и рельса, w – перемещение нижней грани подошвы рельса, т.е. фактически прогиб рельса, σ_1 – коэффициент Пуассона для колесной пары, τ_1 – время релаксации в случае вязкоупругой модели, $\tau_1 = \eta_1 / E_1$, η_1 – коэффициент вязкого сопротивления.

Также для проведения сравнительного анализа предлагается использовать несколько более современных моделей контакта, функциональные соотношения, которых содержат несколько выражений, а именно, упругопластические модели Кильчевского (4.46г) и Александрова-Кадомцева (4.46д), модель с разгрузкой (4.46е), модель Абрате (4.46ж), линеаризованную модель с изменяющимися механическими параметрами в зависимости от этапа нагружения (4.46з), модель Шимасу (4.46и), эмпирическую модель (4.46к), трехфазную энергетическую модель (4.46л).

$$\alpha = \begin{cases} bP^{2/3}, & dP/dt > 0, P < P_b, \\ bP^{2/3} + Pd, & dP/dt > 0, P > P_b, \\ bP^{2/3} + P_{max}d, & dP/dt < 0, P_{max} > P_b, \end{cases} \quad (4.46г)$$

$$\alpha = \begin{cases} bP^{2/3}, & dP/dt > 0, P_{max} < P_1, \\ (1 + \beta)c_1 + (1 - \beta)Pd, & dP/dt > 0, P_{max} > P_1, \\ b_f P^{2/3} + \alpha_p(P_{max}), & dP/dt < 0, P_{max} > P_1, \end{cases} \quad (4.46д)$$

$$P = P_m \left[\frac{(\alpha - \alpha_0)}{(\alpha_m - \alpha_0)} \right]^q, \text{ для этапа разгрузки} \quad (4.46е)$$

$$P = P_m \left[\frac{(\alpha - \alpha_0)}{(\alpha_m - \alpha_0)} \right]^{1.5}, \quad (4.46ж)$$

$$P = k_1 \alpha, \quad k_1 = P_m^{1/3} k^{2/3}, \quad (4.46з)$$

$$\alpha = \left(\frac{P}{k_H} \right)^{2/3} \left(1 - \frac{\ln 2 P^{1/3} k_H^{2/3} K_0}{h} \right), \quad k_H = \frac{4}{3} Q_H \sqrt{R}, \quad (4.46и)$$

$$P = kW_0^n, \quad (4.46к)$$

На первом этапе трехфазовой модели выполняется соотношение (4.46а), на втором при $\alpha_{cr} \leq \alpha \leq \alpha_m$ – $P(\alpha) = K_y(\alpha - \alpha_{cr}) + k_H \alpha_{cr}^{3/2}$, на третьем – $P(\alpha) = K_y(\alpha_m - \alpha_{cr}) + k_H(\alpha^{3/2} - \alpha_m^{3/2} + \alpha_{cr}^{3/2})$, (4.46л)

здесь параметр пластичности $\lambda=5,7$, $\chi = \pi k_{pl} \lambda$, $b = ((9\pi^2(k_1 + k)^2)/16R)^{1/3}$,

$$k_1 = (1 - \sigma_1^2)/E_1, \quad k = (1 - \sigma^2)/E, \quad R_p^{-1} = R^{-1} - R_f^{-1}, \quad P_1 = \chi^3(3R(k_1 + k)/4)^2,$$

$$b_f = R_f^{-1/3}(3(k_1 + k)/4)^{2/3}, \quad c_1 = 3\chi^{1/2}(k_1 + k)/8, \quad R_f = (4/3(k_1 + k))P_{max}^{1/2}\chi^{-3/2},$$

$$\alpha_p(P_{max}) = (1 - \beta)P_{max}(2\chi R_p)^{-1}, \quad K_y = 1.5k_H\sqrt{\alpha_{cr}}, \quad d = 1/2\chi R, \quad k_{pl} - \text{наименьшая из}$$

пластических констант, P_m – максимальное значение контактной силы перед началом этапа разгрузки, α_m – максимальное смятие материала в области взаимодействия, α_0 – текущее значение смятия, α_p – предельное значение смятия колеса, α_{cr} – предельное значение смятия рельса, k_H – контактная жесткость, определяемая радиусом ударника R и эффективным контактным модулем Q_H , $\beta = 0,33$.

Результаты исследований показали, что для описания взаимосвязи силовых, геометрических и кинематических характеристик, которые сопровождают

деформацию рельса при высокоскоростном движении колесной пары, наиболее оптимальна модель, объединяющая усилия в областях с одинаковыми напряжениями на контактных поверхностях двух тел. Кроме того, в модели учитывается динамика по времени, особенно если скорость движения состава становится сопоставимой со скоростями упругих волн в верхнем строении пути:

$$P(x, y, t) = \sum_{x=0}^{x_k} \sum_{y=0}^{y_k} \sum_{t_k}^{t_{k+1}} \left[(\alpha_{xyt} - w_0) \frac{E_{xyt}}{A_k} + (\alpha_{xyt} - w_0) E_T \alpha_T + \frac{\partial(\alpha_{xyt} - w_0)}{\partial t} \frac{E_v r_v}{G_m} \right] \times A_{pr} F_{def}, \quad (4.47)$$

где x_k, y_k – координаты начала соответствующей области равного напряжения в зоне контакта колеса и рельса (x – отсчитывается вдоль рельса), t_k – время появления колесной пары в точке с нулевыми геометрическими координатами на поверхности катания рельса, α_{xyt} – местное смятие в заданной точке в определенный момент времени, w_0 – перемещение подошвы рельса в исследуемом поперечном сечении от действия колесной пары, находящейся в своем предыдущем положении, A_k – площадь области одинаковых напряжений, E_{xyt} – модуль упругости в некоторой точке контактного пятна с момента приложения нагрузки в нулевой точке, E_T – приведенный модуль вязкоупругого сопротивления, α_T – коэффициент температурного расширения материала, G_m – медианное значения скоростей фронтов упругих волн, E_v – градиент изменения модуля упругости в зависимости от времени с начала нагружения, r_v – расстояние от нулевой до искомой точки, A_{pr} – приведенная площадь поверхности контакта, F_{def} – функция дефектов на поверхности катания колеса и рельса, а также боковой поверхности рельса и реборды.

Решение определяющих интегро-дифференциальных уравнений, полученных с помощью выражений (4.46) и (4.47) предлагается искать численно с помощью ЭВМ. Для этого характерное время прохода упругой волной рельса по его толщине делится на k равных частей. Продолжительность элементарного временного интервала τ_b зависит от частоты собственных колебаний рельса и скорости распространения фронтов упругих волн в ней.

В ходе решения контактной задачи была получена графическая зависимость, отражающая напряжения в зоне контакта между колесом и рельсом на прямом участке пути в условиях отсутствия дефектов. Эти результаты совпадают с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований (Рисунок 4.16).

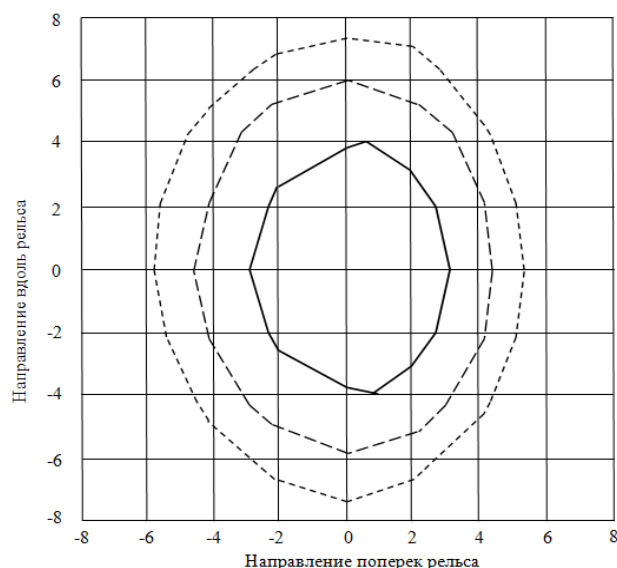


Рисунок 4.16 – Площадь контакта рельса с колесом, напряжения показаны в виде изолиний: сплошная обозначает 450 МПа, длинный штрих - 300 МПа, короткий штрих - 150 МПа

Предложенный подход к определению параметров взаимодействия колеса и рельса, учитывающий множество факторов, позволяет моделировать процессы, происходящие в рельсе, включая скоростное и высокоскоростное движение. Этот подход рекомендуется использовать при проектировании стрелочных переводов на плитном основании [55].

Задачи о поперечном динамическом воздействии на балку в различных постановках и с учетом различных факторов были неоднократно исследованы отечественными и зарубежными учеными. Одним из первых, эта задача была рассмотрена Коксом, который исходил из элементарных представлений о явлении динамического воздействия. Существенный шаг в развитии теории динамического воздействия был сделан Тимошенко, который объединил задачу о развитии местных деформаций ударяющего тела и балки в месте контакта и задачу колебаний балки. Динамическим воздействиям посвящены монографии

Филиппова и Голдсмита, в которых рассматриваются не только теоретические подходы, но и подходы, основанные на экспериментах. В этих работах рассматривались динамические воздействия с учетом стационарных и нестационарных процессов в балке. Появление новых конструкционных материалов и возрастающие потребности инженерной практики в строительстве и машиностроении заставляют исследователей совершенствовать модели динамического воздействия, поведения тел при деформировании, методы расчета и учитывать различные реологические свойства контактирующих тел (на которое и через которое передается внешняя нагрузка, т.е. фактически, колесная пара и рельс, закрепленный с учетом особенностей конструкции рельсошпальной решетки или плитного основания). Упругопластический характер местных деформаций впервые был рассмотрен в работах Кильчевского, данное направление получило развитие в работах Бирюкова, Кадомцева и Локтева. Были проведены расчеты с учётом растяжения срединной линии балки (рельса) в работе, вязкоупругих свойств колесной пары, через которую передается внешняя динамическая нагрузка, в целом вязкоупругой модели взаимодействия, анизотропных свойств мишени (в данном случае такая модель может быть обобщена на верхнее строение железнодорожного пути) и предварительного напряжения. Но, несмотря на существенные достижения в задачах теории динамического воздействия, такие вопросы, как влияние неупругих свойств колеса и рельса в месте взаимодействия на динамические характеристики контакта с учетом волновых процессов, растяжения-сжатия срединной линии рельса и инерции контактной области, являются не до конца изученными. В настоящей работе предпринята попытка расширить представление о деформировании рельса при динамическом воздействии колесной пары с учетом перечисленных факторов [56].

Для моделирования динамического поведения рельса под действием колесной пары используются определяющие соотношения для криволинейных стержней с поперечным сечением, которые могут иметь различное удлинение и

условия закрепления в зависимости от используемых промежуточных скреплений, подуклонки и разуклонки в прямых и на стрелочных кривых. Динамическое поведение рельса с учетом растяжения срединной плоскости описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial u}{\partial s} = (\varphi \times \tau) + \frac{N \cdot \tau}{EF} \tau; \quad (4.48)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial s} = A \cdot M + B \cdot N; \quad (4.49)$$

$$\frac{\partial M}{\partial s} = (N \times \tau) + C \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - (N^0 \times (\varphi \times \tau)); \quad (4.50)$$

$$\frac{\partial N}{\partial s} = \rho F \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + f \frac{\partial u}{\partial t} - q \sin \Omega t; \quad (4.51)$$

$$\frac{\partial N^0}{\partial s} = -q^0, \quad (4.52)$$

где приняты следующие обозначения: t – время; s – продольная координата, отсчитываемая вдоль рельса; u – вектор линейного смещения оси стержня; φ – вектор углового смещения сечения; M и N – векторы моментов и сил в выбранном сечении; τ – орт, касательный к оси криволинейного стержня; A и B – матрицы податливостей в ортогональном базисе n и b (нормаль и бинормаль, относительно орта τ в естественном трехграннике); C – матрица приведенных к длине массовых моментов инерции; ρ – плотность материала рельса; f – коэффициент вязкого трения; q – вектор распределенной нагрузки, приведенной к продольной оси; N^0 и q^0 – векторы силы и распределенной нагрузки, предварительно действующих на стержень; Ω – циклическая частота внешних вынуждающих воздействий.

При этом считается, что в базисе естественного трехгранника и ортов τ , n и b матрицы A и C являются диагональными, причем значения их компонент определяются следующими соотношениями:

$$a_{11} = 1/GJ_{кр}; a_{22} = 1/EJ_n; a_{33} = 1/EJ_b; \quad (4.53)$$

$$c_{11} = \rho \cdot (J_n + J_b); c_{22} = \rho J_n; c_{33} = \rho J_b, \quad (4.54)$$

где G – модуль сдвига, $J_{кр}$ – момент инерции при кручении, J_n , J_b – моменты инерции относительно осей коллинеарных нормали и бинормали естественного трехгранника.

Предполагается, что в результате динамического воздействия на рельс в нем распространяются продольные и изгибные волны, фронты которых являются плоскими поверхностями сильного разрыва, расширяющимися с нормальными скоростями $G^{(\alpha)}$.

За волновым фронтом некоторая искомая функция Z может быть представлена в виде ряда:

$$Z(z, t) = \sum_{\alpha=1}^2 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} [Z_{,(k)}] \left(t - \frac{z}{G^{(\alpha)}}\right)^k H\left(t - \frac{z}{G^{(\alpha)}}\right), \quad (4.55)$$

где $[Z_{,(k)}] = Z_{,(k)}^+ - Z_{,(k)}^- = \left[\frac{\partial^k Z}{\partial t^k}\right]$ – скачки k -го порядка по времени t от функции Z на волновой поверхности Σ , т.е. при $t = \frac{z}{G^{(\alpha)}}$; z – продольная координата; индексы «+» и «-» означают, что величина вычисляется, соответственно, непосредственно перед и за волновым фронтом; индекс α обозначает порядковый номер волны ($\alpha = 1$ для квазипродольной волны (волны растяжения-сжатия), $\alpha = 2$ для квазипоперечной волны (изгибная волна)); $H(t)$ – единичная функция Хевисайда.

Для перехода от производной по координате к производной по времени необходимо использовать условие совместности на волновой поверхности Σ , которое для рельса имеет вид:

$$G \left[\frac{\partial Z_{,(k)}}{\partial z}\right] = -[Z_{,(k+1)}] + \frac{\delta [Z_{,(k)}]}{\delta t}, \quad (4.56)$$

где $\frac{\delta}{\delta t}$ – полная производная по времени от функции на движущейся поверхности Σ .

Дифференцируя уравнения движения (4.48) – (4.52) k раз по времени, переходя от неизвестных величин к их скачкам и используя условие совместности (4.56), получим систему рекуррентных дифференциальных уравнений для определения скоростей волн и скачков неизвестных величин.

Учитывая только нулевой член лучевого ряда (4.55), что допускается из-за малого времени динамического контакта колеса и рельса в заданной точке, из уравнений (4.48) – (4.52) можно определить скорости продольной и изгибной волн и динамические условия совместности:

$$G^{(1)} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, G^{(2)} = \sqrt{\frac{K\mu}{\rho}}, \quad (4.57)$$

$$Q = -\rho F G^{(2)} W, N = -\rho F G^{(1)} v, \quad (4.58)$$

а также соотношение, которое связывает нормальный прогиб с его же скоростью и скоростью упругой волны второго порядка (скорость изгибной волны):

$$\frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{W}{G^{(2)}}. \quad (4.59)$$

Колесо моделируется цилиндром массой m , оказывает динамическое воздействие на рельс с нормальной компонентой скорости v_0 . Динамическое воздействие начинается в момент времени $t = 0$ (Рисунок 4.17).

Движение колеса после начала динамического воздействия на рельс в заданной точке с учётом инерции пятна контакта описывается уравнением:

$$m\ddot{y} = m(\ddot{\delta} + \dot{W}) = \begin{cases} -P(t) - \rho h \pi a^2 \dot{W}, & \frac{dP}{dt} \geq 0 \\ -P(t) - \rho h \pi a_{max}^2 \dot{W}, & \frac{dP}{dt} < 0 \end{cases}, \quad (4.60)$$

где $P(t)$ – контактная сила; $\delta(t)$ – смятие материала в зоне контакта; $a(t)$ – радиус области контакта ω ; h – высота сечения рельса.

$$P(t) = \iint_{\omega} q(x, y, t) dx dy, \quad (4.61)$$

где $q(x, y, t)$ – давление в области контакта ω .

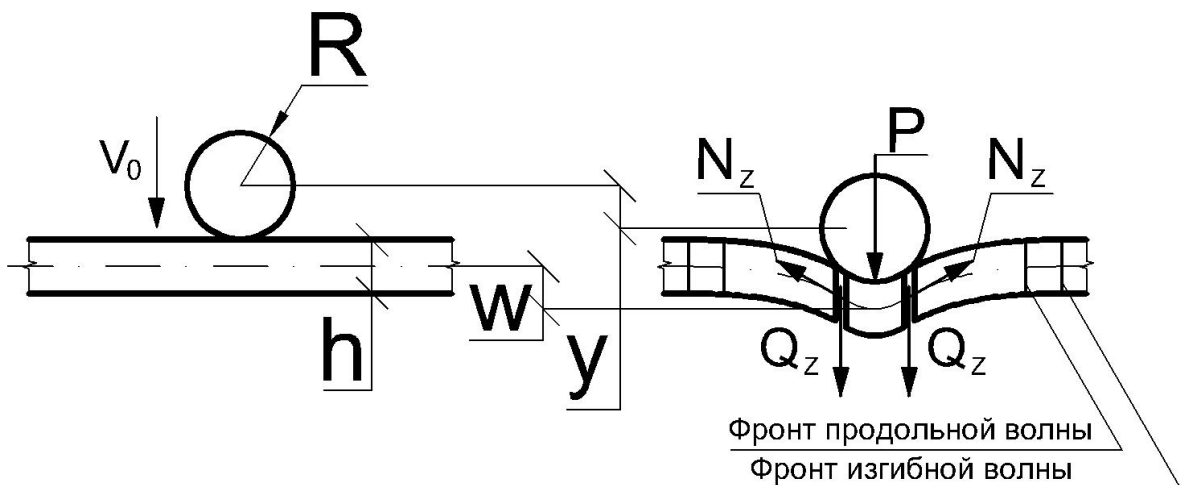


Рисунок 4.17 – Схема динамического взаимодействия колеса и рельса

Уравнение движения части рельса, находящегося в контакте с колесом, с учётом инерции контактного пятна имеет вид:

$$2N \frac{\partial w}{\partial z} + 2Q + P(t) = \begin{cases} \rho h \pi a^2 \dot{W}, & \frac{dP}{dt} \geq 0 \\ \rho h \pi a_{max}^2 \dot{W}, & \frac{dP}{dt} < 0 \end{cases}. \quad (4.62)$$

Уравнения (4.60) и (4.62) решаются при следующих начальных условиях:

$$y|_{t=0} = 0, \dot{y}|_{t=0} = v_0; w|_{t=0} = 0, \dot{w}|_{t=0} = 0. \quad (4.63)$$

Соотношения между силой взаимодействия колеса и рельса $P(t)$, местным смятием $\delta(t)$ и радиусом области контакта $a(t)$ получаются из решения контактных задач (4.46а) – (4.46л), (4.47).

Подставляя соотношения (4.57) – (4.59) в (4.62), можно получить дифференциальное уравнение относительно $W(t)$, $P(t)$ и $\delta(t)$:

$$-W(1 + e\delta) + \frac{1}{2\rho FG^{(2)}} P(t) = \frac{h\pi a^2}{2FG^{(2)}} \dot{W}, \quad (4.64)$$

где $e = \left(\frac{G^{(1)}}{G^{(2)}}\right)^2 \frac{1-\sigma}{\sigma h}$. Здесь $W(t)$ и $\dot{W}(t)$ получаются из (4.60) с учётом (4.63), а контактная сила $P(t)$ и радиус контактного пятна $a(t)$ определяются выражениями (4.60) – (4.64). В итоге получим интегро-дифференциальное уравнение относительно $\delta(t)$, $\dot{\delta}(t)$ и $\ddot{\delta}(t)$.

Для случая упругого взаимодействия колеса и рельса при учёте инерции контактного пятна определяющее уравнение приобретает известный вид.

Для упругопластического контакта на каждом этапе взаимодействия (упругое деформирование, упругопластическое деформирование и упругая разгрузка) записывается отдельное интегро-дифференциальное уравнение с учётом начальных условий, полученных при решении уравнения, соответствующего предыдущему этапу взаимодействия (4.46г, д, е, л).

Получившееся уравнение решаем численно методом разложения искомой величины в степенной ряд:

$$\delta(t_{i+1}) = \delta(t_i) + H\dot{\delta}(t_i) + \frac{H^2}{2}\ddot{\delta}(t_i), \quad (4.65)$$

$$\dot{\delta}(t_{i+1}) = \dot{\delta}(t_i) + H\ddot{\delta}(t_i), \quad (4.66)$$

где $H = t_{i+1} - t_i$ – шаг по времени. Здесь $\ddot{\delta}(t_i)$ находится из функционального уравнения на каждом шаге. Интегралы в функциональном уравнении типа (4.64) можно преобразовать с помощью метода трапеций.

При $t = 0$ начальные условия известны:

$$\delta|_{t=0} = 0, \dot{\delta}|_{t=0} = v_0. \quad (4.67)$$

Для иллюстрации полученных результатов рассмотрим динамическое воздействие колеса и рельса при различных параметрах взаимодействия.

На рисунке 4.18 приведены зависимости силы взаимодействия колеса и рельса от времени для случая динамического взаимодействия колеса и рельса, когда коэффициент Пуассона принимался равным $\nu = 0,3$, модуль упругости – $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па, плотность материала контактирующих тел – $\rho = 7850$ кг/м³. Для случая упругопластического характера местного смятия предел текучести принимался равным $Y = 240$ МПа. Расчёт проводился как с учётом, так и без учёта растяжения срединной плоскости, с учётом и без учёта инерции пятна контакта, а также для упругого и упругопластического законов деформирования материала в месте контакта колеса и рельса. Кривые на рисунке 4.18, указанные номерами сбоку, построенные для следующих моделей взаимодействия: кривая 1 – упругая модель (4.46а); 2 – упругая модель без учёта растяжения срединной плоскости; 3 – упругая модель с учётом растяжения срединной плоскости и инерции пятна контакта; 4 – упругопластическая модель (4.46д); 5 – упругопластическая модель с учётом инерции пятна контакта (4.46г); 6 – упругопластическая модель без учёта растяжения срединной плоскости; 7 – упругая модель без учёта растяжения срединной плоскости; 8 – упругая модель с учётом растяжения срединной плоскости; 9 – упругая модель без учёта растяжения срединной плоскости [57, 58].

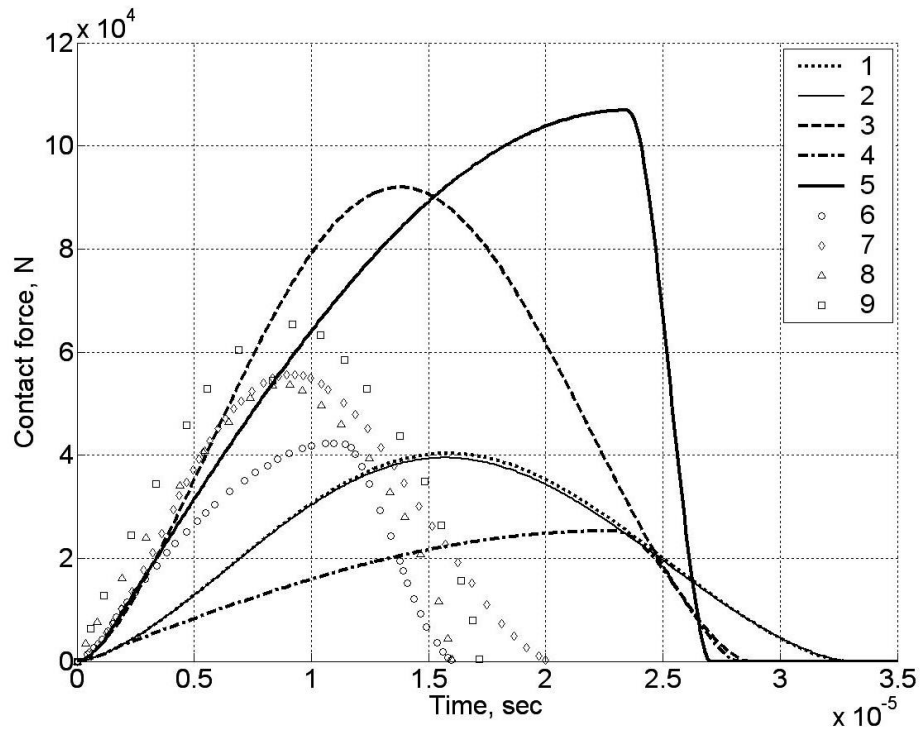


Рисунок 4.18 – Зависимость контактной силы от времени при движении экипажа со скоростью $v = 28.5$ м/с

На рисунке 4.18 можно видеть, что учет инерции контактной области существенно увеличивает максимум контактной силы и незначительно уменьшает время контакта, учет же растяжения срединной поверхности практически не вносит никаких изменений в результирующую зависимость.

На рисунке 4.19 представлены зависимости максимальной величины силы взаимодействия колеса и рельса от начальной скорости для тех же параметров, что и на рисунке 4.18. Кривая 1 получена для упругой модели без учёта инерции пятна контакта (4.46а); кривая 2 представляет упругую модель с учётом инерции пятна контакта; кривая 3 – упругопластическая модель без учёта инерции пятна контакта (4.46д); кривая 4 – упругопластическая модель с учётом инерции пятна контакта.

На графиках, изображенных на рисунке 4.19, видно, что учет инерции контактной области увеличивает максимум контактной силы, причем для случая упругопластической модели контакта для начальных скоростей воздействия больших 5 м/с, значение силы взаимодействия увеличивается в три раза. Также видно, что при учете инерции контактного пятна зависимости характеристик

динамического поведения рельса от начальной скорости воздействия становятся более линейными.

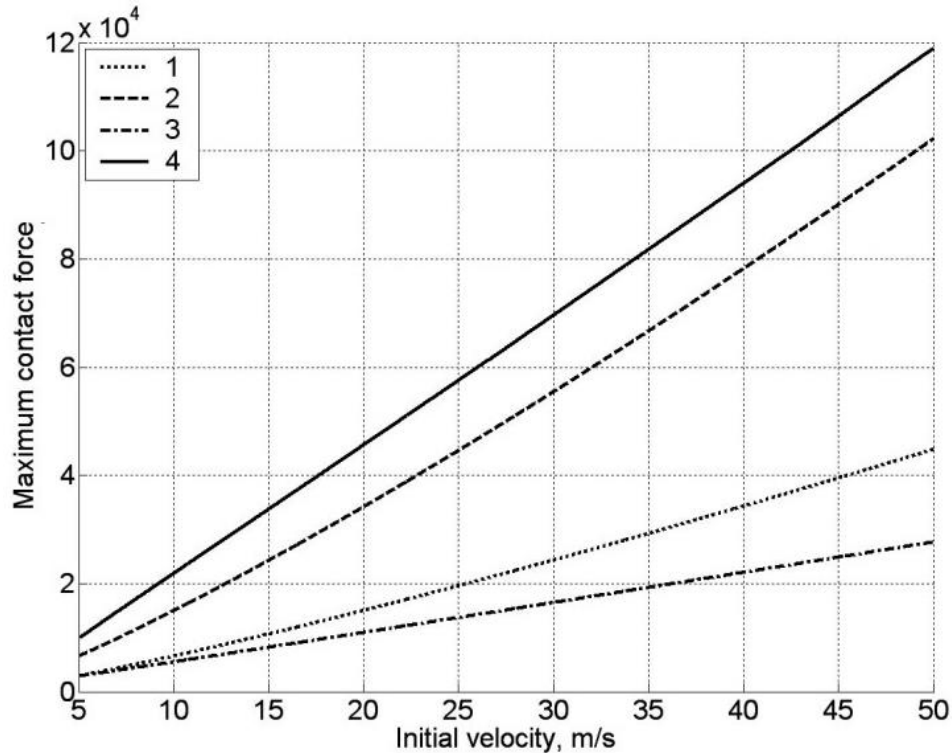


Рисунок 4.19 – Зависимость максимальной величины контактной силы от начальной скорости воздействия колеса и рельса

На рисунке 4.20 изображены зависимости времени развития местных деформаций в рельсе в месте взаимодействия колеса и рельса от начальной скорости воздействия. Кривая 1 представляет собой экспериментальные данные; кривая 2 построена для упругой модели взаимодействия без учёта инерции пятна контакта (4.46а); кривая 3 представляет упругую модель с учётом инерции пятна контакта; кривая 4 – упругопластическая модель без учёта инерции пятна контакта (4.46г); кривая 5 – упругопластическая модель с учётом инерции пятна контакта.

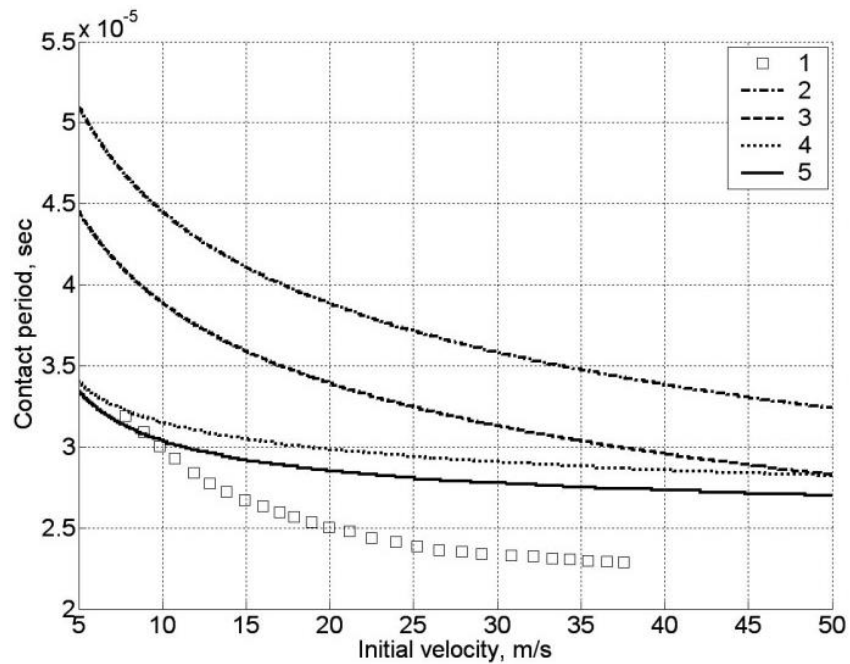


Рисунок 4.20 – Зависимость времени развития местных деформаций в рельсе в месте взаимодействия колеса и рельса от начальной скорости воздействия

На рисунке 4.20 видно, что использование упругопластической модели контактного взаимодействия с учетом инерции контактного пятна и статического предела текучести дает неплохое приближение к результатам эксперимента при начальных скоростях воздействия до 10 м/с. При увеличении начальной скорости воздействия разница между величинами времени деформирования для упругой и упругопластической моделей взаимодействия с учетом и без учета инерции уменьшается и все предложенные подходы дают похожий результат [57, 58].

Предлагается представить железнодорожный путь в виде набора железобетонных плит с небольшими утолщениями в месте установки креплений с рельсами (Рисунок 4.21) и соединенных между собой по разным сторонам периметра. Отдельные плиты могут быть соединены с двух, трех или четырех сторон, в зависимости от конструктивных особенностей пути и технологических схем его ремонта. Настоящее исследование рассматривает модель плитного основания под стрелочным переводом как ортотропную пластину, нижняя поверхность которой лежит на упругом основании, и по контуру выполняются различные краевые условия, моделирующие разные решения крепежа.

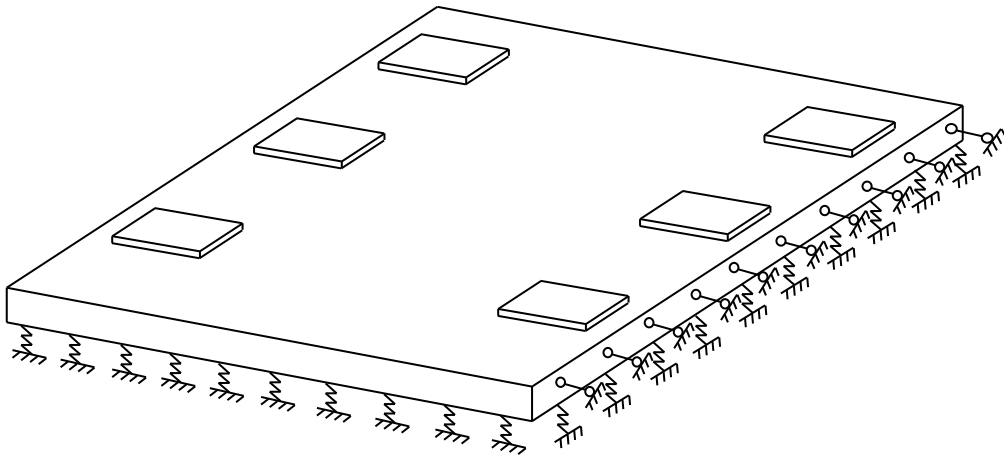


Рисунок 4.21 – Модель прямоугольного элемента плиты основания стрелочного перевода

Представленная на рисунке 4.21 плита моделируется как упругая ортотропная пластинка. Для описания ее динамического поведения применяются волновые уравнения типа Уфлянда-Миндлина-Рейснера. Эти уравнения учитывают анизотропные свойства материала и инерцию вращения и деформации поперечного сдвига характерных сечений элемента в полярной системе координат, которая наилучшим образом подходит для случая цилиндрической анизотропии. Выражения для волновых уравнений записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 & D_{r\theta} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) - \frac{1}{r} \left\{ -D_r \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + D_k \frac{1}{r} \left(\frac{\partial^3 w}{\partial \theta^2 \partial r} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} \right) + D_\theta \frac{1}{r} \varphi + \right. \\
 & \left. + (D_\theta \sigma_r + D_k) \left(\frac{\partial^2}{\partial r \partial \theta} \left(\frac{\partial w}{r \partial \theta} \right) - \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial \theta} \right) + D_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} - \frac{D_k}{r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} - \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) \right\} + \\
 & + KhG_{rz} \left(\frac{\partial w}{\partial r} - \varphi \right) = -\rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2},
 \end{aligned} \tag{4.68}$$

$$KG_{rz} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} - \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + KG_{rz} \frac{1}{r} \left(\frac{\partial w}{\partial r} - \varphi \right) + KG_{\theta z} \frac{1}{r} \left(\frac{\partial^2 w}{r \partial \theta^2} - \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \tag{4.69}$$

$$C_r \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + C_k \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} - C_\theta \frac{u}{r^2} + (C_\theta \sigma_r + C_k) \frac{1}{r} \frac{\partial^2 v}{\partial r \partial \theta} -$$

$$-(C_\theta + C_k) \frac{1}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} = \rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (4.70)$$

$$C_\theta \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + C_k \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2} \right) + (C_r \sigma_\theta + C_k) \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial \theta} +$$

$$+(C_\theta + C_k) \frac{1}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} = \rho h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \quad (4.71)$$

$$D_{r\theta} \frac{1}{r} \frac{\partial^3 w}{\partial r^2 \partial \theta} - \frac{1}{r} \left\{ -D_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} + D_k \left[r \frac{\partial^2}{\partial r^2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} - \psi \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} - \psi \right) - \right. \right.$$

$$\left. - \frac{1}{r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} - \psi \right) \right] + (D_r \sigma_\theta + D_k) \left(\frac{\partial^3 w}{\partial r^2 \partial \theta} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r \partial \theta} \right) -$$

$$\left. - D_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + D_k \frac{1}{r} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \theta \partial r} - \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right) \right\} + Kh G_{\theta z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} - \psi \right) = -\rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}, \quad (4.72)$$

где $D_r = \frac{h^3}{12} B_r$, $D_\theta = \frac{h^3}{12} B_\theta$, $D_k = \frac{h^3}{12} B_k$, $C_r = h B_r$, $C_\theta = h B_\theta$, $C_k = h B_k$,

$$D_{r\theta} = D_r \sigma_\theta + 2D_k, \quad B_r = \frac{E_r}{1 - \sigma_r \sigma_\theta}, \quad B_\theta = \frac{E_\theta}{1 - \sigma_r \sigma_\theta}, \quad B_k = G_{r\theta}, \quad E_r \sigma_r = E_\theta \sigma_\theta, \quad K = \frac{5}{6},$$

D_r , D_θ и C_r , C_θ – жесткости основания пути при изгибе и растяжении-сжатии в характерных направлениях r , θ соответственно; D_k – жесткость при кручении плиты основания железнодорожного пути; C_k – жесткость при сдвиговых деформациях; E_r , E_θ и σ_r , σ_θ – модуль Юнга и коэффициент поперечной деформации в направлениях анизотропии r , θ соответственно; G_{rz} , $G_{\theta z}$ – модуль сдвига для вертикальных плоскостей rz и θz ; $w(r, \theta)$ – вертикальное перемещение медианной поверхности основания пути, $u(r, \theta)$ и $v(r, \theta)$ – касательные перемещения медианной плоскости в направлениях r , θ соответственно; $\varphi(r, \theta)$ и $\psi(r, \theta)$ – функции поворота поперечных сечений в направлении вдоль рельс и вдоль шпал соответственно.

Для уточнения представленной модели конструкции сегмента верхнего строения пути предлагается провести моделирование динамического поведения

рельса в пределах двух смежных шпал под действием колесной пары подвижного состава при помощи уравнений для ортотропного плоского элемента, предварительно-напряженного продольной силой и двумя моментами, что в целом соответствует состоянию сегментов рельса, уложенного в путь с учетом закрепления (Рисунок 4.21), в зависимости от используемых промежуточных скреплений, наличия уравнильных стыков, подуклонки и разуклонки в кривых участках пути. Волновые уравнения для сегмента рельса учитывают поперечный сдвиг и инерцию вращения поперечных сечений и позволяют моделировать процесс распространения упругих волн после начала контакта с колесной парой, что особенно важно для высоких скоростей следования подвижного состава. В безразмерном виде данные соотношения можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} - \frac{1}{r^2} \frac{c_2}{c_1} \varphi + \frac{c_2 \sigma_r + c_3}{c_1 r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial \theta} - \frac{c_2 + c_3}{c_1 r^2} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + \\
& + \frac{12c_4}{c_1} \left(\frac{\partial w}{\partial r} - \varphi \right) = - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \tau^2} + M + \frac{M_r \Delta_r u}{c_1 h \rho}, \\
& \frac{c_4}{c_1} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} - \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{c_4}{c_1} \left(\frac{\partial w}{r \partial r} - \frac{\varphi}{r} \right) + \frac{c_4}{c_1} \left(\frac{\partial^2 w}{r^2 \partial \theta^2} - \frac{\partial \psi}{r \partial \theta} \right) = \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} + q_1 \sin \alpha_1 + \frac{N \Delta_r w}{c_1 h^2 \rho}, \\
& \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{c_3}{c_1 r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} - \frac{c_2}{c_1} \frac{u}{r^2} + \frac{c_2 \sigma_r + c_3}{c_1 r} \frac{\partial^2 v}{\partial r \partial \theta} - \\
& - \frac{c_2 + c_3}{c_1 r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + q_1 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \frac{N \Delta_r u}{c_1 h^2 \rho} + \frac{M_r \Delta_r \varphi}{c_1 \rho}, \\
& \frac{c_2}{c_1 r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{c_3}{c_1} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2} \right) + \frac{\sigma_\theta + c_3}{c_1 r} \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial \theta} + \\
& + \frac{c_2 + c_3}{c_1 r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2} + q_1 \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 + \frac{M_z \Delta_\theta \psi}{c_1 \rho}, \\
& \frac{c_3}{c_1} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{\psi}{r^2} \right) + \frac{c_2}{c_1 r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} + \frac{\sigma_\theta + c_3}{c_1 r} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r \partial \theta} + \frac{c_2 + c_3}{c_1 r^2} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} +
\end{aligned} \tag{4.73}$$

$$+\frac{12c_5}{c_1}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial w}{\partial\theta}-\psi\right)=-\frac{\partial^2\psi}{\partial\tau^2}+\frac{M_z\Delta\theta v}{c_1h\rho},$$

$$\text{где } c_1 = \frac{E_r}{(1-\sigma_r\sigma_\theta)\rho}, \quad c_2 = \frac{E_\theta}{(1-\sigma_r\sigma_\theta)\rho}, \quad c_3 = \frac{G_{r\theta}}{\rho}, \quad c_4 = \frac{KG_{rz}}{\rho}, \quad c_5 = \frac{KG_{\theta z}}{\rho}, \quad q_1 = \frac{qh}{\rho c_1},$$

$$M = \frac{12qR_1 \cos \alpha_1}{\rho h c_1} = \frac{12R_1 \cos \alpha_1}{h^2} q_1, \quad R_1 - \text{радиус колеса пары, } q - \text{приведенная нагрузка,}$$

α_1, α_2 – углы направления наибольшей силы в вертикальной и горизонтальной

плоскости соответственно, $\tau = \frac{t\sqrt{c_1}}{h}, w = \frac{w}{h}, u = \frac{u}{h}, v = \frac{v}{h}, r = \frac{r}{h}, \Delta_r = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial}{\partial r}\right),$

$\Delta_\theta = \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial\theta^2}, N$ – внешняя продольная сила, действующая вдоль рельса, M_r –

внешний изгибающий момент, вектор которого направлен вдоль рельса, M_z – внешний крутящий момент, вектор которого направлен вдоль шпалы.

В выражениях (4.73) величины c_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) обозначают квадраты скоростей упругих волн при отсутствии предварительного нагружения сегмента рельса, при этом цифры 1, 2 определяют квазипродольные волны растяжения-сжатия, скорости которых направлены вдоль направлений r и θ соответственно, цифра 3 определяет волну сдвига с преобладающими деформациями в плоскости $r\theta$, цифры 4, 5 соответствуют квазипоперечным волнам, на фронтах которых преобладает сдвиг в плоскостях $rz, \theta z$ соответственно.

Для определения контактной силы и динамического прогиба плитного элемента под местом динамического воздействия запишем систему уравнений (4.73) в пространстве Лапласа, заменив неизвестные $\varphi, \psi, w, u, v, q_1$ и M на их изображения $\bar{\varphi}, \bar{\psi}, \bar{w}, \bar{u}, \bar{v}, \bar{q}_1$ и \bar{M}

$$\begin{aligned} &\bar{\varphi}_{,rr} + \frac{1}{r}\bar{\varphi}_{,r} + \frac{1}{r^2}\bar{\varphi}_{,\theta\theta} - \frac{1}{r^2}\frac{c_2}{c_1}\bar{\varphi} + \frac{c_2\sigma_r + c_3}{c_1r}\bar{\psi}_{,r\theta} - \frac{c_2 + c_3}{c_1r^2}\bar{\varphi}_{,\theta} + \\ &+ \frac{12c_4}{c_1}(\bar{w}_{,r} - \bar{\varphi}) = -\bar{\varphi}p^2 + \bar{M} + \frac{M_r\Delta_r\bar{u}}{c_1h\rho}, \end{aligned}$$

$$\frac{c_4}{c_1} \left(\bar{w}_{,rr} - \bar{\varphi}_{,r} + \frac{1}{r} \bar{w}_{,r} - \frac{\bar{\varphi}}{r} + \frac{1}{r^2} \bar{w}_{,\theta\theta} - \frac{1}{r} \bar{\psi}_{,\theta} \right) = \bar{w} p^2 + \bar{q}_1 \sin \alpha_1 + \frac{N \Delta_r \bar{w}}{c_1 h^2 \rho},$$

$$\begin{aligned} & \bar{u}_{,rr} + \frac{1}{r} \bar{u}_{,r} + \frac{c_3}{c_1 r^2} \bar{u}_{,\theta\theta} - \frac{c_2}{c_1} \frac{\bar{u}}{r^2} + \frac{c_2 \sigma_r + c_3}{c_1 r} \bar{v}_{,r\theta} - \frac{c_2 + c_3}{c_1 r^2} \bar{v}_{,\theta} = \\ & = \bar{u} p^2 + \bar{q}_1 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \frac{N \Delta_r \bar{u}}{c_1 h^2 \rho} + \frac{M_r \Delta_r \bar{\varphi}}{c_1 \rho}, \end{aligned} \quad (4.74)$$

$$\begin{aligned} & \frac{c_2}{c_1 r^2} \bar{v}_{,\theta\theta} + \frac{c_3}{c_1} \left(\bar{v}_{,rr} + \frac{1}{r} \bar{v}_{,r} - \frac{\bar{v}}{r^2} \right) + \frac{\sigma_\theta + c_3}{c_1 r} \bar{u}_{,r\theta} + \frac{c_2 + c_3}{c_1 r^2} \bar{u}_{,\theta} = \\ & = \bar{v} p^2 + \bar{q}_1 \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 + \frac{M_z \Delta_\theta \bar{\psi}}{c_1 \rho}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{c_3}{c_1} \left(\bar{\psi}_{,rr} + \frac{1}{r} \bar{\psi}_{,r} - \frac{\bar{\psi}}{r^2} \right) + \frac{c_2}{c_1 r^2} \bar{\psi}_{,\theta\theta} + \frac{\sigma_\theta + c_3}{c_1 r} \bar{\varphi}_{,r\theta} + \frac{c_2 + c_3}{c_1 r^2} \bar{\varphi}_{,\theta} + \\ & + \frac{12c_5}{c_1} \left(\frac{1}{r} \bar{w}_{,\theta} - \bar{\psi} \right) = -\bar{\psi} p^2 + \frac{M_z \Delta_\theta \bar{v}}{c_1 h \rho}, \end{aligned}$$

в выражениях (4.74) p – параметр преобразования, индексы r и θ , стоящие после запятой в нижнем регистре, определяют частную производную по соответствующей пространственной координате.

