

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

Кафедра проектирования, строительства и эксплуатации  
транспортных объектов

Н. В. ДОВГЕЛЮК, И. М. ЦАРЕНКОВА, Т. А. ДУБРОВСКАЯ

# ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

*Допущено Министерством образования Республики Беларусь  
в качестве учебного пособия  
для студентов учреждений высшего образования  
по специальности «Строительство железных дорог,  
путь и путевое хозяйство»*

Гомель 2023

УДК 625.1.001.2(075.8)  
ББК 30.2  
Д58

**Рецензенты:** заведующий кафедрой экономики и логистики Белорусского национального технического университета, член-корреспондент НАН Беларуси, доктор экономических наук, профессор *Р. Б. Ивуть*; начальник технического отдела службы пути Управления Белорусской железной дороги *Н. Е. Мирошников*

**Авторы:** канд. техн. наук, доц. *Н. В. Довгелюк* – введение, разделы 5, 7 (кроме подразд. 7.2, 7.4), подразд. 3.1, 3.2, 4.4; канд. экон. наук, доц. *И. М. Царенкова* – разделы 2 (кроме подразд. 2.7, 2.8), 4 (кроме подразд. 4.3, 4.4), 6; канд. техн. наук *Т. А. Дубровская* – разделы 1, 3 (кроме подразд. 3.1, 3.2, 3.3), подразд. 2.7, 2.8, 4.3, 7.2).

### **Довгелюк, Н. В.**

Д58 Экономические изыскания при проектировании железных дорог : учеб. пособие / Н. В. Довгелюк, И. М. Царенкова, Т. А. Дубровская ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2023. – 255 с.  
ISBN 978-985-891-121-8

Изложены основы экономических изысканий, проектирования трассы, плана и продольного профиля железных дорог, приведено определение основных измерителей работы грузового поезда для подсчета эксплуатационных расходов на основе тяговых расчетов, результаты которых используются для принятия решения по выбору варианта железной дороги. Рассмотрены примеры технико-экономических расчетов при переустройстве железных дорог.

Предназначено для студентов специальности «Строительство железных дорог, путь и путевое хозяйство». Может быть использовано также инженерами-проектировщиками и строителями железных дорог, слушателями факультетов повышения квалификации, магистрантами по специальностям «Строительство» и «Транспорт», работниками проектных организаций.

УДК 625.1.001.2(075.8)  
ББК 30.2

ISBN 978-985-891-121-8

© Довгелюк Н. В., Царенкова И. М.,  
Дубровская Т. А., 2023  
© Оформление. БелГУТ, 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

---

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОСНОВЫ ИЗЫСКАНИЙ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ.....	9
1.1 Сеть железных дорог, ее современное состояние и развитие .....	9
1.2 Роль железной дороги в единой транспортной системе страны .....	18
1.3 Содержание проектов железных дорог и порядок их разработки .....	22
1.4 Строительно-технические нормы проектирования новых, скоростных и реконструкции существующих железных дорог .....	24
1.5 Пропускная и провозная способности железных дорог.....	26
2 ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ .....	29
2.1 Виды изысканий железных дорог.....	29
2.2 Назначение, классификация и содержание экономических изысканий .....	30
2.3 Местные перевозки и определение местного района тяготения .....	34
2.4 Показатели экономических изысканий и их влияние на выбор категории железной дороги и ее основных технических параметров .....	37
2.5 Транзитный район тяготения .....	43
2.6 Определение транзитных перевозок.....	44
2.7 Определение размеров пассажирских перевозок .....	45
2.8 Особенности экономических изысканий при реконструкции железных дорог ...	46
3 ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРАССЫ, ПЛАНА И ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ .....	49
3.1 Трассирование железных дорог .....	49
3.2 Трассирование на напряженных и вольных ходах .....	51
3.3 Автоматизированное проектирование железных дорог с использованием программного продукта «ТОПОМАТИК ROBUR» .....	62
3.4 План железных дорог.....	69
3.5 Продольный профиль железных дорог .....	80
3.6 Обеспечение плавности, безопасности и бесперебойности движения поездов при проектировании продольного профиля .....	82
3.7 Экономические требования к проектированию плана и продольного профиля ..	87
4 ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ СРАВНЕНИЯ ВАРИАНТОВ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ	89
4.1 Варианты, их роль и требования, предъявляемые к ним при проектировании трассы.....	89
4.2 Показатели и критерии, используемые для сравнения вариантов .....	91
4.3 Определение капитальных вложений для сравнения вариантов .....	94
4.4 Эксплуатационные расходы для сравнения вариантов трассы .....	106
5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ РАБОТЫ ГРУЗОВОГО ПОЕЗДА ДЛЯ ПОДСЧЕТА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАСХОДОВ НА ОСНОВЕ ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ.....	117
5.1 Назначение тяговых расчетов. Расчетная модель поезда .....	117
5.2 Силы, действующие на поезд, и условия движения поезда под действием этих сил .....	122

5.3	Силы сопротивления движению поезда.....	124
5.4	Основное и дополнительные сопротивления .....	125
5.5	Сила тяги локомотива.....	134
5.6	Тяговые характеристики тепловозов и электровозов.....	135
5.7	Тормозные силы поезда.....	140
5.8	Определение массы состава грузового поезда .....	144
5.9	Диаграмма равнодействующих сил.....	149
5.10	Графические способы определения скорости и времени хода поезда.....	153
5.11	Определение механической работы локомотива, работы сил сопротивления, расхода топлива и электроэнергии .....	158
6	<b>ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И РЕКОНСТРУКЦИИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ .....</b>	<b>166</b>
6.1	Принятие решений при одноэтапных и многоэтапных капитальных вложениях .....	177
6.2	Показатели общей эффективности проектных решений: ЧДД, ИД, ВНД, срок окупаемости .....	195
6.3	Однокритериальные и многокритериальные, статические, детерминированные и недетерминированные задачи проектирования .....	201
6.4	Методология выбора оптимального варианта железной дороги по данным расчета капитальных вложений и эксплуатационных расходов .....	204
7	<b>ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПРИ ПЕРЕУСТРОЙСТВЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ .....</b>	<b>204</b>
7.1	Основы технико-экономического обоснования проекта .....	204
7.2	Особенности выбора оптимального проектного решения при реконструкции плана железных дорог.....	214
7.3	Эффективность повышения провозной способности железной дороги за счет введения в эксплуатацию тяжеловесных длинносоставных поездов .....	218
7.4	Особенности электрификации железных дорог .....	225
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А. Определение группы коэффициентов, стоимости и количества подвижного состава .....</b>	<b>245</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Определение стоимостей переходов из одних технических состояний в другие при сравнении вариантов овладения перевозками существующих железных дорог.....</b>	<b>247</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В. Расчет ежегодных эксплуатационных расходов для сравнения вариантов овладения перевозками при проектировании реконструкции существующих линий.....</b>	<b>250</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Нормы проектирования железных дорог .....</b>	<b>252</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д. План и продольный профиль участка железной дороги.....</b>	<b>253</b>
	<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>254</b>

## ВВЕДЕНИЕ

---

**В** единой транспортной системе страны железнодорожный транспорт занимает ведущую позицию. Он обеспечивает связи между различными отраслями народного хозяйства, влияет на процессы развития экономики страны, на размещение крупных народнохозяйственных объектов, освоение районов природных богатств, способствует ускорению доставки грузов и пассажиров к месту назначения, выполняя большой объем перевозочной работы, обеспечивая надежные и экономичные транспортные связи между регионами страны. Эти особенности работы должны учитываться проектировщиками, строителями, эксплуатационниками.

В подпрограмме 1 «Железнодорожный транспорт» Государственной программы «Транспортный комплекс» на 2021–2025 годы предусматривается:

- «развитие контейнерных перевозок грузов специализированными ускоренными поездами, оптимизация транспортно-логистических схем доставки грузов; эффективное использование основных фондов терминального комплекса;

- применение современных информационных технологий при планировании и организации грузовой коммерческой работы и обслуживания клиентов;

- повышение скорости движения поездов в межрегиональном и международном сообщениях;

- развитие применения электронных проездных документов и электронных продаж билетов;

- применение современного подвижного состава повышенной комфортности;

- участие в организации ускоренных пассажирских перевозок международного сообщения, следующих транзитом через Республику Беларусь;

- комплексное развитие железнодорожной инфраструктуры для надежного и безопасного выполнения графика движения поездов всех категорий;

- расширение использования электрической тяги для движения поездов; продолжение электрификации железнодорожных участков, модернизация контактной сети и тяговых подстанций;

- ускоренное развитие интеллектуальных транспортных систем, расширение использования цифровых технологий при перевозках грузов и пассажиров, реализация перехода на принципы цифровой железной дороги» [1].