Для решения системы (4.74) в пространстве изображений представим нагрузку $q(\tau, r, \theta)$ от силы взаимодействия колеса и рельса $P(t)$, определяемой одним из выражений (4.46), (4.47), в виде:

$$\bar{q}_1 = \frac{P(p)}{\pi R_c^2} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} (4n+3) P_{2n+1} \left(\cos \frac{\pi r_1}{2R} \right) P_{2n+1} \left(\cos \frac{\pi r}{2R} \right) \cos(m\theta), \quad (4.75)$$

где r_1 – координата точки рельса, в которой происходит динамический контакт с колесной парой, а неизвестные линейные и угловые перемещения представляются в виде разложений в ряды по полиномам Лежандра:

$$\tilde{x} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} x_{2n+m} P_{2n+1} \left(\cos \frac{\pi r}{2R} \right) \cos(m\theta), \quad (4.76)$$

в выражениях типа (4.76) тильда над неизвестным перемещением показывает, что данная величина записана в пространстве изображений, вместо переменной x может стоять любое из перемещений u, v, w, φ, ψ .

Для определения коэффициентов разложений неизвестных перемещений типа (4.76) представим их вблизи исследуемой точки в виде рядов Лорана, в которых $\varepsilon = p^{-2}$

$$x_{2n+m} = x_{2n+m}^0 \varepsilon^0 + x_{2n+m}^1 \varepsilon^1 + x_{2n+m}^2 \varepsilon^2 + x_{2n+m}^3 \varepsilon^3. \quad (4.77)$$

Подставляя ряды типа (4.76) с учетом разложений (4.77) в систему (4.74) и приравнявая множители при величинах ε с одинаковыми показателями степени, получим системы линейных алгебраических уравнений, из которых определим

$$w_{2n+m}^i = \frac{\sin \alpha_1 P_s (A_{\varphi 4} A_{\psi 3} - A_{\varphi 3} A_{\psi 4}) - \cos \alpha_1 P_s [C_{\varphi 2} (A_{P 4} A_{\psi 3} - A_{P 3} A_{\psi 4}) - C_{\psi 2} (A_{P 4} A_{\varphi 3} - A_{P 3} A_{\varphi 4})]}{[C_{w 2} (A_{\varphi 4} A_{\psi 3} - A_{\varphi 3} A_{\psi 4}) + C_{\varphi 2} (A_{w 3} A_{\psi 4} - A_{w 4} A_{\psi 3}) - C_{\psi 2} (A_{w 3} A_{\varphi 4} - A_{w 4} A_{\varphi 3})]} +$$

$$+ \left(\frac{C_{u 4}}{C_{u 1}} \varphi_{2n+m}^{i+1} + \frac{C_{v 4}}{C_{v 5}} \psi_{2n+m}^{i+1} \right) \left(\frac{C_{\psi 2} A_{\varphi 3} - C_{\varphi 2} A_{\psi 3}}{A_{\varphi 4} A_{\psi 3} - A_{\varphi 3} A_{\psi 4}} \right) +$$

$$+ \left(\frac{C_{u 3}}{C_{u 1}} \varphi_{2n+m}^{i+1} + \frac{C_{v 3}}{C_{v 5}} \psi_{2n+m}^{i+1} \right) \left(\frac{C_{\varphi 2} A_{\psi 4} - C_{\psi 2} A_{\varphi 4}}{A_{\varphi 4} A_{\psi 3} - A_{\varphi 3} A_{\psi 4}} \right) + w^{i+1},$$

$$\varphi_{2n+m}^i = \frac{(A_{w 3} A_{\psi 4} - A_{w 4} A_{\psi 3}) w_{2n+m}^i + \cos \alpha_1 P_s (A_{P 4} A_{\psi 3} - A_{P 3} A_{\psi 4}) + \frac{\varphi_{2n+m}^i (A_{\psi 3} C_{u 4} - A_{\psi 4} C_{u 3})}{C_{u 1}}}{(A_{\varphi 4} A_{\psi 3} - A_{\varphi 3} A_{\psi 4})} +$$

$$+ \frac{\frac{\psi_{2n+m}^i (A_{\psi 3} C_{v 4} - A_{\psi 4} C_{v 3}) - v_{2n+m}^{i+1} - u_{2n+m}^{i+1} A_{\psi 4}}{C_{v 5}}}{(A_{\varphi 4} A_{\psi 3} - A_{\varphi 3} A_{\psi 4})}, \quad (4.78)$$

$$\psi_{2n+m}^i = \frac{(A_{w 4} A_{\varphi 3} - A_{w 3} A_{\varphi 4}) w_{2n+m}^i - \cos \alpha_1 P_s (A_{P 4} A_{\varphi 3} - A_{P 3} A_{\varphi 4}) - \frac{\varphi_{2n+m}^i (A_{\varphi 3} C_{u 4} - A_{\varphi 4} C_{u 3})}{C_{u 1}}}{(A_{\varphi 4} A_{\psi 3} - A_{\varphi 3} A_{\psi 4})}$$

$$-\frac{\frac{\psi_{2n+m}^i}{C_{v5}}(A_{\varphi 3}C_{v4} - A_{\varphi 4}C_{v3}) - v_{2n+m}^{i+1} - u_{2n+m}^{i+1}A_{\varphi 4}}{(A_{\varphi 4}A_{\psi 3} - A_{\varphi 3}A_{\psi 4})},$$

$$v_{2n+m}^i = \frac{-\psi_{2n+m}^{i+1} - C_{\psi 5}\psi_{2n+m}^i - C_{\varphi 5}\varphi_{2n+m}^i - C_{w5}w_{2n+m}^i}{C_{v5}},$$

$$u_{2n+m}^i = \frac{\frac{12R_1}{h^2}\cos\alpha_1P_s - \varphi_{2n+m}^{i+1} - C_{\varphi 1}\varphi_{2n+m}^i - C_{\psi 1}\psi_{2n+m}^i - C_{w1}w_{2n+m}^i}{C_{u1}},$$

где приняты следующие обозначения:

$$A_{\varphi 3} = C_{\varphi 3} - \frac{C_{\varphi 1}C_{u3}}{C_{u1}} - \frac{C_{\varphi 5}C_{v3}}{C_{v5}}, \quad A_{\psi 3} = -\frac{C_{\psi 1}C_{u3}}{C_{u1}} - \frac{C_{\psi 5}C_{v3}}{C_{v5}}, \quad A_{w3} = -\frac{C_{w1}C_{u3}}{C_{u1}} - \frac{C_{w5}C_{v3}}{C_{v5}},$$

$$A_{\varphi 4} = -\frac{C_{\varphi 5}C_{v4}}{C_{v5}} - \frac{C_{\varphi 1}C_{u4}}{C_{u1}}, \quad A_{\psi 4} = C_{\psi 4} - \frac{C_{\psi 1}C_{u4}}{C_{u1}} - \frac{C_{\psi 5}C_{v4}}{C_{v5}}, \quad A_{w4} = -\frac{C_{w1}C_{u4}}{C_{u1}} - \frac{C_{w5}C_{v4}}{C_{v5}},$$

$$P_s = P(p) \frac{4n+3}{\pi R_c^2} P_{2n+1} \left(\cos \left(\frac{\pi r_1}{2R} \right) \right) P_{2n+1} \left(\cos \left(\frac{\pi r}{2R} \right) \right) \cos(m\theta), \quad i = 0, 1, 2, 3.$$

Соотношения для функциональных коэффициентов C_{xj} определяются как сумма множителей в соответствующем уравнении у каждого из линейных или угловых перемещений x .

Выражения (4.75) записываются для конкретной области контакта колеса и рельса, вблизи которой определяются геометрические и кинематические параметры деформирования конструкции и отдельных элементов железнодорожного пути, т.е. величины r и θ принимают определенные значения. Выполняя обратное преобразование Лапласа, можно записать все искомые перемещения как функцию времени, двух координат и силы взаимодействия на сегмент рельса со стороны колесной пары.

$$x(\varphi, \theta, \tau) = \frac{(1 - \sigma_\theta \sigma_r) h}{\pi R_c^2 E_r} \int_0^\tau \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} (4n+3) P(\tau_1) P_{2n+1} \left(\cos \left(\frac{\pi r_1}{2R} \right) \right) P_{2n+1} \left(\cos \left(\frac{\pi r}{2R} \right) \right) \cos(m\theta) \times$$

$$\times \left[x_{2n+m}^0 \text{Dirac}(\tau - \tau_1) + x_{2n+m}^1 (\tau - \tau_1) + \frac{x_{2n+m}^2 (\tau - \tau_1)^3}{6} + \frac{x_{2n+m}^3 (\tau - \tau_1)^5}{120} \right] d\tau_1, \quad (4.79)$$

Для определения динамических параметров деформирования элементов железнодорожного пути, например, контактной силы между колесом и рельсом предлагается рассмотреть ударное взаимодействие двух тел, определяемое следующим функциональным уравнением:

$$y(t) = V_0 t - \frac{1}{m} \int_0^t P(t_1) (t - t_1) dt_1, \quad (4.80)$$

где $y(t) = \alpha(t) + w(t)$ – полное перемещение колеса пары в вертикальном направлении, m – масса экипажа, приведенная к одному колесу пары, t – время, отсчитываемое с момента касания колеса и рельса в заданной точке, t_1 – переменная интегрирования, фактически время, отсчитываемое с начала динамических процессов в области контакта.

Зависимость местного смятия контактирующих материалов $\alpha(t)$ и силы взаимодействия между колесом и рельсом $P(t)$ определяется одним из выражений (4.46), (4.47). Решение определяющего уравнения (4.80) находится численно с помощью ЭВМ, исходя из предположения линейности неизвестных величин на каждом достаточно малом временном интервале $(n-1)\tau \leq t \leq n\tau$

$$\dot{P}(n\tau) = (P_n - P_{n-1}) / \tau. \quad (4.81)$$

После подстановки выражений для вертикальных перемещений сегмента рельса (4.79) в заданной точке и местного смятия из выбранного выражения (4.46) в уравнение (4.80) получим нелинейное интегро-дифференциальное уравнение относительно силы взаимодействия колеса и рельса, которое решается по итерационному алгоритму:

$$\tau_i = \tau_i, \quad s_i = s_{i-1} + V_{i-1} \tau + y_{i-1} \frac{\tau^2}{2}, \quad (4.82)$$

$$w_i = \frac{(1 - \sigma_\theta \sigma_r) h}{\pi R_c^2 E_r} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{j=1}^i (4n+3) P_j((i-j)\tau) P_{2n+1} \left(\cos \left(\frac{\pi r_1}{2R} \right) \right) \times$$

$$\times P_{2n+1} \left(\cos \left(\frac{\pi r}{2R} \right) \right) \cos(m\theta) \left[\Phi_0 \text{Dirac}((i-j)\tau) + \Phi_1((i-j)\tau) + \frac{\Phi_2((i-j)\tau)^3}{6} - \right.$$

$$\left. - \frac{C_1^3((i-j)\tau)^5}{120} \right],$$

$$\Phi_0 = -\frac{K_0 B_1^3}{A_1^3} + N_0 + M_0 + \frac{c_1 (K_0 + S_0) R_1 \cos \alpha_1}{c_4 A_1^3 P_s},$$

$$\Phi_1 = -\frac{K_1 B_1^3}{A_1^3} + N_1 + M_1 + \frac{c_1 (K_1 + C_1^3 D_1) R_1 \cos \alpha_1}{c_4 A_1^3 P_s},$$

$$\Phi_2 = -\frac{D_1 C_1^3 B_1^3}{A_1^3} + D_2 C_1^3 + C_1^2 - C_1^3 + \frac{c_1 C_1^3 D_1 R_1 \cos \alpha_1}{c_4 A_1^3 P}.$$

$$\alpha_i = s_i - w_i, \quad P_i = (\alpha_i / b)^{3/2}, \quad y_i = -\frac{P_i}{m}, \quad V_i = V_{i-1} + y_i \tau.$$

Вычислительная процедура может быть реализована как в традиционных математических пакетах, например, MathCAD, MATLAB, Maple, Mathematica, так и при помощи возможностей и стандартных библиотек функций и операторов языков программирования C++, C#, Delphi и т.д.

Результаты решения полученного уравнения, описывающего динамический контакт посредством описанной выше вычислительной схемы, представлены на рисунке 4.22 в виде графических зависимостей безразмерной контактной силы от безразмерного времени для различных моделей контакта колеса и рельса (4.46а) – (4.46л). Параметры динамического контакта колесной пары и рельса принимают следующие значения: $m = 12$ т, $E_r = 150$ ГПа, $E_\theta = 100$ ГПа, $G_{r\theta} = 40$ ГПа, $G_{rz} = 70$ ГПа, $G_{\theta z} = 50$ ГПа, $\sigma_r = 0,3$, $\sigma_\theta = 0,25$, $V_0 = 16,67$ м/с, $h = 0,18$ м, $R_1 = 0,02$ м, $R = 0,8$ м, внешние усилия предварительного напряжения принимают следующие значения в безразмерном виде: $N/h^2 c_1 \rho = -20$, $M_r/h^3 c_1 \rho = 2$, $M_z/h^3 c_1 \rho = 2$, приведенные

значения в целом соответствуют состоянию обычного рельса в кривой большого радиуса при использовании гидравлического натяжного устройства.

Кривые 1 – 11 на рисунке 4.22 построены для соотношений (4.46а) – (4.46л) соответственно, точки, отмеченные кружками, показывают значения силы взаимодействия колеса и рельса, полученные по результатам обработки экспериментальных данных.

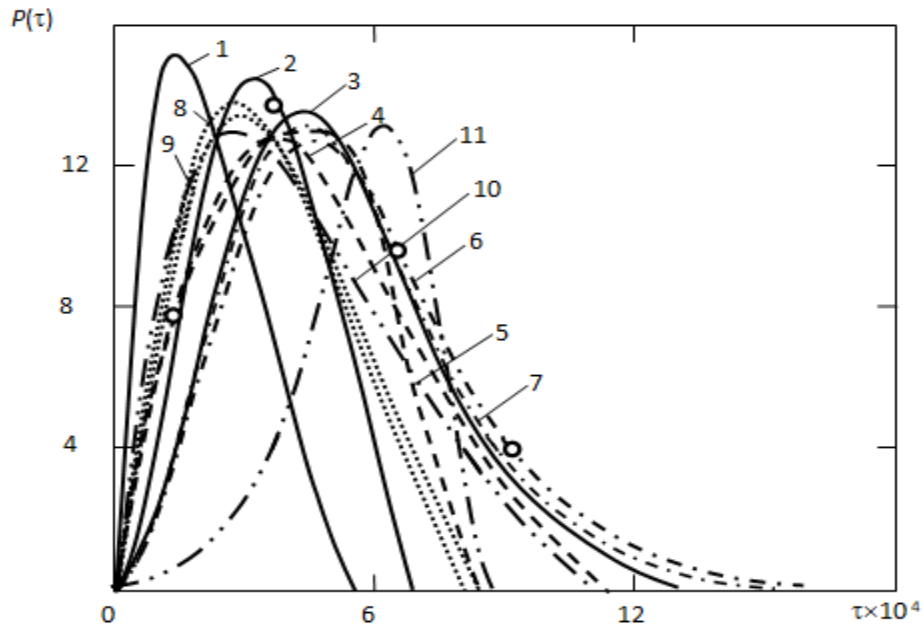


Рисунок 4.22 – Зависимость силы взаимодействия колеса и рельса от времени для разных моделей динамического контакта: 1 – упругая модель Герца; 2 – линейно-упругая модель без учёта растяжения срединной плоскости; 3 – упругая модель Герца с учётом растяжения срединной плоскости и инерции пятна контакта; 4 – упругопластическая модель Кильчевского; 5 – упругопластическая модель Кильчевского с учётом инерции пятна контакта; 6 – упругопластическая модель Кильчевского без учёта растяжения срединной плоскости; 7 – упругая модель Герца без учёта растяжения срединной плоскости; 8 – линейно - упругая модель с учётом растяжения срединной плоскости; 9 – модифицированная модель Герца, с параметрами, подобранными эмпирически; 10 – упругопластическая модель Александра-Кадомцева, 11 – модель с учетом пластических свойств только в зоне контакта колеса и рельса (окружностями обозначены точки, полученные экспериментально)

В результате проведенных исследований была разработана адекватная модель динамического поведения сегмента рельса под воздействием колесной пары в условиях, близких к реальным. Также была создана вычислительная процедура, которая позволяет определить динамические, кинематические и геометрические параметры деформированного состояния рельсов на железнодорожном пути [59]. На рисунке 4.22 представлены кривые, полученные с использованием различных соотношений для контактной задачи. Их разброс указывает на возможность выбора оптимального соотношения, в зависимости от геометрических, механических и конструктивных характеристик участка пути, эксплуатационных параметров и требуемых значений функций, таких как максимальная контактная сила, время контакта, время нагружения и разгрузки, а также общее соответствие графической зависимости и т.д. [60, 61, 62].

В настоящем исследовании учитывается влияние внешней продольной силы, изгибающего и крутящего моментов на зависимость динамического прогиба плитного основания под точкой приложения внешней нагрузки от колесной пары с учетом начальных напряжений, которые моделируют как продольную силу в рельсах, так и наличие предварительно-напряженных стержней в элементах плитного основания.

На рисунке 4.23 показаны зависимости динамического прогиба отдельного плитного элемента для различных значений предварительных усилий в разных направлениях: кривая 1 построена при отсутствии предварительного напряжения плитного элемента, кривые 2, 3, 4, 5, 6, 7 соответствуют следующим значениям начальных внешних усилий: $N/h^2 c_1 \rho = -35$, $N/h^2 c_1 \rho = 35$, $N/h^2 c_1 \rho = 500$, $M_r/h^3 c_1 \rho = 35$, $M_r/h^3 c_1 \rho = -35$, $M_z/h^3 c_1 \rho = 35$. Для обеспечения зависимости итогового результата только от одного предварительного усилия, остальные усилия при построении данных кривых были приняты равными единице. При сравнительном анализе графических зависимостей на рисунке 4.23 можно заметить, что наибольшее влияние на прогиб оказывает внешняя продольная сила. В случае сжатия (кривая 3) она значительно увеличивает прогиб, а в случае растяжения (кривая 2) - уменьшает его, но не так сильно. Запирание поперечной упругой волны (кривая 4) вызывает быстрый рост

прогиба. Влияние внешнего крутящего момента (кривая 7) на прогиб мишени незначительно, в то время как внешний изгибающий момент оказывает более существенное воздействие на прогиб. Более того, его знак может как уменьшить, так и увеличить прогиб.

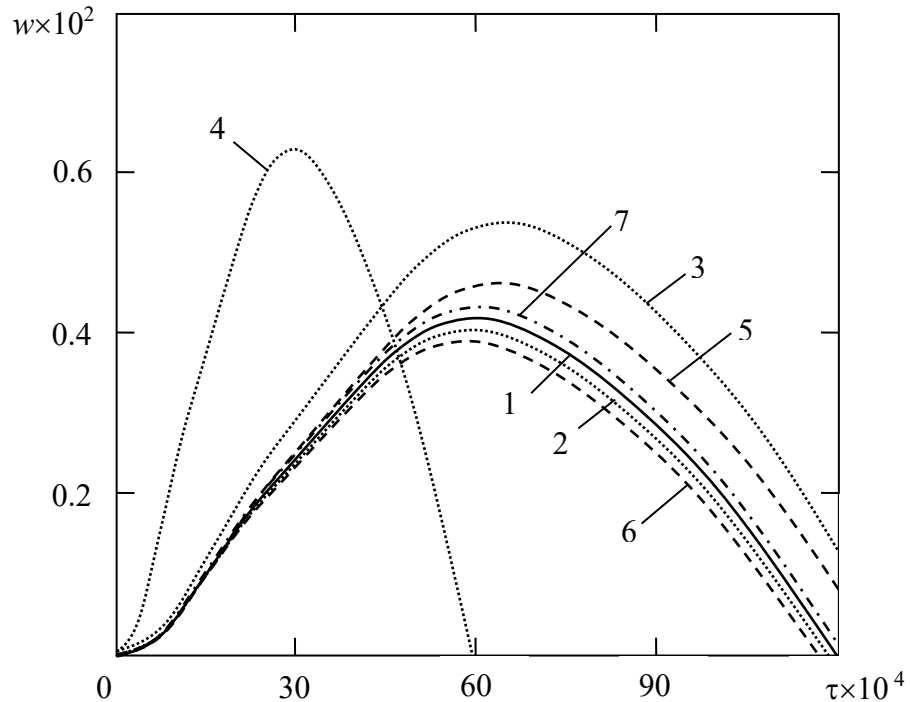


Рисунок 4.23 – Зависимость динамического прогиба от времени для различных значений предварительных напряжений

На рисунке 4.24 показаны зависимости силы взаимодействия колеса и рельса от времени. Кривые 1, 2 построены для следующих скоростей движения (с учетом наличия неровности на поверхности катания рельса в 1 мм) $V_0 = 30$ м/с, кривые 3, 4 соответствуют $V_0 = 20$ м/с, а кривые 5, 6 - $V_0 = 10$ м/с, кривые 1, 3, 5 были рассчитаны при помощи соотношений (4.46в), а кривые 2, 4, 6 - при помощи соотношений (4.46д). Из сравнительного анализа кривых на рисунке 4.24 следует, что при увеличении скорости движения экипажа (и/или увеличении глубины неровности на поверхности катания) увеличивается разница между абсолютными значениями максимумов сил взаимодействия колеса и рельса, полученными при использовании различных моделей динамического контакта, а также интервал между временами появления этих максимумов.

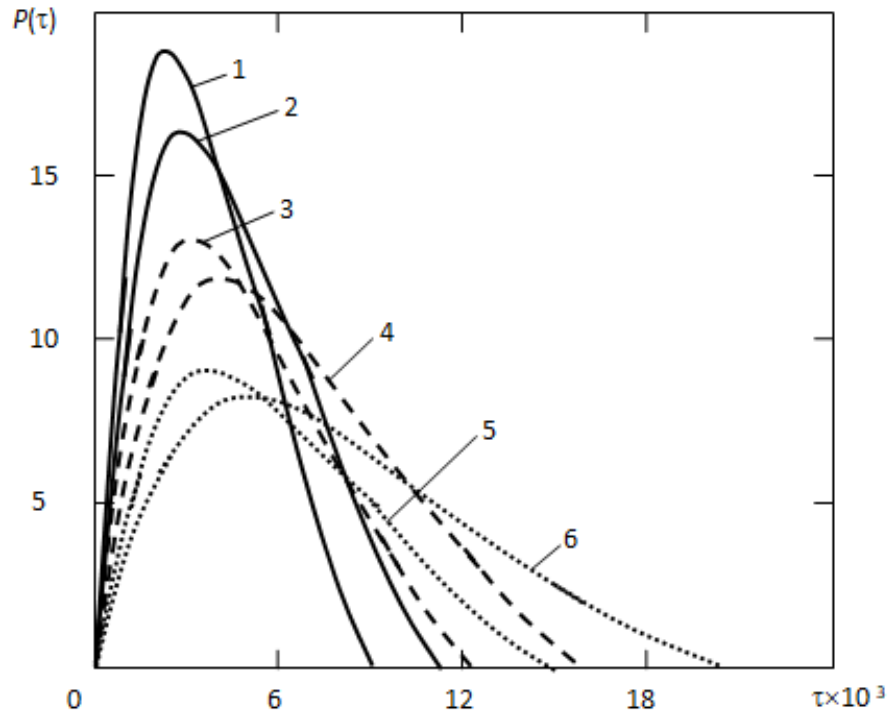


Рисунок 4.24 – Зависимость силы взаимодействия от времени для разных начальных скоростей движения транспортных средств

В работе также были определены перемещения нижней поверхности плитного элемента в области ее соприкосновения с основанием.

На рисунке 4.25 а видно, что при уменьшении модулей упругости E_r и E_θ максимальное значение динамического прогиба увеличивается, причем E_r оказывает более заметное влияние на прогиб. При уменьшении значений модулей сдвига прогиб увеличивается, причем, как следует из рисунка 4.25 б, $G_{\theta z}$ больше остальных характеристик влияет на динамический прогиб мишени. При уменьшении $G_{rz}, G_{\theta z}$ максимальный прогиб и время, при котором прогиб будет равен нулю, увеличиваются пропорционально, а при уменьшении $G_{r\theta}$ время, соответствующее нулевому прогибу, увеличивается интенсивнее, т.е. полотно дольше будет находиться в деформированном состоянии.

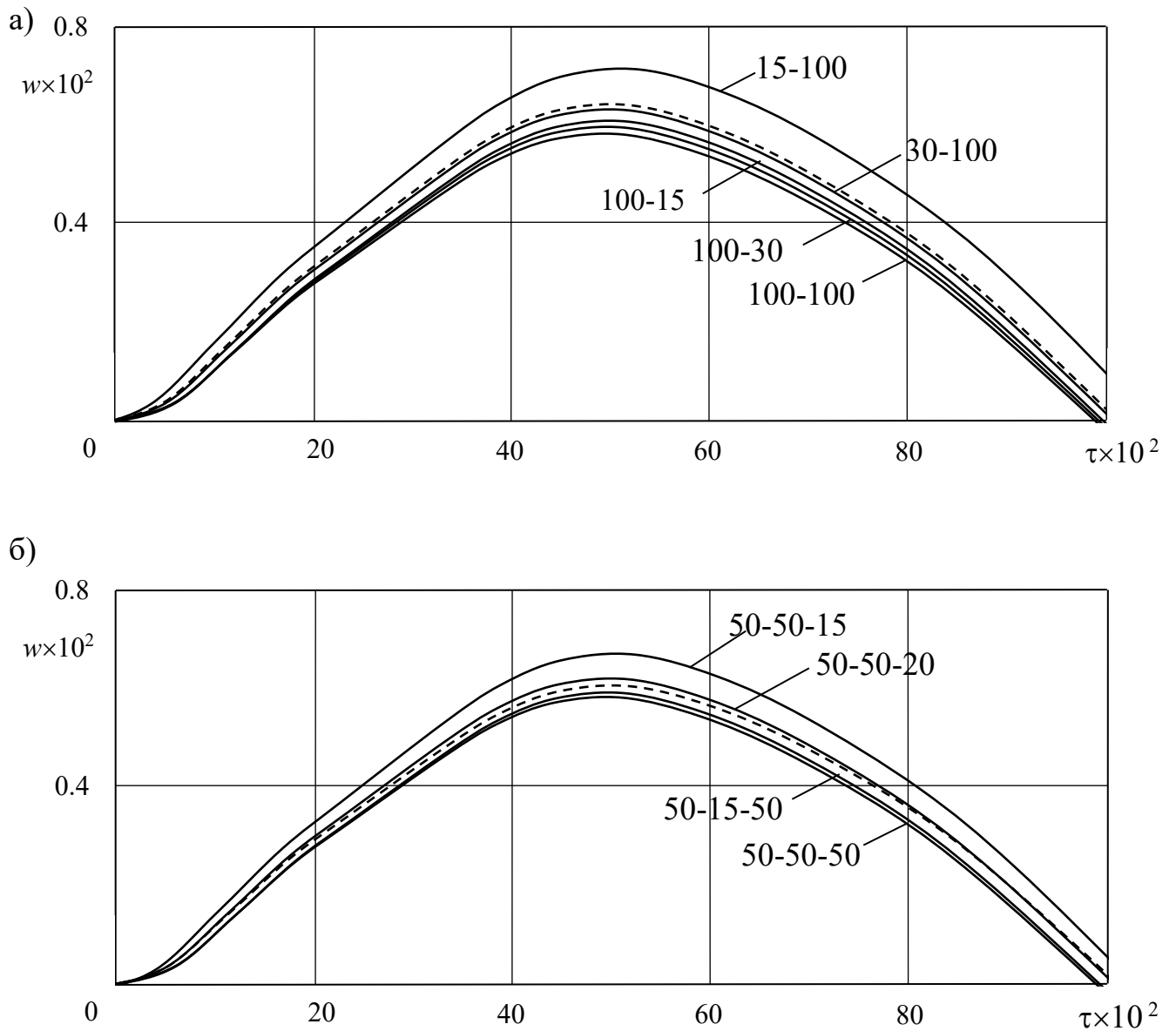


Рисунок 4.25 – Зависимость динамического прогиба элемента плитного основания под точкой приложения нагрузки от колесной пары: а) модулей упругости, б) модулей сдвига

Широкий диапазон инженерных задач по проектированию и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры, характеризующихся наличием в конструкции элементов, обладающих анизотропными свойствами или, в более общем смысле, в первую очередь, связан со стационарными и нестационарными колебательными движениями тел системы, с динамическими воздействиями на них. Учет анизотропии в реальных инженерных конструкциях позволяет

уменьшить резонансные явления в конструкции, гасить колебания отдельных тел, уменьшать, а иногда и регулировать жесткость отдельных элементов сооружения, в том числе и стрелочного перевода [63].

Актуальной задачей является подбор оптимальных параметров жесткости по предлагаемой модели с используемыми элементами конструкций и опирания, а также разработка и апробация моделей, наиболее точно описывающих характер деформирования конструкций объектов транспортной инфраструктуры и их элементов при наличии волновых процессов, представленных в виде фронтов упругих волн, число которых зависит от типа анизотропии и количества основных осей анизотропного базиса. В мировой и отечественной инженерной практике анизотропные элементы обычно устанавливаются в местах крепления элементов, динамическое воздействие на которые различно по своему характеру и способу приложения. Например, плитные элементы стрелочного перевода должны обладать анизотропными свойствами для уменьшения последствий от динамического воздействия движущихся транспортных средств. В качестве основных параметров, характеризующих работу плитного элемента, предлагается использовать вертикальное перемещение, через которое можно определить динамические силовые характеристики. Важным вопросом является определение значений модуля упругости и модуля сдвига в различных направлениях анизотропии для неперевышения расчетных перемещений нормативных значений [64, 65].

Для вычисления перемещений точек плитного основания стрелочного перевода, испытывающего динамическое воздействие со стороны подвижного состава, проходящего по прямому или боковому пути, составляются характеристические уравнения, описывающие деформирование плитного элемента, поведение которого моделируется волновыми уравнениями типа Уфлянда-Миндлина с учетом анизотропии, принимается во внимание характерное время первоначальной деформации плиты, которое связано со скоростями волн и расстояниями, которые они проходят в границах одного плитного элемента. Для

каждого плитного элемента перемещение, представленное на рисунке 4.26, вычислялось в средней точке по ширине плиты и в геометрической середине рельсовой колеи при приложении подвижной нагрузки на данный путь (вверху представлены перемещения для прямого пути, внизу для бокового)

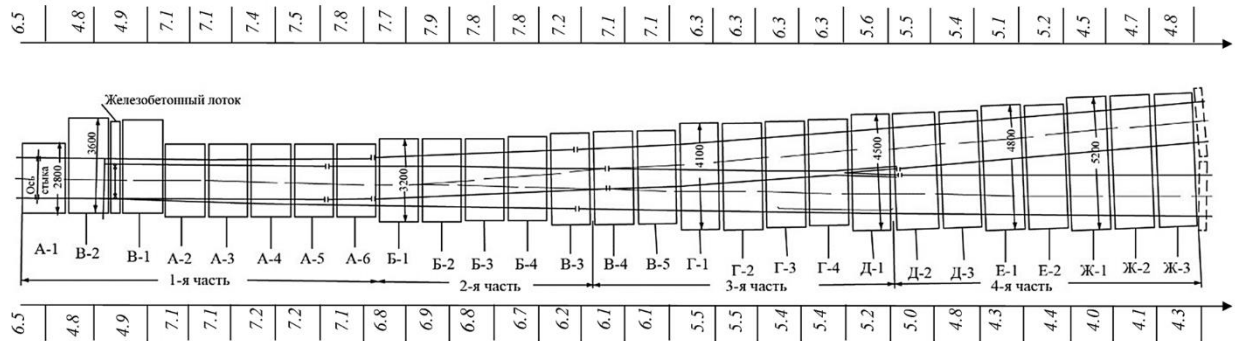


Рисунок 4.26 – Вертикальные перемещения точек пересечения осей плит основания и осей прямого и бокового пути

Поскольку в реальных транспортных системах скорость движения экипажа существенно ниже скоростей упругих волн в материале элементов конструкций, но, в тоже время, одной из современных тенденций является увеличение скорости следования подвижного состава, то имеет смысл рассматривать не мгновенное динамическое воздействие на объект транспортной инфраструктуры. Для построения волновой картины происходящих процессов в конструкциях стрелочного перевода после начала воздействия возможно использование модифицированной теории динамического нагружения, основанной на сращивании решений задачи контактного деформирования в зоне приложения динамической нагрузки и задачи деформирования элементов конструкций вне зоны контакта за счет распространения продольных и поперечных волн. Поскольку в настоящей работе задачей является не просто получение зависимостей силовых (сила взаимодействия) и геометрических (вертикальное перемещение) характеристик, описывающих поведение плитных элементов стрелочного перевода от времени, но и определение характера влияния анизотропных свойств плиты на искомые величины, то имеет смысл рассмотреть математический смысл системы определяющих уравнений.

Поскольку в определяющие уравнения входят производные по времени от искомым перемещений первого и второго порядка, то одним из способов решения уравнений движения является их представление в пространстве Лапласа для преобразования дифференциальных уравнений в алгебраические, решения последних и преобразование полученных выражений обратно в пространство оригиналов или использовать лучевой метод, базирующийся на представлении неизвестных величин в виде разложений в ряды по пространственной координате, отсчитываемой вдоль распространяющейся упругой волны, и условий совместности для перехода от производной по координате к производной по времени старшего порядка и δ – производной по времени для величин на волновом фронте.

Таким образом, представленная часть исследования позволяет выявить ограничения и преимущества той или иной анизотропной модели на уровне математического обеспечения, что в дальнейшем приведет к обоснованному выбору соотношений для стрелочных переводов на основе железобетонных плит [67, 68].

Сравнивая графические зависимости от времени для нормального перемещения элементов конструкции, полученные для двух путей при заданных геометрических и механических параметрах с учетом анизотропии бетона, можно отметить, что, варьируя параметры жесткости, можно добиться как увеличения, так и уменьшения максимальной величины перемещения по сравнению с перемещениями существующих конструкций стрелочных переводов [69].

В целом можно отметить, что проведенные исследования плитных моделей стрелочного перевода позволили достаточно полно понять влияние параметров анизотропии на конечные геометрические и динамические характеристики вертикального воздействия со стороны транспортного средства. Полученные результаты позволяют подобрать параметры армирования плит для обеспечения нормальной эксплуатации стрелочного перевода при различных скоростях движения экипажей, нагрузки на ось и числа колесных пар, а также установить особенности устройства основания под плитные элементы. Возникновение максимумов перемещений можно рассчитывать с точки зрения принципа

суперпозиции от повторных воздействий на конструкции другими осями транспортного средства, что позволит определить оптимальную скорость экипажа и нагрузку на ось при известных параметрах стрелочного перевода. Задаваясь необходимыми величинами скорости следования, нагрузкой на ось, общим числом вагонов, можно определить анизотропные параметры плитного основания, что достаточно своевременно, учитывая развитие скоростного и грузонапряженного движения по транспортным магистралям и проектирование для этих задач новых объектов инфраструктуры.

Динамический прогиб плиты под точкой приложения силы от колесной пары:

$$\begin{aligned}
 w(t) = & \frac{E_1 V_0}{\rho h \pi r_0^2} \frac{t^3}{6} - \frac{E_1 V_0 (G^{(1)} + G^{(2)})}{\rho h \pi r_0^3} \frac{t^4}{12} + \\
 & + \left[\frac{3E_1 V_0 (G^{(1)} + G^{(2)})^2}{\rho h \pi r_0^4} - \frac{E_1^2 V_0}{\rho h \pi r_0^2} \left(\frac{1}{m} + \frac{2}{\rho h \pi r_0^2} \right) \right] \frac{t^5}{120} + \\
 & + \left[\frac{2E_1^2 V_0 (G^{(1)} + G^{(2)})}{\rho h \pi r_0^3} \left(\frac{1}{m} + \frac{4}{\rho h \pi r_0^2} \right) - \frac{4E_1 V_0 (G^{(1)} + G^{(2)})^3}{\rho h \pi r_0^5} + \frac{1}{4} \frac{E_1 V_0 (G^{(1)3} + G^{(2)3})}{\rho h \pi r_0^5} \right] + \\
 & + \frac{12E_1 V_0}{\rho h^3 \pi r_0^2} \frac{(G^{(1)3} - G^{(2)3}) G^{(2)2}}{G^{(1)2} - G^{(2)2}} - \frac{E_1 V_0}{\rho h \pi r_0^5} \left(\frac{E_\theta}{E_r} - 1 \right) \frac{G^{(1)3} G^{(2)}}{G^{(1)} - G^{(2)}} \right] \frac{t^6}{720},
 \end{aligned} \tag{4.83}$$

Сила взаимодействия колеса и рельса:

$$\begin{aligned}
 P(t) = & E_1 V_0 \left[t - E_1 \left(\frac{1}{m} + \frac{2}{\rho h \pi r_0^2} \right) \frac{t^3}{6} + \frac{E_1 (G^{(1)} + G^{(2)})}{\rho h \pi r_0^3} \frac{t^4}{6} - \right. \\
 & - E_1 \left[\frac{(G^{(1)} + G^{(2)})^2}{\rho h \pi r_0^4} - \frac{E_1}{6} \left(\frac{1}{m} + \frac{2}{\rho h \pi r_0^2} \right)^2 \right] \frac{t^5}{20} + \\
 & \left. + E_1 \left[- \frac{4E_1 (G^{(1)} + G^{(2)})}{\rho h \pi r_0^3} \left(\frac{1}{m} + \frac{2}{\rho h \pi r_0^2} \right) + \frac{4(G^{(1)} + G^{(2)})^3}{\rho h \pi r_0^5} - \right. \right.
 \end{aligned} \tag{4.84}$$

$$-\frac{1}{4} \frac{(G^{(1)3} + G^{(2)3})}{\rho h \pi r_0^5} - \frac{12}{\rho h^3 \pi r_0^2} \frac{(G^{(1)3} - G^{(2)3}) G^{(2)2}}{G^{(1)2} - G^{(2)2}} +$$

$$+ \frac{1}{\rho h \pi r_0^5} \left[\left(\frac{E_\theta}{E_r} - 1 \right) \frac{G^{(1)3} G^{(2)}}{G^{(1)} - G^{(2)}} \right] \frac{t^6}{360}.$$

Полученные по описанной методике значения сил использовались в качестве исходных данных для расчета плит, который выполнялся по типовой методике.

Выводы по главе 4

Современный уровень технологий изготовления плитных оснований значительно повысил их целесообразность для использования в стрелочных переводах. Применение инновационных материалов, таких как высокопрочный бетон и полимерные композиты, улучшило долговечность и надежность плит. Благодаря автоматизации производственных процессов и контролю качества посредством компьютерного моделирования, достигается высокая точность параметров плит, что гарантирует их идеальное прилегание и снижение износа рельсов и колесных пар. Эти технологические успехи делают плитное основание для стрелочных переводов предпочтительным решением в современном железнодорожном строительстве.

Применение плитного основания для стрелочных переводов обеспечивает ряд значительных преимуществ. Значительно увеличивается долговечность и надежность путевой структуры, благодаря равномерному распределению нагрузок и снижению вероятности деформации рельсового полотна. Современные технологии позволяют изготавливать плиты с высокой точностью и оптимальными эксплуатационными характеристиками, обеспечивающими быструю и легкую установку. Это, в свою очередь, сокращает время и стоимость строительства и ремонта железнодорожных путей.

Плитное основание для стрелочных переводов, благодаря современным технологиям изготовления, демонстрирует значимые преимущества перед

существующими методами. Эта технология обеспечивает повышенную точность и устойчивость к динамическим нагрузкам, что важно для железнодорожного транспорта. В отличие от применяемого основания, плитные основания устанавливаются быстрее и требуют меньшего обслуживания, снижая эксплуатационные затраты. Ресурс плитных оснований значительно выше, что делает применение данной технологии целесообразным.

Проведенные исследования и полученные графические зависимости основных характеристик динамического взаимодействия от времени, начальной скорости взаимодействия позволяют сделать вывод о существенном влиянии инерции контактного пятна на конечные характеристики для любых моделей контактного взаимодействия; в то же время учет растяжения-сжатия срединной плоскости элемента несущественно влияет на конечные динамические характеристики. В некоторых случаях при учете инерционных составляющих зависимость конечных характеристик от начальных параметров может менять свой характер с линейного на нелинейный, и наоборот. В целом, предложенная упругопластическая модель, учитывающая волновые процессы в рельсе, растяжение-сжатие его срединной линии и инерцию контактного пятна, образовавшегося после начала процесса динамического воздействия, хорошо соотносится с решениями других авторов и наиболее точно из известных результатов описывает экспериментальные данные.

В целом, по представленным графикам можно утверждать, что процесс динамического воздействия колеса и рельса с использованием упругопластической модели, которая наилучшим образом описывает результаты экспериментов, проходит аналогично использованию вязкоупругой модели, но время появления максимума силы взаимодействия колеса и рельса увеличивается.

Сравнивая полученные теоретические зависимости для различных значений механических характеристик элементов плитного основания с экспериментальными данными, видно, что варьируя механические характеристики железобетонной плиты можно как увеличить, так и уменьшить вертикальные перемещения верхнего строения пути. Хорошее совпадение результатов математического моделирования и экспериментальных исследований позволяет говорить о применимости

представленных методик в реальных задачах обеспечения стабильности эксплуатации железнодорожного пути и стрелочных переводов.

Выбор подходящего плитного основания является критическим фактором для обеспечения оптимальной работы стрелочных переводов. Надежность и долговечность перевода напрямую зависят от качества и соответствия характеристик основания под конкретные условия эксплуатации. Правильно подобранное основание минимизирует риски неполадок, увеличивает интервал между техническим обслуживанием и ремонтом, а также снижает износ элементов стрелочного перевода. Основное внимание при выборе следует уделять материалу, грузоподъемности и устойчивости к климатическим условиям.

При выборе плитного основания для стрелочных переводов следует учитывать несколько технических требований. Во-первых, качество и прочность материала должны соответствовать эксплуатационным нагрузкам. Важно, чтобы бетонная плита обладала высокой степенью жесткости и долговечности для минимизации деформаций под воздействием тяжелых поездов. Во-вторых, плитное основание должно обеспечивать отличную влаго- и морозостойкость, предотвращая разрушение материала под воздействием атмосферных явлений. Требуется также гарантировать хорошую адгезию с рельсовым оборудованием, чтобы избежать смещения элементов при эксплуатации.

Выбор оптимального плитного основания для стрелочных переводов обеспечивает повышенную надежность и увеличенный срок службы путевых элементов. Такое основание гарантирует равномерное распределение нагрузок, минимизируя деформацию и износ рельсов. Это, в свою очередь, приводит к снижению затрат на техническое обслуживание и ремонт пути. Кроме экономической выгоды, правильный выбор основания повышает безопасность передвижения поездов, обеспечивая стабильное и точное функционирование стрелочных переводов в любых погодных условиях.

При выборе плитного основания для стрелочных переводов ключевым аспектом является оценка его надежности и долговечности. Важно учитывать материал плиты, его способность противостоять износу и разрушению под воздействием атмосферных условий и агрессивных сред. Рекомендуется выбирать

основания с высокой устойчивостью к механическим нагрузкам, чтобы обеспечить бесперебойную работу переводов длительное время. Также следует обращать внимание на качество исполнения плит, наличие защитных покрытий и возможность легкой замены элементов в случае необходимости, что существенно повышает эксплуатационную надежность системы.

При установке плитного основания для стрелочных переводов важно обеспечить его правильную геометрическую установку и надежное закрепление, чтобы минимизировать вибрации и деформации в процессе эксплуатации. Регулярное техническое обслуживание должно включать проверку целостности и стабильности основания, а также контроль за состоянием крепежных элементов. Такие меры предотвратят преждевременный износ и обеспечат надежность работы стрелочных переводов.

Предложенная модель может быть использована при проектировании плит для стрелочных переводов с основанием в виде плит на балласте.

5 СБОРКА, УКЛАДКА И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТАХ

Вопрос о целесообразности применения той или иной конструкции железнодорожного пути не может быть решен без решения вопроса об ее укладке и обслуживании.

Для укладки стрелочных переводов на железобетонных плитах с балластным основанием предлагается использовать следующую технологию.

На звеносборочной базе или на специальной площадке с помощью порталных или стреловых кранов полностью монтируют стрелочный перевод, который при этом маркируют и проверяют на соответствие параметров геометрии рельсовой колеи, требованиям проектных решений.

После сборки стрелочный перевод частично демонтируют, рельсы и крестовину заменяют инвентарными монтажными рубками, по длине соответствующими продольному размеру плит (или 2-3 плит), а стрелку с остряжками оставляют, смонтированной на трех плитах, как единое целое. Демонтированный стрелочный перевод грузят на платформы путеукладчика (может быть использован специальный подвижной состав для перевозки блоков стрелочного перевода) и доставляют на место укладки.