Изучение дисциплины «Экономические изыскания при проектировании железных дорог» обеспечивает формирование профессиональных компетенций для работы в области экономического обоснования проектирования новых и реконструкции существующих железных дорог как сложных транспортных систем, постоянно функционирующих и развивающихся, на основе современного развития теории и практики проектирования.

В процессе движения поездов, меняющихся нагрузок и постоянного износа актуально проектирование, модернизация и реконструкция дорог, а также разработка новых строительно-технических норм проектирования. В связи с этим важным является грамотное экономическое обоснование строительства новых линий, проектирование реконструкции существующих дорог с усилением их мощности. Так как железные дороги относятся к стратегическим массовым объектам, реализация в них правильных решений позволяет экономить огромные финансовые ресурсы. Поэтому важно, чтобы в процессе учебы студент освоил современные и перспективные теоретические методы и приобрел практические навыки экономических изысканий железных дорог.

*Основными задачами дисциплины являются:* получение студентами знаний по комплексу вопросов, связанных с разработкой перспективных планов экономического развития железнодорожного строительства и реконструкции существующих железных дорог, а также технических заданий на проектируемые объекты; освоение студентами принципов и методов оценки эффективности развития транспортных систем, проектных и технологических решений с учетом конъюнктуры рынка; получение знаний по выполнению технико-экономического обоснования вариантов строительства или реконструкции существующих железных дорог.

В результате изучения дисциплины студент должен закрепить и развить базовую профессиональную компетенцию, предусмотренную образовательным стандартом ОСВО 1–37 02 05-2019: владеть методиками выявления возможных вариантов направлений железных дорог по условиям наиболее эффективного обеспечения межрайонных и внутрирайонных транспортных сетей (БПК-10).

Для приобретения компетенции в результате изучения дисциплины студент *должен знать:*

- основы технико-экономического обоснования (ТЭО) проектирования новых, модернизации, переустройства и реконструкции железных дорог, современные задачи проектного обеспечения объектов железнодорожного строительства;

- теоретические основы и практические методы определения размеров перевозок, границ местного и транзитного районов тяготения;

- теоретические основы и практические методы выполнения тяговых расчетов для целей определения эксплуатационных расходов и последующего выбора проектного решения при проектировании железных дорог;

- общие основы принятия решений при проектировании и реконструкции железных дорог;

*уметь:*

- производить анализ условий движения поезда по рельсовой колее под действием приложенных к нему сил;

- определять скорость, время хода поезда, механическую работу силы тяги локомотива, расход электроэнергии на тягу поездов;

- технически грамотно и экономически обоснованно определять эксплуатационные расходы железной дороги;
- определять объемы главнейших работ и строительную стоимость в целях сравнения вариантов;
- производить обследование и анализ устройств и средств технического оснащения существующих линий;

*владеть:*

- навыками выполнения тяговых расчетов при проектировании железных дорог;
- методами решения задач экономических изысканий – приемами выбора направления дороги на местности (или по карте в горизонталях), обеспечивающими плавность, безопасность и бесперебойность движения поездов;
- методами принятия решений по выбору оптимального варианта трассы с учетом местных условий и последующего содержания.

Ошибки при проектировании, особенно при выборе трассы, остаются на десятилетия, вызывая потери железнодорожного транспорта, что указывает на широкий круг вопросов, которые должны решать инженеры-проектировщики.

Квалификация и компетентность инженерных кадров в значительной степени определяют темпы научно-технического прогресса развития народного хозяйства. Решение современных задач социально-экономического развития общества требует постоянного улучшения профессиональной подготовки специалистов с высшим образованием.

Учебное пособие содержит 7 разделов, в которых приводятся общие сведения об изысканиях и основах проектирования железных дорог, стадиях и нормах проектирования, экономических изысканиях, показателях экономических изысканий и их влиянии на выбор категории и других сооружений железной дороги, трассировании, проектировании плана и продольного профиля дороги, о теоретических основах и практических методах выполнения тяговых расчетов для целей определения эксплуатационных расходов, о методологии определения капитальных вложений и эксплуатационных расходов и использовании их для принятия проектных решений, методологии и особенностях выполнения технико-экономического обоснования и выбора оптимального проектного решения при реконструкции железных дорог, а также примеры решения задач, справочный материал и рекомендации по самостоятельной учебной работе студентов.

Для проектирования железных дорог используются результаты тяговых расчетов, основанные на изучении сил, действующих на поезд, условий движения поезда под действием приложенных сил и методах решения практических задач (определение веса грузового поезда при известном продольном профиле и заданном локомотиве, определение скоростей движения и времени хода поезда, решение тормозных задач, определение расхода электроэнергии и топлива, определение механической работы силы тяги локомотива и работы сил сопротивления).