Очистку щебеночного слоя выполняют до начала работ.

Смену стрелочного перевода производят в специально выделяемое «окно». Старый перевод снимают и убирают полноповоротным стреловым краном или путеукладочным краном.

Основание под стрелочный перевод уплотняют машинным способом. Затем насыпают слой мелкого щебня фракции 7-25 мм высотой 3-5 см и тщательно разравнивают. Новый стрелочный перевод на подготовленное основание укладывают по частям полноповоротным стреловым или путеукладочным краном [70, 71, 72].

Пример технологического процесса.

Условия производства работ: старый стрелочный перевод типа Р65 с крестовиной марки 1/11 расположен на главном пути электрифицированного участка. Количество брусьев на переводе 71, шпал под вылетом рамных рельсов — 8, балласт щебеночный.

Новый стрелочный перевод того же типа монтируют на 25-и железобетонных плитах, щебеночное основание очищают щебнеочистительной машиной; сменяемый и укладываемый стрелочные переводы оборудованы электрической централизацией (Рисунок 5.1). Работы, связанные с отключением старого и включением нового перевода в централизацию, производят работники службы сигнализации и связи в период «окна».

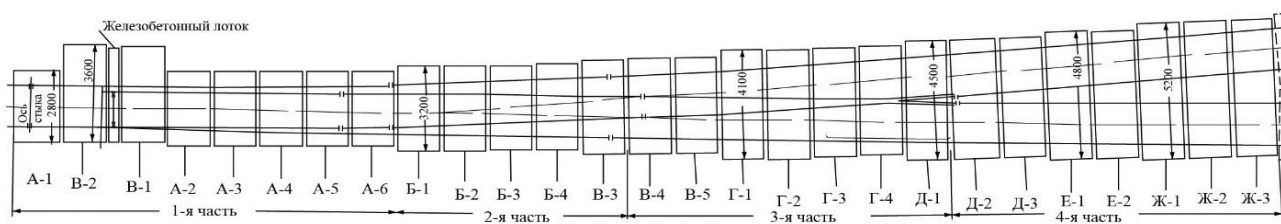


Рисунок 5.1— Схема раскладки плит на стрелочном переводе типа Р65 марки 1/11

При смене стрелочного перевода щебень очищают от засорителей на полный слой (до 45 см), вместо железобетонных брусьев укладывают железобетонные плиты и заменяют металлические части старого перевода новыми.

Все работы, связанные со сменой стрелочного перевода, делятся на три этапа: контрольная сборка нового перевода на сборочной площадке; смена перевода на станции и разборка частей старого перевода на сборочной площадке.

Контрольную сборку стрелочного перевода на железобетонных плитах выполняют на специальном пути-стенде звеносборочной базы или на одном из путей станции, на котором должен быть сменен стрелочный перевод; при этом укладывают дополнительную рельсовую нить на расстоянии 1520 мм от рельса сборочного пути.

Железобетонные плиты раскладывают стреловым краном на рельсы пути-стенда так, чтобы ось рамного рельса прямого пути, когда он будет уложен на плиты, совпала с осью рельса пути-стенда.

Контрольную сборку стрелочного перевода рекомендуется начинать со стороны стрелки.

Перед раскладкой плит рельсовые нити сборочного пути-стенда смазывают солидолом для того, чтобы легче выполнить взаимную подгонку плит перевода.

Металлические части стрелочного перевода раскладывают в следующем порядке: вначале элементы прикрепления металлических частей стрелочного перевода к железобетонным плитам, затем рамные рельсы с остряками, рельсы соединительных путей и, наконец, крестовину и рельсы с контррельсами. После этого тщательно проверяют сборку перевода, маркируют его, нанося обозначения и нумерацию как на металлические части, так и на плиты. Затем стрелочный перевод демонтируют, кроме стрелки, которую оставляют прикрепленной на трех плитах типа А-3. После демонтажа на три плиты (А-3, А-4 и А-5) укладывают и закрепляют инвентарные рубки. Металлические подкладки оставляют на плитах.

Стрелочный перевод разбирают на части для удобной погрузки на платформы путеукладочного крана. Платформы оборудованы роликовым транспортером и лыжами. На первую платформу грузят пять плит типа В без инвентарных рубок и соответствующие металлические части. На вторую платформу загружают крестовину, два рельса с контррельсами и оставшиеся пять плит типа В без инвентарных рубок. На третью платформу ставят семь плит типа Б без инвентарных рубок, плиту А-5 с инвентарными рубками, а также рельсы, расположенные за корнями остряков и рамными рельсами.

На четвертую платформу, следующую сразу за путеукладчиком, грузят шесть-десять железобетонных шпал. Эти шпалы предназначены для укладки под вылетом рамных рельсов и имеют инвентарные рубки. Также на платформу загружаются две плиты А-1 и А-2, которые будут использоваться для монтажа электропривода переводного механизма стрелки. Кроме того, на платформе

размещаются три плиты типа А-3, которые скрепляются с рамными рельсами и остряками, а также две плиты А-4 с инвентарными рубками.

Для безопасной транспортировки плиты закрепляются на платформе с помощью стяжек, которые устанавливаются на концах и посередине каждой платформы в продольном направлении. В поперечном направлении плиты фиксируются тросами, которые привязываются к лесным скобам и погрузочным петлям верхней плиты.

Для закрепления каждого погруженного пакета используются шпальные выкладки, состоящие из одной-двух шпал, которые размещаются поперек платформы, а также двух шпал, расположенных вдоль платформы. Последние две шпалы укладываются таким образом, что один конец находится на поперечной шпале, а другой — на полу платформы, под нижней плитой пакета. Смена стрелочного перевода производится двумя путеукладочными кранами. Работы делятся на три периода: подготовительный, основной и заключительный.

Подготовительные работы включают: выгрузку мелкого щебня для подстилающего слоя, рельсов и деревянных кольев для устройства объемлющего пути; устройство объемлющего пути.

Затраты труда на указанные работы составляют 4 чел.-дня.

Основные работы выполняются в течение 4 часов 10 минут. После того, как движение по сменяемому стрелочному переводу закрыто, на место работ направляется рабочий поезд. Этот поезд состоит из двух путеукладочных кранов, четырех платформ с новым переводом, платформы под старый стрелочный перевод, щебнеочистительной машины, двух полувагонов, в которые загружаются засорители (вместо этих полувагонов могут использоваться обычные полувагоны с открывающимися люками), и двух локомотивов.

Первой вступает в работу щебнеочистительная машина. Производится ее зарядка, которая заключается в подведении под путевую решетку одного из баров машины. Бар подводится под путевую решетку в рабочем состоянии. После зарядки машина очищает щебень с одной стороны стрелочного перевода и

примыкающих к переводу звеньев пути, на которых шпалы на протяжении 5 м заменяются.

Затем, когда одна сторона перевода очищена, включается бар другой стороны и машина, двигаясь в обратном направлении, очищает щебень с другой стороны перевода.

Полное время работы щебнеочистительной машины (с учетом зарядок) на одном стрелочном переводе составляет 1 ч 30 мин. По окончании очистки щебня машина и полувагоны с засорителями уходят с места работ, освобождая фронт работы для кранов.

Смену стрелочного перевода выполняют в такой последовательности.

Разборочный кран снимает стрелку с брусьями и грузит ее на платформу. Остальную часть перевода расшивают вручную и металлические части также грузят краном на платформу, а брусья убирают за пределы перевода.

После уборки брусьев планируют поверхность щебеночной призмы и уплотняют ее машиной шагающего типа, доставленной на место работ и выгруженной укладочным краном. Поверх уплотненной призмы вручную отсыпают слой щебня толщиной 3—5 см. Поверхность этого слоя тщательно планируют с помощью легкого рельса, опирающегося на объемлющий путь.

В процессе подготовки основания путеукладчик укладывает различные компоненты нового перевода. Сначала устанавливается блок из шести-десяти железобетонных шпал с рубками, которые затем быстро убираются. Затем устанавливаются две плиты для монтажа электропривода переводного механизма стрелки. Далее устанавливается плита А-4 с монтажными рубками, которая должна быть расположена сразу за корнями остряков, а также полностью смонтированная стрелка на трех плитах типа А-3. Завершающим этапом является установка двух плит А-4 и А-5, а также семи плит типа Б. После этого кран размещает металлические части перевода на этих плитах, которые крепятся к плитам через одну подкладку.

Затем кран аккуратно укладывает плиты В-1, В-2, В-3, после чего перемещается на боковой путь, а оставшиеся на платформе плиты передаются путеукладчику. Далее следует определенная последовательность работ: сначала укладываются три плиты типа В, затем крестовина и два рельса с контррельсами, а последними устанавливаются четыре плиты типа В и оставшиеся четыре рельса. Плиты типа Б и В не имеют инвентарных рубок, поэтому для их захвата кран использует специальную раму, предложенную работниками ПМС. В конце, когда все работы закончены, кран убирает рельсы с объемлющего пути, и рабочий поезд покидает место работ.

По окончании «окна» на стрелочном переводе производят следующие работы: прикрепление рельсов к плитам на все клеммы, постановку болтов в стыках и выправку перевода подсыпкой с вывеской плит гидравлическими домкратами.

Все работы выполняет бригада, состоящая из 32 монтеров пути и 12 машинистов. Кроме того, в работе участвуют два строповщика, два сигналиста и два неосвобожденных бригадира пути. Руководит работами старший дорожный мастер.

Уложенный стрелочный перевод проверяют по шаблону и уровню, после чего открывают движение поездов. Первые два поезда пропускают со скоростью 15 км/ч и последующие в течение 3 ч — со скоростью 25 км/ч. К концу рабочего дня разрешают движение поездов с нормальной скоростью по прямому и боковому пути.

На скоростных участках нормальная скорость (100 км/ч и выше) устанавливается только после окончания стабилизации пути (пропуска не менее 350 тыс. т брутто груза) и личной проверки начальником дистанции пути уложенного стрелочного перевода (Рисунок 5.2) [73].

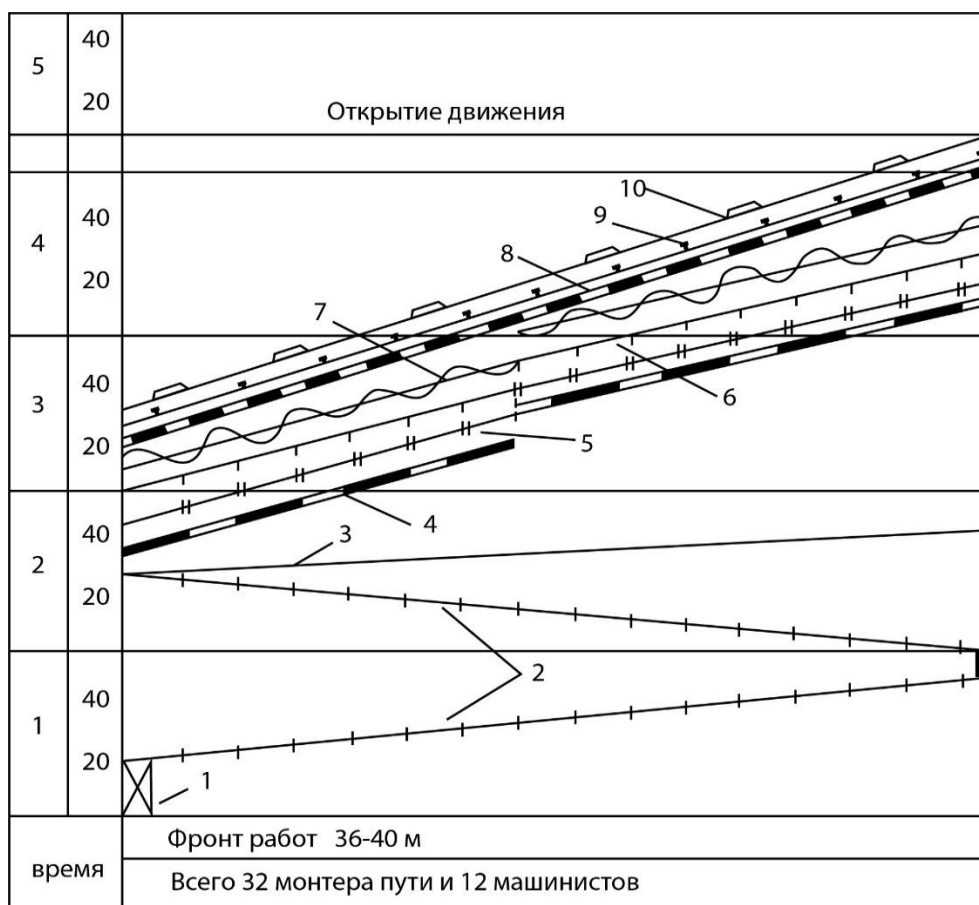


Рисунок 5.2 – Схема укладки перевода с плитным основанием: 1 - оформление закрытия перегона и зарядка щебнеочистительной машины; 2 - очистка щебня щебнеочистительной машиной (3 чел.); 3 - уход машины; 4 - разборка стрелочного перевода укладочным краном, предназначенным для замены крупными блоками стрелочных переводов (4 чел.); 5 - планировка щебня бульдозером (8 чел.); 6 - уплотнение щебеночного слоя машинным способом (1 чел.); 7 - подсыпка и разравнивание основания плит щебнем мелких фракций (4 чел.); 8 - укладка плит и металлических частей стрелочного перевода (4 чел.); 9 - прикрепление рельсов к плитам на все болты (10 чел.); 10 - выправка и рихтовка перевода (12 чел.)

Технология укладки стрелочных переводов на железобетонных плитах имеет отличия от технологии укладки перевода на брусьях. За день до укладки перевода выдают предупреждение об ограничении скорости движения поездов на участке работ по подготовке основания. В этот день бригада в составе 12 человек вырезает щебень до подошвы брусьев, и одновременно техник пути производит точную

разбивку положения нового перевода. Подготавливают и проверяют инструмент, механизмы.

В день предоставления «окна» до его начала вырезают щебень из шпальных ящичков на 3-5 см ниже подошвы брусьев, разболчивают стыки с оставлением их на двух болтах, опробуют прикрепление металлических частей элементов стрелочного перевода к основанию.

После закрытия движения бригада из 6 человек разболчивает стыки, убирает скрепления и работает с краном. Стрелочный перевод разбирают по частям, начиная со стрелки; на снятие, отвозку его затрачивается 20-30 минут. Группа рабочих из 24 человек удаляет слой старого щебня толщиной не менее 6-8 см ниже нижней поверхности плит по всей площади перевода и заменяет его таким же слоем щебня мелких фракций. Для быстрейшего обеспечения фронта работ укладочному крану монтеры пути разбиваются на две группы по 12 человек для работы с двух сторон перевода. Поверхность основания плиты планируют рейкой длиной 5-6 м, которая передвигается по объемлющему пути, опираясь на его рельсы. Поверхность отсыпанного основания железобетонных плит уплотняют виброплитами (приваренные к шпалоподбойкам металлические плиты) и проверяют рейкой с уровнем. На этой работе занято 8 человек. После проверки подготовленного основания укладывают перевод одновременно с двух сторон путеукладчиком и полноповоротным краном. Путеукладчик производит укладку стрелки, состоящей из трех плит, а также укладку пяти плит типа А и семи плит типа Б. Затем полноповоротный кран укладывает пять-шесть плит типа В и раскладывает на них рельсы, соединяющиеся с крестовиной. Этот этап работы занимает примерно 15-20 минут. После этого продолжается укладка остальных плит типа В и установка на них крестовин и контррельсов. Восемь рабочих соединяют стыки накладками и прикрепляют металлические части перевода к плитам, используя все необходимые элементы крепления.

На этом работы по укладке стрелочного перевода заканчивают и открывают движение с ограничением скорости первого поезда до 5 км/ч, следующих четырех-пяти поездов до 15 км/ч и далее без ограничения.

Применение такой технологии дает возможность сократить «окно» для смены стрелочных переводов на железобетонном основании до 3-3,5 ч.

В тех случаях, когда на дороге имеется возможность использовать два стреловых самоходных крана, может быть применен вариант при укладке стрелочного перевода марки 1/11 типа Р65, описанный ниже.

Сборка перевода ничем не отличается от сборки перевода того же типа за исключением того, что выполняли ее на станции, где предполагалась смена перевода.

На пути-стенде собранный перевод был разделен на четыре части. Первая часть включала переводной механизм, стрелку и рамные рельсы, которые были прикреплены к восьми плитам (А-1, В-2, В-1, А-2, А-3, А-4, А-5, А-6). Вторая часть состояла из рельсов прямого пути и переводной кривой, которые были прикреплены к пяти плитам (Б-1, Б-2, Б-3, Б-4, В-3). Третья часть включала крестовину с рельсами и контррельсами, которые были расположены на семи плитах (В-4, В-5, Г-1, Г-2, Г-3, Г-4, Д-1). Четвертая часть состояла из закрестовинной конструкции, которая включала плиты (Д-2, Д-3, Е-1, Е-2, Ж-1, Ж-2, Ж-3).

Все части перевода грузятся на четыре платформы краном. Для погрузки каждую часть перевода предварительно вывешивают двумя домкратами для подведения под нее тросов.

В первую очередь грузится третья часть перевода.

На ту же платформу поверх третьей части перевода укладывается вторая часть. Затем на вторую и третью платформы грузится первая часть, которая по своей длине не может разместиться на одной платформе. Последней на отдельную платформу грузится четвертая закрестовинная часть перевода.

Разборка старого стрелочного перевода и подготовка щебеночного основания выполняется обычными способами, имеющимися для этого на дороге машинами и механизмами.

Укладку перевода целесообразно производить с соседнего пути, куда после предоставления «окна» подают два стреловых крана, имеющих в сцепе между собой две платформы с погруженной на них первой частью стрелочного перевода. При укладке оба крана работают одновременно. Уложенную первую часть перевода стыкуют с примыкающим звеном и выверяют нивелиром и оптическим визирным прибором. Затем к месту выполнения работ подают краны с платформой, грузенной второй и третьей частями стрелочного перевода, которые последовательно укладываются на подготовленное основание. После укладки третьей части перевода подают платформу с погруженной на нее четвертой частью, которую укладывают теми же кранами. После этого производят стыкование перевода к примыкающим звеньям, его проверку и при необходимости выправку и рихтовку. Перечисленные операции занимают около четырех часов.

На электрифицированной линии необходима дополнительная затрата времени на подготовку и приведение в порядок элементов контактной сети и подключение электропривода переводного механизма.

При эксплуатации для текущего содержания стрелочных переводов на плитном основании со временем возможно появление просадок и выплесков основания, для устранения которых потребуются технология, которая позволит привести стрелочный перевод в свое нормативное положение. Также при укладке или замене плитного основания стрелочного перевода в положение, согласно разработанному проекту, необходима технология, позволяющая выравнивать основания стрелочного перевода в виде плит в свое запроектированное положение. В качестве такой технологии предлагается применение метода пневмосуфляжа [74-84].

Техническим результатом, на достижение которого направлено заявляемое решение, является эксплуатация стрелочных переводов согласно нормативно-

техническим требованиям, с целью обеспечения бесперебойной работы конструкций верхнего строения пути. А также сокращения затрат времени и средств на текущее содержание стрелочных переводов на плитном основании. К положительному эффекту применения такой технологии следует отнести то, что ее применение не требует использования специальных железнодорожных машинных комплексов для подбивки стрелочных переводов на плитном основании [74-84].

Указанный технический результат достигается применением не только технологии суфляжа как такового, а подбивкой плит стрелочного перевода в определенной последовательности, согласно схеме, указанной на рисунке 5.3.

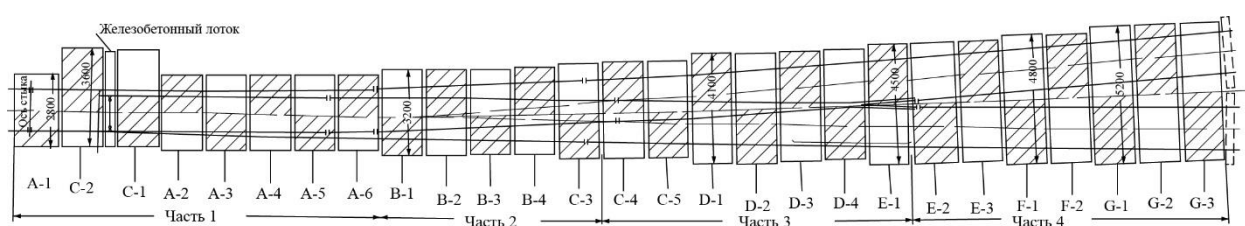


Рисунок 5.3 – Схема выправки плит в шахматном порядке на стрелочном переводе типа Р65 марки 1/11

Заявляемое решение конкретизировано на рисунке 5.3, где представлена схема выправки плит в шахматном порядке на стрелочном переводе на плитном основании, наиболее распространённой на российских железных дорогах конструкции марки 1/11.

Заявленный способ для подбивки стрелочного перевода на плитном основании, в свою очередь, обеспечивает равноупругость стрелочных переводов на плитном основании, а также стабильность положения в плане и профиле. Данный способ позволяет эксплуатировать стрелочные переводы на плитном основании не только согласно регламентированным размерам и показателям, но и с экономией на техническое обслуживание уже эксплуатируемых стрелочных переводов на плитном основании и вновь укладываемых для эксплуатации, в составе безбалластного пути и грузонапряженных участков железнодорожного пути.

Предложенный способ, который предполагается использовать для текущего содержания и укладки новых конструкций стрелочных переводов на плитном

основании, зависит от модели и марки стрелочного перевода, а также условий эксплуатации [74-84].

Способ для подбивки стрелочного перевода на плитном основании заключается в следующем: для приведения стрелочного перевода на плитном основании к нормативным показателям для дальнейшей бесперебойной эксплуатации по положению в плане и профиле, плиты эксплуатируемого или вновь уложенного стрелочного перевода вывешиваются, затем производится подбивка методом суфляжа в определенном шахматном порядке. Данная схема подбивки позволяет избежать резких перепадов по высоте плит основания стрелочного перевода, тем самым уменьшив нагрузку на металлические элементы стрелочной конструкции в целом [85].

Выводы по главе 5

Проанализирована технология производства работ по замене стрелочного перевода типа Р65 на железобетонных брусках стрелочным переводом того же типа на железобетонных плитах.

В качестве примера рассмотрен один из вариантов возможного производства работ.

При эксплуатации для текущего содержания стрелочных переводов на плитном основании со временем возможно появление просадок и выплесков основания, для устранения которых потребуется технология, которая позволит привести стрелочный перевод в свое нормативное положение. Также при укладке или замене плитного основания стрелочного перевода в положение, согласно разработанному проекту, необходима технология, позволяющая выравнять основания стрелочного перевода в виде плит в свое запроектированное положение. В качестве такой технологии предлагается применение метода пневмосуфляжа.

Применение способа выправки стрелочного перевода на плитном основании методом суфляжа позволяет эксплуатировать стрелочные переводы на плитном

основании не только согласно регламентированным нормативам и показателям, но и с экономией на их техническое обслуживание.

Решая вопросы, связанные с обслуживанием стрелочных переводов на плитном основании, необходимо рассмотреть обеспечение надежной работы стрелочных переводов в зимний период.

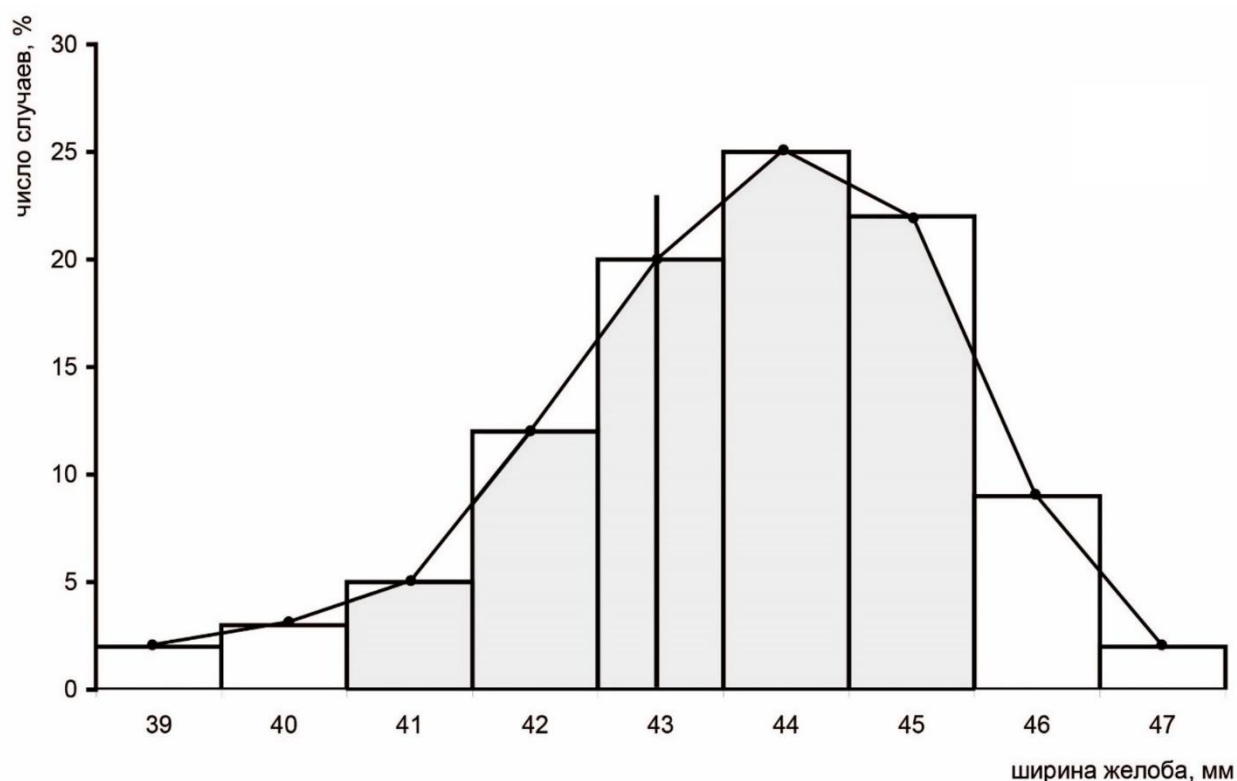
6 ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КОНТРРЕЛЬСОВ ДЛЯ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Один из наиболее сложных компонентов стрелочного перевода – это крестовинный узел. Он предотвращает удары колес в острие сердечника крестовины и их попадание в желоб в неправильном направлении движения. Применение специального профиля СП-850 позволяет создавать контррельсовые узлы, которые позволяют регулировать размеры желобов ~~и~~ в процессе эксплуатации стрелочных переводов, значительно облегчает замену рельсов крестовины.

Конструкция спецпрофиля СП-850 была разработана с целью обеспечения удобства ее применения, однако, в результате эксплуатации, были выявлены недостатки, такие как избыточная жесткость узла и повышенный износ контррельса.

В ходе эксплуатационной работы на крестовинных узлах был замечен значительный разброс значений. По прямому пути разброс ширины колеи составлял 10-12 мм, а по боковому – 15-18 мм. Массовые измерения были проведены в 2018-2019 годах [87].

Измерения показали, что 68 % значений ширины колеи соответствуют нормативным значениям, 16 % значений превышают норму, а также 16 % значений ниже нормы. Максимальная ширина колеи, измеренная в ходе обмеров, составила 1527 мм, а минимальная – 1515 мм. Отклонения от номинальных размеров желобов в прямой части крестовин составляют (-5) до (+2) мм, а на отводах – (-6) до (+8) мм (Рисунок 6.1).



■ - в пределах установленных инструкцией допусков содержания

Рисунок 6.1 – Распределение ширины желобов в средней части контррельса

Наиболее важными параметрами, которые определяют безопасность работы крестовинных узлов стрелочных переводов, являются расстояния между рабочими гранями контррельса и «нерабочего» усовика ($E \leq 1435$ мм) и между рабочими гранями контррельса и сердечника ($T \geq 1472$ мм). Измерения, проведенные в 2018-2019 годах, показали, что 14,6 % стрелочных переводов не соответствуют установленному значению E , а 9,6 % не соответствуют значению T . При эксплуатации поездов с предельными значениями размеров колесных пар, что неизбежно происходит на сети, это имеет крайне негативное влияние как на работу стрелочных переводов, так и на безопасность движения по ним [88].

Анализ размеров колеи, желобов, а также размеров T и E демонстрирует необходимость повышения качества и содержания крестовинных узлов стрелочных переводов, а также рассмотрения вопроса об оптимальности существующих заводских и эксплуатационных допусков в системе «колесная пара – рельсовая колея» [89].

Одним из способов регулировки параметров рельсовой колеи является применение прокладок в узле прикрепления контррельсового спецпрофиля к опорам. Если использовать прокладки из упруго деформирующегося материала, то прокладки также можно использовать для снижения избыточной жесткости узла и уменьшения износа контррельса (Рисунок 6.2). Это позволит увеличить срок службы контррельса и облегчить соблюдение регламентированных размеров для крестовинного узла. Однако, эта мера сама по себе недостаточна [90].



Рисунок 6.2 - Демпфирующие прокладки, установленные на контррельсовом узле

В настоящее время актуальным является вопрос улучшения конструкции контррельсового узла. Существует несколько вариантов решения этой проблемы. Технологические решения включают в себя закалку контррельса или применение металла более высокого качества. Конструктивные изменения могут быть связаны как с модификацией конструкции узла в целом, так и самого контррельса.

После проведения ряда исследований было выяснено, что целесообразно внести изменения в геометрию спецпрофиля. Это позволит уменьшить его металлоемкость и более эффективно распределить металл по сечению.

Внедрение нового спецпроката потребует пересмотра технологии производства, что, в свою очередь, повлечет за собой дополнительные затраты.

Вопрос о необходимости и возможности изменения спецпрофиля уголка контррельсового уже был обсужден на различных конференциях и в ведущих изданиях, включая 126-ую «Рельсовую комиссию» 2010 года и 135-ую «Рельсовую

комиссию» 2019 года, однако, до сих пор не было достигнуто практического решения данного вопроса.

Ранее разработанная автором модель контррельса позволяет произвести расчет контррельса, который не связан с ходовым рельсом. Были проанализированы параметры ширины колеи и желобов на крестовинных узлах стрелочных переводов, а также представлены новые перспективные научные разработки контррельсового спецпрофиля. Были предложены варианты изменения прокатного спецпрофиля уголка контррельсового [7].

Построение эпюр моментов от сил, действующих на контррельс

Как указывалось выше, силы, действующие на контррельс, вызывают в нем деформации изгиба и кручения [91, 92].

В качестве модели для расчета изгибных напряжений, раскрыв статическую неопределимость, примем восьми пролетную статически определимую разрезную балку с шарнирным опиранием на опоры (Рисунок 6.3).

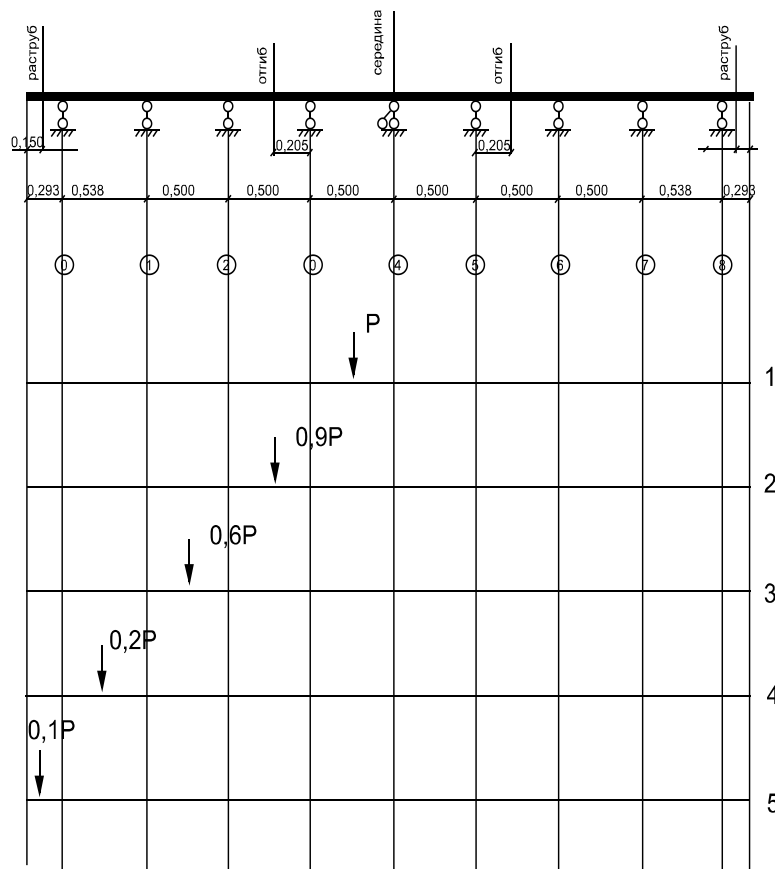


Рисунок 6.3 - Схемы нагружения от сил, действующих на контррельс, при проходе колес подвижного состава по крестовинному узлу

Балка загружена нагрузкой P , и крутящим моментом M_k от воздействия колес и моментами на опорах M_0 - M_8 , компенсирующими действие внутренних сил при замене статически неопределимой конструкции на разрезную. В качестве первого этапа расчета рассмотрим приложение силы и крутящего момента в среднем пролете. Расчетные схемы для расчета приведены на рисунке 6.4.

В матричной форме система уравнений для определения неизвестных изгибающих моментов будет иметь вид:

$$A \cdot M = P \cdot p, \quad (6.1)$$

где A – квадратная матрица размером 9×9 коэффициентов при неизвестных;

M – вектор неизвестных;

P – вектор нагрузок от единичной силы;

p – величина действующей силы.

Для определения компонент матрицы A воспользуемся уравнениями трех моментов:

$$\text{Для 0-й опоры:} \quad M_0 = 0 \quad (6.2)$$

$$\text{Для 1-й опоры:} \quad 0,276 M_1 + 0,5 M_2 = 0 \quad (6.3)$$

$$\text{Для 2-й опоры:} \quad 0,5 M_1 + 2 M_2 + 0,5 M_3 = 0 \quad (6.4)$$

$$\text{Для 3-й опоры:} \quad 0,5 M_2 + 2 M_3 + 0,5 M_4 = 0,09375p \quad (6.5)$$

Сила и крутящий момент приложены в пролете между опорами 3 и 4

$$\text{Для 4-й опоры:} \quad 0,5 M_3 + 2 M_4 + 0,5 M_5 = -0,09375p \quad (6.6)$$

$$\text{Для 5-й опоры:} \quad 0,5 M_4 + 2 M_5 + 0,5 M_6 = 0 \quad (6.7)$$

$$\text{Для 6-й опоры:} \quad 0,5 M_5 + 2 M_6 + 0,5 M_7 = 0 \quad (6.8)$$

$$\text{Для 7-й опоры:} \quad 0,5 M_6 + 2,076 M_7 = 0 \quad (6.9)$$

$$\text{Для 8-й опоры:} \quad M_8 = 0 \quad (6.10)$$

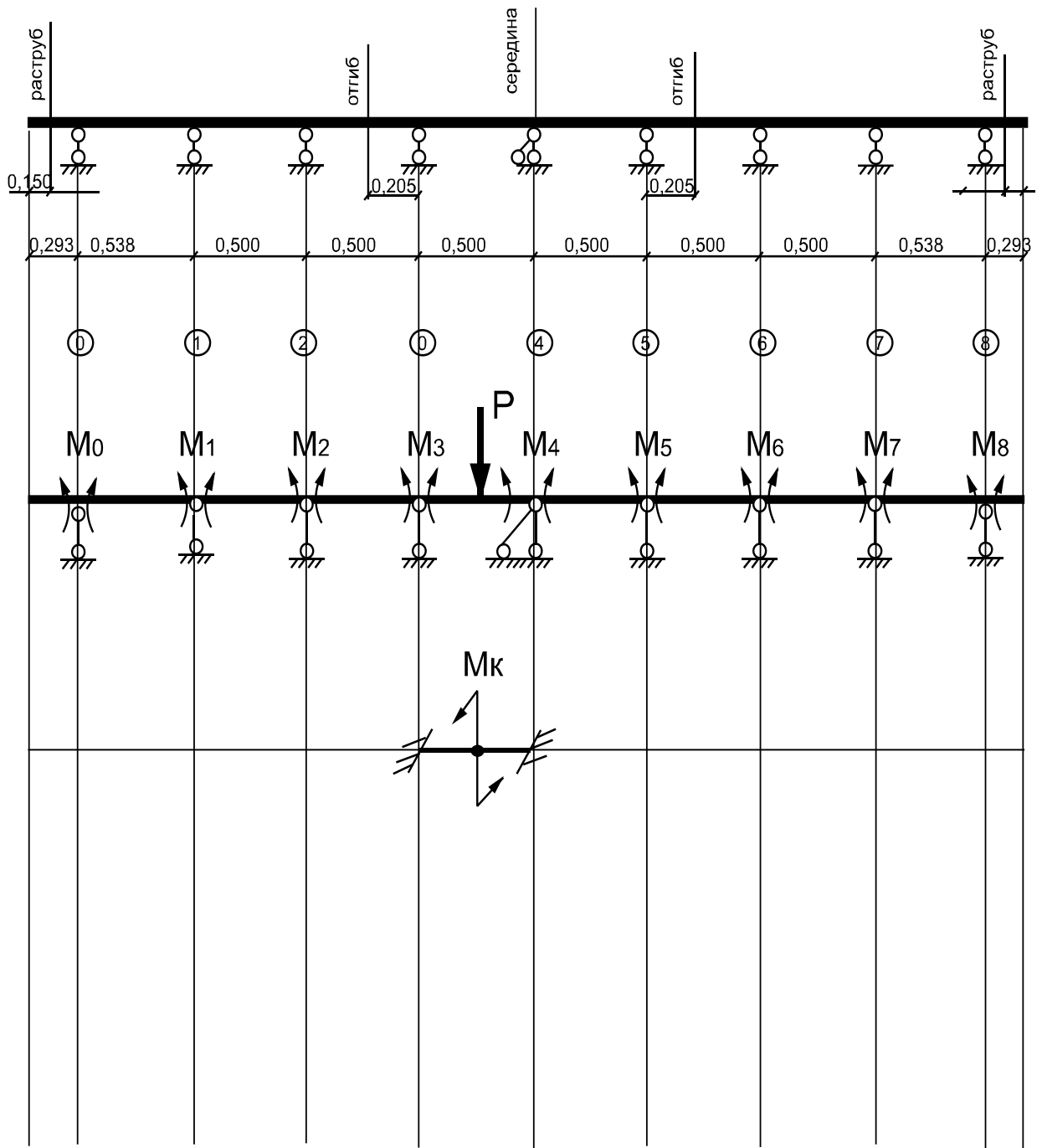


Рисунок 6.4 - Расчетные схемы контроля при расчете на изгиб и кручение

Приводя уравнения 6.2 – 6.10 к общему виду, получим компоненты матрицы А:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4,152 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4,152 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

Вектор неизвестных М и нагрузок Р:

$$M = \begin{bmatrix} M_0 \\ M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \\ M_5 \\ -M_6 \\ M_7 \\ M_8 \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0,1875 \\ -0,1875 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.12), (6.13)$$

Расчет выполним для условий, имевших место в динамико-прочностных испытаниях (Р=110 кН) и для предельных нагрузок (Р=150 кН).

Подставляя Р, а также (6.11); (6.12) и (6.13) в уравнение (6.1), получим систему линейных уравнений 9-ого порядка.

В результате ее решения получим изгибающие моменты, действующие на опорах контррельса.

$$M = \begin{bmatrix} 0 \\ -0,3806 \\ +1,5801 \\ -5,9400 \\ -5,9442 \\ +1,5920 \\ -0,4235 \\ +0,1020 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

где компоненты вектора M даны в $[\text{кН}\cdot\text{м}]$.

Момент в сечении под действующей силой M_p равен:

$$M_p = M^0 + M_3 + (M_4 - M_3) \frac{x}{l}, \quad (6.15)$$

где M^0 – момент в статически определимой балке в точке приложения силы (балка между опорами 3 и 4);

l – длина пролета балки между опорами 3 и 4;

x – расстояние от опоры 3 до места приложения силы.

Подставляя данные, получим:

$$M_p = 0,85414 \cdot p,$$

где p – действующая сила, или

$$M_p = 128,121 \text{ кН}\cdot\text{м для } P=150\text{кН}$$

$$M_p = 93,955 \text{ кН}\cdot\text{м для } P=110\text{кН}$$

Наибольший крутящий момент действует в сечении, в котором приложена сила воздействия колеса на контррельс. При заданной схеме нагружения, и учитывая, что наихудший возможный случай реализуется при приложении силы по верхней кромке контррельса, он будет равен:

$$M_k = p \cdot \frac{b}{2}, \quad (6.16)$$

где p – действующая сила;

b – высота сечения контррельса.

Подставляя действующую силу, получим:

$$M_k = 3,15 \text{ кН}\cdot\text{м для } P=150\text{кН}$$

$$M_k = 2,31 \text{ кН}\cdot\text{м для } P=110\text{кН}$$

Аналогичным образом были выполнены расчеты изгибающих и крутящих моментов при приложении сил в пролетах между другими опорами. Наибольшие значения моментов, полученных в расчетах, приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 - Наибольшие величины изгибающего M_n и крутящего M_k моментов в пролетах между опорами контррельсов, кН·м.

Номера пролетов	P, кН	0-1	1-2	2-3	3-4
Максимальный изгибающий момент, кН·м	110	19,309	55,000	82,207	93,955
	150	26,333	75,023	112,100	128,121
Максимальный крутящий момент, кН·м	110	2,310	2,310	2,310	2,310
	150	3,150	3,150	3,150	3,150

Таким образом, для расчета наибольших напряжений в контррельсе и проверки его прочности следует использовать значения, полученные для загрузки пролета между опорами 3 и 4.

Для исследования напряженно-деформированного состояния контррельса с целью оптимизации его геометрических размеров был выбран метод конечных элементов, т.к. он позволяет подробно рассматривать все особенности геометрии сечений контррельсов.

Метод конечных элементов основан на идее аппроксимации непрерывной функции дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, называемых конечными элементами.

Ключевая идея метода при анализе поведения конструкций заключается в следующем: конструкция моделируется путем разбиения ее на области (конечные элементы), в каждой из которых поведение среды описывается с помощью отдельного набора выбранных функций, представляющих напряжения и

перемещения в указанной области. Эти наборы функций задаются в такой форме, чтобы удовлетворить условиям непрерывности описываемых ими характеристик во всей конструкции в целом.

Граничные условия для перемещений задаются посредством стеснения степеней свободы (заданием нулевых перемещений).

К настоящему времени разработаны различные программные комплексы, реализующие метод конечных элементов.

В процессе выбора программного обеспечения были рассмотрены характеристики таких программных комплексов, как Pro/Engineer, ABAQUS, MSC NASTRAN и ANSYS.

Для расчетов контррельса был выбран программный пакет ANSYS, поскольку этот программный комплекс обладает широкими возможностями для выполнения прочностных расчетов.

Первым этапом работы было создание корректной геометрической модели для исследования. Моделировалась половина контррельса. Для расчетов была взята геометрическая модель, представляющая собой 4-х пролетную статически неопределимую неразрезную балку с консолью на левом конце (половина контррельса), опирающуюся на 5 опор.

В качестве типа конечного элемента, был выбран элемент SOLID187.

Исходные данные по геометрии контррельсового спецпрофиля для построения компьютерной модели контррельса были взяты из чертежа контррельса СП-850 (Рисунок 6.5).

В качестве способа построения сетки из узлов и элементов, использовалось построение упорядоченной сетки. После генерации конечно-элементной (дискретной) модели были определены контактные пары и их свойства, заданы граничные условия.

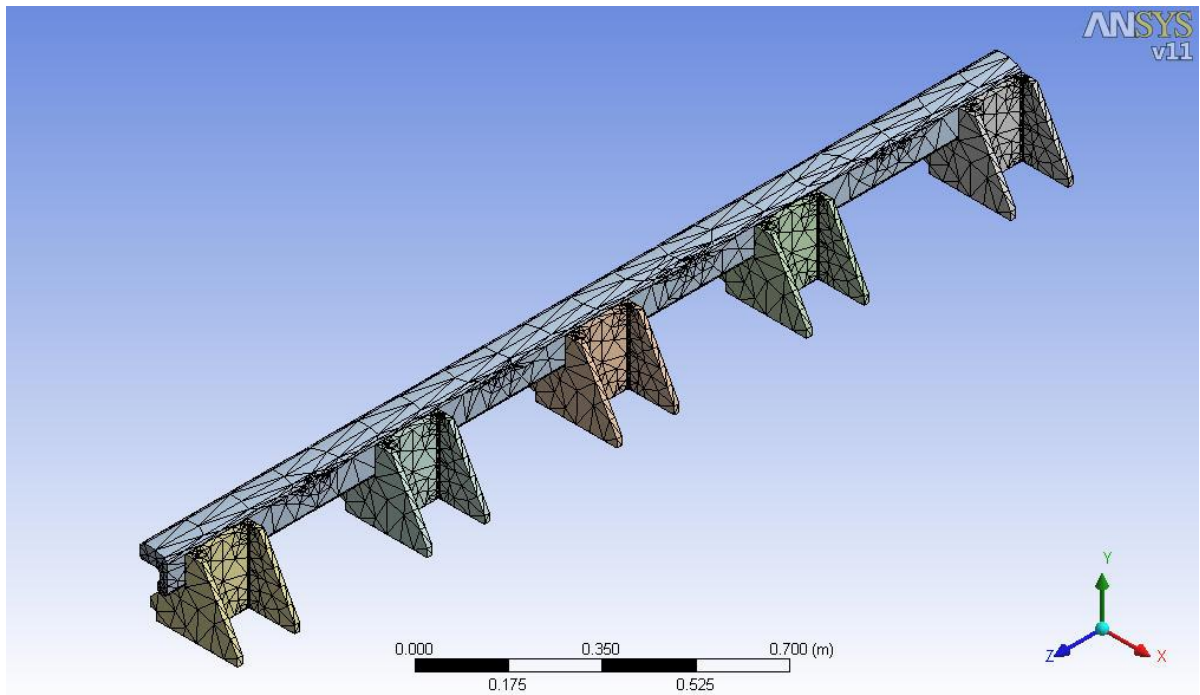


Рисунок 6.5 – Модель уголка контррельсового СП-850, с выделенными конечными элементами

Принимаем в качестве граничных условий, что балка (половина контррельса) прикрепляется к 5-ти опорам. Начало осей координат располагается в точке прикрепления к 5-й (крайней правой) опоре.

Контррельс жестко прикреплен к опорам. То есть, перемещения по осям x , y , z в местах прикрепления балки к опорам принимаются равными нулю.

Нагрузка величиной $0,1; 0,2; 0,6$ и $0,9 \cdot P$ прикладывается к пролетам между опорами с целью моделирования процесса работы контррельса под поездной нагрузкой. Моделирование проводим для предельных нагрузок ($P = 150$ кН).

Результаты расчетов для спецпрофиля контррельса СП-850 представлены на рисунках 6.6 - 6.9 и в таблице 6.2.

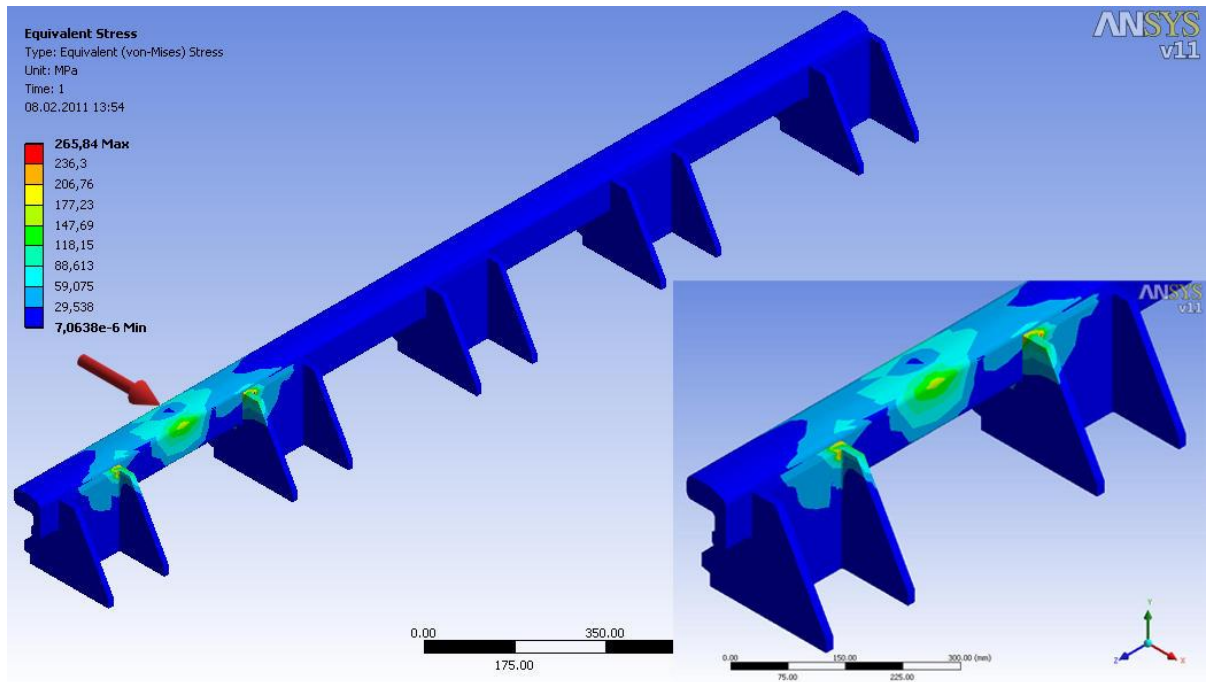


Рисунок 6.6 – Результаты моделирования СП-850 для нагрузки в положении 1

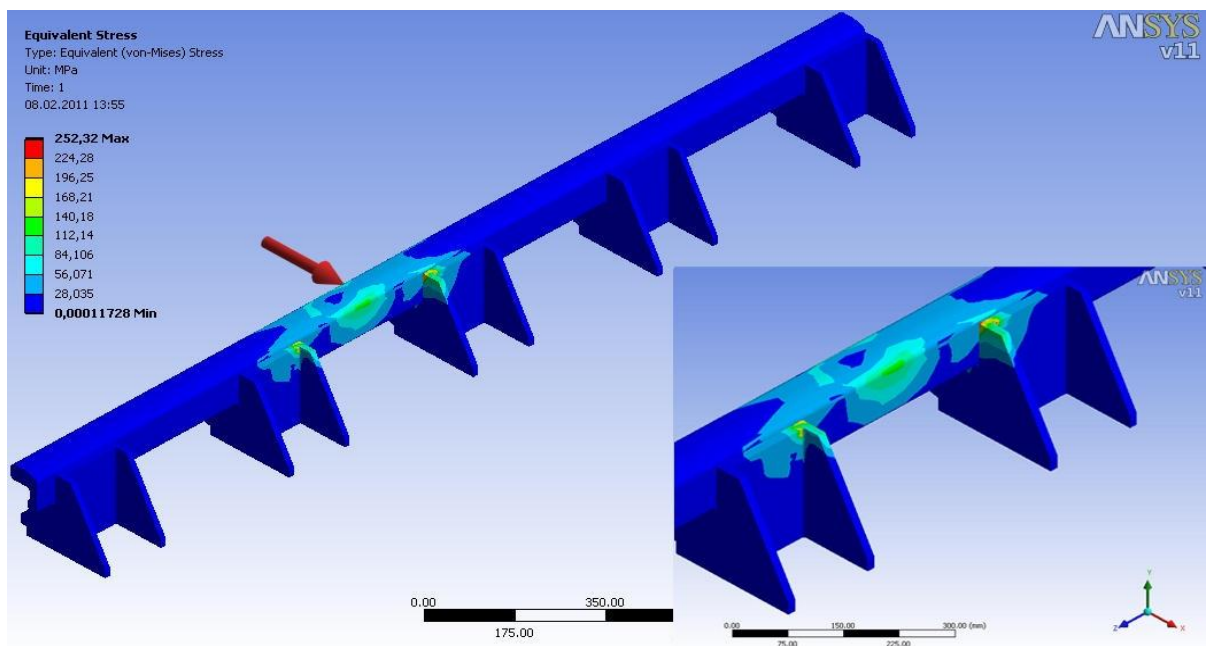


Рисунок 6.7 – Результаты моделирования СП-850 для нагрузки в положении 2

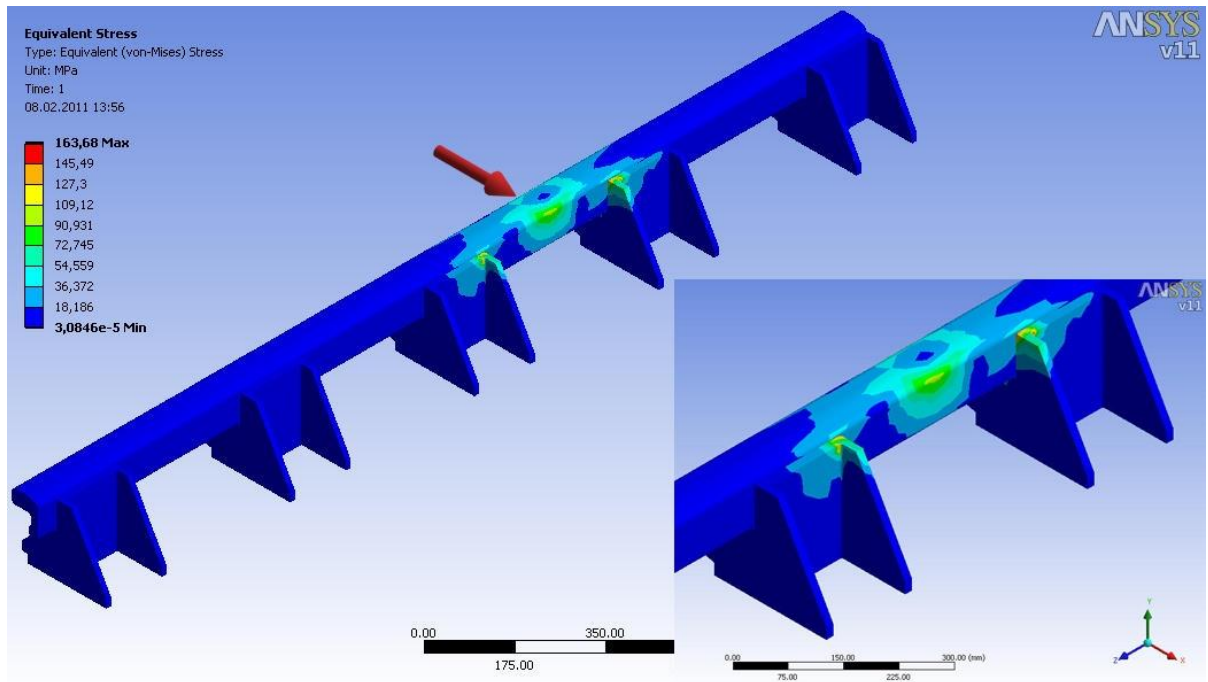


Рисунок 6.8 – Результаты моделирования СП-850 для нагрузки в положении 3

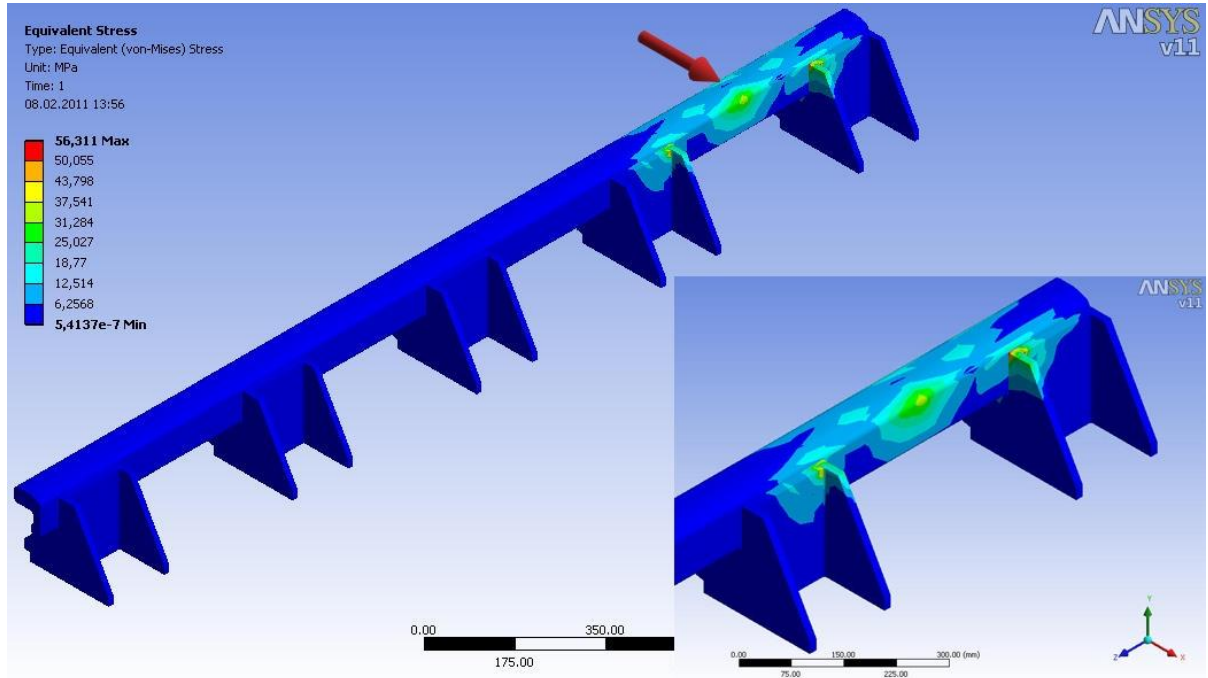


Рисунок 6.9 – Результаты моделирования СП-850 для нагрузки в положении 4

Таблица 6.2 - Наибольшие величины допустимых напряжений в пролетах между опорами контррельса СП-850, МПа

Наибольшие напряжения, МПа, СП-850	Номера пролетов			
	0-1	1-2	2-3	3-4
	265	252	163	56

Как видно из рисунков 6.6 - 6.9 и таблицы 6.2 наибольшие напряжения для спецпрофиля СП-850 достигают максимальной величины в 265 МПа, что ниже значений допускаемых напряжений в контррельсе с учетом условий его работы $[\sigma] = 330$ МПа. Это говорит о том, что спецпрофиль СП-850 по условиям прочности избыточно металлоемок.

При динамико-прочностных испытаниях были отмечены самые большие значения в средней части контррельса. Здесь максимальные наблюдавшиеся значения напряжений, полученные в испытаниях, составили 230 МПа. В отогнутой части контррельса наибольшие напряжения не превышали 165 МПа. Однако, результаты испытаний показали, что при неблагоприятных условиях (уширение колеи, сужение желобов) максимальные вероятные значения напряжений могут составить 270-280 МПа [91, 92].

Сравнивая полученные результаты, можно сделать вывод: полученные величины близки по значениям.

Поэтому может быть поставлена задача проектирования рационального сечения контррельсового спецпрофиля за счет удаления металла из его слабо нагруженных мест.

Такая задача может быть решена методом последовательных приближений, путем вариантных расчетов на описанной выше модели.

Оптимизация контррельсового спецпрофиля

Целевая функция оптимизации будет выглядеть следующим образом:

$$S = \left\{ \min S_i \mid \sigma_{\max} \leq [\sigma] \right\} , \quad (6.17)$$

где S и S_i – означают соответственно оптимизированную и i -ую площади сечения контррельса.

Оптимизируемыми параметрами являются размеры частей сечения контррельса.

$$\vec{X} \in \mathbb{R}^{12}, \quad (6.18)$$

где компоненты вектора X представляют собой набор геометрических размеров сечения контррельса.

Ограничениями служат граничные условия и размеры, определяющие положение контррельса в колее крестовинного узла.

То есть регламентируется положение верха контррельса относительно рельса крестовины, его боковой рабочей грани и перемещения относительно осей x, y, z в местах прикрепления к опорам:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &< [\sigma] \\ l_{ik} &\leq l_{i\text{СП850}} \\ h_k &= h_{\text{СП850}} \\ e_k &= e_{\text{СП850}} \\ \Delta X_{i0} &= 0, i = 1, \dots, 5 \end{aligned} \quad (6.19)$$

где $l_{i\text{СП-850}}$ и l_{ik} – соответственно размер сечения спецпрофиля СП-850 и вариантного на одинаковом уровне;

$h_{\text{СП-850}}$ и h_k – положение верха головки спецпрофиля СП-850 и вариантного контррельса;

$e_{\text{СП-850}}$ и e_k – соответственно размеры, определяющие положение боковой рабочей грани контррельсовых спецпрофилей СП-850 и вариантного;

ΔX_{i0} – горизонтальные перемещения контррельса в местах расположения опор.

Полная постановка оптимизационной задачи будет выглядеть так:

$$\left\{ \begin{aligned} S &= \{\min S_i \mid \sigma_{\max} \leq [\sigma]\} \\ \vec{X} &\in \mathbb{R}^{12} \\ \sigma_{\max} &< [\sigma] \\ l_{ik} &\leq l_{i\text{СП850}} \\ h_k &= h_{\text{СП850}} \\ e_k &= e_{\text{СП850}} \\ \Delta X_{i0} &= 0, i = 1, \dots, 5 \end{aligned} \right. \quad (6.20)$$

Проведя расчет напряжений с использованием программного пакета ANSYS для спецпрофиля СП-850, было получено, что наибольшие напряжения для спецпрофиля СП-850 достигают максимальной величины в 265 МПа, что ниже значений допускаемых напряжений в контррельсе с учетом условий его работы $[\sigma] = 330$ МПа [91, 92].

Результаты анализа его напряженного состояния иллюстрируют рисунки 6.10 - 6.13.

Величины напряжений в характерных точках приведены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 - Величины напряжений в характерных точках оптимизированного спецпрофиля, МПа

Наибольшие напряжения, МПа, оптимизированный профиль	Номера пролетов			
	0-1	1-2	2-3	3-4
	332	310	214	89

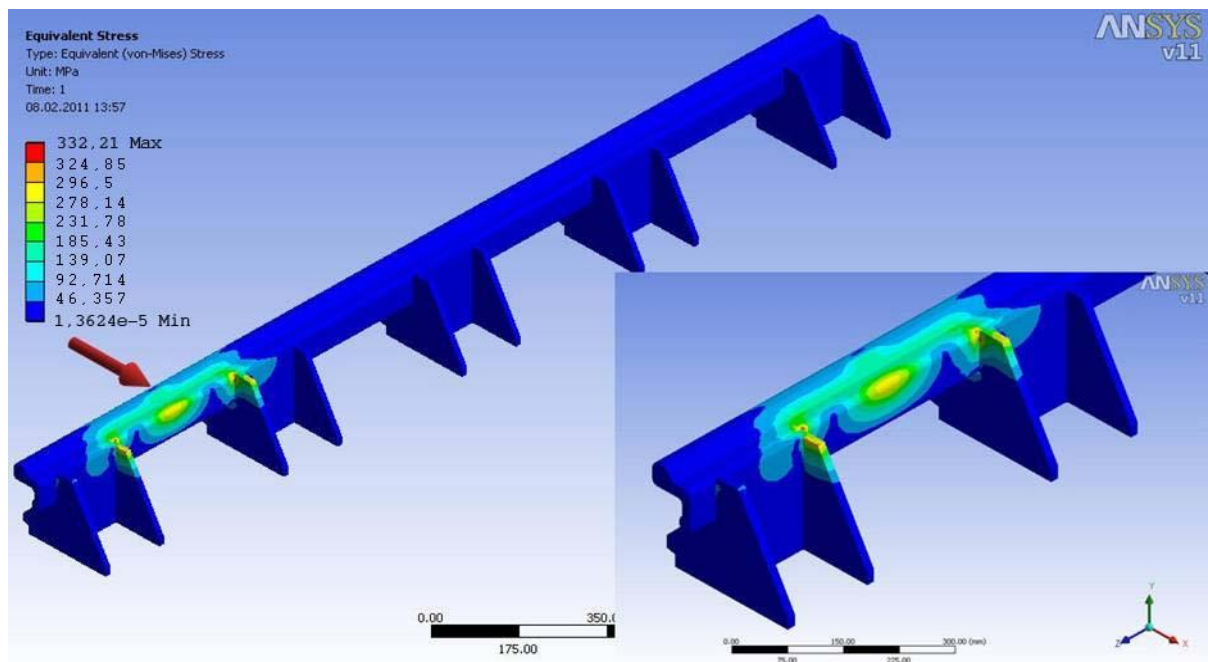


Рисунок 6.10 - Результаты моделирования оптимизированного спецпрофиля для нагрузки в положении 1

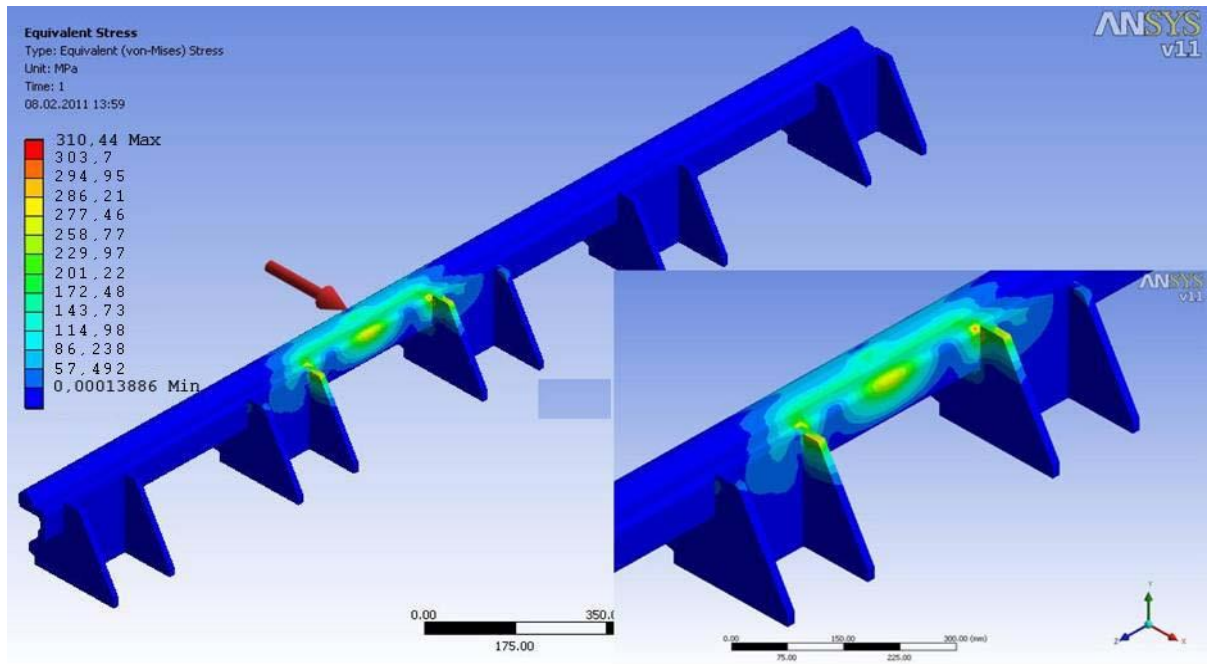


Рисунок 6.11 - Результаты моделирования оптимизированного спецпрофиля для нагрузки в положении 2

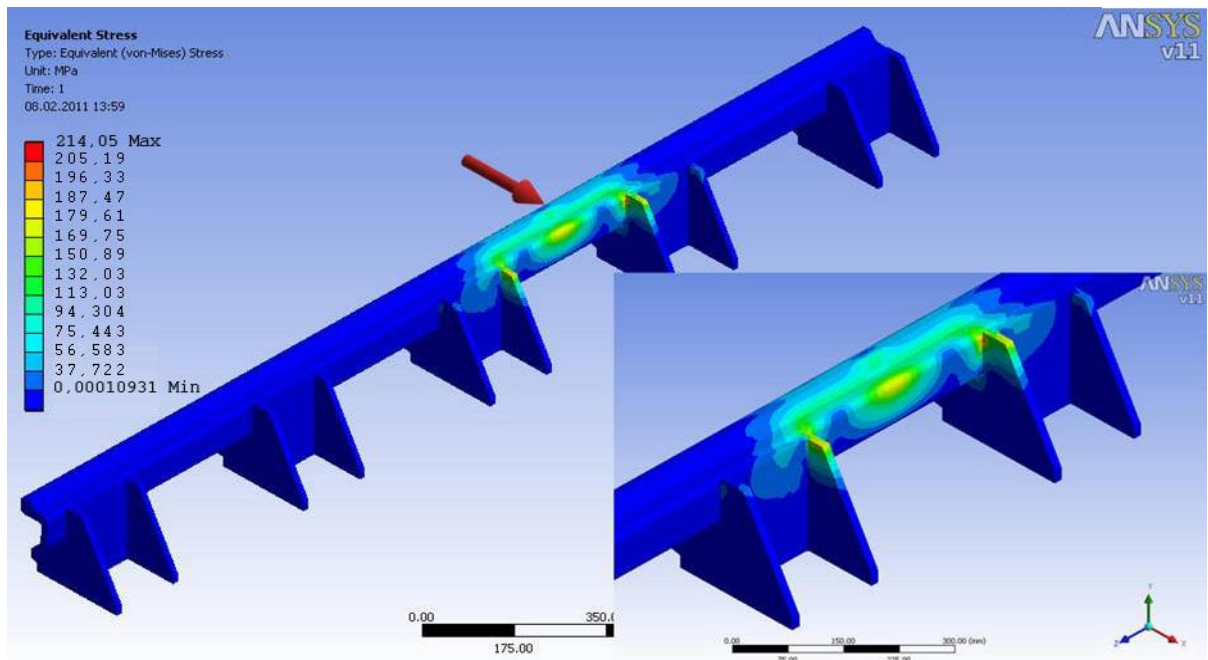


Рисунок 6.12 - Результаты моделирования оптимизированного спецпрофиля для нагрузки в положении 3

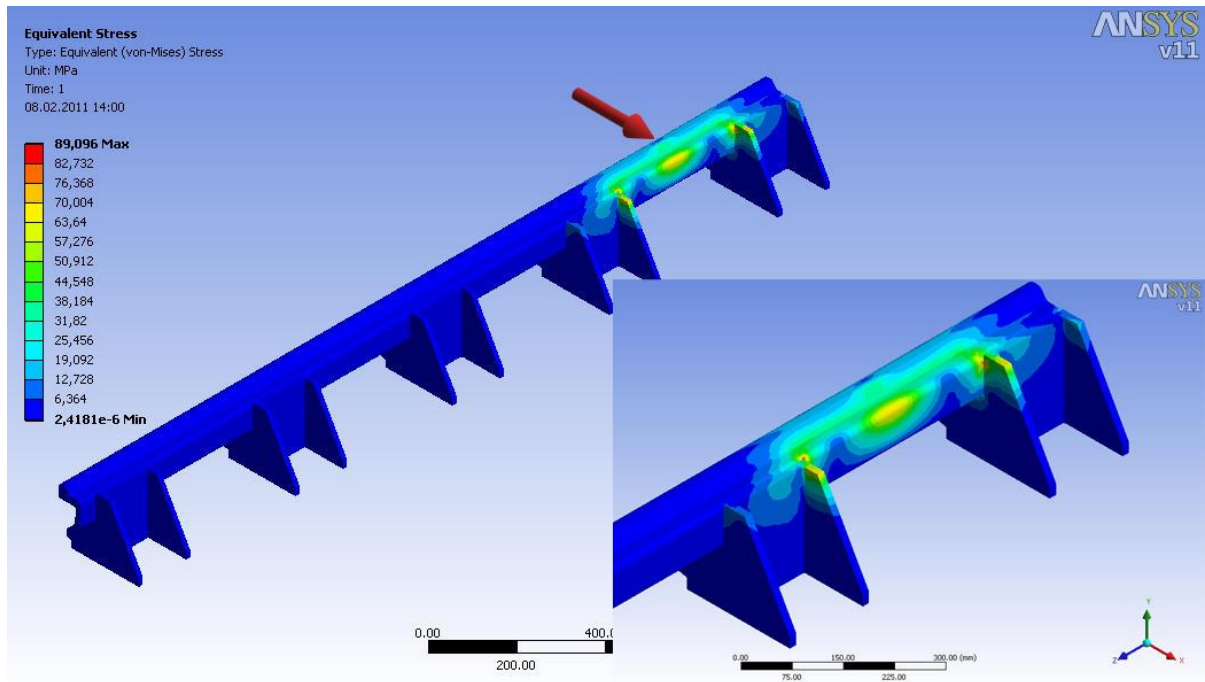


Рисунок 6.13 - Результаты моделирования оптимизированного спецпрофиля для нагрузки в положении 4

Полученные в испытаниях величины составили 230 МПа, таким образом, можно сделать вывод: полученные величины близки по значениям, следовательно разработанная математическая модель адекватна отражает напряжения деформированного состояния контррельса в зонах их наибольшей нагруженности.

Поэтому может быть поставлена задача проектирования рационального сечения контррельсового спецпрофиля за счет удаления металла из его слабо нагруженных мест с применением разработанной модели.

Целевая функция для оптимизации профиля построена как достижение минимума массы при ограничении уровня напряжений в наиболее нагруженных точках сечения. При этом дополнительным условием была минимизация жесткости сечения в горизонтальной поперечной плоскости. Геометрические размеры сечения в пределах, ограничиваемых размерами желобов и элементов крепления, варьировали [7,104,105].

В настоящее время уже разработаны два перспективных предложения, которые были тщательно изучены российскими специалистами по стрелочному хозяйству (Рисунок 6.14) [93-103].

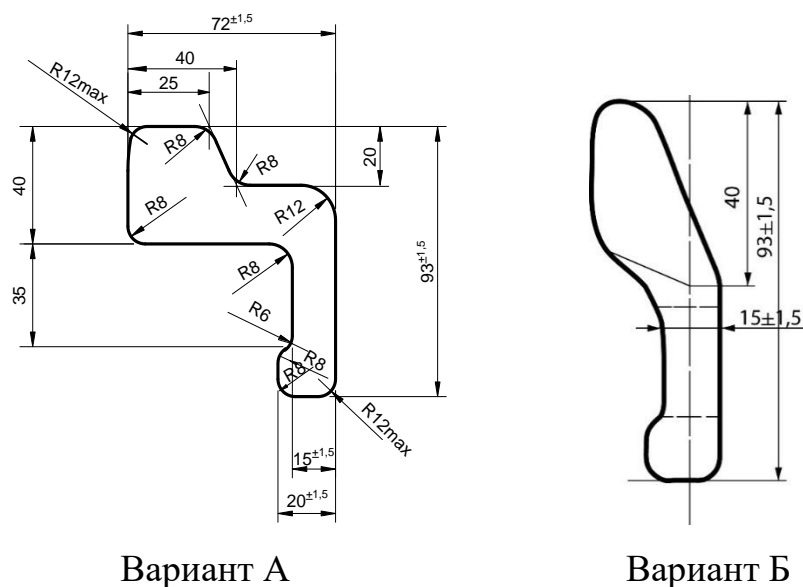


Рисунок 6.14 - Контррельсовый профиль

Выводы по главе 6

1. Разработанные ранее модели не позволяют произвести расчет контррельса, не связанного с ходовым рельсом.

Для исследования напряженно-деформированного состояния контррельса с целью оптимизации его геометрических размеров был разработан метод, основанный на применении метода конечных элементов, т.к. он позволяет подробно рассматривать все особенности геометрии сечений контррельсов, не связанных с ходовым рельсом.

2. В результате моделирования был получен оптимизированный вариант контррельсового спецпрофиля.

Контррельсовый профиль, отличающийся тем, что, отношение высоты его головки к толщине шейки находится в соотношении $1/2$, а отношение толщины

шейки к его полной высоте находится в пределах $1/6$. В свою очередь, головка и подошва смещены относительно шейки.

При указанных соотношениях в контррельсовом профиле исключаются концентраторы напряжений, благодаря чему повышается его надежность и долговечность. Одновременно, в пределах указанных соотношений, реализуется менее металлоемкий профиль с оптимальной жесткостью и повышенной усталостной прочностью.

7 СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТЫ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

В зимний период обеспечение работы стрелочных переводов становится значительно сложнее из-за низких температур и снегопадов. Накопившийся снег мешает нормальному функционированию переводных механизмов. Чтобы обеспечить надежную работу стрелочных переводов в зимнее время и защитить их от снега и льда, применяются различные способы и системы. Применяются способы удаления снега на стрелочных переводах, основанные на пневмоочистке, тепловом обогреве и механическом удалении снега. Каждый из этих способов может быть реализован с помощью различных систем [106-114].

Существует два основных метода очистки стрелочных переводов от снега. Первый метод – ручной - предполагает использование специальных ручных инструментов. Этот метод требует присутствия работника на путях и не является эффективным при высоких скоростях движения поездов.

Второй метод – механический - включает в себя размещение щеток вдоль рамных рельсов и остряков, которые предотвращают скопление снега. Такой метод широко используется на европейских железных дорогах.

Кроме того, при движении поездов возникают воздушные потоки, которые помогают удалять снег с элементов стрелочного перевода.

Механизированный метод очистки снега основан на применении различных машин. Он эффективен при сильных снегопадах для очистки дорог, однако не подходит для очистки стрелочных переводов. Это связано с тем, что использование машин требует дополнительных технологических изменений в графике движения поездов, а также может вызвать повреждения самого перевода и образование уплотненного снега в соединениях его элементов.

Существуют два вида устройств пневматической очистки стрелочных переводов: автоматические и устройства ручной шланговой пневмообдувки. Автоматические устройства пневмоочистки стрелок от снега, в свою очередь,

могут быть стационарными или смонтированными на специальном подвижном составе.

Наиболее распространенным способом очистки стрелок является использование стационарных устройств автоматической обдувки. Такие устройства включают компрессорную станцию, систему подводящих труб и обдувочные трубки, которые закрепляются по всей длине стрелки.

Система автоматической пневмообдувки стрелочных переводов обладает высокой устойчивостью к изменениям температуры в диапазоне от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, благодаря особой конструкции клапанов и использованию специальных материалов. Если на стрелочном переводе образуется наледь, которую невозможно удалить с помощью воздуха, вручную ее удаляют работники дистанции пути. Для текущей очистки стрелок и крестовин от снега предусмотрены стационарные устройства пневматической очистки. Они включаются при начале снегоотложений по распоряжению дежурного по станции, который активирует компрессоры на циклической или блочной системе управления устройствами пневмоочистки стрелок.

Циклическая система управления устройствами пневмоочистки стрелок на станции обеспечивает последовательную подачу сжатого воздуха от компрессорной системы через трубопроводы, электропневматические клапаны (ЭПК) и пневмоаппаратуру, установленную на стрелке. Цикл пневмоочистки длится 4 секунды и повторяется каждые 6 минут.

Система управления также предоставляет три режима очистки: циклический, который применяется для всех стрелок; групповой, который применяется для наиболее активных стрелок, выделенных в отдельные технологические группы; и индивидуальный, который применяется для отдельной стрелки перед ее переводом или в случае запрессовки снега между острием и рамным рельсом.

Возможны три режима работы: нормальный, облегченный и усиленный. В нормальном режиме продувка стрелки происходит в течение 4 секунд через каждые 6 минут. В облегченном режиме продувка осуществляется в течение 4 секунд

каждые 10 минут. В усиленном режиме продувка продолжается в течение 5 секунд через каждые 4 минуты.

Пневмоаппаратура, установленная на стрелке, направляет сжатый воздух в пространство между острием и рамным рельсом с помощью отводов. В конце отводов должны быть установлены пневмосопла Лавалья с диаметром отверстия 6 мм. Ближайшее сопло к острию острия должно иметь диаметр отверстия 8 мм.

Обычно стационарная автоматическая пневмоочистка стрелок дополняется ручной шланговой системой, чтобы обеспечить более тщательную очистку всего стрелочного перевода. Шланговая пневмообдувка включает в себя дополнительные разборные колонки с штуцерами и концевыми вагонными кранами для подключения шлангов. В систему также входят гибкие шланги длиной 10-15 м с металлическими наконечниками, на которых приварены сопла Лавалья с диаметром проходных сечений 6 мм. Для эффективной работы системы пневмоочистки стрелок, давление перед электропневматическим клапаном (ЭПК) на стрелке должно составлять не менее 0,35-0,40 МПа.

Группа, занимающаяся обслуживанием и ремонтом стационарных устройств пневмоочистки стрелок, состоит из опытных наладчиков путевых машин и механизмов пятого и четвертого разряда. Пневматические устройства обеспечивают надежную работу в условиях сухого снега. Однако, для эффективного функционирования системы обдувки требуется прокладка воздушной магистрали, что сопряжено с высокими затратами на труд и материалы. За последние двадцать лет было разработано множество новых моделей машин, которые значительно упрощают процесс очистки снега на станциях. Одной из таких моделей является пневмоочистительная машина ПОМ в различных вариантах модификации.

Машины для очистки снега оснащаются двумя соплами, одно из которых предназначено для подрезания снега, а другое – для его выдува с пути. Угол наклона сопел может быть изменен, а направление потока воздуха можно регулировать. В качестве рабочего органа используются мельничные вентиляторы

с диаметром около 2 метров. Питание привода вентиляторов осуществляется от локомотива. Пневмоочистительная машина типа ПОМ работает очень эффективно: снег в комках, удаляется канатными щетками, а затем выдувается с пути вентиляторами. Во время работы снег выдувается на расстояние до 40 метров.

Одним из главных достоинств данной машины является ее способность эффективно функционировать в условиях обильных снегопадов. Однако, следует отметить, что для обеспечения правильной работы машины необходимы регулярные проходы по стрелочному переводу. Для обеспечения эффективной работы пневмоочистительной машины требуется наличие локомотива и технологических «окон».

Устройства электрообогрева предназначены для предотвращения образования снежных и ледяных препятствий на остриях, рамных рельсах, крестовинах с подвижными сердечниками, а также на рабочих тягах переводов и внешних замыкателях стрелочных переводов.

Устройство электрообогрева включает в себя трубчатые электронагреватели (ТЭНы), которые устанавливаются на подошве рамных рельсов, начиная от острия и заканчивая корнем острия, а также на подошве усювиков, от острия до конца усювиков на крестовинах с подвижным сердечником. Для управления энергопитанием используются шкафы управления, а также пульта местного и дистанционного управления.

Система электрообогрева стрелочных переводов типов Р50 и Р65 предназначена для работы при напряжении 230 В. Установленная мощность электрообогрева для стрелок марки 1/9 и 1/11 в центральной части России составляет 6-8 кВт, а для Севера и Сибири – 8,5-10,4 кВт. Нагревательные элементы (ТЭНы) в контакте с подошвой рамного рельса нагреваются до температуры 80-100 °С. Длина ТЭНов составляет от 3 до 4 метров, а их поперечное сечение составляет 8x12 мм.

Применение системы электрообогрева позволяет сократить ручные работы по очистке стрелочных переводов. Правильный подбор компонентов системы

электрообогрева и настройка параметров терморегулирования обеспечивают надежное функционирование стрелочных переводов в любых погодных условиях и в любое время суток.

Дежурный по станции заботится о том, чтобы устройства обогрева были включены за 40-60 минут до предполагаемого снегопада. Это позволяет разогреть металл стрелки и предотвратить его замерзание. После окончания снегопада, дежурный не отключает устройства обогрева раньше, чем через 60 минут, чтобы полностью испарилась влага с элементов стрелки.

В системе электрообогрева стрелочных переводов основным компонентом оборудования является шкаф ШУЭС-М. Внутри этого шкафа установлены современные средства контроля, управления и диагностики. Большой выбор модификаций шкафа ШУЭС-М позволяет подобрать наиболее подходящий вариант для обогрева нужного количества стрелок. Один шкаф может обеспечить электропитание от 1 до 12 стрелочных переводов с общей мощностью от 12 до 125 кВт·А.

Шкаф ШУЭС-М может работать в широком диапазоне температур окружающего воздуха: от +45 °С до –60 °С. Питание шкафа осуществляется от стационарной электросети.

Для обеспечения надежной работы системы электрообогрева в экстремальных климатических условиях, на некоторых системах электрообогрева стрелочных переводов предусмотрена установка дополнительных нагревательных элементов на остряковые рельсы. В настоящее время, для оборудования стрелочных переводов электрообогревом разработана улучшенная арматура. Она включает в себя теплоудерживающие экраны, которые способствуют снижению потерь тепла при обогреве рамных рельсов на стрелке и усювиков на крестовине с подвижным сердечником [106-114].

Использование теплоизолирующих полимерных блоков на стрелочных переводах позволяет значительно снизить потери тепла, выделяемого нагревателем, и в результате экономить до 20 % энергии, затрачиваемой на обогрев.

Этот метод имеет ряд преимуществ по сравнению с известными системами очистки стрелочных переводов от снега и наледи с использованием электрообогрева. Он обеспечивает стабильную работу в условиях переменной температуры окружающей среды и не требует наличия обслуживающего персонала в зоне движения поездов. Однако следует отметить, что устройства электрообогрева имеют некоторые недостатки, такие как низкая механическая прочность ТЭНов, что исключает использование щеточных снегоборщиков на стрелочных переводах, а также высокое энергопотребление и, как следствие, высокую стоимость эксплуатации.

Экономичным вариантом для обогрева стрелочных переводов является система газообогрева, оснащенная факельно-камерными обогревателями или беспламенными горелками инфракрасного излучения. Например, в одной из систем газообогрева используется факельно-камерный обогреватель, состоящий из обогревательной камеры и инжекционной горелки. Горящая газовоздушная смесь, выходящая из смесителя инжекционной горелки, направляется в камеру сгорания, обеспечивая равномерный нагрев поверхности до необходимой температуры (максимальная температура – 300 °С).

Нагрев элементов стрелочного перевода происходит за счет трех факторов: контакта с теплопроводом, теплового излучения боковых поверхностей теплопровода и передачи теплоты от продуктов сгорания. Выход продуктов сгорания осуществляется через специальные щели, расположенные в пространстве между рамным рельсом и острием, направленные в сторону стрелочных башмаков. Это позволяет предотвратить возможность возгорания горючих продуктов, которые могут попасть на пути движения поездов. Горелки, установленные внутри обогревательных камер, обеспечивают безопасное газоснабжение через коллекторы, подключенные к емкостям сжиженного газа или сети газоснабжения.

Управление горелками газообогрева осуществляется удаленно с помощью автоматического розжига горелок и контролем за их работой. Устройства

газообогрева включаются немедленно при начале снегопада. В случае слабых снегопадов или метелей, тепловая нагрузка газообогревательных установок может быть снижена до 50 % путем регулировки давления газа.

Система может быть питаема газом как от газовой магистрали, так и от баллонов со сжиженным газом. Кроме того, разработан вариант системы, который позволяет питать ее газом на протяжении всего отопительного сезона, используя только один комплект баллонов.

Газообогрев имеет свои преимущества и недостатки. Он относительно дешев в эксплуатации, однако может вызывать трудности при сильных заносах. Важно отметить, что устройства газообогрева не вмешиваются в работу снегоочистительных машин.

При модернизации системы газообогрева с использованием солнечной батареи для розжига горелок, система может функционировать автономно, не требуя подключения к электрическим сетям.

Для обогрева стрелочных переводов можно использовать систему геотермального обогрева, которая использует подземное тепло в качестве источника энергии. Основной принцип работы этой инновационной системы основан на разнице температуры между окружающим воздухом и землей. Для эффективной работы системы применяются тепловые насосы в сочетании с устройствами управления и регулирования [106-114].

Система геотермального обогрева, оснащенная тепловым насосом и рельсовыми теплообменниками, обеспечивает надежный обогрев стрелочных переводов путем циркуляции теплоносителя с оптимальной температурой. Эта инновационная система позволяет снизить энергозатраты на 60 % по сравнению с традиционными электрическими системами обогрева.

Управление геотермальным обогревом осуществляется при помощи метеостанции, совмещенной с температурными датчиками, установленными на рельсах. Метеостанция в режиме реального времени контролирует погодные

условия, включая осадки, влажность и температуру, и на основе этих данных система управления оптимизирует режим работы системы обогрева [106-114].

Система геотермального обогрева стрелочных переводов состоит из нескольких ключевых компонентов. Во-первых, есть вертикальный теплообменник, который располагается в скважине. Затем идет тепловой насос, который осуществляет передачу тепла. Наконец, есть теплообменник, расположенный на рельсе.

Также в систему геотермального обогрева на стрелочном переводе входит трубопровод, в котором циркулирует специальный теплоноситель – солевой раствор. Расположение теплообменника может варьироваться от 20 до 250 метров от обогреваемого стрелочного перевода.

Источником теплоты может служить как тепловые корзины, так и специально оборудованные скважины.

Тепловые корзины представляют собой котлованы размером 4x4 м и глубиной 3-4 м. Внутри них установлены кольцевые трубы, по которым циркулирует соляной раствор. В зимний период, когда температура грунта на глубине 3-4 м на 1-2 градуса выше, чем на поверхности, соляной раствор подогревается на эту разницу и поступает в тепловой насос. С использованием «обратного принципа холодильника» и компрессии, тепловой насос нагревает жидкость в теплообменнике на несколько десятков градусов. Затем она передается через трубы на стрелочный перевод [106-114].

В случае снегопада геотермальная система обеспечивает высокую готовность к эксплуатации стрелочных переводов, достигающую 99,9 %. На станции Дача Долгорукова Октябрьской железной дороги был проведен пилотный проект по внедрению системы геотермального обогрева стрелочных переводов. В период отопительных сезонов система показала непрерывную работу и снижение энергопотребления.

В рамках диссертационной работы была проведена оценка существующих систем защиты стрелочных переводов от негативного воздействия снега и льда в зимнее время [106-114].