Специфика тяговых расчетов при проектировании железных дорог состоит в том, что в них основное внимание уделяется выбору проектного решения, в отличие от курса тяги поездов, где рассматриваются вопросы устройства, конструкции и испытания подвижного состава. Тяговым расчетам посвящены труды таких ученых, как Гребенюк П. Г., Бабичков А. М., Турбин И. В., Негрей В. Я., Кантор И. И. и др.

Основными задачами экономических изысканий являются обоснование проектных решений по выбору рационального варианта основных технических параметров проектирования железной дороги и средств ее технического оснащения, определение размеров грузовых и пассажирских перевозок на расчетные годы, влияние проектируемой железной дороги на работу автомобильного и речного транспорта, определение значения железных дорог как основного звена единой транспортной системы и другие задачи.

Изложена методика технико-экономического обоснования принимаемых проектных решений, которая является обязательной составной частью проектов железных дорог. Методы обоснования определяются характером решаемых задач и стадий проектирования. На стадии обоснования инвестиций возникает необходимость оценки возможных вариантов направления проектируемой линии с целью исключения заведомо неконкурентоспособных вариантов. Такая оценка производится по некоторым важнейшим показателям трассы: ориентировочной длине линии, сумме преодолеваемых высот, характеристике пересекаемых водотоков и другим показателям.

Без экономических изысканий невозможно разработка ни одного из проектов проектирования, строительства, модернизации и реконструкции железной дороги, так как сначала определяется целесообразность и необходимость вкладываемых инвестиций, получаемых выгод от проекта, а затем уже осуществляется его разработка. При написании учебного пособия были использованы нормы проектирования железных дорог колеи 1520 мм (СТН Ц–01–95. Правила тяговых расчетов для поездной работы (ПТР [9]), СНБ 3.03.01-98) [3], Свод правил СП 119.13330.2012 Железные дороги колеи 1520 мм.

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам: заведующему кафедрой экономики и логистики Белорусского национального технического университета, члену-корреспонденту НАН Беларуси, доктору экономических наук, профессору *Р. Б. Ивутью*; начальнику технического отдела службы пути Управления Белорусской железной дороги *Н. Е. Мирошникову* за ценные замечания и пожелания, которые позволили более точно определить многие принципиальные положения работы и способствовали существенному улучшению качества учебного пособия, а также аспирантам *Драловой И. П.* (подразд. 3.3) и *Масловской М. А.* (подразд. 7.4) за помощь в написании подразделов.



# 1 ОСНОВЫ ИЗЫСКАНИЙ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

---

## 1.1 Сеть железных дорог, ее современное состояние и развитие

**Т**ранспорт – одна из важнейших отраслей экономики государства. Он обеспечивает производственные связи промышленности и сельского хозяйства, осуществляет перевозки грузов и пассажиров. Объем и структура транспортных перевозок отражают уровень и структуру экономики, а география транспортной сети и грузопотоков – размещение производительных сил.

Перемещая различные виды продукции из мест производства в места их потребления, осуществляя перевозки пассажиров, транспорт не создает новой продукции. Его продукцией является сам процесс перевозок грузов и пассажиров.

**Транспортной сетью** называется совокупность транспортных связей, по которым осуществляются пассажирские и грузовые перевозки. Укрупненно транспортную сеть можно разбить на три группы:

- группа, соединяющая пункты между собой по кратчайшим направлениям (воздушный, трубопроводный, морской транспорт);
- естественные пути сообщения – главным образом это реки и пригодные для перемещения внедорожных транспортных средств участки земной поверхности;
- дороги – основная группа транспортной сети, по которой перемещается наибольшее количество грузов и пассажиров.

Дороги по особенностям перемещения делятся на рельсовые (железнодорожная сеть) и безрельсовые (сеть автомобильных дорог).

**Железнодорожная сеть** образуется совокупностью железнодорожных путей и позволяет выполнять перевозки между всеми станциями, имеющими железнодорожные пути общего пользования.

**Железнодорожный транспорт** – важнейшая отрасль народного хозяйства нашей страны. Территория, природные условия Беларуси, расположение месторождений полезных ископаемых, состояние автомобильных работ определяют в настоящее время и в обозримой перспективе базовую роль железнодорожного транспорта в функционировании экономики. При этом роль железных дорог в условиях рыночного хозяйства значительно возрастает, так как от их работы прямо зависят ускорение или замедление достав-

ки пассажиров и грузов, скорость оборота капитала, себестоимость промышленной и сельскохозяйственной продукции.