Цель исследования состояла в определении надежности и эффективности применения различных существующих и инновационных систем обеспечения безотказной работы стрелочных переводов в зимних условиях. Для этого была собрана информация о работе систем на стрелочных переводах, которые были оборудованы соответствующими системами очистки от снега. При оценке эффективности каждой из систем учитывались затраты:

$$C_{ж.ц.} = C1 + C2 + C3 + C4 + C5 + C6,$$

где C1 – стоимость разработки продукции, отнесенная на единицу;

C2 – стоимость изготовления единицы продукции;

C3 – стоимость доставки и монтажа единицы продукции;

C4 – стоимость эксплуатации и обслуживания единицы продукции состоит из:

C4a – стоимость энергии в сезон, за весь срок эксплуатации;

C4b – затраты труда на обслуживание в сезон, за весь срок эксплуатации;

C4c – стоимость запасных частей в сезон, за весь срок эксплуатации;

C4d – стоимость эксплуатации постоянных устройств в сезон, за весь срок эксплуатации;

C5 – стоимость демонтажа единицы продукции;

C6 – стоимость утилизации единицы продукции.

В данном исследовании не приводятся конкретные цифры относительно стоимости жизненного цикла каждой из систем, так как эти данные сильно зависят от ценового контекста в различных регионах страны. Однако, проведенные анализы стоимости жизненного цикла каждой из систем позволили установить их экономическую эффективность и расположить их по порядку, который приведен ниже.

Среди наиболее распространенных систем отопления, система электрообогрева является наиболее удобной. Однако, из-за высокого потребления

электроэнергии и недостаточной надежности нагревательных элементов, она не является самой экономичной [106-114].

Наиболее экономным вариантом системы отопления является геотермальная система. Однако, чтобы в полной мере воспользоваться преимуществами этой системы, необходимо правильно подключить все компоненты, учитывая ее возможности. Вместе с тем, следует отметить некоторые недостатки этой системы, включая высокую первоначальную стоимость, сложность монтажа и установки, а также требование высококвалифицированного персонала для обслуживания и ремонта. Поэтому, наиболее целесообразно использовать геотермальные системы группами на крупных станциях. Вторым по эффективности вариантом является система газообогрева.

Систему газообогрева стрелочных переводов рекомендуется применять на путях, где отсутствует достаточная электрическая мощность для обогрева стрелочных переводов. Однако следует отметить, что у этой системы есть некоторые недостатки, такие как необходимость обеспечить пожарную безопасность и защиту от вандализма. Если система газообогрева использует солнечную батарею для поджига газа, то она может работать в автономном режиме, что особенно полезно для малых станций.

Систему электрообогрева стрелочных переводов, в свою очередь, рекомендуется использовать на путях всех категорий, где доступны достаточные электрические мощности и имеются экономические возможности для установки такой системы.

В настоящее время, система автоматической пневмообдувки является предпочтительной для линий скоростного и высокоскоростного движения. Однако, недостатком этой системы является низкая надежность нагревательных элементов. В связи с этим, было предложено несколько новых видов нагревательных элементов, которые обладают повышенной надежностью и долговечностью. Также, исследуются инновационные технические решения, включая

индукционные системы и другие. В ближайшее время планируется проведение испытаний этих технических средств.

Система автоматической пневмообдувки стрелочных переводов рекомендуется для использования на путях станций, где недостаточно электрических мощностей для установки систем электрообогрева стрелочных переводов, а также на путях, где обслуживание системы электрообогрева стрелочных переводов затруднено.

Пневматические устройства обеспечивают надежную работу при сухом снеге, однако, даже в таких условиях, использование ручного труда не полностью исключено. Для эффективной очистки горловин станций и станционных путей в условиях обильных снегопадов на сети дорог, рекомендуется использовать пневмоочистительные машины ПОМ. Они также могут быть применены в качестве дополнительного средства очистки стрелочных переводов во время интенсивных снегопадов. Важно отметить, что данный метод очистки требует регулярных проходов машин по стрелочному переводу [106-114].

7.1 Теплораспределение на стрелочных переводах

Обогрев стрелочных переводов при помощи трубчатых электронагревателей (ТЭНов) в настоящее время является одним из наиболее распространённых методов обеспечения работы переводных и замыкающих устройств стрелочных переводов в зимних условиях, однако, общепринятая методика расчётов таких устройств отсутствует. Фрагментарно встречающиеся расчёты проводятся без должного обоснования [106-114].

Точное решение задачи теплового состояния обогреваемого перевода крайне сложно. Физика процесса включает в себя помимо собственного распределения тепла в конструкции перевода такие явления, как конвективный теплообмен конструкции перевода с окружающим воздухом, скорость и направление потока

которого заранее неизвестны, теплообмен излучением как с окружающей средой, так и конструкции с самой собой, плавление снега, его сток и фильтрацию через нижележащие слои, обрушение сводов проплавленных полостей в снеге и теплообмен различными способами с вновь образованными поверхностями и множество других эффектов. Сам по себе учёт всего многообразия участвующих явлений представляет собой на текущем уровне развития вычислительных методов сложную задачу. Ещё большую сложность представляет собой анализ влияния возможного изменения параметров, описывающих тот или иной эффект (таких как скорость и направление ветра, окружающая температура, интенсивность снегопада, плотность и высота снежных наносов на не оттаявших участках).

Очевидно, решение подобных задач должно опираться на те или иные модельные упрощения в постановке [106-114].

7.2 Определение распределения тепла внутри элементов стрелочного перевода

Определение распределения тепла внутри элементов стрелочного перевода и снежного покрова, а также процессов таяния снега является задачей теории теплопроводности [115, 116].

Основным законом теплопроводности является закон Фурье (7.1). Согласно закону, плотность теплового потока прямо пропорциональна градиенту температуры:

$$\vec{q} = \lambda \cdot \nabla T \quad (7.1)$$

где \vec{q} – вектор плотности теплового потока;

λ – коэффициент теплопроводности;

T – температура.

Вторым важным законом является первое начало термодинамики, которое по сути является законом сохранения энергии:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} = \ddot{q} \quad (7.2)$$

где ρ – плотность;

c – удельная теплоемкость;

T – температура;

t – время;

\vec{q} – вектор теплового потока;

\ddot{q} – мощность теплового потока на единицу объема.

Подставив выражение (7.1) в (7.2), получим дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \ddot{q} \quad (7.3)$$

Уравнение (7.3) определяет связь между пространственными и временными изменениями температуры. Для решения этого уравнения необходимо знать распределение температуры внутри рассматриваемого тела в начальный момент времени, форму тела и граничные условия.

Начальное условие определяется как:

$$T(x, y, z, 0) = f(x, y, z) \quad (7.4)$$

Существуют граничные условия различных типов. Для решения задачи распространения тепла внутри стрелочного перевода и снежного покрова необходимы условия четырёх типов:

1. Распределение температуры поверхности тела в любой момент времени:

$$T_{\text{п}}(t) = f(t) \quad (7.5)$$

где $T_{\text{п}}(t)$ – температура поверхности тела в момент времени t .

2. Плотность теплового потока:

$$q_{\text{п}}(t) = f(t) \quad (7.6)$$

где $q_{\text{п}}(t)$ – тепловой поток в момент времени t .

3. Закон конвективного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой:

$$q_{\text{п}} = h_f(T_s - T_B) \quad (7.7)$$

где h_f – коэффициент теплоотдачи конвекцией;

T_B – температура окружающей среды;

T_s – температура поверхности.

4. Закон Стефана–Больцмана для лучистого потока тепла между двумя поверхностями:

$$q_{\text{п}}(t) = \sigma^*(T_s^4 - T_a^4) \quad (7.8)$$

где σ^* – приведённый коэффициент лучеиспускания;

T_a – абсолютная температура тепловоспринимающей поверхности.

Существует ряд способов для решения уравнений такого типа. Например, метод источников, метод разделения переменных и многие другие. Данные методы имеют ограниченную применимость, связанную с формой тел и сложностью получения решений.

В настоящее время широкое распространение получил метод конечных элементов, который позволяет находить численное решение для сложных форм тел [115, 116].

В современной практике подобные расчёты выполняют в различных открытых или коммерческих конечно-элементных пакетах. В настоящей работе применялся коммерческий расчётный код ANSYS.

Для специалиста, выполняющего решение задачи в подобном программном продукте, процесс решения задачи делится на следующие этапы:

1. Создание или импорт геометрической модели.
2. Построение конечно-элементной сетки (дискретизация).
3. Определение свойств и моделей материалов, задание граничных и начальных условий.
4. Решение задачи.
5. Обработка результатов.

Для пояснения методов решения уравнений (7.1) – (7.7) в конечно-элементном коде перепишем их еще раз, но уже в терминологии, принятой в документации ANSYS.

Первое начало термодинамики в дифференциальной форме для контрольного объема сформулировано как:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \nabla T \right) + \nabla \cdot \{q\} = \ddot{q} \quad (7.9)$$

где ρ – плотность;

c – удельная теплоемкость;

T – температура;

t – время;

$\{q\}$ – вектор теплового потока;

\ddot{q} – мощность теплового потока на единицу объема;

$\{v\} = \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix}$ – вектор скорости массового переноса тепла.

Далее, закон Фурье (7.10) используется для связи вектора теплового потока с тепловыми градиентами.

$$\{q\} = -[D]\nabla T \quad (7.10)$$

где $[D] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix}$ – матрица теплопроводности;

K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} – теплопроводности элемента в направлении X, Y и Z, соответственно.

Подставив (7.10) в (7.9) получим:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \nabla T \right) = \nabla \cdot ([D]\nabla T) + \ddot{q} \quad (7.11)$$

Уравнение (7.11) можно также выразить как:

$$\begin{aligned} & \rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \ddot{q} \end{aligned} \quad (7.12)$$

Рассмотрим четыре типа граничных условий, рассмотренных в задачах:

1. Температура, действующая на поверхности S_1 . Граничное условие первого рода:

$$T = T^* \quad (7.13)$$

где T^* – заданная температура.

2. Тепловой поток, действующий на поверхности S_2 . Граничное условие второго рода:

$$\{q\}^T \{n\} = -q^* \quad (7.14)$$

где q^* – заданный тепловой поток;

$\{n\}$ – единичный вектор, направленный по нормали к поверхности.

3. Конвекция, действующая на поверхности S_3 . Граничное условие третьего рода:

$$\{q\}^T \{n\} = h_f (T_s - T_B) \quad (7.15)$$

где h_f – коэффициент теплоотдачи конвекцией;

T_B – температура окружающей среды;

T_s – температура поверхности.

4. Энергетический баланс для расширенного закона лучистого теплообмена Стефана-Больцмана для системы из N поверхностей:

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta_{ji}}{\varepsilon_i} - F_{ji} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) \frac{1}{A_i} Q_i = \sum_{i=1}^N (\delta_{ji} - F_{ji}) \sigma T_i^4 \quad (7.16)$$

где N – число излучающих поверхностей;

δ_{ji} – дельта-символ Кронекера;

ε_i – коэффициент излучения для i -й -поверхности;

F_{ji} – угловой коэффициент;

A_i – площадь i -й -поверхности;

Q_i – потери энергии на i -й поверхности;

σ – постоянная Стефана-Больцмана;

T_i – абсолютная температура i -й поверхности.

Угловой коэффициент определяется как доля общей энергии излучения, покидающей поверхность i , к энергии, которая поступает на поверхность j , как показано на рисунке 7.1:

$$F_{ji} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} dA_j dA_i \quad (7.17)$$

где A_j, A_i – площади i -й и j -й поверхностей;

r – расстояние между i -й и j -й поверхностями;

ε_i – коэффициент излучения для i -й поверхности;

θ_i – угол между N_i и направлением к поверхности dA_j ;

θ_j – угол между N_j и направлением к поверхности dA_i ;

N_i, N_j – нормали к поверхностям dA_i и dA_j .

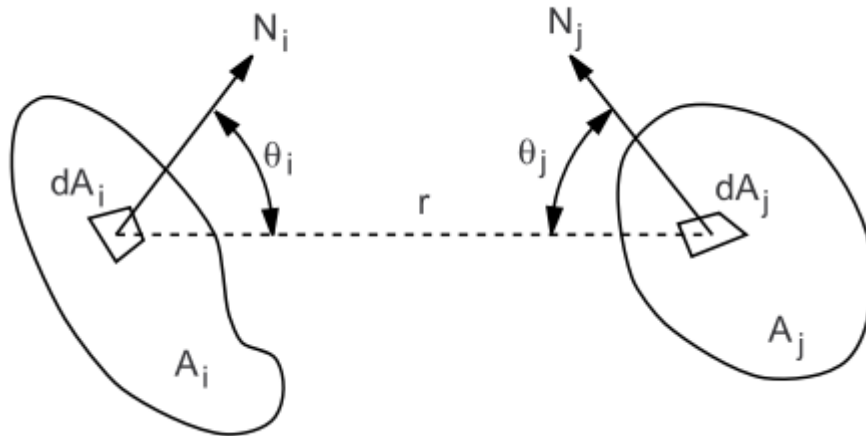


Рисунок 7.1 – Расчёт угловых коэффициентов

Подставив выражения (7.14) и (7.15) в (7.10) получим:

$$\{n\}^T [D] \nabla T = -q^* \quad (7.18)$$

$$\{n\}^T [D] \nabla T = h_f (T_s - T_B) \quad (7.19)$$

Умножив уравнение (7.11) на приращение δT , проинтегрировав по объему и подставив (7.18) и (7.19) получим:

$$\begin{aligned} & \iiint_V \left(\rho c \delta T \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \nabla T \right) + \nabla \cdot (\delta T) ([D] \nabla T) \right) dV \\ & = \iint_{S_2} \delta T q^* dS_2 + \iint_{S_3} \delta T h_f (T_B - T) dS_3 + \iiint_V \delta T \ddot{q} dV \end{aligned} \quad (7.20)$$

где V – объем элемента;

δT – возможное приращение температуры, $\delta T = f(x, y, z, t)$.

Как сказано выше, переменная T изменяется как в пространстве, так и во времени. Разделим эти зависимости как:

$$T = \{N\}^T \{T_e\} \quad (7.21)$$

где $T = f(x, y, z, t)$ – температура;

$\{N\} = \{N(x, y, z, t)\}$ – функция формы элемента;

$\{T_e\} = \{T_e(t)\}$ – узловый вектор температуры элемента.

Таким образом, производные по времени уравнения ((7.21) могут быть записаны как:

$$\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t} = \{N\}^T \{\dot{T}_e\} \quad (7.22)$$

δT имеет тот же вид, что и T :

$$\delta T = \{\delta T_e\}^T \{N\} \quad (7.23)$$

Тогда ∇T может быть выражено как:

$$\nabla T = [B] \{T_e\} \quad (7.24)$$

где $[B] = \nabla \{N\}^T$.

Теперь вариационная форма уравнения (7.20) может быть объединена с уравнениями (7.21), (7.22), (7.23) и (7.24):

$$\begin{aligned}
& \iiint_V \rho c \{\delta T_e\}^T \{N\} \{N\}^T \{\dot{T}_e\} dV \\
& + \iiint_V \rho c \{\delta T_e\}^T \{N\} \{v\}^T [B] \{T_e\} dV \\
& + \iiint_V \{\delta T_e\}^T [B]^T [D] [B] \{T_e\} dV \\
& = \iint_{S_2} \{\delta T_e\}^T \{N\} q^* dS_2 \\
& + \iint_{S_3} \{\delta T_e\}^T \{N\} h_f (T_B - \{N\}^T \{T_e\}) dS_3 \\
& + \iiint_V \{\delta T_e\}^T \{N\} \ddot{q} dV
\end{aligned} \tag{7.25}$$

Предполагается, что плотность ρ остается постоянной по отношению к объему элемента. С другой стороны, c и \ddot{q} могут изменяться внутри элемента. $\{T_e\}$, $\{\dot{T}_e\}$ и $\{\delta T_e\}$ являются узловыми величинами и не меняются в объеме элемента, так что они могут быть вынесены за интеграл. Теперь, когда все величины воспринимаются как предумноженные на произвольный вектор $\{\delta T_e\}$, этот член можно сократить. Таким образом, уравнение (7.25) можно сократить до:

$$\begin{aligned}
& \rho \iiint_V c \{N\} \{N\}^T dV \{\dot{T}_e\} \\
& + \rho \iiint_V c \{N\} \{v\}^T [B] dV \{T_e\} \\
& + \iiint_V [B]^T [D] [B] dV \{T_e\} \\
& = \iint_{S_2} \{N\} q^* dS_2 + \iint_{S_3} T_B h_f \{N\} dS_3 \\
& + \iint_{S_3} h_f \{N\} \{N\}^T dS_3 \{T_e\} + \iiint_V \ddot{q} \{N\} dV
\end{aligned} \tag{7.26}$$

Уравнение (7.26) может быть записано как:

$$\begin{aligned} [C_e^t]\{\dot{T}_e\} + ([K_e^{tm}] + [K_e^{tb}] + [K_e^{tc}])\{T_e\} \\ = \{Q_e^f\} + \{Q_e^c\} + \{Q_e^g\} \end{aligned} \quad (7.27)$$

где $[C_e^t] = \rho \iiint_V c\{N\}\{N\}^T dV$ – матрица удельной теплоемкости элемента;

$[K_e^{tm}] = \rho \iiint_V c\{N\}\{v\}^T [B] dV$ – матрица массовой тепловой проводимости элементов;

$[K_e^{tb}] = \iiint_V [B]^T [D] [B] dV$ – матрица диффузионной проводимости элемента;

$[K_e^{tc}] = \iint_{S_3} h_f\{N\}\{N\}^T dS_3$ – матрица конвекционной поверхностной проводимости элемента;

$\{Q_e^f\} = \iint_{S_2} \{N\}q^* dS_2$ – вектор массового потока элемента;

$\{Q_e^c\} = \iint_{S_3} T_B h_f\{N\} dS_3$ – вектор конвективной поверхностной теплоотдачи элемента;

$\{Q_e^g\} = \iiint_V \ddot{q}\{N\} dV$ – тепловая нагрузка элемента.

Для задач фазового перехода матрица определяется по $[C_e^t]$ кривой энтальпии.

Для пояснения способа решения уравнения (7.27) запишем его в упрощенной форме:

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q^a\} \quad (7.28)$$

Процедура, используемая для решения уравнения (7.28), представляет собой обобщенное правило трапеций:

$$\{T_{n+1}\} = \{T_n\} + (1 - \theta)\Delta t\{\dot{T}_n\} + \theta\Delta t\{\dot{T}_{n+1}\} \quad (7.29)$$

где θ – параметр интегрирования по времени;

$\Delta t = t_{n+1} - t_n$;

$\{T_n\}$ – значение температуры в момент времени t_n ;

$\{\dot{T}_n\}$ – значение скорости температуры в момент времени t_n , рассчитанное на предыдущем шаге.

Уравнение (7.28) может быть записано для шага в момент t_{n+1} :

$$[C]\{\dot{T}_{n+1}\} + [K]\{T_{n+1}\} = \{Q^a\} \quad (7.30)$$

Подставив (7.29) в (7.30) получим:

$$\left(\frac{1}{\theta\Delta t}[C] + [K]\right)\{T_{n+1}\} = \{Q^a\} + [C]\left(\frac{1}{\theta\Delta t}\{T_n\} + \frac{1-\theta}{\theta}\{\dot{T}_{n+1}\}\right) \quad (7.31)$$

Параметр временного интегрирования θ по умолчанию равен 1. Для задач с фазовым переходом рекомендовано значение 0,5.

В случаях, когда задача является нелинейной, то есть, когда имеется зависимость $[C(T)]$ или $[K(T)]$, для поиска решения на каждом временном шаге используется итеративный алгоритм Ньютона-Рафсона.

При работе алгоритма решается уравнение вида (7.32).

$$[K]\{T\} = \{Q^a\} \quad (7.32)$$

Метод Ньютона-Рафсона может быть записан как

$$[K_i^T]\{\Delta T_i\} = \{Q^a\} - \{Q_i^{nr}\} \quad (7.33)$$

$$\{T_{i+1}\} = \{T_i\} + \{\Delta T_i\} \quad (7.34)$$

где $[K_i^T]$ – матрица Якоби (матрица касательных);

i – индекс текущей итерации;

$\{Q_i^{nr}\}$ – вектор внутренней тепловой мощности.

Значения $[K_i^T]$ и $\{Q_i^{nr}\}$ определяются исходя из текущего значения $\{T_i\}$. Правая сторона уравнения (7.33) – это вектор несбалансированной нагрузки. Решатель итеративно изменяет значение $\{Q_i^{nr}\}$ и пересчитывает $[K_i^T]$, исходя из $\{\Delta T_i\}$, как это показано на рисунке 7.2, до тех пор, пока правая сторона уравнения не станет достаточно малой для того, чтобы считать подшаг сошедшимся.

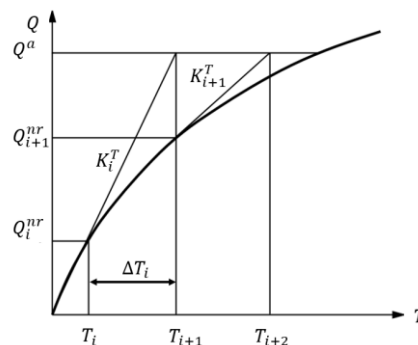


Рисунок 7.2 – Пример работы алгоритма Ньютона-Рафсона

Итеративный алгоритм состоит из следующих стадий:

1. Расчет начинается со значения $\{T_0\}$. $\{T_0\}$ – это вектор температуры с предыдущего подшага. В момент инициализации задачи $\{T_0\} = \{0\}$.
2. Вычисление обновленной тангенциальной матрицы теплопроводности $\{K_i^T\}$ и вектора внутреннего тепловой мощности $\{Q_i^{nr}\}$.
3. Вычисление $\{\Delta T_i\}$ из уравнения (7.33).
4. Вычисление следующего приближения $\{T_{i+1}\}$ из $\{\Delta T_i\}$ и $\{T_i\}$ по уравнению (7.34).
5. Повторение этапов 2-4 до достижения сходимости.

Сходимость достигается тогда, когда выполняются условия:

$$||\{Q^a\} - \{Q_i^{nr}\}|| < \varepsilon_R R_{ref} \quad (7.35)$$

$$||\{\Delta T_i\}|| < \varepsilon_T T_{ref} \quad (7.36)$$

где ε_R и ε_T – допуски;

R_{ref} и T_{ref} – референсные величины;

$||\dots||$ – оператор нормы векторов, которые вычисляются как корень из суммы квадратов компонент вектора.

Референсное значение R_{ref} вычисляется как

$$R_{ref} = ||\{Q^a\}|| \quad (7.37)$$

Референсное значение T_{ref} вычисляется как

$$T_{ref} = \max\{\Delta T_i\} \quad (7.38)$$

где $\{\Delta T_i\}$ – вектор приращения температуры на итерации i .

По умолчанию допуски ε_R и ε_T равны 0,005 и 0,05 соответственно.

7.3 Описание математической модели и свойств материалов

Рассмотрим стрелочный перевод (Рисунок 7.3). Моделируется процесс прогрева рельсов и остряковых рельсов трубчатыми электронагревательными

элементами, находящимися под снежным покровом, а также определение способности нагревательных элементов расплавлять снег при снегопаде.

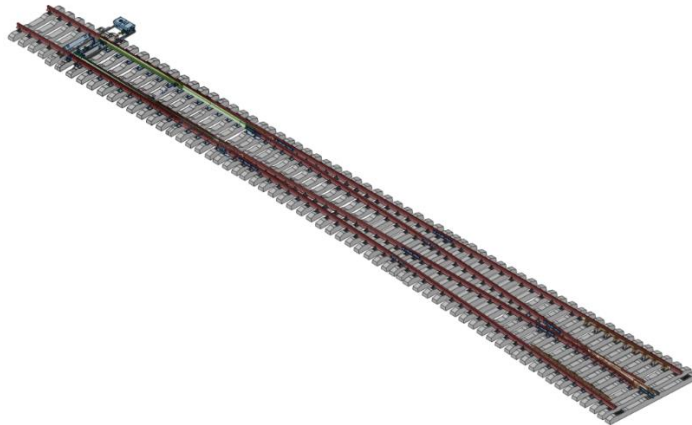


Рисунок 7.3 – Стрелочный перевод

Для снижения ресурсоемкости задачи целесообразно ее рассмотрение в двумерной постановке для ряда характерных сечений. Пример такого сечения показан на рисунке 7.4.



Рисунок 7.4 – Сечение стрелочного перевода

Участок геометрии с обозначением основных элементов показан на рисунке 7.5.

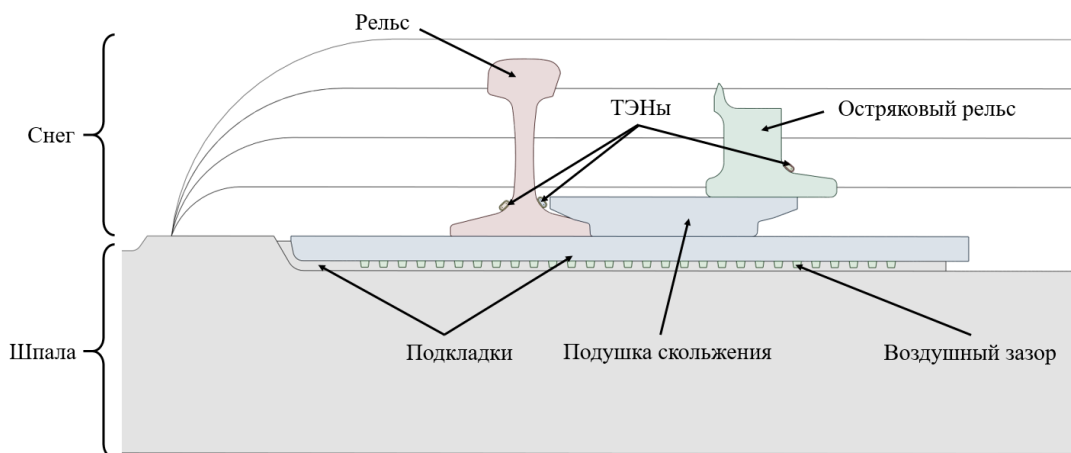


Рисунок 7.5 – Обозначения рассматриваемых элементов стрелочного перевода

Рельс и острижковый рельс выполнены из стали М76Т, подушка скольжения – из Ст3, подкладки – из твердой резины и стали Ст3, шпала – из бетона. ТЭНы

состоят из внутреннего заполнителя – оксида магния и внешней оболочки, выполненной из Ст3. Распределение материалов в геометрии показано на рисунке 7.6 [115, 116].

Теплофизические свойства применяемых твёрдых материалов показаны в таблице 7.1.

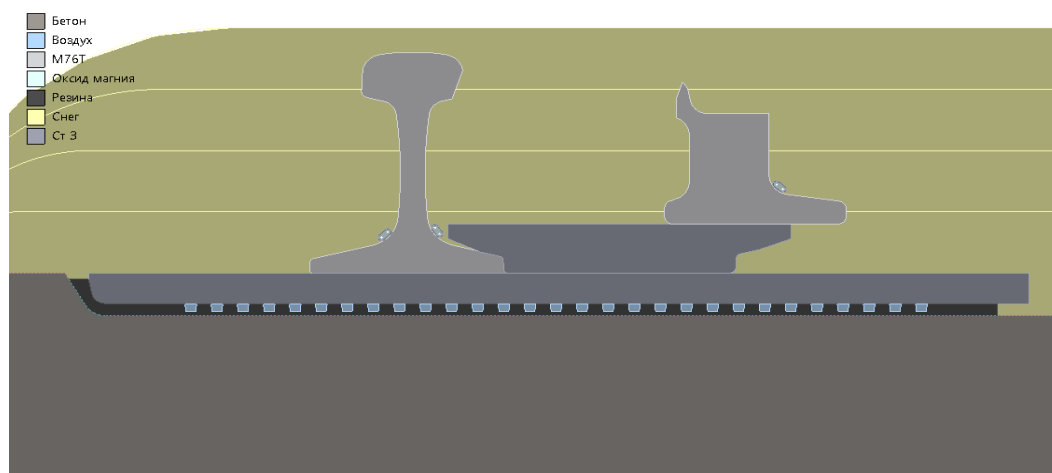


Рисунок 7.6 – Распределение материалов

Таблица 7.1 – Теплофизические свойства применяемых материалов

Свойство	М76Т	Ст3	Бетон В40	Резина	Оксид магния
Плотность, кг/м ³	7850 (Бабичев, Бабушкина, & Братковский, 1991)	7850 (Бабичев, Бабушкина, & Братковский, 1991)	2300 (Бабичев, Бабушкина, & Братковский, 1991)	1190 (Бабичев, Бабушкина, & Братковский, 1991)	3580 (Бабичев, Бабушкина, & Братковский, 1991)
Теплопроводность, Вт/м·°С	49,90 (Rothman, 1988)	63,70 (Eldridge & Deem, 1960)	1,60 (Бабичев, Бабушкина, & Братковский, 1991)	0,15 (Новицкий & Кожевников, 1975)	43,20 (Kingery, Francl, Coble, & Vasilos, 1954)
Теплоемкость, Дж/кг·°С	476 (Rothman, 1988)	501 (American Society for Metals, 1990)	840 (Бабичев, Бабушкина, & Братковский, 1991)	1705 (Новицкий & Кожевников, 1975)	913 (Pankratz, 1982)

Примечание: для М76Т указаны свойства теплопроводности и теплоёмкости для материала-аналога AISI 1080; для Ст3 указаны свойства теплопроводности и теплоёмкости для материала-аналога ASTM 1020.

При работе трубчатых электронагревательных элементов вокруг их оболочек создается область таяния снега. Вода, накопившаяся внизу области таяния,

частично просачивается вниз под действием собственного веса, вплоть до грунта, частично испаряется, а частично поглощается снегом. При этом снег уплотняется за счёт увеличения массовой доли воды и под действием собственного веса стремится занять область уже растаявшего снега. Некоторая часть объёма, ранее занятого снегом, заполняется воздухом. В этой области происходит теплообмен излучением и конвекцией. Корректное моделирование процесса плавления снега при обогреве перевода не является чисто тепловым расчетом, так как предполагает, кроме моделирования теплового состояния, решение задачи течения талой воды в поле действия ускорения свободного падения, включая ее фильтрацию через снег. Такая постановка задачи моделирования является чрезвычайно ресурсоемкой даже по современным меркам [115, 116].

Для упрощения задачи моделирования и сведения к тепловой, возможно её решение в предположении, что снег после плавления становится водой и не удаляется из зазора, либо снег после плавления заменяется воздухом. Технически это достигается использованием в тепловом расчете материала с температурно-зависимыми теплофизическими свойствами: теплопроводностью и энтальпией.

Плотность снега не является постоянной величиной и может колебаться в пределах от 10 кг/м^3 до 700 кг/м^3 в зависимости от влажности, размеров снежинок и времени, прошедшего с момента выпадения снега, а также от внешнего физического воздействия. При дальнейшем увеличении плотности снег превращается в лёд [115, 116].

Классификация снега по виду представлена в таблице 7.2.

Сухой снежный покров состоит из двух фаз – кристаллов льда и воздуха.

Мокрый снежный покров состоит уже из трех фаз и дополнительно включает водную фазу [115, 116].

Свежевыпавший снег состоит из снежинок, ориентированных в разных плоскостях, с частичным сохранением первоначальной структуры.

Уплотнённый снег имеет частично изменённую структуру и изменённую форму снежинок без их перекристаллизации. Это происходит за счет воздействия собственного веса, ветра и температуры.

Старый снег имеет зернистую структуру, состоящую из кристаллов с изменённой структурой и формой [115, 116].

Таблица 7.2 – Классификация снежного покрова

Группа	Плотность, кг/м ³	Вид
I. Свежевыпавший	10-20	1. Свежевыпавший сухой
	100-300	2. Свежевыпавший влажный
II. Уплотнённый	200-600	1. Осевший сухой
		2. Осевший влажный
		3. Метелевый
III. Старый	300-700	1. Мелкозернистый
		2. Среднезернистый
		3. Крупнозернистый
		4. Снег-пльвун

Плотность снега зависит от наличия влаги в его составе. С увеличением содержания влаги происходит увеличение плотности. Из наблюдений известно, что в начале таяния плотность изменяется от 180 до 350 кг/м³, в разгар таяния изменяется от 350 до 450 кг/м³ и в конце таяния достигает 600 кг/м³.

Теплопроводность снега описывается эмпирическим соотношением Абельса (7.39) для плотности менее 350 кг/м³ и эмпирическим соотношением Кондратьевой (7.40) для плотности свыше 350 кг/м³:

$$\lambda = 2,85 \cdot 10^{-6} \cdot \rho^2 \quad (7.39)$$

$$\lambda = 3,56 \cdot 10^{-6} \cdot \rho^2 \quad (7.40)$$

где λ – теплопроводность, Вт/м·°С;

ρ – плотность, кг/м³.

Графически соотношения имеют вид, представленный на рисунке 7.7.

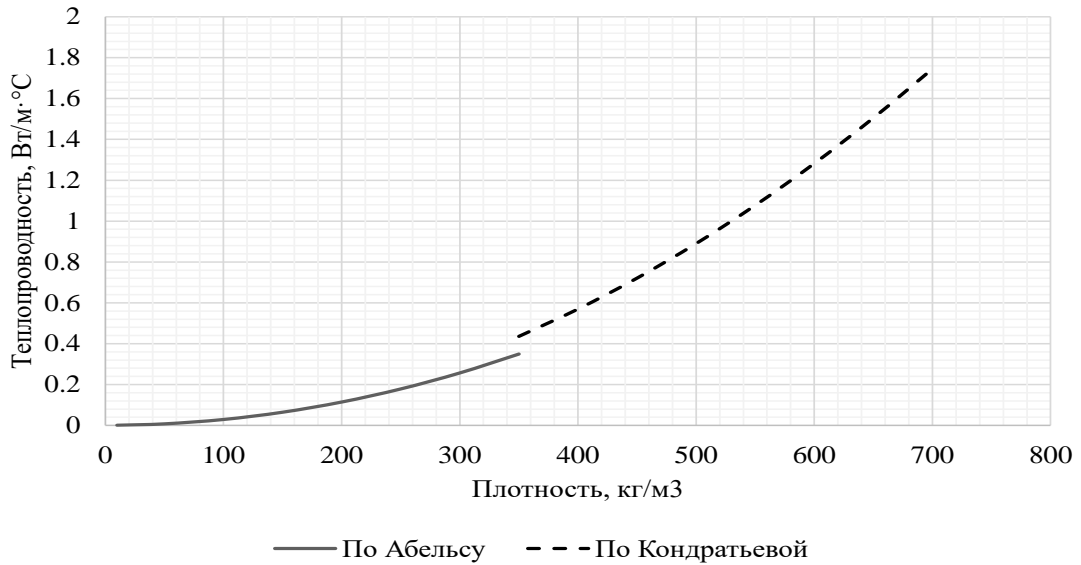


Рисунок 7.7 – Зависимость теплопроводности снега от плотности

Удельную теплоёмкость сухого снега считают равной теплоёмкости льда, вычисляемой по эмпирическому соотношению Вейнберга:

$$C = 2120 \cdot (1 + 0,0037 \cdot T) \quad (7.41)$$

где C – удельная теплоёмкость, Дж/кг·°С;

T – температура, °С.

Для консервативной оценки динамики таяния снега в качестве расчётной плотности принято значение для насыщенного влагой снега в конце таяния – 600 кг/м³.

Значения теплофизических величин, вычисленные по вышперечисленным условиям, представлены в таблице 7.3.

Таблица 7.3 – Расчётные теплофизические свойства снега

Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/м·°С	Теплоемкость, Дж/кг·°С
600	1,282	1963

В большинстве расчётов рассматриваемая задача предполагает учёт фазового перехода при таянии снега и заполнения образовавшихся пустот водой, либо воздухом. Теплофизические свойства воздуха при 0 °С приведены в таблице 7.4.

Таблица 7.4 – Расчётные теплофизические свойства воздуха

Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/м·°С	Теплоемкость, Дж/кг·°С
1,293	0,0244	1005

Теплофизические свойства воды при 0 °С приведены в таблице 7.5.

Таблица 7.5 – Расчётные теплофизические свойства воды

Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/м·°С	Теплоемкость, Дж/кг·°С
1000	0,569	4217

Процесс плавления протекает при постоянной температуре с поглощением энергии извне, затрачиваемой на сам процесс плавления. Поглощаемая теплота называется скрытой теплотой фазового перехода.

Скрытая теплота фазового перехода воды из твёрдого состояния в жидкое составляет 332 кДж/кг при температуре фазового перехода 0 °С. Объемная скрытая теплота фазового перехода воды из твёрдого состояния в жидкое в таком случае составляет 119,5 МДж/м³.

Вне фазового перехода энтальпия определяется как

$$C = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \quad (7.42)$$

где H – энтальпия, Дж/кг;

C – теплоемкость, Дж/кг·°С.

Выражение (7.42) можно представить в виде (7.43), составленном для объемной энтальпии с размерностью Дж/м³:

$$H' = \int_{T_0}^{T_e} \rho \cdot C \cdot dT \quad (7.43)$$

где T_0 и T_e – начальная и конечные температуры, °С;

ρ – плотность, кг/м³.

Исходя из выражения (7.43) и скрытой теплоты фазового перехода, объёмная энтальпия для системы снег-воздух и снег-вода может быть представлена как кусочно-линейная функция. Результат такого преобразования показан на рисунках 7.8 и 7.9.

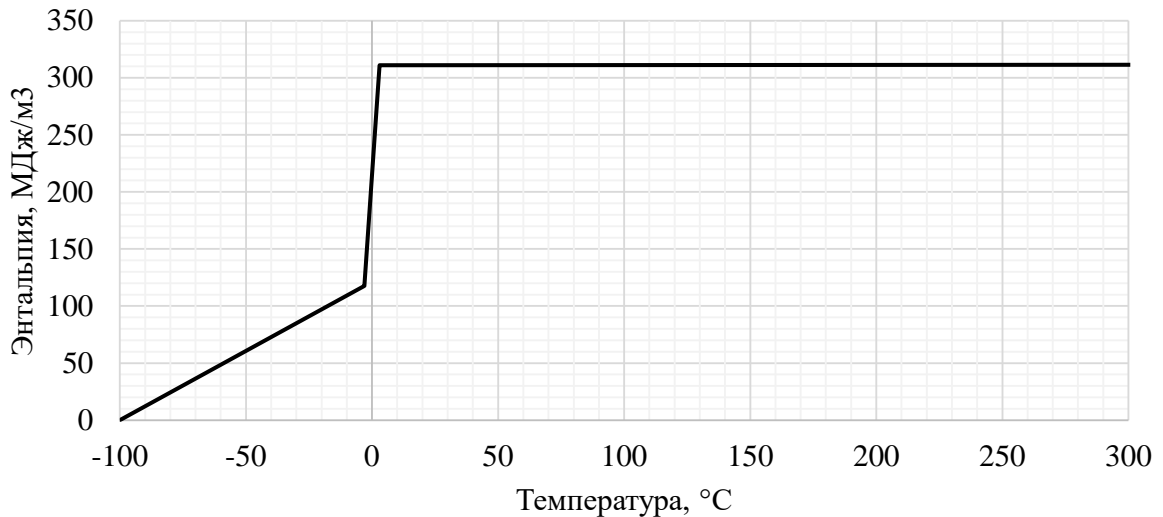


Рисунок 7.8 – Зависимость энтальпии от температуры для системы снег-воздух

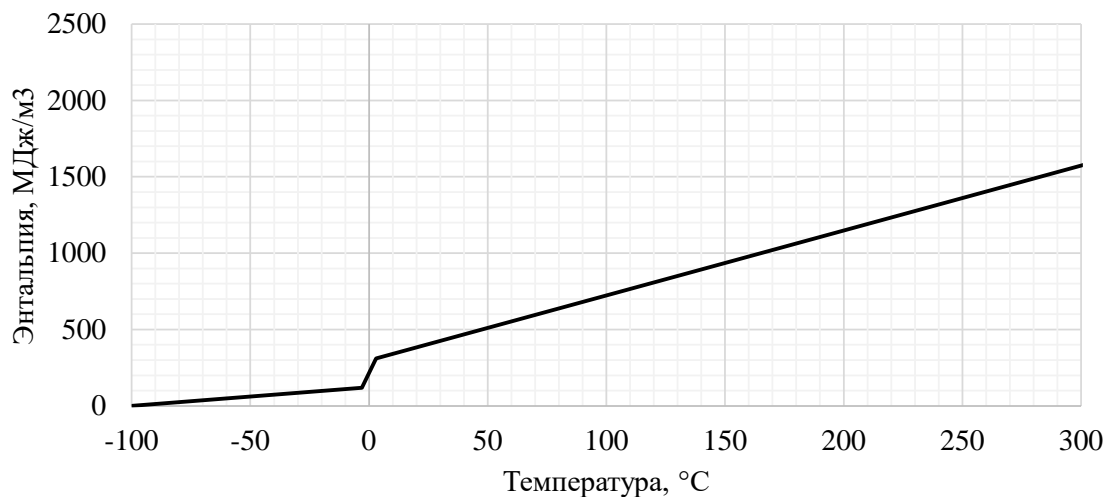


Рисунок 7.9 – Зависимость энтальпии от температуры для системы снег-вода

Согласно данным, на 80 % территории России скорость ветра не превышает 5 м/с. Для данной скорости указано эмпирическое соотношение для определения коэффициента теплоотдачи вынужденной конвекции при обтекании воздухом плоского тела:

$$h = 7,15 \cdot v^{0,78} \quad (7.44)$$

где v – скорость течения воздуха, м/с.

Отсюда коэффициент теплоотдачи с поверхности раздела снег-воздух равен 25,1 Вт/м·°C.

При работе трубчатых электронагревательных элементов в стационарном режиме в твёрдых телах создаётся поле распределения температур, которое зависит

от условий конвекции, лучистого теплообмена и стоков тепла к другим элементам с постоянной температурой. При воздействии снегопада на такую систему будет происходить непрерывный процесс таяния снега и удаления влаги различными механизмами в областях с температурой выше нуля градусов Цельсия и накопления снежной массы в области с температурой **выше** нуля градусов Цельсия. На последнюю область будут оказывать влияние нагретые поверхности твёрдых тел за счёт теплообмена излучением и конвекции. Данные факторы будут понижать температуру в твёрдых телах до тех пор, пока нагревательные элементы не потеряют способность плавить падающий снег. Исходя из этих фактов, можно определить температурные условия окружающей среды и интенсивность снегопада, при которых возможно плавление падающего снега при заданной конструкции железнодорожного полотна и мощности электронагревательных элементов. Учёт всех факторов напрямую представляет крайне ресурсоёмкую задачу. Данную задачу можно решить с учётом следующих модельных допущений.

Задача определения способности расплавлять снег при снегопаде подразумевает определение стационарного распределения тепла внутри твёрдых тел, при котором температура на поверхности в области интереса становится равной нулю градусов Цельсия. Данный процесс включает влияние лучистого теплообмена между телами и конвективного стока тепла в окружающую среду под воздействием ветра. Области с температурой ниже нуля градусов Цельсия начинают накапливать снег, что приводит к возникновению теплового сопротивления между элементами рельсов и окружающей средой, а также блокирует участки покрытых снегом поверхностей от участия в лучистом теплообмене между поверхностями рельсов. Технически это достигается использованием в тепловом расчете граничных условий конвекции и лучистого теплообмена с температурно-зависимыми параметрами: коэффициентом конвективного теплообмена и коэффициентом излучения [115, 116].

Коэффициент излучения для бетона составляет 0,85, для стали с окисленным слоем – 0,8. Таким образом, температурно-зависимые коэффициенты излучения можно определить в виде, показанном в таблице 7.6.

Таблица 7.6 – Коэффициенты излучения, зависящие от температуры

Температура, °С	Сталь	Бетон
Минус 0,1	0,001	0,001
Плюс 0,1	0,800	0,850

По интенсивности снегопад делят на: слабый – меньше 0,1 мм/ч; средний – 0,1-1 мм/ч; сильный – больше 1 мм/ч. Тепло, затрачиваемое на плавление и нагрев падающего снега данной интенсивности, можно выразить через коэффициент конвекции, задав данный коэффициент зависимым от температуры окружающей среды и температуры поверхности [115, 116].

Массовый расход для заданной интенсивности снегопада можно вычислить по соотношению:

$$S_m = A \cdot I \cdot \rho \quad (7.45)$$

где A – площадь, м²;

I – интенсивность снегопада, м/с;

ρ – плотность воды, кг/м³.

При интенсивности снегопада 1 мм/ч массовый расход составит 1 кг/ч.

Теплота плавления определяется как

$$Q_\lambda = \lambda \cdot m \quad (7.46)$$

где λ – скрытая теплота фазового перехода, Дж/кг;

m – масса, кг.

Теплота нагрева определяется как

$$Q_c = C \cdot m \cdot \Delta T \quad (7.47)$$

где C – удельная теплоёмкость, Дж/кг·°С;

m – масса, кг;

ΔT – разница температур, °С.

Суммарная теплота, расходуемая на нагрев и плавление, определяется как

$$Q_s = Q_c + Q_\lambda \quad (7.48)$$

Таким образом, для нагрева и плавления снега при расходе 1 кг/ч графическая зависимость необходимой тепловой мощности от температуры будет иметь вид, показанный на рисунке 7.10.

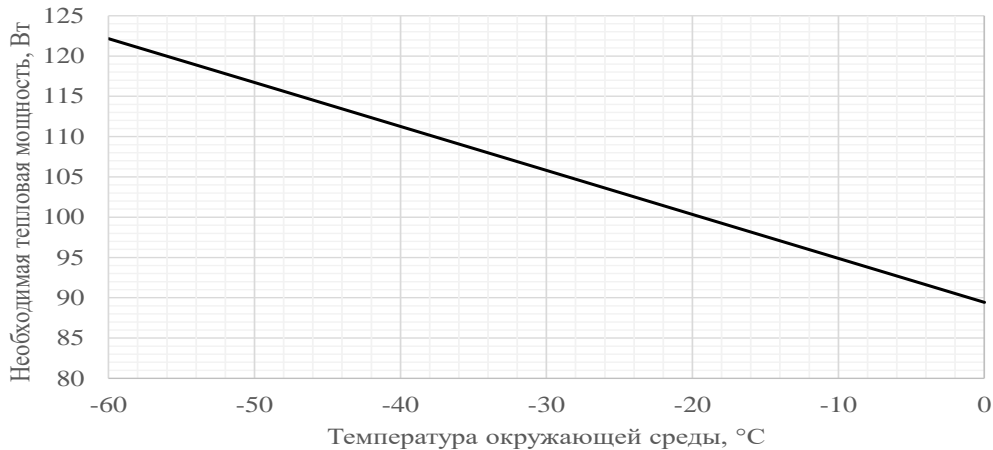


Рисунок 7.10 – Зависимость необходимой тепловой мощности от температуры для плавления снега интенсивностью 1 мм/ч

Из условия теплового баланса на охлаждаемой поверхности, тепловой поток можно представить, как сумму воздействия конвективной теплоотдачи, вызванной наличием ветра, и теплоотдачи на плавление снега и его нагрев. Таким образом, эффективный коэффициент теплоотдачи определяется как

$$\hat{h} = h + \frac{Q_s}{\Delta T} \quad (7.49)$$

где h – коэффициент вынужденной конвекции, Вт/м²·°C;

Q_s – тепловая мощность, расходуемая на нагрев снега и плавление, Вт;

ΔT – разница температур поверхности и окружающей среды, °C.

Эффективный коэффициент теплоотдачи имеет дискретную составляющую и изменяет своё значение в нуле градусов Цельсия, так как при температуре поверхности ниже нуля подразумевается, что на этой поверхности накапливается снег. Высота снега оказывает влияние на коэффициент теплоотдачи согласно соотношению:

$$\hat{h} = \left(\frac{1}{h} + \frac{e}{k} \right)^{-1} \quad (7.50)$$

где e – толщина снега, м;

k – теплопроводность, Вт/м·°С.

Используя соотношения (7.45) - (7.50) и приняв площадь равную 1 м², эффективный коэффициент теплоотдачи может быть выражен как

$$\hat{h} = \begin{cases} \left(\frac{1}{h} + \frac{e}{k}\right)^{-1}, & \text{при } T_{\text{пов}} < 0 \text{ } ^\circ\text{C} \\ h + \frac{I \cdot \rho \cdot (\lambda + C \cdot \Delta T)}{\Delta T}, & \text{при } T_{\text{пов}} \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (7.51)$$

где $T_{\text{пов}}$ – температура поверхности, °С.

В соотношении (7.51) переменными величинами являются интенсивность снегопада, температуры поверхности и окружающей среды. Графические зависимости данного соотношения для указанных переменных показаны на рисунке 7.11. для интенсивности снегопада 1 мм/ч и 5 мм/ч при температурах минус 60 °С, минус 25 °С и минус 5 °С в предположении высоты снега 20 мм в области с температурой ниже нуля градусов Цельсия. При этом плотность снега принята максимальной для свежеснегавшего влажного снега – 300 кг/м³. Коэффициент вынужденной конвекции вычислен для скорости ветра 5 м/с и составляет 25,1 Вт/м·°С [115, 116].

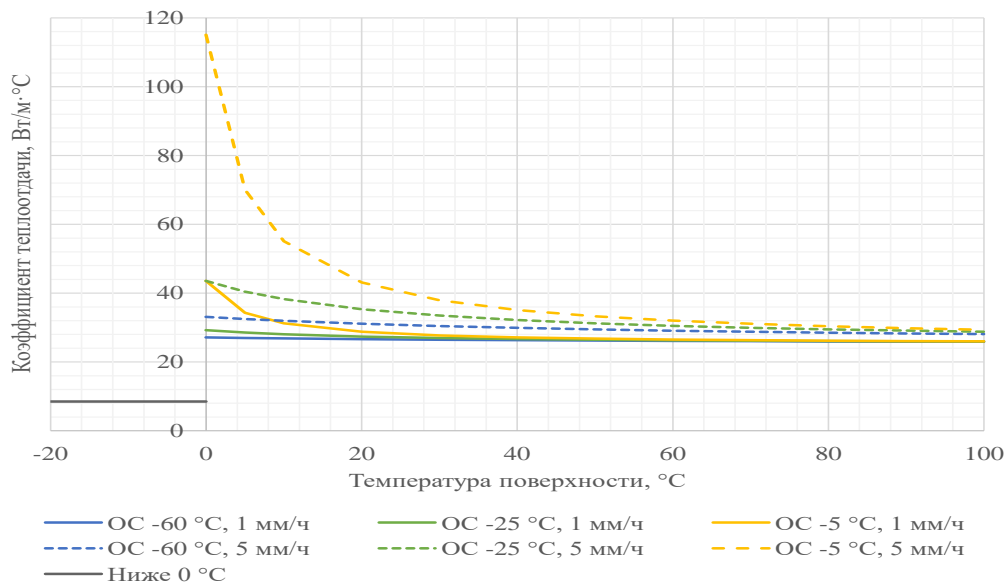


Рисунок 7.11 – Зависимость эффективного коэффициента теплоотдачи от интенсивности снегопада, температуры окружающей среды (ОС) и температуры поверхности

Конечно-элементная сетка состоит преимущественно из четырёхугольных элементов с включениями из треугольных элементов с квадратичными функциями интерполяции. При построении сетки использован характерный размер элемента 7 мм, с функцией измельчения сетки в областях высокой кривизны линий. Таким образом, достигнуты наилучшие параметры качества конечных элементов. Размер модели составляет 79 тысяч узлов. Конечно-элементная сетка показана на рисунках 7.12 и 7.13 [115, 116].

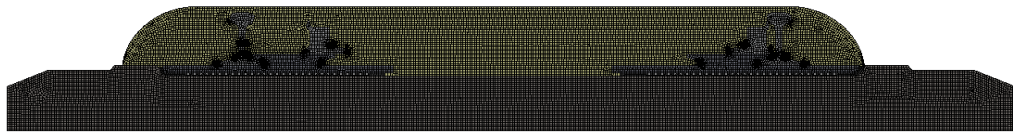


Рисунок 7.12 – Конечно-элементная сетка сечения стрелки стрелочного перевода

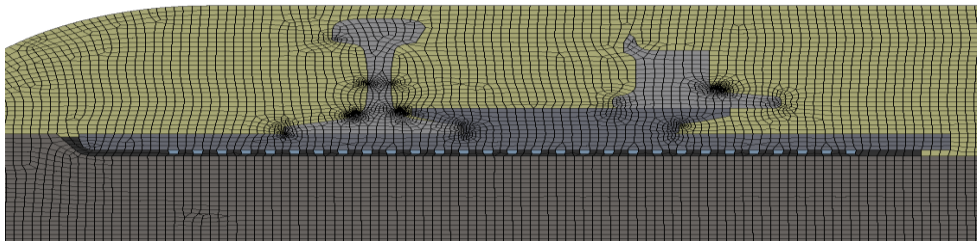


Рисунок 7.13 – Конечно-элементная сетка сечения подкладки с подушкой

7.4 Обоснование метода расчета плавления при заданном уровне снежного покрова

7.4.1 Определение области плавления при заданном уровне снежного покрова

При определении области плавления снежной массы существенным является вопрос учета дополнительного поглощения тепла за счёт скрытой теплоты фазового перехода. Ввиду особенностей методов решения задач численными методами необходимо определить эффективный диапазон температур для учёта фазового перехода. Для сведения задачи к тепловой использованы предположения о замене растаявшего снега средой со свойствами воздуха, либо средой со свойствами воды.

Для определения степени влияния вышеописанных параметров решены четыре задачи, постановки в которых отличаются учетом скрытой теплоты фазового перехода и изменением теплофизических свойств в зависимости от температуры. Параметры задач и граничные условия указаны на рисунке 7.14 и в таблице 7.7 [115, 116].

Таблица 7.7 – Параметры задач

Параметр	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4
Тепловая мощность ТЭНов, Вт/м	500	500	500	500
Коэффициент теплоотдачи, Вт/м·°С	25,1	25,1	25,1	25,1
Температура грунта, °С	минус 25	минус 25	минус 25	минус 25
Температура окружающей среды, °С	минус 25	минус 25	минус 25	минус 25
Начальная температура, °С	минус 25	минус 25	минус 25	минус 25
Время процесса, с	36000	36000	36000	36000
Учет замены снега воздухом	не учтена	не учтена	не учтена	учтена
Учет замены снега водой	учтена	учтена	не учтена	не учтена
Учет скрытой теплоты фазового перехода	учтена	учтена	не учтена	учтена
Температура начала фазового перехода, °С	минус 3	минус 1	–	минус 3
Температура конца фазового перехода, °С	плюс 3	плюс 1	–	плюс 3

Начальная температура и температура окружающего воздуха приняты за минус 25 °С. Предполагается, что грунт содержит большое количество холода и его температуру можно считать постоянной и равной минус 25 °С [115, 116].

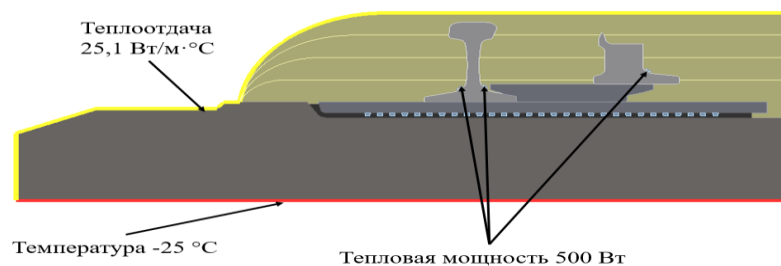


Рисунок 7.14 – Граничные условия

Модели 1, 2 и 4 включают учет нелинейностей фазового перехода и решаются с помощью алгоритма Ньютона-Рафсона. Итеративно определены наилучшие параметры сходимости задачи, без существенной потери точности. К таким параметрам относятся температуры начала и конца фазового перехода. Хотя в реальном процессе эти температуры практически равны между собой, при моделировании температуры приняты за минус 3 °С и плюс 3 °С соответственно (задачи 1 и 4). Такие условия обеспечивают устойчивое решение задачи за существенно более малое расчетное время (более 4 раз), в сравнении с температурами фазового перехода – минус 1 °С и плюс 1 °С (задача 2) [115, 116].

Зависимости температуры от времени процесса для разных температур фазового перехода в точках 5, 6, 7 и 8 (Рисунок 7.15) показаны на рисунке 7.16.

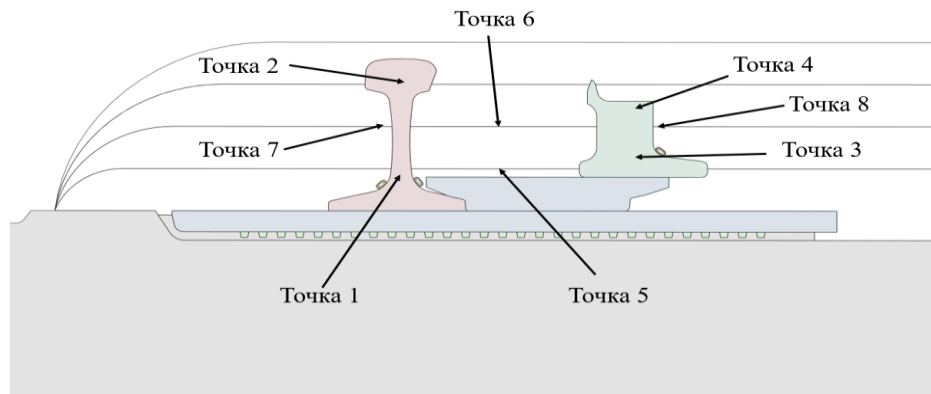


Рисунок 7.15 – Области контроля температуры

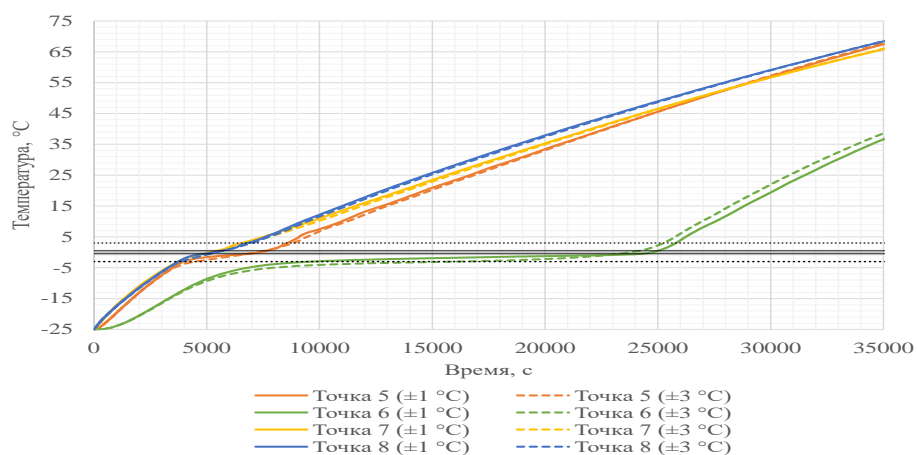


Рисунок 7.16 – Изменение температуры в области снега:

±3 °С – диапазон фазового перехода от минус 3 °С до плюс 3 °С,

±1 °С – диапазон фазового перехода от минус 1 °С до плюс 1 °С

Зависимости на рисунке 7.16 расположены достаточно близко друг к другу. Отличия заметны в точке б: области, наиболее удалённой от нагревателей. Это объясняется как раз меньшей температурой фазового перехода и большим влиянием энтальпии в разности температур в двух подходах [115, 116].

Было проведено сравнение результатов для модели 1, модели 2, модели 3 и модели 4 на 1800 с, 3600 с, 7200 с, 14400 с, 25200 с и 36000 с от начала процесса. В качестве примера на рисунке 7.17 показано распределение температур на 36000 с.

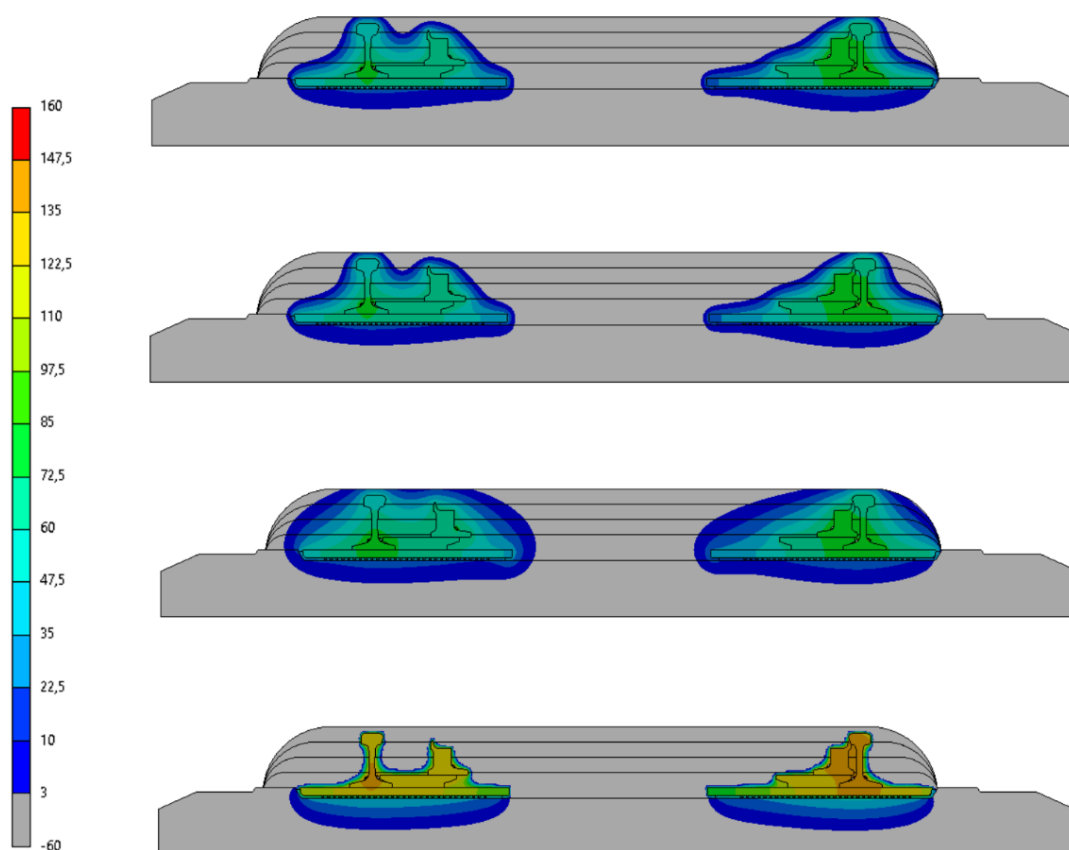


Рисунок 7.17 – Распределение температур на 36000 с:

сечения сверху вниз: модель 1, модель 2, модель 3, модель 4

Из сравнения результатов модели 1 и модели 2 видно, что области проплавления снега практически идентичны. Подход, рассмотренный в модели 1, является приемлемым. Все дальнейшие задачи рассмотрены с диапазоном фазового перехода от минус 3 °С до плюс 3 °С [115, 116].

Результаты расчетов модели 1, модели 3 и модели 4 также показаны на рисунках 7.18 и 7.19.

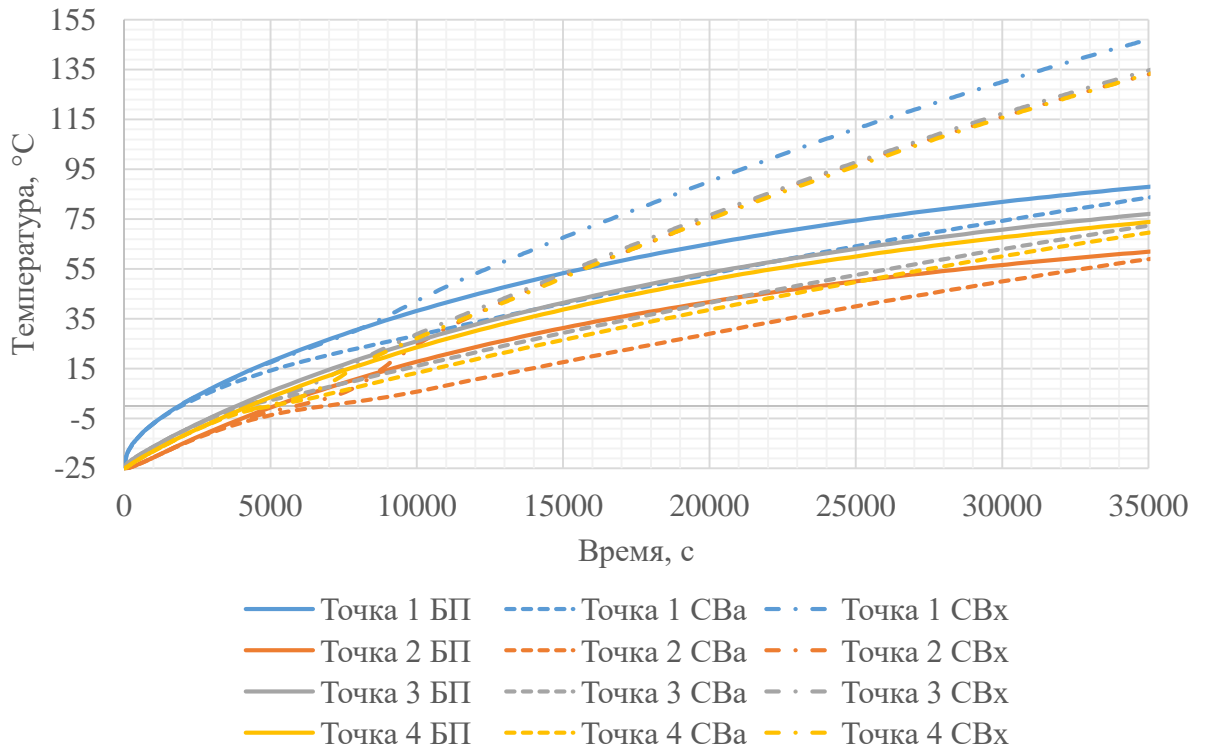


Рисунок 7.18 – Изменение температуры в твердых телах:
СВа – модель 1, БП – модель 3, СВх – модель 4

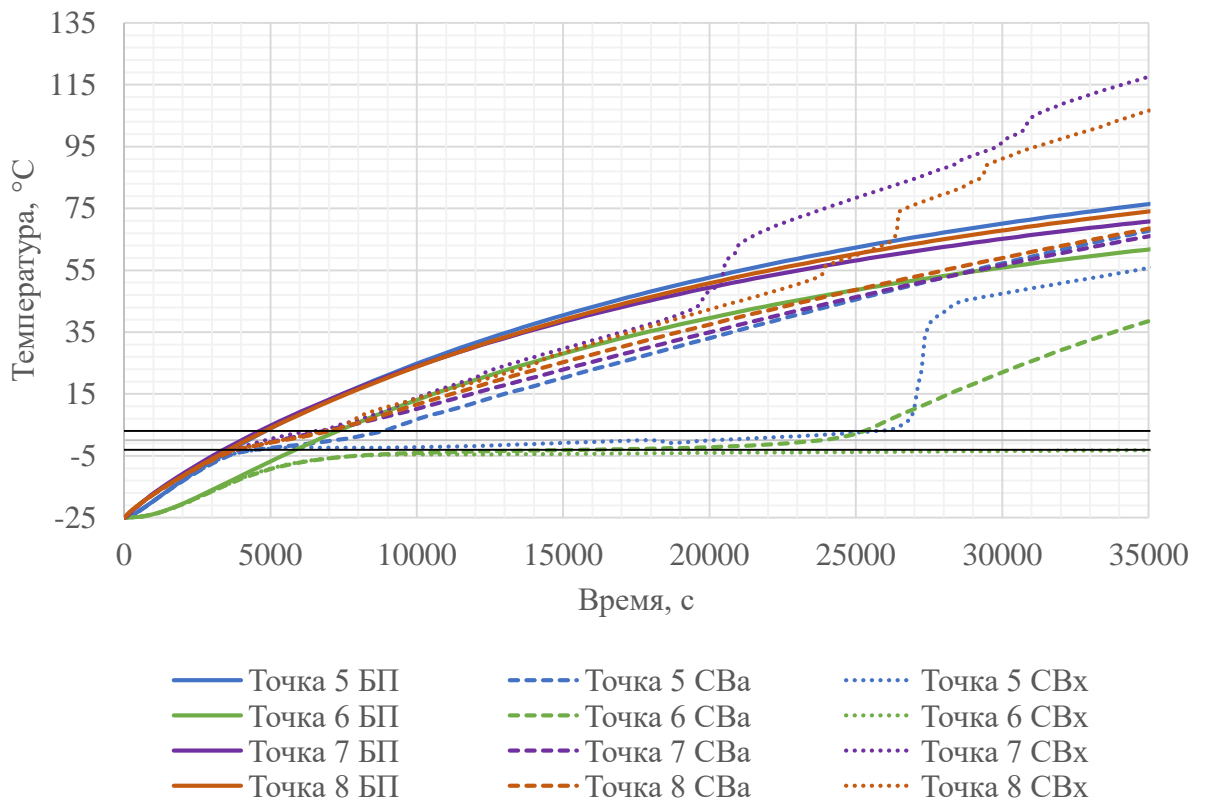


Рисунок 7.19 - Изменение температуры в снеге/воздухе:
СВа – модель 1, БП – модель 3, СВх – модель 4

Первые 3000 с процесса модель 1, модель 3 и модель 4 ведут себя сходным образом и показывают близкое друг к другу распределение температур. Это связано с первоначальным прогревом конструкций, при котором не происходит таяния снега.

В модели 3 и модели 4 происходит большой прогрев конструкции железнодорожного полотна. Это обусловлено тем, что модель 3 не включает фазовый переход, а модель 4 блокирует передачу тепла к нерастопленному снегу из-за воздушного зазора. Таким образом, конструкция накапливает тепло и не позволяет расходовать его на плавление снега вокруг себя.

Модель 3 показывает наибольшие области снега с положительной температурой. Такая модель не позволяет дать консервативную оценку в условиях модельных упрощений.

Модель 4 показывает завышенные значения температуры в элементах железнодорожного полотна, при том, что проплавленной является меньшая часть снега из всех моделей, что также приводит к неконсервативному решению.

Таким образом, моделью, показывающей наиболее адекватный результат, является модель 1. В дальнейших расчётах приняты допущения, описанные для данной модели [115, 116].

7.4.2 Определение влияния теплофизических свойств на область плавления

Плотность снега оказывает существенное влияние на энтальпию и теплопроводность. Эти два свойства определяют динамику передачи тепла и нагрева снега. Необходимо определить плотность снега, при которой получается наиболее консервативная оценка. Для определения плотности снега по этому критерию решены две задачи, условия которых описаны в таблице 7.8. Граничные условия показаны на рисунке 7.14 [115, 116].

Таблица 7.8 – Параметры задач

Параметр	Модель 1	Модель 2
Тепловая мощность ТЭНов, Вт/м	500	500
Коэффициент теплоотдачи, Вт/м·°С	25,1	25,1
Температура грунта, °С	минус 25	минус 25
Температура окружающей среды, °С	минус 25	минус 25
Начальная температура, °С	минус 25	минус 25
Время процесса, с	36000	36000
Учет замены снега водой	учтена	учтена
Учет скрытой теплоты фазового перехода	учтена	учтена
Температура начала фазового перехода, °С	минус 3	минус 3
Температура конца фазового перехода, °С	плюс 3	плюс 3
Плотность снега, кг/м ³	600	100

Начальная температура и температура окружающего воздуха приняты за минус 25 °С. Предполагается, что грунт содержит большое количество холода и его температуру можно считать постоянной и равной минус 25 °С.

Сравнение результатов для модели 1 и модели 2 на 36000 с от начала процесса показаны на рисунке 7.20. Светло-серым показана область отрицательных температур, цветовой раскраской – распределение температур.

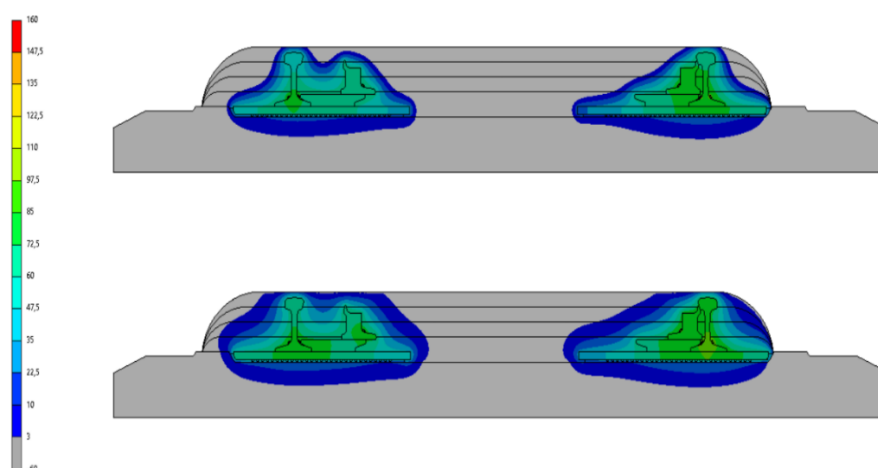


Рисунок 7.20 – Распределение температур на 36000 с:
сечения сверху вниз: модель 1, модель 2

Из сравнения видно, что в модели 2 элементы железнодорожного полотна прогреваются до больших температур. Также видно, что плавится больший объём

снега, что свидетельствует о большей консервативности модели 1, то есть о том, что проведение расчётов динамики распространения тепла и таяния снега более консервативно в постановке с использованием плотности 600 кг/м^3 и соответствующих ей теплофизических свойствах [115, 116].

7.5 Определение способности противостоять снегопаду при различной высоте снежной насыпи

В соотношении для эффективного коэффициента теплоотдачи (7.51) используется высота снега. Так как решаемая задача является стационарной и предполагает бесконечно длительное время процесса, аналитически высоту определить невозможно. Необходимо задаться некоторой величиной высоты снега. Для этого надо определить влияние высоты снега на распределение температуры по железнодорожному полотну. По соотношению (7.39) для наиболее плотного свежеснег выпавшего снега теплопроводность составляет $0,26 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$ [115, 116].

Параметры задач и граничные условия указаны на рисунках 7.21, 7.22 и в таблице 7.9.

Таблица 7.9 – Параметры задач

Параметр	Модель 1	Модель 2	Модель 3
Тепловая мощность ТЭНов, Вт/м	500	500	500
Коэффициент теплоотдачи, Вт/м·°C	25,1	25,1	25,1
Температура грунта, °C	минус 25	минус 25	минус 25
Температура окружающей среды, °C	минус 25	минус 25	минус 25
Начальная температура, °C	минус 25	минус 25	минус 25
Коэффициент излучения для стали	0,8	0,8	0,8
Коэффициент излучения для бетона	0,85	0,85	0,85
Интенсивность снегопада, мм/ч	5	5	5
Высота снега, мм	20	50	200

Начальная температура и температура окружающего воздуха приняты за минус 25 °С. Предполагается, что грунт содержит большое количество холода и его температуру можно считать постоянной и равной минус 25 °С.

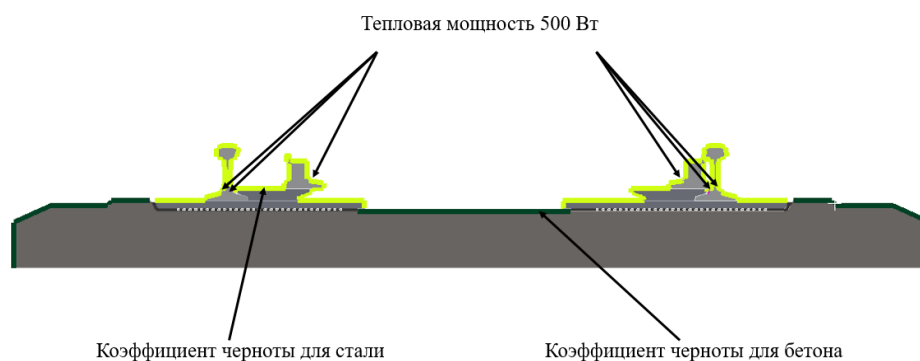


Рисунок 7.21 – Граничные условия при тепловой мощности 500 Вт

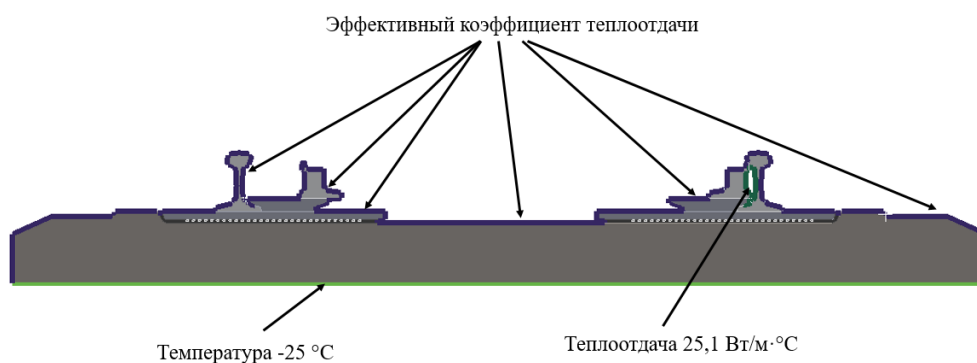


Рисунок 7.22 – Граничные условия для эффективного коэффициента теплоотдачи

Распределение температур для различных высот снега показано на рисунке 7.23.

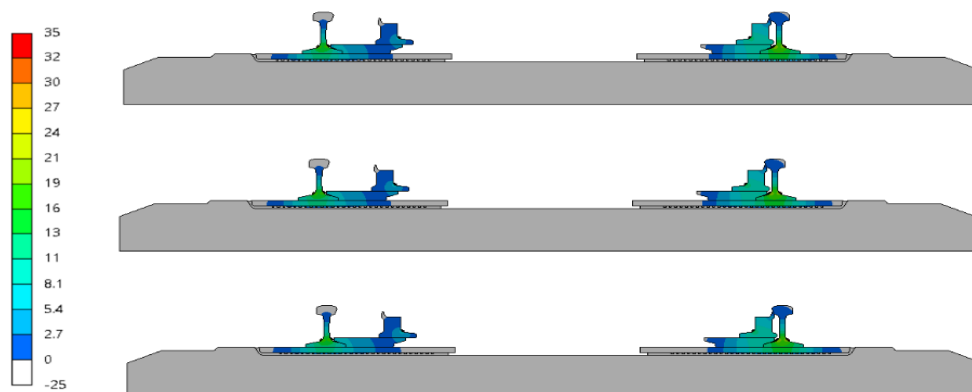


Рисунок 7.23 – Распределение температур:

сечения сверху вниз: модель 1, модель 2, модель 3

Высота снега не оказывает существенного влияния на распределение температур в области между рамным рельсом и остряковым рельсом [115, 116].

7.6 Определение влияния скорости ветра на способность противостоять снегопаду

Скорость ветра влияет на коэффициент теплоотдачи (7.44), который, в свою очередь, влияет на теплоотдачу при снегопаде (7.51). Необходимо определить влияние скорости ветра на распределение температур и способность нагревателей противостоять снегопаду. Для этого решены две задачи, условия которых описаны в таблице 7.10 [115, 116].

Таблица 7.10 – Параметры задач

Параметр	Модель 1	Модель 2
Тепловая мощность ТЭНов, Вт/м	500	500
Коэффициент теплоотдачи, Вт/м·°С	25,1	25,1
Температура грунта, °С	минус 25	минус 25
Температура окружающей среды, °С	минус 25	минус 25
Начальная температура, °С	минус 25	минус 25
Коэффициент излучения для стали	0,8	0,8
Коэффициент излучения для бетона	0,85	0,85
Интенсивность снегопада, мм/ч	5	5
Высота снега, мм	20	20
Скорость ветра, м/с	5	1

Начальная температура и температура окружающего воздуха приняты за минус 25 °С. Предполагается, что грунт содержит большое количество холода и его температуру можно считать постоянной и равной минус 25 °С.

Распределение температур для различных скоростей ветра показано на рисунке 7.24.

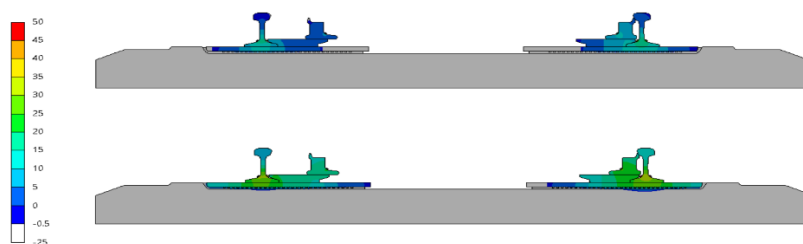


Рисунок 7.24 – Распределение температур: сечения сверху вниз: модель 1, модель 2

Уменьшение скорости ветра приводит к увеличению средней температуры железнодорожного полотна и увеличению площади поверхностей с положительной температурой. Следовательно, более консервативным будет решение со скоростью ветра 5 м/с.

7.7 Результаты расчетов плавления при заданном уровне снежного покрова

Для установления закономерностей плавления снега и способности противостоять снегопаду рассмотрены пять сечений железнодорожного пути с различным расстоянием между рамными рельсами и остряковыми рельсами, показанные на рисунке 7.25. В последующих подразделах показано влияние сечения, высоты снега, количества нагревателей и температуры окружающей среды на распределение температур и способность плавить снег в зависимости от этих параметров. Также показаны влияние интенсивности снегопада на распределение температур и зависимость способности противостоять снегопаду различной интенсивности от температуры окружающей среды и конфигурации нагревателей [115, 116].

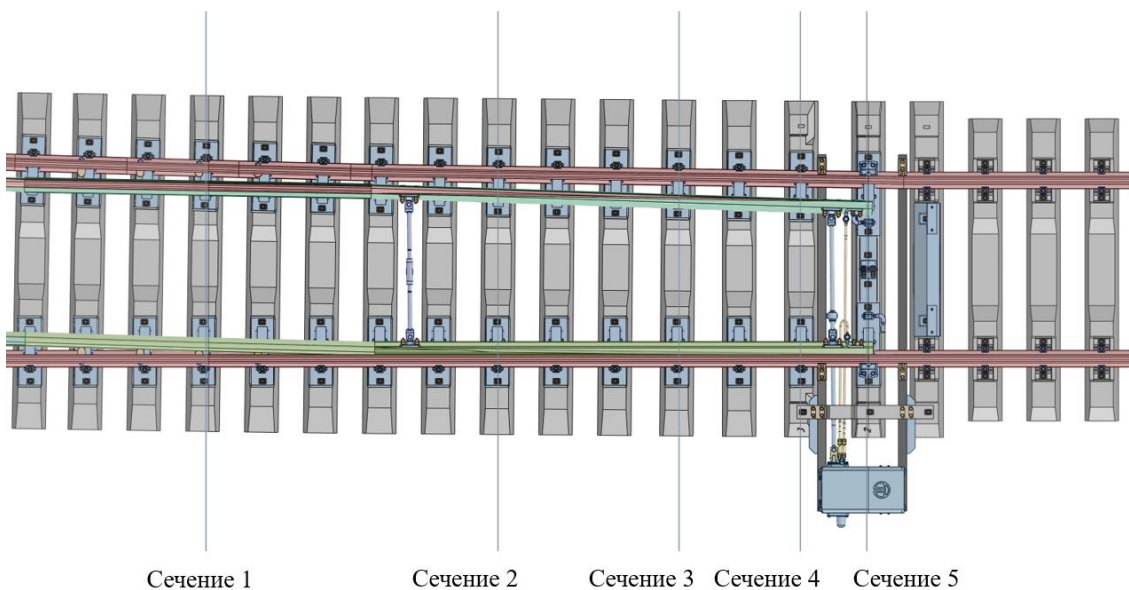


Рисунок 7.25 – Нумерация сечений

7.7.1 Зависимость распределения температур от геометрии сечения

В данном подразделе показаны зависимости динамики распределения температур в различных сечениях при температурах окружающей среды $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, минус $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, минус $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и минус $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в различные моменты времени. Смоделировано 36000 с процесса [115, 116].

На рисунке 7.26 показана динамика прогрева сечений железнодорожного пути при температуре окружающей среды $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 36000 с.

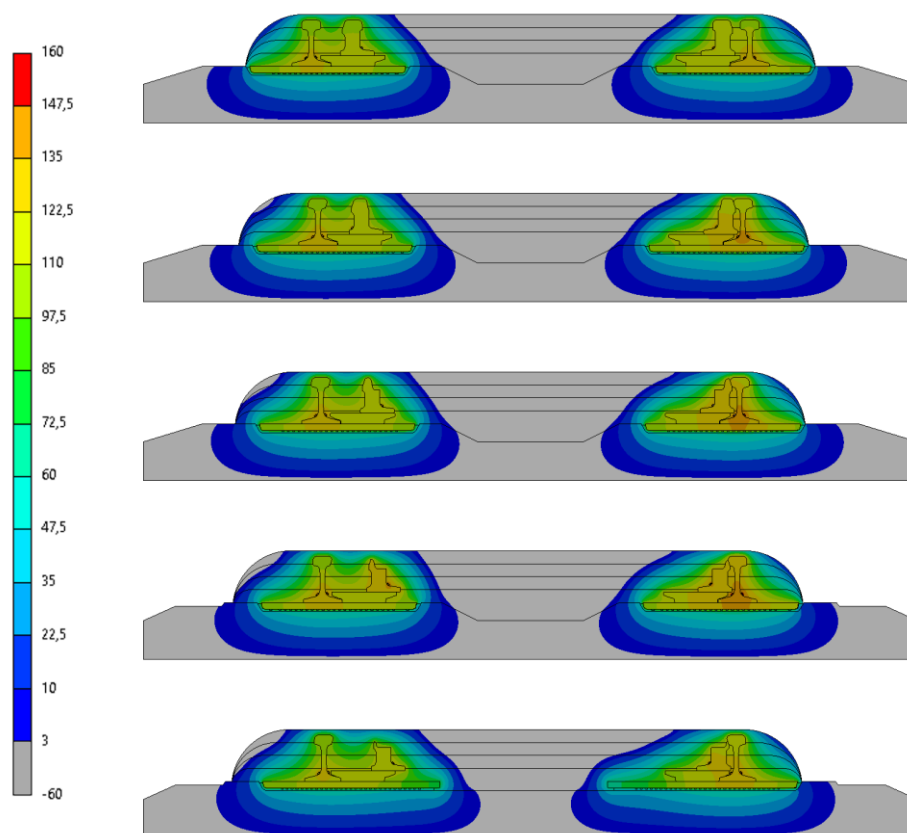


Рисунок 7.26 – Распределение температур при температуре окружающей среды $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 36000 с:
сечения сверху вниз 1, 2, 3, 4, 5

Из распределений температур с начала процесса до 14400 с следует, что в левой части железнодорожного пути в сечении 5 прогрев происходит медленней, чем в остальных сечениях. В то же время в правой части железнодорожного пути в сечении 1 прогрев происходит медленней, чем в остальных сечениях. Такие

закономерности обусловлены отдалённостью остряковых рельсов от рамных рельсов. Следовательно, чем дальше находится остряковый рельс от рамного, тем менее интенсивный прогрев наблюдается в области между ними.

К 25200 с от начала процесса снег растаивает во всех сечениях в области между рамным рельсом и остряковым рельсом [115, 116].

Как и в предыдущей постановке, очевидно, что в сечении 5 прогрев происходит медленней, чем в остальных сечениях. В правой части железнодорожного пути в сечении 1 прогрев происходит медленней, чем в остальных сечениях.

К 36000 с от начала процесса снег растаивает в сечениях 1-2 в области между рамным рельсом и остряковым рельсом.

На рисунке 7.27 показана динамика прогрева сечений железнодорожного пути при температуре окружающей среды минус 60 °С на 36000 с.

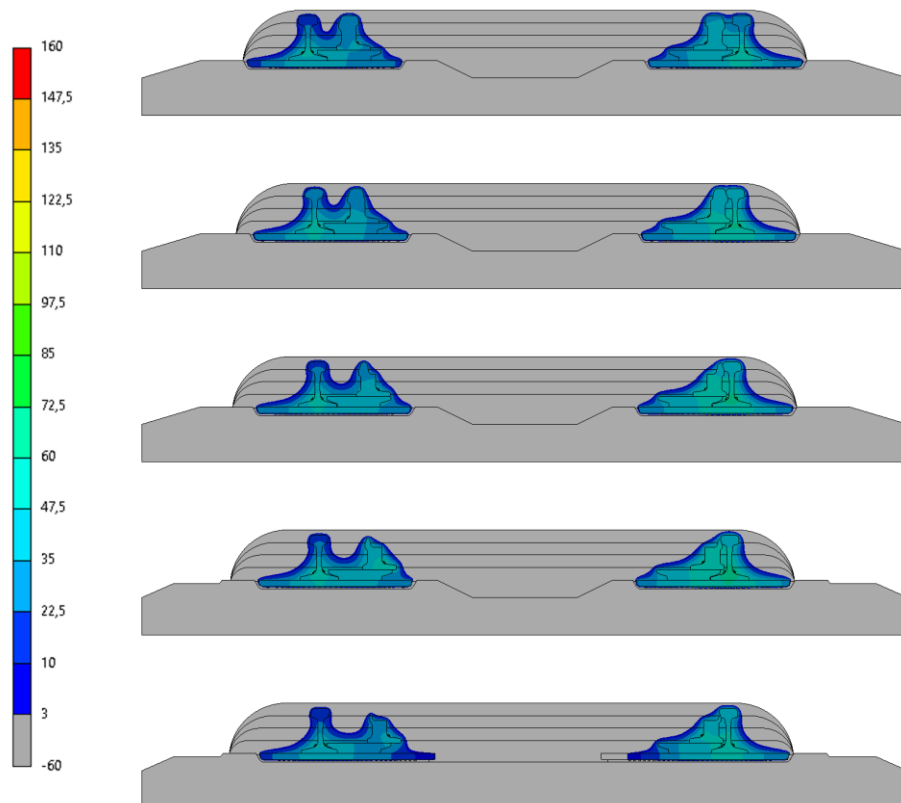


Рисунок 7.27 – Распределение температур при температуре окружающей среды минус 60 °С на 36000 с:
сечения сверху вниз 1, 2, 3, 4, 5

К 36000 с от начала процесса полностью снег не растаивает во всех сечениях в области между рамным рельсом и остряковым рельсом.

Снижение температуры окружающей среды приводит к уменьшению областей проплавления снега за одинаковые промежутки времени [115, 116].

Чем дальше находится остряковый рельс от рамного, тем менее интенсивный прогрев наблюдается в области между ними. В дальнейшем рассмотрении задач подобного типа консервативная оценка прогрева может быть дана по одному сечению, с наибольшим удалением острякового от рамного рельса – наиболее близко расположенному к механизму стрелочного перевода.

7.7.2 Зависимость распределения температур от высоты снега

В данном подразделе показаны зависимости динамики распределения температур при высотах снежного покрова 50 мм, 100 мм, 150 мм и 200 мм от поверхности шпалы в сечении 5 при температуре окружающей среды минус 25 °С в различные моменты времени. Смоделировано 36000 с процесса [115, 116].

На рисунке 7.28 показана динамика прогрева сечения железнодорожного пути при температуре окружающей среды минус 25 °С на 36000 с.

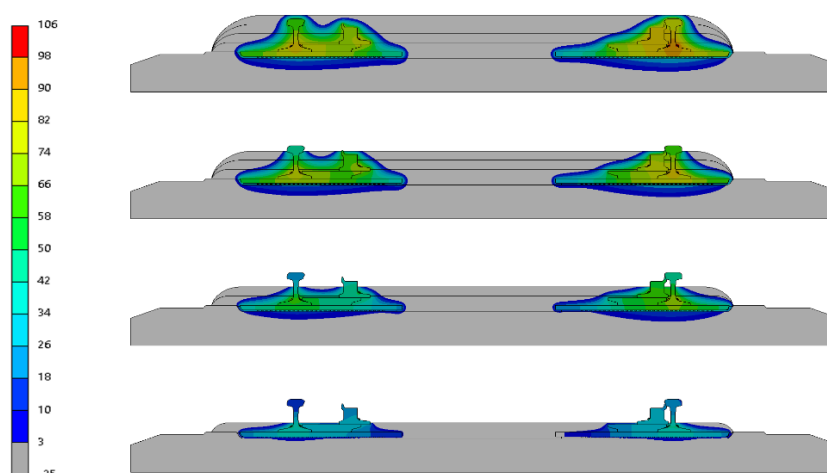


Рисунок 7.28 – Распределение температур при температуре окружающей среды минус 25 °С на 36000 с:

высота снега сверху вниз: 200 мм, 150 мм, 100 мм, 50 мм

Снижение высоты снежного покрова приводит к уменьшению средней температуры рельсов. Это обусловлено увеличением коэффициента теплоотдачи за счёт снижения суммарного сопротивления теплопередачи, связанного с уменьшением высоты снежного покрова, который выступает в качестве теплоизолятора.

Изменение высоты снежного покрова практически не оказывает влияние на области проплавления снега. Если стрелочный перевод работоспособен при больших высотах снежного покрова через определенный промежуток времени, то он будет работоспособен и при меньших высотах снежного покрова [115, 116].

7.7.3 Зависимость распределения температур от количества нагревателей и температуры окружающей среды

В данном подразделе показаны зависимости динамики распределения температур в различные моменты времени в сечениях 1 и 5 при высотах снежного покрова 100 мм и 200 мм при температурах окружающей среды 0 °С, минус 10 °С, минус 25 °С и минус 60 °С для трёх различных конфигураций нагревателей, показанных на рисунке 7.29. Смоделировано 36000 с процесса [115, 116].

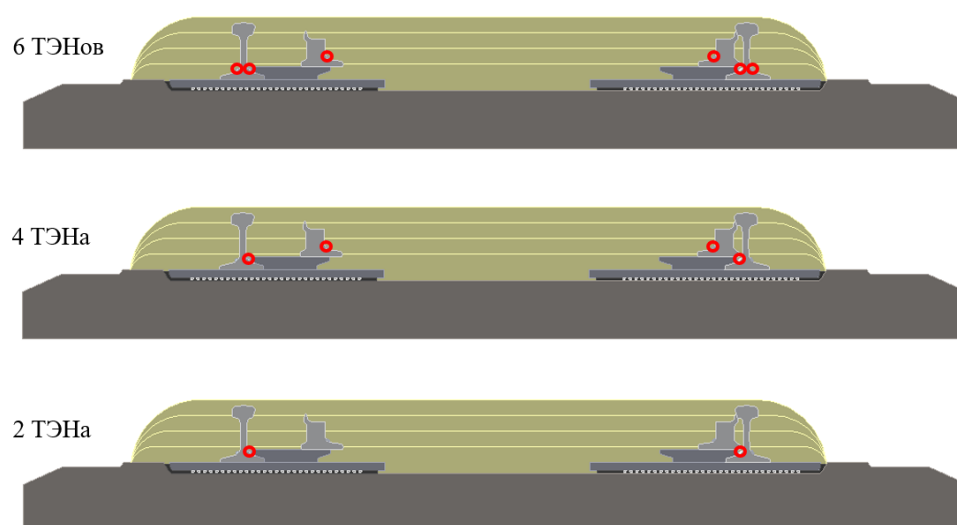


Рисунок 7.29 – Конфигурации активных ТЭНов

На рисунке 7.30 показана динамика прогрева сечения 1 железнодорожного пути для различных конфигураций нагревательных элементов при температуре окружающей среды $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и высоте снежного покрова 100 мм на 36000 с.

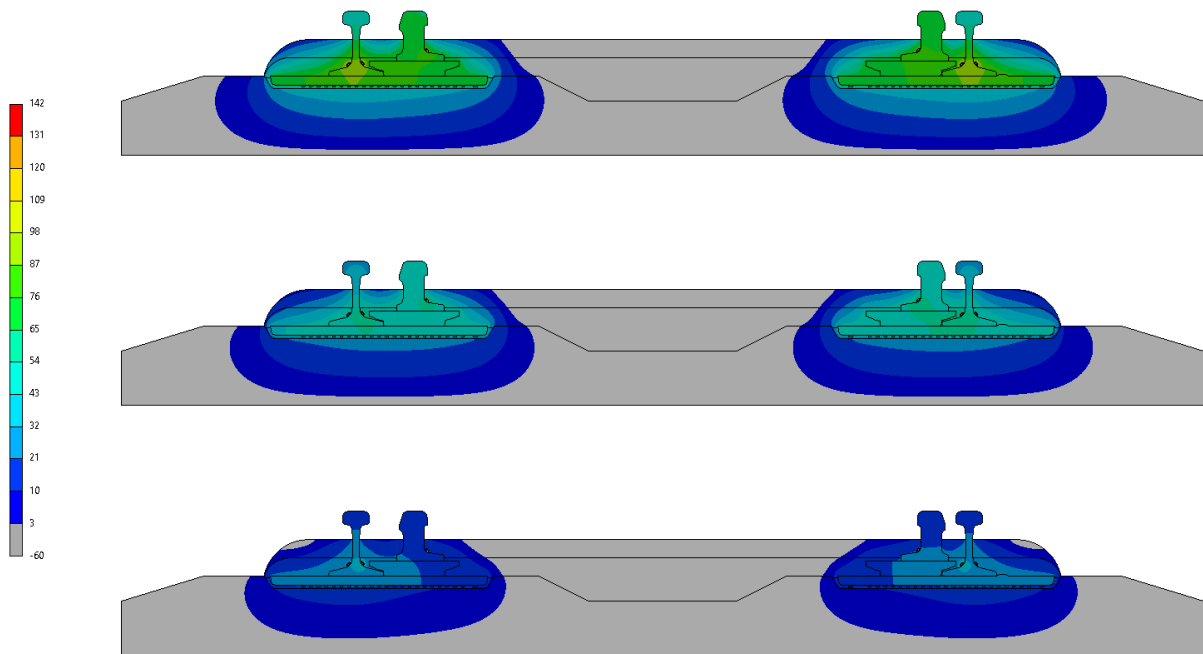


Рисунок 7.30 – Распределение температур при температуре окружающей среды $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и высоте снега 100 мм для сечения 1 на 36000 с:
количество ТЭНов сверху вниз: 6, 4, 2

Уменьшение числа нагревательных элементов приводит к уменьшению средней температуры элементов железнодорожного пути и снижению интенсивности плавления снежного покрова. Область проплавления практически не изменяется при изменении конфигурации с шести до четырёх ТЭНов при температуре окружающей среды $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [115, 116].

На рисунке 7.31 показана динамика прогрева сечения 5 железнодорожного пути для различных конфигураций нагревательных элементов при температуре окружающей среды минус $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и высоте снежного покрова 200 мм на 36000 с.

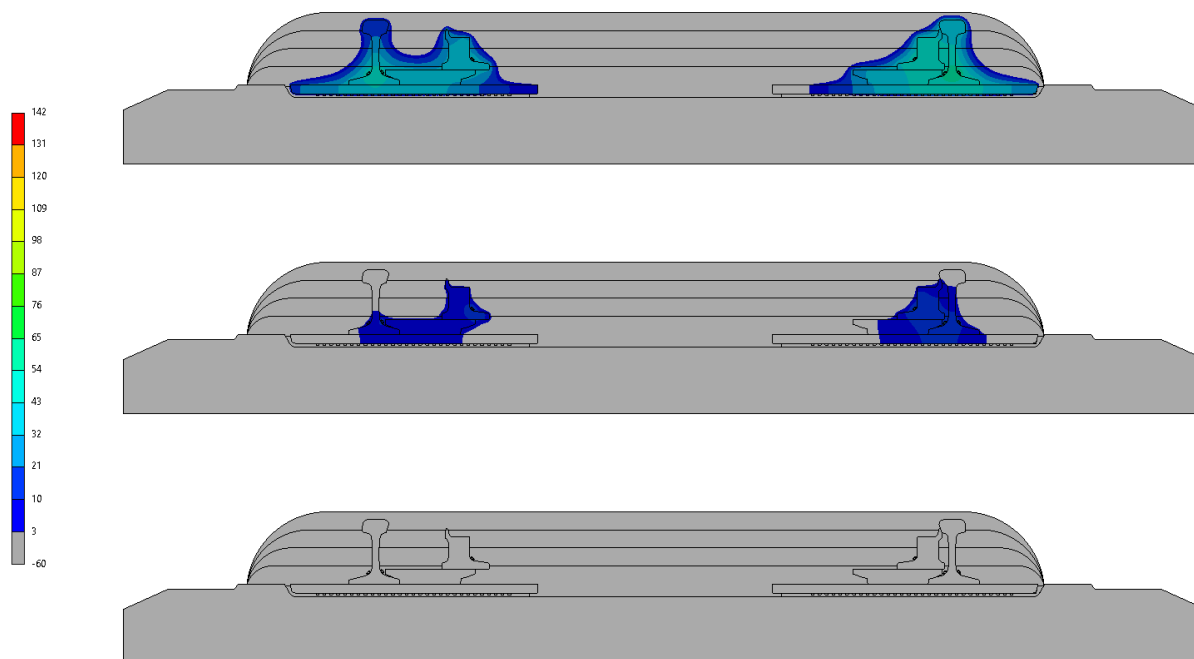


Рисунок 7.31 – Распределение температур при температуре окружающей среды минус 60 °С и высоте снега 200 мм для сечения 5 на 36000 с:

количество ТЭНов сверху вниз: 6, 4, 2

При температуре окружающей среды минус 60 °С и для всех конфигураций ТЭНов конструкция практически не прогревается, и в большей части конструкции наблюдается отрицательная температура. К 36000 с процесса при температуре окружающей среды минус 60 °С в области между рамным рельсом и остряковым рельсом снег полностью не проплавляется во всех конфигурациях ТЭНов.

Сечение 5 прогревается менее интенсивно, чем сечение 1. Это обусловлено большим объёмом снега между остряковым и рамным рельсом.

7.7.4 Зависимость распределения температур от снегопада различной интенсивности

В данном подразделе показаны зависимости распределения температур в сечении 5 с четырьмя активными нагревателями при температуре окружающей

среды минус 20 °С при различной интенсивности снегопада: 1 мм/ч, 2 мм/ч, 3 мм/ч, 4 мм/ч, 5 мм/ч и 6 мм/ч. Распределение температур при различной интенсивности снегопада показано на рисунке 7.32 [115, 116].

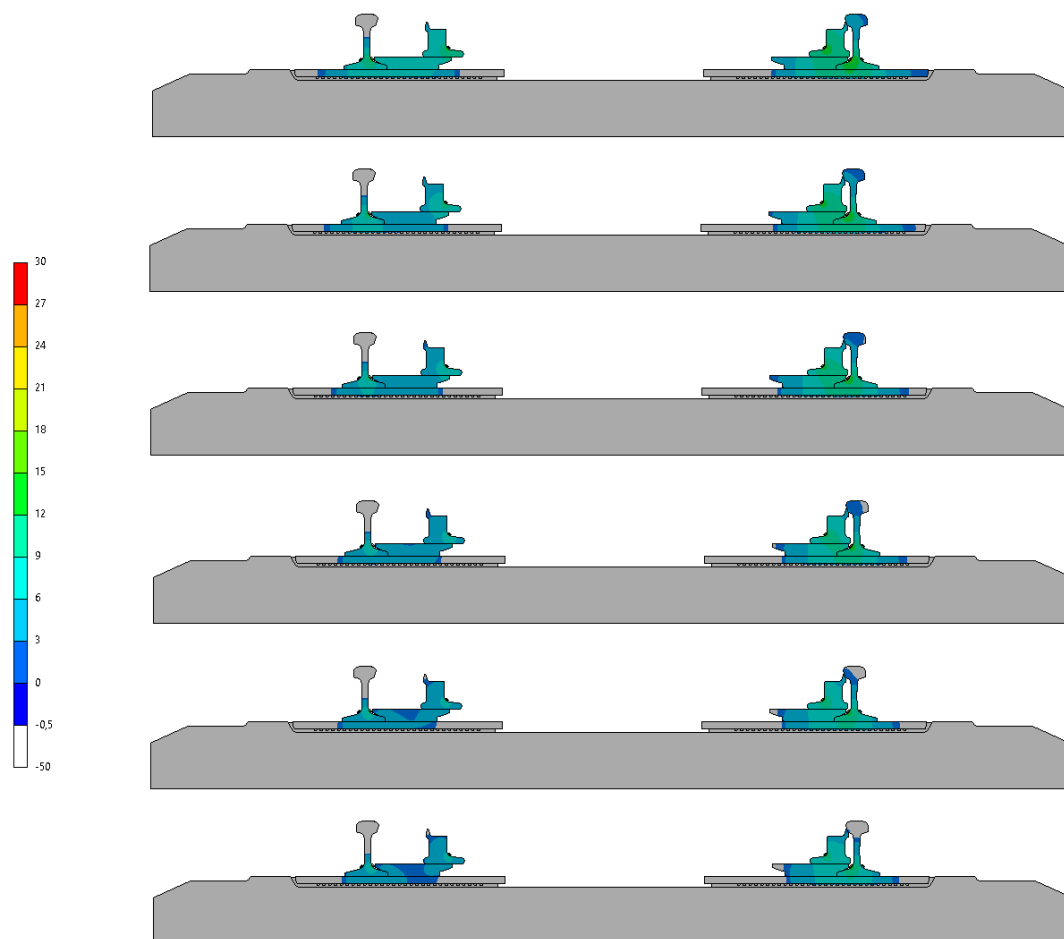


Рисунок 7.32 – Распределение температур при температуре окружающей среды минус 20 °С и различной интенсивности снегопада:

сверху вниз: 1 мм/ч, 2 мм/ч, 3 мм/ч, 4 мм/ч, 5 мм/ч и 6 мм/ч

Увеличение интенсивности снегопада приводит к уменьшению областей конструкции с положительной температурой. На областях с отрицательной температурой не происходит нагрев и плавление снега при заданной интенсивности снегопада, что, в свою очередь, приводит к накоплению снега в этих областях [115, 116].

Для температуры окружающей среды минус 20 °С в сечении 5 критической является интенсивность снегопада 5 мм/ч, так как при заданной интенсивности половина подушки скольжения имеет температуру ниже нуля градусов Цельсия.

Дальнейшее увеличение интенсивности приводит к тому, что температура всей поверхности подушки скольжения опускается ниже нуля градусов Цельсия. Следовательно, нагреватели не выделяют достаточного количества тепла для нагрева и плавления снега, и снег накапливается на подушке скольжения.

7.7.5 Зависимость способности противостоять снегопаду различной интенсивности от температуры окружающей среды и нагревателей

В данном подразделе были построены зависимости способности противостоять снегопаду различной интенсивности от температуры окружающей среды и конфигурации нагревателей в сечении 5. Также смоделировано распределения температур для сечения 1 при тех же интенсивностях снегопада.

Задача решена итеративно: осуществлён подбор интенсивностей снегопада и температур окружающей среды, при которых половина поверхности подушки скольжения имеет отрицательную температуру, то есть на этой части сечения происходит накопление снега [115, 116].

Результаты расчётов показаны в таблице 7.11 и на рисунках 7.33, 7.34.

Таблица 7.11 – Зависимость критической интенсивности снегопада от температуры окружающей среды и конфигурации нагревателей для сечения 5

6 ТЭНов				
Температура, °С	-25	-35	-40	-47
Интенсивность, мм/ч	10,7	5,6	3,0	0,0
4 ТЭНа				
Температура, °С	-10	-20	-25	-30
Интенсивность, мм/ч	11,6	4,9	2,1	0,0
2 ТЭНа				
Температура, °С	-2	-8	-12	-16
Интенсивность, мм/ч	12,1	6,4	2,9	0,0

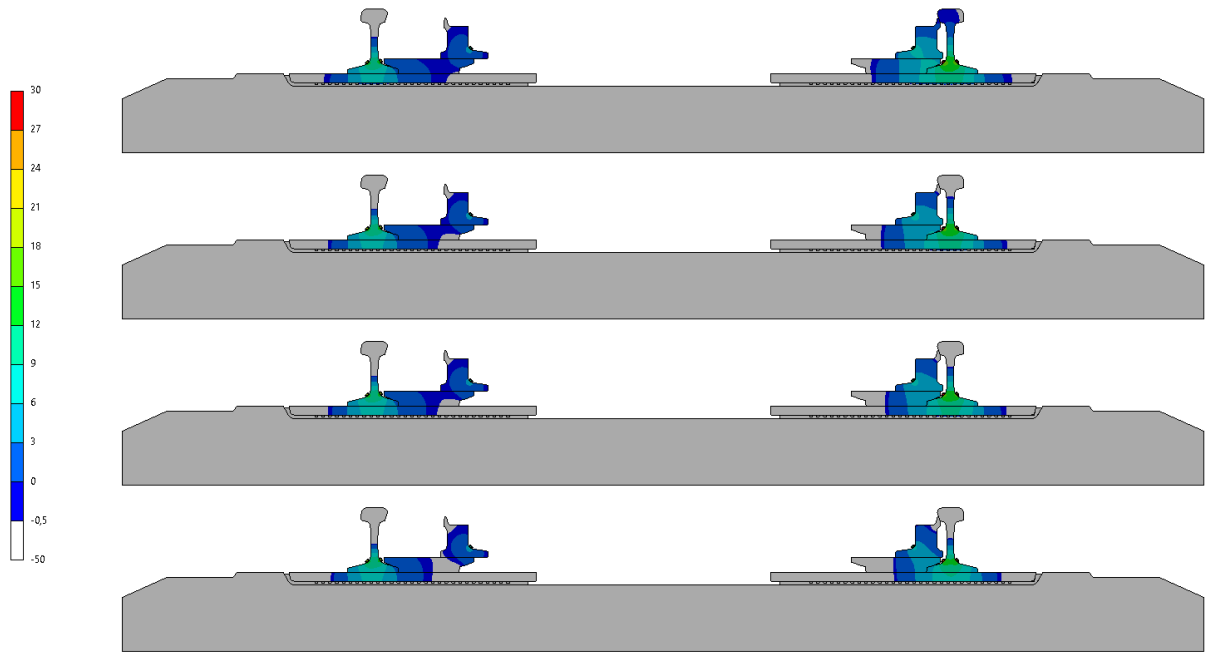


Рисунок 7.33 – Распределение температур при различных интенсивностях снегопада и соответствующих им температурам окружающей среды для сечения 5 при 6 активных ТЭНах:

сверху вниз: $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (10,7 мм/ч), $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (5,6 мм/ч), $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3,0 мм/ч), $-47\text{ }^{\circ}\text{C}$ (0 мм/ч)

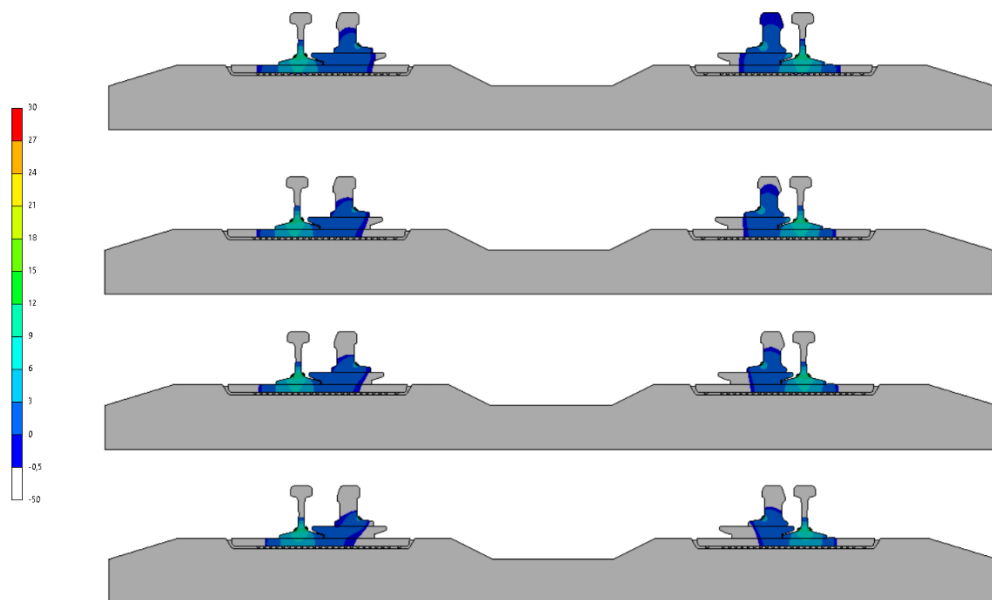


Рисунок 7.34 – Распределение температур при различных интенсивностях снегопада и соответствующих им температурам окружающей среды для сечения 1 при 6 активных ТЭНах:

сверху вниз: $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (10,7 мм/ч), $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (5,6 мм/ч), $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3,0 мм/ч), $-47\text{ }^{\circ}\text{C}$ (0 мм/ч)

Сравнение результатов для сечения 5 и сечения 1 показывают, что решение задачи для сечения 5 является более консервативным, так как в данном сечении поверхность теплосъёма имеет большую площадь, чем в остальных. Если сечение 5 способно противостоять снегопаду определённой интенсивности, то и все остальные сечения будут иметь способность противостоять снегопаду такой же интенсивности [115, 116].

На рисунке 7.35 показана зависимость критической интенсивности снегопада от температуры окружающей среды и конфигурации нагревателей. Область, лежащая по правую сторону от графика, является областью работоспособности процесса. Сами же линии показывают соотношение между температурой окружающей среды и интенсивностью снегопада, при которых стрелочный перевод потеряет способность противостоять снегопаду в стационарном режиме работы.

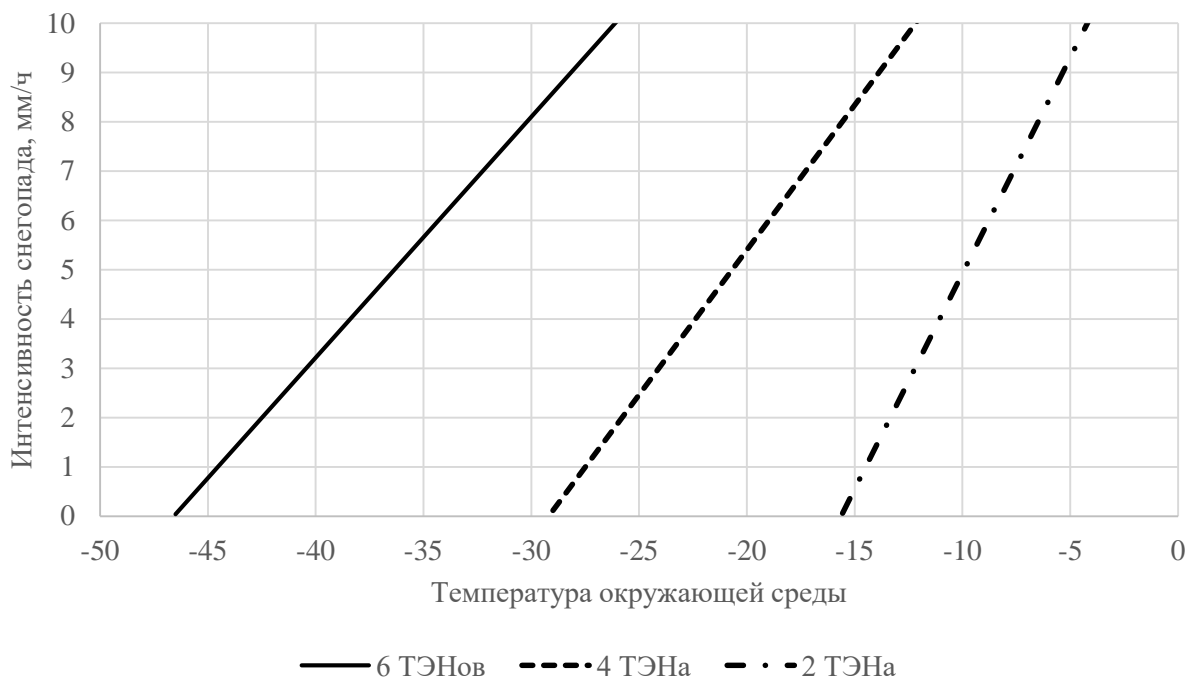


Рисунок 7.35 – Зависимость критической интенсивности снегопада от температуры окружающей среды и конфигурации нагревателей

7.8 Методика расчёта динамики прогрева

Моделирование процесса прогрева сечения стрелочного перевода и определение доли нерасплавленного снега в сечении делится на несколько этапов.

Создание геометрии. Для этого консервативно выбирается сечение с наибольшим возможным расстоянием между острьяковым и рамным рельсами (Рисунок 7.36).

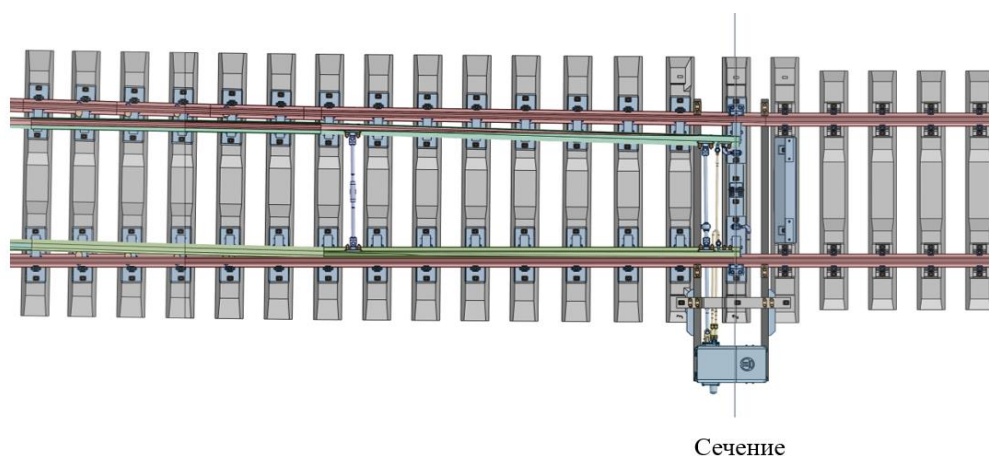


Рисунок 7.36 – Геометрия стрелочного перевода

Сечение упрощается: для дальнейшего построения более однородной конечно-элементной сетки удаляются мелкие незначительные элементы. Если сечение попадает на отверстия в трёхмерной геометрии, то эти отверстия необходимо удалить, так как их влияние на распространение тепла в трёхмерной геометрии незначительное. Результат обработки сечения показан на рисунках 7.37 и 7.38 [115, 116].



Рисунок 7.37 – Сечение стрелочного перевода

Над сечением создается снежный купол необходимой высоты (Рисунок 7.38).



Рисунок 7.38 – Сечение стрелочного перевода с учётом снега

Создание конечно-элементной сетки. Размер конечно-элементной сетки будет зависеть от свойств используемых материалов и габаритов модели. Необходимо выполнить исследование сеточной сходимости для определения размера элемента (Рисунок 7.39).

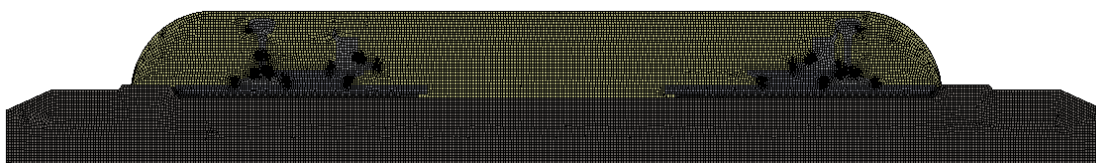


Рисунок 7.39 – Конечно-элементная сетка модели

Назначение свойств материалов. Свойства материалов определяются из справочников или из теплофизических испытаний. Для выполнения расчётов необходимы: плотность, теплопроводность и теплоёмкость. Для сталей М76Т, Ст3, бетона В40, оксида магния и твёрдой резины свойства указаны в таблице 7.1. Для воздуха при температуре 0 °С свойства указаны в таблице 7.4 [115, 116].

Принимается предположение, что снег, после превышения температуры плавления, становится водой. Свойства снега для плотности 600 кг/м³ приведены в таблицах 7.3 (для температуры ниже нуля градусов Цельсия) и 7.5 (для температуры выше нуля градусов Цельсия). Свойства энтальпии, с учётом фазового перехода, показаны на рисунке 7.7. Для других плотностей снега для температуры ниже нуля градусов Цельсия теплопроводность определяется из рисунка 7.5 или соотношений (7.1) и (5.2). Энтальпия определяется по соотношению (7.5), с учётом теплоёмкости, определенной по соотношению (7.3) и скрытой теплоте фазового перехода, равной 322 кДж/кг.

Пример распределения свойств по геометрии показан на рисунке 7.40.



Рисунок 7.40 – Материалы

Определение граничных условий. Консервативно на все внешние поверхности задаются коэффициенты теплоотдачи, равные $25,1 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$ и соответствующие скорости ветра 5 м/с . При других скоростях ветра коэффициент теплоотдачи можно вычислить по соотношению (7.44). Указывается температура окружающей среды.

На внутренние поверхности трубчатых электронагревательных элементов задаётся необходимая тепловая мощность.

На поверхности, соприкасающиеся с грунтом, задается температурное граничное условие с температурой, соответствующей температуре окружающей среды.

На все тела, участвующие в решении, задаётся инициализация начальной температуры, равная температуре окружающей среды.

Настройка решателя: указание необходимого времени моделирования, дискретизация временной области (должна иметь достаточно низкий шаг по времени из-за фазового перехода). Решение задачи.

Вывод интересующих результатов с учётом времени. Области снега с температурой ниже нуля градусов Цельсия обозначают наличие нерастаявшего снега. Пример результатов расчёта на 14400 с от начала процесса показан на рисунке 7.41 [115, 116].

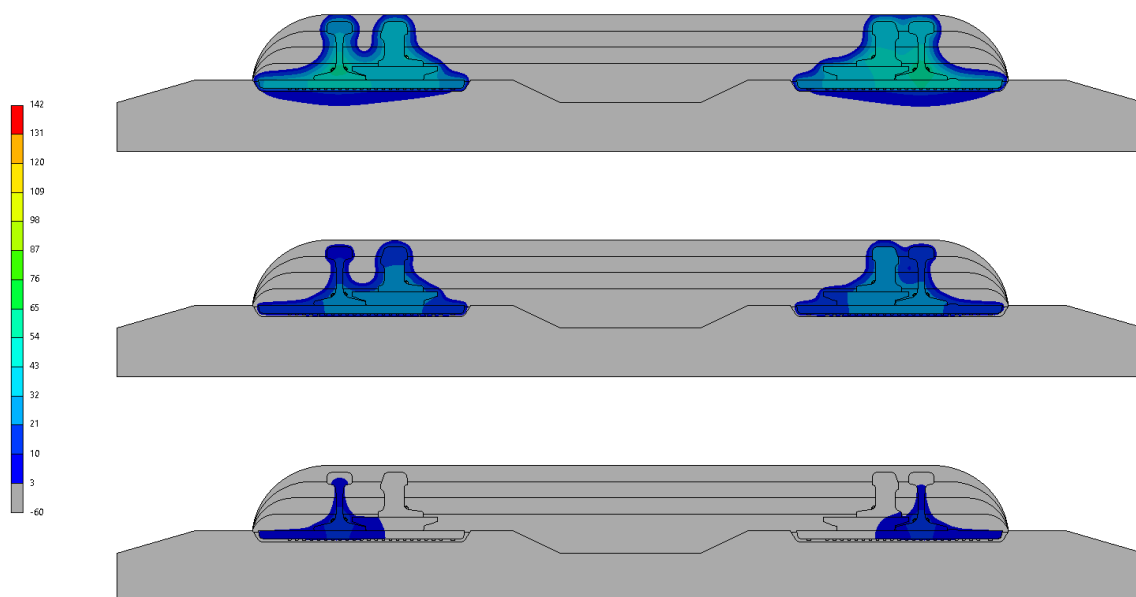


Рисунок 7.41 – Распределение температур при температуре окружающей среды минус 10 °С и высоте снега 200 мм для сечения 1 на 14400 с:
количество ТЭНов сверху вниз: 6, 4, 2

7.9 Методика расчёта достаточности обогрева при снегопаде

Моделирование процесса прогрева сечения стрелочного перевода и определение достаточности обогрева сечения при заданной интенсивности снегопада в сечении проводится по методике, описанной выше, и также делится на несколько этапов [115, 116]:

- создание геометрии;
- сечение упрощается;
- создание конечно-элементной сетки (Рисунок 7.42);



Рисунок 7.42 – Конечно-элементная сетка

- назначение свойств материалов;

– определение граничных условий. Консервативно на все закрытые от прямого попадания снега поверхности задаются коэффициенты теплоотдачи, равные $25,1 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, соответствующие скорости ветра 5 м/с . Для вычисления коэффициента вынужденной конвекции при другой скорости ветра задаются коэффициенты теплоотдачи, зависящие от температуры поверхности и температуры окружающей среды и вычисленные по соотношению для необходимой интенсивности снегопада. Высоту снега рекомендуется принять равной 200 мм . При этом плотность снега принята максимальной для свежеснегавшего влажного снега – 300 кг/м^3 . Коэффициент вынужденной конвекции вычислен для скорости ветра 5 м/с и составляет $25,1 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$. Указывается температура окружающей среды.

На поверхности, соприкасающиеся с грунтом, задается температурное граничное условие с температурой, соответствующей температуре окружающей среды.

На внешние и внутренние поверхности задается граничное условие лучистого теплообмена, с соответствующими коэффициентами излучения. При этом принимается, что при температуре поверхности ниже минус $0,1 \text{ °С}$ используется коэффициент излучения, равный $0,001$, а при температуре поверхности выше плюс $0,1 \text{ °С}$ используется коэффициент излучения, соответствующий используемому материалу в этой области. За счёт этого обеспечивается ограничение теплоотдачи излучением с поверхности с отрицательной температурой. Таким образом, моделируется покрытие снегом данной поверхности.

На внутренние поверхности трубчатых электронагревательных элементов задается необходимая тепловая мощность.

На все тела, участвующие в решении, задается инициализация начальной температуры, равная температуре окружающей среды.

Настройка решателя: указание дискретизации приращения нагрузки при решении нелинейной задачи теплообмена. Решение задачи [115, 116].

Вывод распределения температур. Поверхности с температурой ниже нуля градусов Цельсия означают, что эти поверхности будут покрыты снегом. Пример результатов расчёта показан на рисунке 7.43.

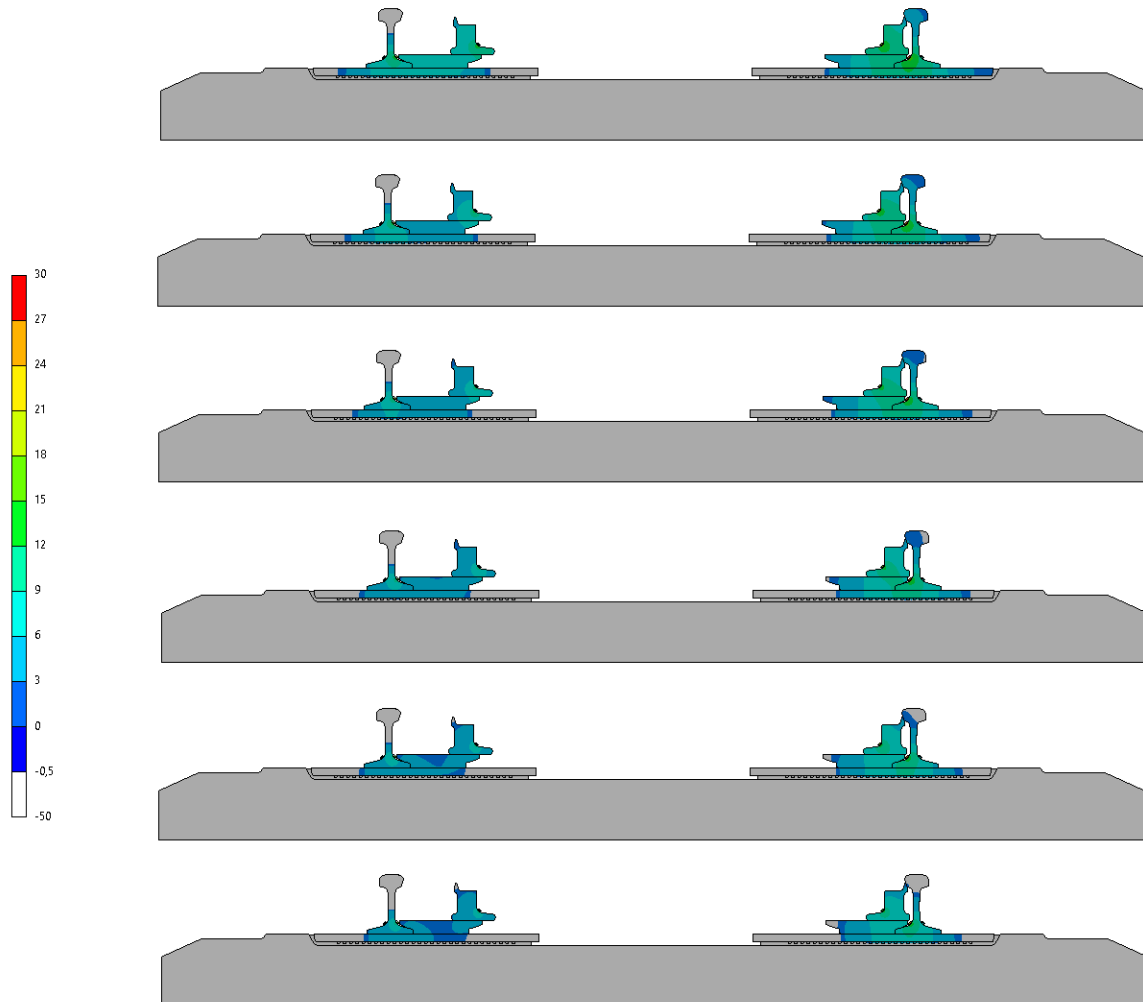


Рисунок 7.43 – Распределение температур при температуре окружающей среды минус 20 °С и различной интенсивности снегопада:
сверху вниз: 1 мм/ч, 2 мм/ч, 3 мм/ч, 4 мм/ч, 5 мм/ч и 6 мм/ч

Выводы по главе 7

Проведен анализ параметров, описывающих тепловое состояние стрелочных переводов, на примере двух задач с практической направленностью: разморозка

стрелочного перевода, покрытого снегом, и поддержание прогретого состояния в условиях интенсивного снегопада.

Рассмотрен стрелочный перевод на железобетонных брусках. Поскольку нагревательные элементы крепятся к металлическим частям стрелочного перевода, и теплораспределение происходит в этих металлических частях, методика расчета теплораспределения по сечениям острякового рельса в стрелочном переводе на плитном основании будет аналогична. Это позволяет достичь минимального коэффициента погрешности и обеспечить необходимый уровень надежности в перевозочном процессе по стрелочным переводам на плитном основании.

В результате проведенной серии расчетов были определены параметры, которые оказывают влияние на конструктивные решения, касающиеся работы стрелочных переводов в зимних условиях. Были разработаны практические приемы, которые помогают упростить вычислительную часть задачи. На основании проведенных исследований были предложены методики расчета, которые могут быть использованы при практическом проектировании систем электрообогрева для элементов стрелочных переводов.

Важным результатом исследования является вывод о том, что высота снега не оказывает существенного влияния на распределение температур в области между рамным рельсом и остряковым рельсом при определении критической интенсивности снегопада.

8 ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СТРЕЛОЧНЫМ ПЕРЕВОДАМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

В настоящее время стрелочные переводы российских железных дорог в основном удовлетворяют потребности в перевозках. Однако, учитывая необходимое время на подготовку стрелочного хозяйства для реализации перспективных задач, уже сейчас необходимо ускорить разработку и производство новых конструкций и модельных рядов стрелочной продукции. Важными направлениями развития являются скоростное и высокоскоростное движение, увеличение нагрузок и массы поездов для интенсификации перевозок, а также сокращение затрат на обслуживание инфраструктуры.

Для обеспечения повышения скоростей движения поездов необходимо модернизировать стрелочное хозяйство линий. Для этого требуется наличие модельных рядов стрелочной продукции, включающих следующие конструкции:

- стрелочные переводы и съезды промежуточных станций, которые обеспечивают движение всех видов поездов, включая скоростные, по главным путям со скоростью, действующей на примыкающих перегонах;
- стрелочные переводы и диспетчерские съезды на их основе, которые обеспечивают коммуникацию скоростных (высокоскоростных) поездов между главными путями, чтобы соблюдать график движения при проведении регламентных работ на отдельных участках линии и в нештатных ситуациях.

Нужны также стрелочные переводы, предназначенные для движения скоростных поездов по перронным путям, которые являются важной частью инфраструктуры станций. Помимо этого, нужны специальные конструкции, которые обеспечивают эффективную работу стрелочных переводов и их групп в составе бесстыкового пути большой протяженности. К сожалению, в России выпускается лишь небольшая часть необходимых стрелочных устройств для скоростного движения поездов [117].

В основном, это стрелочные переводы и съезды типа Р65 марки 1/11 проектов 2726 и 2728, предназначенные для промежуточных станций. Они обладают конструкционными скоростями движения по основному направлению до 200 км/ч и на боковое направление до 50 км/ч.

Изначально эти стрелочные переводы и съезды были спроектированы для линии Санкт-Петербург – Москва. В настоящее время они активно используются на участках, где движение пассажирских поездов осуществляется со скоростями свыше 140 км/ч, включая смешанное движение грузовых поездов с нагрузками до 250 кН/ось. Однако, конструкция этих стрелочных переводов и съездов не предусматривает обращение поездов с такими нагрузками. Поэтому требуется их модернизация с учетом опыта эксплуатации и возможностей производителей стрелочной продукции.

Также необходимо усовершенствовать конструкцию уравнильных стыков, которые обеспечивают работу стрелочных переводов и их групп в составе бесстыкового пути.

На линии Санкт-Петербург – Москва успешно применяются стрелочные переводы и съезды типа Р65 марки 1/11 проектов 2956 и 2968 для промежуточных станций. Эти конструкции позволяют двигаться по основному направлению со скоростью до 250 км/ч и по боковому направлению – до 50 км/ч.

Новосибирский и Муромский стрелочные заводы разработали стрелочные переводы типа Р65 марки 1/22, которые обеспечивают скорость движения по основному пути до 250 км/ч и по боковому направлению – до 120 км/ч [118].

Они успешно прошли полный цикл испытаний и готовы для массового производства, однако, пока не получили широкого распространения. Для этого необходимо внести некоторые улучшения, такие как доработка конструкций переводных механизмов, системы электрообогрева, оптимизация размещения и крепления электроприводов, а также регулировка колеи. Важным аспектом является также геометрия рельсовых элементов и оптимизация условий прохода

колес через зоны перекатывания, учитывая движение как грузовых, так и высокоскоростных поездов.

Опираясь на опыт организации высокоскоростного движения как за рубежом, так и в нашей стране, для обеспечения комфорта пассажиров и соблюдения заявленного времени в пути при возникновении различных сложностей в организации движения поездов, необходимо устанавливать диспетчерские съезды через каждые 30-50 км с конструкционной скоростью по боковому направлению, равной примерно половине максимальной скорости, которая действует на данном участке.

Принимая во внимание сложности при прохождении высокоскоростных поездов по кривым с малым радиусом, необходимо пересмотреть конструкции стрелочных переводов для конечных и крупных промежуточных станций: все высокоскоростные переводы должны быть выполнены с увеличенными радиусами стрелочных кривых.

Разрабатывая новые стрелочные переводы, необходимо учитывать ограниченные условия и стремиться к их применению без значительных изменений в путевом развитии. Для этого можно использовать стрелочные переводы марок 1/9, 1/11 и новую 1/13 с большими радиусами стрелочных кривых, которые могут быть взаимозаменяемыми с уже существующими типовыми моделями.

Важность разработки нового поколения высокоскоростных стрелочных переводов уже осознается, и процесс создания модельного ряда шестого поколения начался [119].

На сегодняшний день основным стрелочным переводом, который используется в условиях тяжелого движения, является модель проекта 2750 с «жесткой» крестовиной. Он был разработан в начале века для путей 1 и 2 классов и успешно применяется. В настоящее время он используется как универсальный вариант на путях различных классов и категорий.

Главные проблемы, выявленные в стрелочных переводах данного проекта, связаны с недостаточной прочностью крестовин и нестабильностью геометрии

рельсовой колеи при использовании. В ближайшей перспективе увеличение пропускной способности определенных направлений может быть достигнуто без строительства дополнительных путей путем увеличения массы поездов и нагрузки на оси вагонов. Для этого необходимы стрелочные переводы, которые обеспечат безопасное движение поездов с нагрузкой 250 кН/ось, а в дальнейшем – 270 и 300 кН/ось. Для удовлетворения этих требований предлагаются следующие модели стрелочных переводов для тяжеловесного движения:

- модернизированный стрелочный перевод проекта 2750 с жесткой моноблочной крестовиной и геометрией перевода;
- специальный стрелочный перевод проекта 2750 с жесткой моноблочной крестовиной и геометрией перевода на шурупно-дюбельном скреплении;
- равноресурсный стрелочный перевод проекта 2750 с крестовиной с непрерывной поверхностью катания и поворотным сердечником;
- стрелочный перевод с увеличенным до 400-450 м радиусом бокового пути, жесткой моноблочной крестовиной и криволинейной геометрией по боковому пути.

Учитывая, что планируется использование одних и тех же путей для тяжеловесного движения и обращения поездов с повышенными скоростями, необходимо обеспечить скорости движения по основному пути стрелочных переводов не менее 160 км/ч. В настоящее время уже существуют инновационные стрелочные переводы, произведенные российскими стрелочными заводами, которые имеют наработку более 550 млн тонн груза брутто. Предполагается, что эти конструкции заменят переводы проекта 2750, однако они еще не прошли широкую эксплуатационную проверку.

На некоторых участках поезда вынуждены выходить на перегон со станционных путей со скоростью 40 км/ч. Однако, из-за ограничений в тяговых характеристиках локомотивов, они не могут достичь достаточной эффективности на этих участках. Применение более эффективных стрелочных переводов марки

1/18 вместо 1/11 на большинстве станций невозможно из-за увеличения длины перевода практически в два раза - с 35 до 60 м.

Поэтому для обращения поездов повышенной массы и длины необходимо разработать компактные стрелочные переводы промежуточной марки от 1/13 до 1/15, которые позволят двигаться в боковом направлении со скоростью 60 км/ч.

Следует отметить, что для увеличения скорости движения грузовых поездов на выходе со станций можно использовать стрелочные переводы с криволинейными крестовинами марок 1/9 и 1/11. Применение таких стрелочных переводов не требует реконструкции горловин станций.

Для повышения эффективности обслуживания инфраструктуры необходимо разработать путевые конструкции с ресурсом между капитальными ремонтами 2,5 миллиарда тонн груза брутто. Для достижения такого ресурса требуются стрелочные переводы с нормативным ресурсом 625 миллионов тонн груза брутто.

Одновременно идет работа над созданием стрелочного перевода с ресурсом более 500 млн т груза брутто для тяжелых условий эксплуатации. Однако, чтобы достичь ресурса в 625 млн т груза брутто и более, необходимо получить комплектующие, способные обеспечить такой ресурс. В основном, это относится к прокатным остряковым и другим рельсовым элементам.

Для эффективного функционирования сортировочных станций используются симметричные стрелочные переводы марки 1/6 подгорочных парков. Однако, конструкция этих переводов была разработана несколько десятков лет назад и уже не соответствует современным требованиям. Ремкомплекты быстро изнашиваются, а рельсовая колея не обеспечивает достаточную стабильность. Для решения этой проблемы необходимо разработать новый проект горочного стрелочного перевода, основанный на современной элементной базе и использовании рельсовых элементов и элементов креплений с повышенной долговечностью.

Особое внимание следует уделить стрелочным переводам для криволинейных участков пути, которые составляют до 10 % от общей

протяженности нашей дорожной сети. Применение таких стрелочных переводов позволит устранить ограничения скорости движения и увеличить срок службы металлических элементов.

В настоящее время модельный ряд специальных стрелочных переводов ограничен конструкциями односторонней кривизны для радиуса основного пути 600, 750 и 900 метров. Однако, в этом ряду нет стрелочных переводов с разносторонней кривизной, необходимых для создания криволинейных съездов. Для российских железных дорог стоит задача разработки нового, шестого поколения стрелочной продукции под условным названием «Гекса». Решение этой задачи будет иметь прямое влияние на готовность стрелочного хозяйства и инфраструктуры компании РЖД к реализации ее планов.

На сегодняшний день уже разработаны моноблочные крестовины и несколько вариантов контррельсового проката. Геометрия цельнолитых подкладок с подушкой была пересмотрена, что позволило изготавливать их не только из стали, но и из композитных материалов. Активно исследуется новое плитное основание для стрелочных переводов, которое упростит текущее содержание пути. Изучается возможность использования фиброматериала при изготовлении не только плитного основания, но также брусьев и шпал.

Идет работа над улучшением системы работы стрелочных переводов в зимних условиях. Особое внимание уделяется очистке зоны, где установлены переводные механизмы. Также идет работа по усовершенствованию сборных крестовин. Это позволит не только производить крестовины с рельсами Т1, но и рассмотреть возможность использования новых видов рельсового проката. Кроме того, разрабатываются меры по предотвращению трещин в болтовых отверстиях в хвостовой части рельсовых окончаний крестовин.

Современные переводные механизмы требуют сложной настройки, не позволяют эффективно использовать машины для подбивки зоны острия острия острия и нуждаются в дальнейшем усовершенствовании. Одним из решений этой

проблемы является размещение тяг и внешних замыкателей в специальных полых брусках.

Системы безопасности на стрелочных переводах российских железных дорог включают в себя внутренние и внешние (по отношению к электроприводу) замыкатели. Рационально сохранить возможность использования гарнитур как с внешними замыкателями, так и без них для основных стрелочных переводов. При этом, необходимо улучшить конструкцию внешних замыкателей, чтобы упростить их настройку в процессе монтажа и эксплуатации [120].

Необходимо продолжить разработку систем пассивного контроля положения пар «остряк–рамный рельс» и «сердечник–усовик крестовины с непрерывной поверхностью катания». Исходя из мирового опыта, их использование необходимо на высокоскоростных линиях [121].

Принципиальные вопросы создания современной элементной базы для стрелочных переводов шестого поколения «Гекса» планируется решить при создании высокоскоростных стрелочных переводов и съездов [121].

Для суперскоростных и тяжеловесных стрелочных переводов следует рассмотреть возможность использования в качестве основания не только железобетонных брусков, но и безбалластных конструкций. Не следует также забывать об опыте использования плит на балласте.

Стрелочный перевод и съезд должны быть разработаны для эксплуатации на путях, по которым планируется к обращению подвижной состав со статическими осевыми нагрузками и скоростями движения.

Стрелочные переводы и съезды, а также переводные и замыкающие устройства должны соответствовать климатическому исполнению.

Рекомендуемый ресурс металлических частей стрелочного перевода и съезда, а также переводных и замыкающих устройств должен составлять не менее 500 млн т брутто, а рекомендуемый срок службы не менее 25 лет.

Стрелочный перевод и съезд должны разрабатываться в правом и левом исполнении.

Расчетное непогашенное ускорение экипажа при движении на боковое направление не должно превышать $0,5 \text{ м/с}^2$, а скорость его изменения не должна превышать $0,75 \text{ м/с}^3$.

Переводные устройства стрелок и крестовины НПК стрелочных переводов и съездов должны быть оборудованы внешними замыкателями и устройствами контроля положения (УК), отведенного и прижатого остряков и сердечника крестовины.

Стрелочные переводы и съезды должны быть оборудованы системой защиты элементов стрелочного перевода от снега и льда, в том числе элементы внешних замыкателей. Система защиты элементов стрелочного перевода от снега и льда должна обеспечивать работу комплекса стрелочного перевода (съезда) во всем диапазоне рабочих температур.

Конструкция основания стрелочного перевода и съезда должна обеспечивать отвод поверхностных вод, в том числе, в зоне расположения переводных устройств.

Конструкция гарнитур с замыкателями должна обеспечивать фиксацию и надежное удержание в рабочих положениях (крайних прижатых положениях) подвижных элементов (остряк, сердечник) стрелочного перевода.

Наклон поверхностей катания головок рельсовых элементов стрелочного перевода и съезда должен соответствовать наклону поверхностей катания рельсов (подуклонке) примыкающих путей.

Скрепления должны предусматривать возможность регулировки ширины колеи $\pm 6 \text{ мм}$ и положения головки рельсовых элементов по высоте $+18; -4 \text{ мм}$.

Шаг регулировки колеи должен составлять не более 1 мм по ширине и не более 2 мм по высоте.

Стрелочные электроприводы, переводные устройства должны обеспечивать переводные усилия необходимые для надежного перевода остряков и подвижных сердечников крестовин.

Конструкция стрелочных переводов и съездов должна обеспечивать изоляцию металлических частей для надежной работы электрических рельсовых

цепей, целостность рельсовой линии при прохождении подвижного состава, централизацию обратного тягового тока, возможность запираания остряков и подвижных сердечников крестовин в рабочем положении на замки или другие фиксирующие устройства в зоне каждого электропривода.

Конструкцией электроприводов стрелочных переводов должен быть предусмотрен ручной перевод стрелки и крестовины с механическим запираением, блокировкой электрического управления и сохранением электрического контроля положения стрелочного перевода.

Все рельсовые стыки стрелочного перевода, кроме изолирующих, должны позволять сваривать их алюминотермитной сваркой в пути. Исключить наличие стыковых отверстий на концах рельсовых деталей, предназначенных для сварки (рельсы рамные, остряки, усовики, рельсы сердечника, рельсы соединительных путей).

Конструкция подрельсового основания должна обеспечивать возможность размещения электрокабелей, путевых перемычек, межпутных соединителей. В конструкции безбалластного основания предусмотреть во всех сечениях установки электроприводов и УК возможность крепления для прокладки кабелей СЦБ и электрообогрева стрелочных переводов. Конструкции креплений переводных, контрольных и диагностических устройств определяются в процессе проектирования стрелочного перевода (съезда). При проектировании безбалластного основания они используются в качестве исходных требований к конструкции основания.

Конструкция стрелочных переводов (съездов) должна быть ремонтпригодна.

Должна быть предусмотрена регулировка хода (вылета) шибера и контрольных линеек электропривода, либо, должна быть предусмотрена регулировка длины контрольных и рабочих тяг с учетом требований устройства и содержания колеи на стрелочных переводах.

Электропривод должен иметь контакт безопасности для исключения перевода с поста электрической централизации при сохранении контроля положения остряков и сердечников, а также обеспечивать лево- правостороннюю установку.

В составе стрелочного перевода необходимо предусмотреть роликовые опоры, уменьшающие переводные усилия остряков стрелки и сердечника крестовины.

В конструкции стрелочного перевода и съезда на безбалластном основании возможно применение электроприводов, как шпального исполнения, так и консольного крепления в зависимости от конструкции стрелочного перевода, его назначения и типа основания.

Выводы по главе 8

Конструкции и технологии использования стрелочной продукции должны быть адаптированы к потребностям перевозочного процесса и способствовать реализации перспективных планов железнодорожного транспорта. В главе рассмотрены технические требования к современным стрелочным переводам, применяемым на территории отечественных железных дорог. Также формулируются задачи, стоящие перед стрелочным хозяйством на российских железных дорогах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Поставлена и решена задача по обоснованию выбора современных элементов для конструирования стрелочных переводов нового поколения для российских железных дорог с учетом реализации перспективных задач перевозочного процесса, а также обеспечения работы стрелочных переводов в зимний период.

2. Главным фактором, определяющим эксплуатационные качества основания для стрелочных переводов, является их конструкция. Результаты анализа данных обмеров и мониторинга стрелочных переводов позволили сформировать вывод, что при разработке стрелочных переводов нового поколения целесообразно использовать конструкцию подрельсового основания устойчивую к воздействиям подвижного состава и менее склонную к расстройству колеи, а также систему прикрепления, облегчающую регулировку параметров рельсовой колеи на стрелочном переводе. В качестве такого основания могут использоваться железобетонные плиты.

3. По результатам динамико-прочностных и эксплуатационных испытаний стрелочного перевода на железобетонном основании массового применения было отмечено, что недостатком конструкции стрелочных переводов является то, что в эксплуатации необходимо проведение периодических работ по обслуживанию стрелочного перевода – выправке и регулировке параметров рельсовой колеи. На перспективу целесообразно предусмотреть применение основания с большей распределяющей способностью, в виде плит.

5. Для определения вертикальных сил была составлена модель в виде системы сосредоточенных масс с упруго-вязкими связями между ее элементами. Расчеты динамических эффектов с помощью системы четырех дифференциальных уравнений второго порядка показали достаточно хорошую сходимость полученных данных с результатами экспериментов.

6. Разработаны и реализованы модели для расчета плит основания стрелочных переводов. Проведены исследования конструкций плитного основания стрелочного перевода с помощью этих моделей. Полученные результаты позволяют рассчитать конструкцию плит для обеспечения работы стрелочного перевода при различных условиях эксплуатации и нагрузках на ось подвижного состава.

7. Результаты проведенных исследований доказывают, что внедрение в конструкцию оснований стрелочных переводов железобетонных плит позволит увеличить ресурс основания в 2 раза и более по сравнению с основанием в виде железобетонных брусьев.

8. Разработана технология технического обслуживания стрелочных переводов нового поколения на железобетонных плитах.

Применение метода суфляжа позволяет эксплуатировать стрелочные переводы на плитном основании не только с соблюдением регламентированных норм, но и с экономией расходов на их техническое обслуживание.

Предложенный способ выправки стрелочного перевода на плитном основании обеспечивает равноупругость плитного основания, а также стабильность положения стрелочного перевода в плане и профиле.

9. Разработанная автором модель позволяет произвести расчет контррельса, не связанного с ходовым рельсом.

Проанализировав параметры ширины колеи, желобов на крестовинных узлах стрелочных переводов, а также выполнив расчет по разработанной модели с учетом перспективных задач, был предложен оптимизированный вариант контррельсового спецпрофиля.

Предложенный контррельсовый профиль отличается тем, что, с целью повышения надежности и срока службы, отношение высоты его головки к толщине шейки находится в соотношении $1/2$, а отношение толщины шейки к его полной высоте находится в пределах $1/6$.

10. Проведена серия расчётов для выбора параметров конструкции, обеспечивающей работу стрелочных переводов в зимний период. Был проведен анализ параметров, описывающих тепловое состояние стрелочных переводов на примере решения двух задач: задачи разморозки стрелочного перевода, укрытого снегом, и задачи поддержания прогретого состояния в условиях интенсивного снегопада.

Важным результатом является вывод о том, что величина высоты снега не оказывает существенного влияния на распределение температур в области стрелки при определении критической интенсивности снегопада.

11. Результаты проведенных исследований доказывают, что внедрение в эксплуатацию современных элементов для стрелочных переводов нового поколения позволит увеличить ресурс и межремонтные сроки не только стрелочного перевода, но и его важнейших узлов.

12. Сформулированы технические требования к современным стрелочным переводам, применяемым на территории отечественных железных дорог. Также формулируются задачи, стоящие перед стрелочным хозяйством на российских железных дорогах.

14. По материалам исследований, представленных в диссертационной работе, получены патенты на полезные модели «Контррельсовый профиль» и «Плитное основание стрелочных переводов», а также патент на изобретение: «Способ подбивки стрелочного перевода на плитном основании».

Перспективой дальнейшего развития темы диссертационного исследования является проведение аналогичных работ для отдельных элементов стрелочных переводов. При этом могут быть использованы подходы и методы, разработанные в данной диссертации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глюзберг, Б. Э. Система критериев и требований, определяющих скорости движения подвижного состава по стрелочным переводам / Б. Э. Глюзберг // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2023. – Т. 82, № 3. – С. 198-211.

2. Трегубчак, П. В. Разработка крестовин стрелочных переводов для условий тяжеловесного и интенсивного движения: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 2.9.2 / Трегубчак Павел Владимирович. – М., 2024. – 150 с.

3. Шишкина, И. В. Повышение ресурса стрелок стрелочных переводов за счет усовершенствования прикрепления рельсовых элементов стрелки к основанию: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.22.06 / Шишкина Ирина Викторовна. – Москва, 2019. – 24 с.

4. Горьканова, Т. Н. О разработке конструкции пути с ресурсом 2,5 млрд т груза брутто / Т. Н. Горьканова // Путь и путевое хозяйство. – 2023. – № 10. – С. 14.

5. Глюзберг, Б. Э. Технические требования к стрелочным переводам шестого поколения "ГЕКСА" / Б. Э. Глюзберг, В. В. Королев, И. В. Шишкина // Путь и путевое хозяйство. – 2022. – № 7. – С. 19-21.

6. Глюзберг, Б. Э. Высокоскоростное движение и проблемы стрелочного хозяйства / Б. Э. Глюзберг // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2010. – № 4. – С. 3-7.

7. Королев, В. В. Оптимизация конструкции контррельсов стрелочных переводов на основе анализа фактического состояния пути и особенностей воздействия на них колесных пар подвижного состава: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.22.06 / Королев Вадим Вадимович. – Москва, 2012. – 140 с.

8. Гридасова, Е. А. Моделирование поведения сегмента рельсовой плети при динамическом воздействии / Е. А. Гридасова, А. А. Локтев, Л. А. Илларионова //

Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки. – 2020. – № 4(91). – С. 24-41.

9. Березовский, М. Е. Обоснование требований к новым конструкциям стрелочных переводов для ВСМ с разработкой предложений по организации их производства / М. Е. Березовский // Транспортное строительство: Сборник статей второй всероссийской научно-технической конференции, Москва, 12–14 апреля 2021 года. – Москва: Издательство "Перо", 2021. – С. 175-190.

10. Глюзберг Б. Э. Расчет и проектирование скоростных и стрелочных переводов и съездов. М.: РГОТУПС, 2002. – 54 с.

11. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: Учебное пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта в 2-х томах / И. П. Киселев, Л. С. Блажко, М. Я. Брынть [и др.]; под редакцией И. П. Киселева; Допущено Федеральным агентством железнодорожного транспорта. Том 1. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение дополнительного профессионального образования «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2020. – 428 с.

12. Глюзберг, Б. Э. Параметры, обеспечивающие плавность проезда подвижного состава по стрелочным переводам / Б. Э. Глюзберг // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2012. – Т. 5, №5(5). – С. 41-45.

13. Глюзберг, Б. Э. Поколения стрелочных переводов / Б. Э. Глюзберг, В. В. Королев // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – № 12. – С. 21-24.

14. Локтев, А. А. Расчет скорости движения по боковому пути для пологих марок стрелочных переводов / А. А. Локтев, В. В. Королев, И. В. Шишкина, М. Е. Березовский // Транспорт Урала. – 2020. – № 2. – С. 52-56.

15. Локтев, А. А. Выбор формы переводной кривой стрелочных переводов для высоких скоростей движения / А. А. Локтев, В. В. Королев, И. В. Шишкина, В. С. Кусков // Транспорт Урала. – 2020. – № 3. – С. 62-67.

16. Gluzberg, B., Korolev, V., Loktev, A., Shishkina, I., & Berezovsky, M. (2019). Switch operation safety. In E3S Web of Conferences (Vol. 138). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913801017>
17. Loktev, A., Korolev, V., Shishkina, I., Chernova, L., Geluh, P., Savin, A., & Loktev, D. (2020). Modeling of railway track sections on approaches to constructive works and selection of track parameters for its normal functioning. In Advances in Intelligent Systems and Computing (Vol. 982, pp. 325–336). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19756-8_30
18. Korolev, V., Shishkina, I., & Lokteva, V. (2020). Basic stages of creating a BIM model for transport infrastructure objects. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 918, 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/918/1/012014>
19. Gluzberg, B., Korolev, V., Shishkina, I., Berezovsky, M., Tregubchak, P., & Zverkova, N. (2020). Reliability indicators of railway joints and crossings. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 918, 012147. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/918/1/012147>
20. Glusberg B., Loktev A., Korolev V., Shishkina I. (2022) Parameters Ensuring Smooth Passage of the Rolling Stock Along Turnouts of Railway Transport. In: Bieliatynskiy A., Breskich V. (eds) Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9_36
21. Королев, В. В. Моделирование стрелочных переводов на плитном основании / В. В. Королев // Наука и техника транспорта. – 2019. – № 3. – С. 77-87.
22. Глюзберг, Б.Э. Динамическое воздействие вагонов, имеющих колесные пары с тонкими гребнями, на стрелочные переводы / Б. Э. Глюзберг, М. И. Титаренко, Е. А. Тимакова [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2020. – Т. 79, № 4. – С. 202-208.
23. Глюзберг, Б. Э. Влияние параметров гребней вагонных колес на безопасность движения по стрелочным переводам / Б. Э. Глюзберг // Вестник

Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. – Т. 77, № 2. – С. 67-76.

24. Королев, В. В. Организация работ по контролю рельсовых элементов стрелочных переводов на железных дорогах России / В. В. Королев, В. А. Мальцев // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2014. – Т. 7, № 7(7). – С. 43-50.

25. Глюзберг, Б. Э. Применение методов анализа сочетаний размеров колесных пар и элементов стрелочных переводов для определения размеров желобов контррельсовых узлов / Б. Э. Глюзберг, А. А. Локтев, В. В. Королев, В. С. Кусков // Транспорт Урала. – 2021. – № 2(69). – С. 3-9.

26. Korolev, V. (2020). The study of rolling stock wheels impact on rail switch frogs. E3S Web of Conferences, 164, 03033.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016403033>

27. Королев, В. В. Напряжённое состояние элементов скоростного стрелочного перевода марки 1/22 / В. В. Королев // Развитие железнодорожного транспорта в условиях реформ: Сборник научных статей молодых ученых и аспирантов ВНИИЖТ. – Москва: Интекс, 2003. – С. 231-235.

28. Глюзберг, Б. Э. Разработка норм содержания контррельсовых узлов по результатам динамико-прочностных испытаний и исследований безопасности прохождения подвижного состава по стрелочным переводам / Б. Э. Глюзберг, М. А. Горбунов, В. В. Королев // Современные и перспективные конструкции железнодорожного пути для различных условий эксплуатации: сборник трудов ученых ОАО «ВНИИЖТ» / ОАО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта». – Москва: Интекст, 2013. – С. 82-103.

29. Глюзберг, Б. Э. Испытания нового высокоскоростного стрелочного перевода / Б. Э. Глюзберг, М. И. Титаренко // Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всероссийской научно-практической конференции к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института

железнодорожного транспорта, Москва, 05 июня 2019 года. – Москва: ООО «РАС», 2019. – С. 192-200.

30. Глюзберг, Б. Э. Геометрия стрелочных кривых и способы ее оценки / Б. Э. Глюзберг // Путь и путевое хозяйство. – 2020. – № 6. – С. 19-23.

31. Королев, В. В. Стрелочные переводы для высокоскоростного движения свыше 250 км/ч / В. В. Королев // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2015. – Т. 8, № 8(8). – С. 96-100.

32. Глюзберг, Б. Э. Стрелочные переводы для реализации стратегических программ ОАО "РЖД" / Б. Э. Глюзберг // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД. – 2011. – № 4. – С. 35-43.

33. Бржезовский, А. М. Экспериментальная оценка взаимодействия экипажа и пути при скоростном и высокоскоростном движении / А. М. Бржезовский, Д. Н. Аршинцев, О. Г. Бржезовская [и др.]; АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта». – Москва: РАС, 2019. – 152 с. – (Труды АО «ВНИИЖТ»).

34. Глюзберг, Б. Э. Анализ возможности сходов колес с рельсов из-за вкатывания на остряк / Б. Э. Глюзберг, Е. А. Тимакова // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2020. – № 1. – С. 30-33.

35. Глюзберг, Б. Э. Опыт применения скоростных и высокоскоростных стрелочных переводов и съездов на Российских железных дорогах / Б. Э. Глюзберг // Современные и перспективные конструкции железнодорожного пути для различных условий эксплуатации: сборник трудов ученых ОАО "ВНИИЖТ" / ОАО "Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта". – Москва : Интекст, 2013. – С. 104-107.

36. Титаренко, М. И. Работа рельсов в условиях различных средних статических осевых нагрузок подвижного состава / М. И. Титаренко // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. – Т. 77, № 3. – С. 172-176.

37. Титаренко, М. И. Результаты испытаний усиленного симметричного стрелочного перевода марки 1/6 / М. И. Титаренко, С. М. Корнева // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: Труды XIII Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца, Москва, 31 марта – 01 2017 года. – Москва: Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II, 2016. – С. 159-160.

38. Glusberg, B., Korolev, V., Lokteva, O., & Shishkina, I. (2020). Contact stresses in point frogs. E3S Web of Conferences, 164, 03034. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016403034>

39. Korolev, V. (2021). Change of geometric forms of working surfaces of turnout crosspieces in wear process. In Advances in Intelligent Systems and Computing (Vol. 1258 AISC, pp. 207–218). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5_19

40. Vadim Korolev, Boris Glyuzberg, Alexey Loktev, Vladimir Tkachenko, Olga Paddaeva (2023). Principles of determining the necessary strength of the railway track. AIP Conference Proceedings 2476, 020054 (2023) <https://doi.org/10.1063/5.0104821>

41. Королев, В. В. Исследование взаимосвязи стрелочного хозяйства в инновационном процессе / В. В. Королев // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте: Сборник трудов научно-практической конференции с международным участием, Москва, 20–21 октября 2021 года. – Москва: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет транспорта", 2022. – С. 236-241.

42. Савин, А. В. Исследование безбалластных конструкций пути на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» / А. В. Савин // Транспортное строительство. – 2017. – № 9. – С. 14-18.

43. Савин, А. В. Сферы применения безбалластного пути / А. В. Савин, А. Д. Разуваев // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2016. – № 3(35). – С. 32-41.

44. Савин, А. В. Исследования возможности применения технологии безбалластной конструкции для российских стрелочных переводов / А. В. Савин, В. В. Королев // Наука и техника транспорта. – 2020. – № 1. – С. 17-29.

45. Глюзберг, Б. Э. Принципы определения необходимой прочности железнодорожного пути с учетом интенсивности его использования / Б. Э. Глюзберг, А. А. Локтев, В. В. Королев, Н.А. Клековкина, В.С. Кусков // Транспорт Урала. – 2022. – № 1(72). – С. 53-61.

46. Савин, А. В. Выбор конструкции пути для высокоскоростного движения / А. В. Савин // Транспорт Российской Федерации. – 2017. – № 1(68). – С. 18-21.

47. Савин, А. В. Опыт укладки и эксплуатации безбалластного пути LVT / А. В. Савин // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 5. – С. 31-34.

48. Савин, А. В. Безбалластный путь и его основание / А. В. Савин, П. И. Дыдышко // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 12. – С. 39-41.

49. Савин, А. В. Исследования безбалластной конструкции верхнего строения пути / А. В. Савин, А. М. Бржезовский, В. В. Третьяков [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2015. – № 6. – С. 23-32.

50. Глюзберг, Б. Э. Отечественный опыт эксплуатации стрелочных переводов на плитном основании / Б. Э. Глюзберг, А. А. Локтев, В. В. Королев // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – № 10. – С. 28-32.

51. Савин, А. В. Технические требования к элементам безбалластного пути / А. В. Савин, А. В. Кузнецова, С. А. Васильева, А. В. Петров // Транспортное строительство: Сборник статей второй всероссийской научно-технической конференции, Москва, 12–14 апреля 2021 года. – Москва: Издательство "Перо", 2021. – С. 23-32.

52. Савин, А. В. Условия применения безбалластного пути: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.22.06 / Савин Александр Владимирович. – М., 2018. – 444 с.

53. Королев, В. В. Моделирование стрелочных переводов на плитном основании / В. В. Королев // Наука и техника транспорта. – 2019. – № 3. – С. 77-87.

54. Савин, А. В. Безбалластный путь / А. В. Савин // АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта». – Москва: РАС, 2017. – 192 с. – (труды ученых АО «ВНИИЖТ»).

55. Савин, А. В. Расчет напряжений в конструкциях безбалластного пути / А. В. Савин, Д. А. Ищенко // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2015. – Т. 8, № 8(8). – С. 147-155.

56. Савин, А. В. Безбалластный путь для высокоскоростного движения / А. В. Савин // Научное сопровождение развития высокоскоростных магистралей в России: Труды АО «ВНИИЖТ». Коллективная монография / АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта». – Москва: ООО "РАС", 2018. – С. 9-52.

57. Савин, А. В. Результаты испытаний безбалластных конструкций пути на Экспериментальном кольце АО "ВНИИЖТ" / А. В. Савин, В. В. Третьяков, В. Н. Каплин [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2017. – Т. 76, № 4. – С. 195-201.

58. Савин, А. В. Итоги испытаний безбалластного пути / А. В. Савин // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2017. – № 1(37). – С. 26-31.

59. Савин, А. В. Ресурсные испытания безбалластных конструкций пути / А. В. Савин // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 7. – С. 49-52.

60. Savin, A., Kogan, A., Loktev, A., & Korolev, V. (2019). Evaluation of the service life of non-ballast track based on calculation and test. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(7), 2325–2328. G5991058719/19©BEIESP

61. Savin, A., Korolev, V., Loktev, A., & Shishkina, I. (2020). Vertical Sediment of a Ballastless Track. In *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 1115 AISC, pp. 797–808). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_78

62. Loktev, A., Korolev, V., Shishkina, I., Savin, A., Illarionova, L., Lokteva, O., & Kuskov, V. (2020). Dynamic behavior model of the ballastless railroad track segment considering wave processes. E3S Web of Conferences, 164, 03035. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016403035>

63. Савин, А. В. Безбалластный путь для грузового движения / А. В. Савин, А. В. Петров, К. И. Третьяков, С. С. Князев // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2018. – Т. 12, № 12(12). – С. 142-145.

64. Коган, А. Я. Методика определения расчетного срока службы безбалластного пути / А. Я. Коган, А. В. Савин // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2017. – Т. 76, № 1. – С. 3-9.

65. Савин, А. В. Комбинированный метод исследования безбалластного пути / А. В. Савин // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2015. – № 3. – С. 48-52.

66. Патент на полезную модель № 203554 U1 Российская Федерация, МПК E01B 7/22. Плитное основание стрелочных переводов: № 2020138312: заявл. 23.11.2020: опубл. 12.04.2021 / Б. Э. Глюзберг, В. В. Королев, А. А. Локтев [и др.]; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет транспорта".

67. Савин, А. В. Переходные участки безбалластного пути после 1,1 млрд т брутто / А. В. Савин, К. И. Третьяков, А. В. Петров [и др.] // Современные проблемы железнодорожного транспорта: Сборник трудов по результатам международной интернет-конференции. В 2-х томах, Москва, 21–22 марта 2019 года / Под общей редакцией К.А. Сергеева. Том 1. – Москва: Российский университет транспорта, 2019. – С. 536-546.

68. Савин, А. В. Срок службы безбалластного пути / А. В. Савин // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: Труды XIV Международной научно-технической

конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца, Москва, 05–06 апреля 2017 года. – Москва: Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II, 2017. – С. 139-142.

69. Глюзберг, Б. Э. Применение методов моделирования для определения скоростей движения по участкам пути, на которых расположены комбинации стрелочных переводов / Б. Э. Глюзберг, А. А. Локтев, В. В. Королев, Д. А. Локтев, П. А. Гелюх, И. В. Шишкина // История и перспективы развития транспорта на севере России. – 2018. – № 1. – С. 73-78.

70. Бельтюков, В. П. Применение методик оптимизации содержания верхнего строения пути / В. П. Бельтюков // Путь XXI века: сборник трудов Национальной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 01–02 ноября 2018 года. – Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2019. – С. 13-17.

71. Королев, В. В. Сравнительный анализ технологических процессов укладки стрелочных переводов различными машинными комплексами / В. В. Королев, А. А. Жукова // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2015. – Т. 8, № 8(8). – С. 161-165.

72. Королев, В. В. Сравнительный анализ технологических процессов сборки стрелочных переводов / В. В. Королев // Транспортное строительство: Сборник статей второй всероссийской научно-технической конференции, Москва, 12–14 апреля 2021 года. – Москва: Издательство "Перо", 2021. – С. 56-72.

73. Крейнис, З. Л. Техническое обслуживание и ремонт железнодорожного пути: Учебник / З. Л. Крейнис, Н. Е. Селезнева. – Москва: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. – 568 с.

74. Абрашитов, А. А. Пневмосуфляж при выправке пути на щебёночном балласте / А. А. Абрашитов // Мир транспорта. – 2012. – Т. 10, № 6(44). – С. 56-60.

75. Абрашитов, А. А. Опыт механизированного пневматического суфляжа / А. А. Абрашитов // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 2. – С. 11-13.

76. Абрашитов, А. А. Ручной пневматический суфляж / А. А. Абрашитов, А. В. Замуховский // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 1. – С. 29-30.

77. Абрашитов, А. А. Пневматический суфляж при выправке пути на щебеночном балласте / А. А. Абрашитов // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 5. – С. 11-14.

78. Абрашитов, А. А. Как поддерживать функциональность балластной призмы при тяжеловесном движении / А. А. Абрашитов // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 3. – С. 36-38.

79. Абрашитов, А. А. Мероприятия, повышающие качество выправки пути в профиле в условиях высокого загрязнения балластной призмы / А. А. Абрашитов, М. Г. Рюмин, А. В. Семак // Транспортные системы: тенденции развития: Сборник трудов международной научно-практической конференции, Москва, 26–27 сентября 2016 года / Под общей редакцией Б.А. Лёвина. – Москва: Российский университет транспорта (МИИТ), 2016. – С. 483-487.

80. Абрашитов, А. А. Лабораторные исследования технологии выправки шпал пневматическим суфляжем / А. А. Абрашитов, А. А. Зайцев, А. В. Семак // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: Труды XIV Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца, Москва, 05–06 апреля 2017 года. – Москва: Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II, 2017. – С. 200-203.

81. Певзнер, В. О. Выправка пути на щебеночном балласте установкой подшпальных прокладок и пневматическим суфляжем / В. О. Певзнер, В. Н. Каплин, А. А. Абрашитов, А. В. Семак // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. – Т. 77, № 2. – С. 104-109.

82. Абрашитов, А. А. Устранение выплесков пневматическим суфляжем / А. А. Абрашитов, А. В. Гуляева // Перспективы развития метрополитенов в условиях интенсивного внедрения новых технологий. Инфраструктура и подвижной состав метрополитена: Сборник трудов Международной выставки-конференции, Москва,

12–14 декабря 2019 года / Под общей редакцией Т.В. Шепитько, А.А. Сидракова. Том Выпуск 2. – Москва: Российский университет транспорта, 2019. – С. 32-39.

83. Филатов, И. С. Изучение опытной технологии пневматического суфляжа / И. С. Филатов // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки: Материалы Всероссийской конференции с международным участием, Москва, 01–05 февраля 2019 года. – Москва: Издательство "Перо", 2019. – С. 475-477.

84. Каплин, В. Н. Технология и определение применимости пневмосуфляжа при текущем содержании пути / В. Н. Каплин, А. А. Абрашитов, Е. Н. Гринь // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2020. – Т. 79, № 2. – С. 74-79.

85. Патент № 2789281 С1 Российская Федерация, МПК E01B 27/18, E01B 29/04. Способ подбивки стрелочного перевода на плитном основании: № 2021133695: заявл. 19.11.2021: опубл. 01.02.2023 / В. В. Королев, А. А. Локтев, Д. А. Локтев [и др.]; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет транспорта".

86. Глюзберг, Б. Э. Нормы содержания контррельсовых узлов стрелочных переводов / Б. Э. Глюзберг // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2012. – № 5. – С. 7-15.

87. Глюзберг, Б. Э. Способы повышения конструкционной скорости движения по стрелочным переводам на реконструируемых участках пути / Б. Э. Глюзберг // Проблемы железнодорожного транспорта. Задачи и пути их решения : Сборник трудов ученых ОАО ВНИИЖТ / Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта; редактор: Б. М. Лapidус, Г. В. Гогричани. – Москва : Интекст, 2012. – С. 195-199.

88. Глюзберг, Б. Э. О нормах износа контррельсов стрелочных переводов / Б. Э. Глюзберг // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – № 4. – С. 22-26.

89. Глюзберг, Б.Э. Требования к контрольным узлам стрелочных переводов / Б. Э. Глюзберг, А. А. Локтев, И. В. Шишкина, М. Е. Березовский // Транспорт Урала. – 2021. – № 2(69). – С. 48-52.

90. Глюзберг, Б. Э. Интегральные показатели надежности стрелочных переводов и стрелочного хозяйства / Б. Э. Глюзберг // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2016. – Т. 9, № 9(9). – С. 39-42.

91. Королев, В. В. Напряженное состояние контрольных криволинейного стрелочного перевода / В. В. Королев // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2008. – Т. 1, № 1(1). – С. 11-15.

92. Королев, В. В. Сравнительные исследования напряженного состояния контрольных стрелочных переводов / В. В. Королев // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2009. – № 6. – С. 38-39.

93. Глюзберг, Б. Э. Контрольсы-протекторы для стрелочных переводов / Б. Э. Глюзберг // Транспорт Урала. – 2016. – № 2(49). – С. 39-43.

94. Глюзберг, Б. Э. Новая конструкция контрольного протектора / Б. Э. Глюзберг, А. М. Тейтель, М. И. Титаренко, М. Ю. Хвостик // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 1997. – № 3. – С. 29-32.

95. Королев, В. В. Разработка нового контрольного, не связанного с ходовым рельсом / В. В. Королев // Безопасность движения поездов : Материалы 11-й Научно-практической конференции, Москва, 21–22 октября 2010 года. – Москва: Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II, 2010. – С. XIV-36.

96. Глюзберг, Б. Э. Новые конструкции контрольного для увеличения безопасности движения по стрелочным переводам / Б. Э. Глюзберг, В. В. Королев, И. В. Шишкина // История и перспективы развития транспорта на севере России. – 2021. – № 1. – С. 38-41.

97. Королев, В. В. Новый контррельс для стрелочных переводов / В. В. Королев // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. – 2014. – № 10. – С. 46-48.

98. Королев, В. В. Варианты изменения контррельсового профиля / В. В. Королев // Транспортное строительство: Сборник статей третьей всероссийской научно-технической конференции, Москва, 12–13 апреля 2022 года. – Москва: Издательство "Перо", 2022. – С. 69-80.

99. Королев, В. В. Контррельс-протектор для стрелочных переводов / В. В. Королев // Путь и путевое хозяйство. – 2017. – № 10. – С. 21-24.

100. Королев, В. В. Возможность изменения профиля контррельсового уголка СП8-50 / В. В. Королев // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – № 9. – С. 29-31.

101. Королев, В. В. Новый контррельсовый спецпрофиль для стрелочных переводов / В. В. Королев // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2010. – № 6. – С. 32-33.

102. Korolev, V. (2020). Guard Rail Operation of Lateral Path of Railroad Switch. In *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 1115 AISC, pp. 621–638). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_60

103. Glusberg, B., Savin, A., Loktev, A., Korolev, V., Shishkina, I., Chernova, L., & Loktev, D. (2020). Counter-rail special profile for new generation railroad switch. In *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 982, pp. 571–587). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19756-8_54

104. Патент на полезную модель № 108760 U1 Российская Федерация, МПК E01B 5/18. Уголок контррельсовый: № 2011123082/11: заявл. 08.06.2011: опубл. 27.09.2011 / Б. Э. Глюзберг, В. В. Королев; заявитель Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта».

105. Патент на полезную модель № 198496 U1 Российская Федерация, МПК E01B 5/18. Контррельсовый профиль: № 2020112216: заявл. 25.03.2020: опубл. 14.07.2020 / Б. Э. Глюзберг, В. В. Королев, А. А. Локтев [и др.]; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего

образования "Российский университет транспорта" (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ).

106. Королев, В. В. Обеспечение устойчивой работы стрелочных переводов в зимних условиях / В. В. Королев // Проблемы проектирования, строительства, диагностики и технического содержания объектов железнодорожного транспорта: Материалы всероссийской научно-практической конференции, Чита, 24 октября – 15 2013 года. – Чита: Забайкальский институт железнодорожного транспорта - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Иркутский университет путей сообщения", 2013. – С. 82-87.

107. Королев, В. В. Системы удаления снега со стрелочных переводов в зимних условиях / В. В. Королев // Современные и перспективные конструкции железнодорожного пути для различных условий эксплуатации: сборник трудов ученых ОАО «ВНИИЖТ» / ОАО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта». – Москва: Интекст, 2013. – С. 138-148.

108. Королев, В. В. Совершенствование технологии очистки стрелочных переводов от снега в зимний период / В. В. Королев // История и перспективы развития транспорта на севере России. – 2022. – № 1. – С. 50-55.

109. Глюзберг, Б. Э. Применение различных систем удаления снега на стрелочных переводах / Б. Э. Глюзберг, В. В. Королев // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2013. – Т. 6, № 6(6). – С. 80-93.

110. Глюзберг, Б. Э. Удаление снега на стрелочных переводах / Б. Э. Глюзберг, В. В. Королев // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 3. – С. 26-30.

111. Королев, В. В. Системы обеспечения безотказной работы стрелочных переводов зимой / В. В. Королев, И. В. Шишкина, Д. С. Колосков // Путь и путевое хозяйство. – 2020. – № 11. – С. 13-16.

112. Glusberg, B., Loktev, A., Korolev, V., Shishkina, I., Alexandrova, D., & Koloskov, D. (2020). Calculation of heat distribution of electric heating systems for

turnouts. In *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 982, pp. 337–345). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19756-8_31

113. Шишкина, И. В. Способы и системы обеспечения работы стрелочных переводов в зимний период / И. В. Шишкина // *История и перспективы развития транспорта на севере России*. – 2023. – № 1. – С. 44-48.

114. Шишкина, И. В. Система обогрева стрелочных переводов с помощью электропроводящей краски / И. В. Шишкина // *История и перспективы развития транспорта на севере России*. – 2024. – № 1. – С. 43-47.

115. Королев, В. В. Методы расчета систем, обеспечивающих работу стрелочных переводов в условиях низких температур / В. В. Королев // *Наука и техника транспорта*. – 2023. – № 4. – С. 81-87.

116. Королев, В. В. Инженерное снеговедение: Теплораспределение на стрелочных переводах / В. В. Королев. – Москва: Издательство "Перо", 2021. – 154с.

117. Шишкина, И. В. Необходимость разработки стрелочных переводов шестого поколения "ГЕКСА" / И. В. Шишкина // *Путь и путевое хозяйство*. – 2022. – № 1. – С. 16-18.

118. Королев, В. В. Информационное моделирование стрелочных переводов / В. В. Королев // *Путь и путевое хозяйство*. – 2022. – № 8. – С. 37-39.

119. Королев, В. В. Цифровой двойник стрелочного перевода / В. В. Королев // *Путь и путевое хозяйство*. – 2021. – № 1. – С. 6-8.

120. Глюзберг, Б. Э. Технические требования к стрелочным переводам шестого поколения "ГЕКСА" / Б. Э. Глюзберг, В. В. Королев, И. В. Шишкина // *Путь и путевое хозяйство*. – 2022. – № 7. – С. 19-21.

121. Королев, В. В. Стрелочная продукция в эпоху цифрового проектирования / В. В. Королев // *Путь и путевое хозяйство*. – 2023. – № 6. – С. 17-19.

122. Королев, В. В. Технология искусственного интеллекта в стрелочном хозяйстве / В. В. Королев // *Путь и путевое хозяйство*. – 2023. – № 12. – С. 18-19.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 198496

КОНТРЕЛЬСОВЫЙ ПРОФИЛЬ

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет транспорта" (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ) (RU)*

Авторы: *Глюзберг Борис Эйнихович (RU), Королев Вадим Вадимович (RU), Локтев Алексей Алексеевич (RU), Локтев Даниил Алексеевич (RU), Шишкина Ирина Викторовна (RU)*


Заявка № 2020112216

Приоритет полезной модели 25 марта 2020 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 14 июля 2020 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 25 марта 2030 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 203554**ПЛИТНОЕ ОСНОВАНИЕ СТРЕЛОЧНЫХ
ПЕРЕВОДОВ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет транспорта" (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ)) (RU)*

Авторы: *Глюзберг Борис Эйнихович (RU), Королев Вадим Вадимович (RU), Локтев Алексей Алексеевич (RU), Локтев Даниил Алексеевич (RU), Шишкина Ирина Викторовна (RU), Клековкина Надежда Александровна (RU)*

Заявка № **2020138312**Приоритет полезной модели **23 ноября 2020 г.**Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **12 апреля 2021 г.**Срок действия исключительного права на полезную модель истекает **23 ноября 2030 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2789281

СПОСОБ ПОДБИВКИ СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА
НА ПЛИТНОМ ОСНОВАНИИ

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет транспорта" (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ) (RU)*

Авторы: *Королев Вадим Вадимович (RU), Локтев Алексей Алексеевич (RU), Локтев Даниил Алексеевич (RU), Локтева Виктория Анатольевна (RU), Шишкина Ирина Викторовна (RU), Клековкина Надежда Александровна (RU), Савулиди Михаил Юрьевич (RU), Кузнецов Артем Александрович (RU)*

Заявка № 2021133695

Приоритет изобретения 19 ноября 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 01 февраля 2023 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 19 ноября 2041 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