Основными задачами транспорта являются своевременное качественное и полное удовлетворение народного хозяйства в перевозках, повышение эффективности его работы. Необходимо согласованное развитие единой транспортной системы страны, совершенствование координации работы всех видов транспорта [3].

В последнее время к качеству перевозочного процесса на железных дорогах предъявляются новые, более высокие, требования. На первый план выходят требования клиентов в отношении комфортности проезда и сокращения сроков нахождения в пути. Введение в практику нового качества перевозок приводит к повышению требований к инфраструктуре железных дорог: созданию нового подвижного состава, станционных устройств, модернизации систем сигнализации, информации, связи и в первую очередь переустройству всех основных элементов железнодорожного пути (плана и профиля линии, искусственных сооружений, земляного полотна, верхнего строения пути).

Кардинальное повышение эффективности работы железнодорожного транспорта находится в тесной связи с решением проблемы повышения скоростей как в грузовом, так и в пассажирском движении, что особенно важно в условиях самофинансирования железнодорожных предприятий.

Тенденции мирового товарооборота ставят перед Белорусскими железными дорогами и транспортными компаниями актуальную задачу – осуществление доставки транзитных грузов максимально быстро и на качественном уровне, соответствующем требованиям клиентов. В этих условиях возникает актуальность вопроса об увеличении скоростей движения поездов.

Железнодорожный транспорт имеет следующие технико-экономические особенности:

- возможность прокладки на любой сухопутной территории;
- осуществление перевозок на огромных пространствах;
- регулярность перевозок в любое время суток, года, в любую погоду независимо от климатических условий;
- массовость перевозок;
- возможность перевозки негабаритных грузов;
- реализация больших скоростей движения при относительно высокой степени безопасности;
- большая маневренность в использовании вагонного парка, изменении направлений вагонопотоков в обход поврежденных или загруженных участков;
- относительно низкая себестоимость перевозок грузов и пассажиров;
- наименьшее отрицательное воздействие на окружающую среду;
- большая значимость во внешнеэкономических связях и в деле обороны страны.

Железнодорожный транспорт – основной в транспортной системе страны. Его ведущее значение обусловлено двумя факторами: технико-экономическими преимуществами над большинством других видов транспорта (в отличие от речного и морского транспорта) и географическими особенностями нашей страны.

В последние годы вследствие существенного развития международной торговли в значительной степени увеличились объемы потоков перевозок грузов в международном сообщении. Самые короткие дороги, соединяющие страны Западной Европы со странами СНГ, а также Южную и Центральную Европу с северо-западными регионами России, Балтии и Скандинавии, проходят через территорию Республики Беларусь. Становление Республики Беларусь как суверенного государства, благоприятное географическое положение между странами Западной, Центральной, Восточной Европы, Балтии, Скандинавии, России, Украины и странами Азии и Ближнего Востока способствуют интеграции республики в мировую транспортную систему.

С целью согласованного развития транспортных систем для осуществления внешнеэкономических связей и обеспечения беспрепятственного передвижения грузов и пассажиров через национальные границы в странах Евроазиатского континента предусмотрено формирование международных транспортных коридоров, представляющих собой совокупность магистральных коммуникаций с соответствующей инфраструктурой при использовании различных видов транспорта на направлениях, имеющих важное международное значение [1].

Территория нашей страны расположена на пересечении кратчайших торговых путей между странами Европы, Центральной Азии и Азиатско-Тихоокеанского региона, где формируются основные международные транспортные потоки, которые создают международные транспортные коридоры.

**Международный транспортный коридор** (транспортный коридор) – высокотехнологическая транспортная система, концентрирующаяся на генеральных направлениях наземного транспорта общего пользования (железнодорожный, автомобильный, речной) и телекоммуникациях.

Исторически так сложилось, что через Беларусь во все времена проходили транспортные коммуникации между различными государствами, народами и цивилизациями.

На второй Общевропейской конференции по транспорту на о. Крит (Греция) в марте 1994 года были определены 13 общевропейских и 10 панъевропейских транспортных коридоров, инфраструктуру которых решено модернизировать и довести до соответствия текущим и будущим потребностям в перевозках в условиях развивающейся Европы.

В состав международных транспортных коридоров включаются транспортные коммуникации, соответствующие следующим критериям:

- совпадение их с согласованными международным сообществом интегрированными направлениями международных транспортных связей;
- максимальное использование существующих хорошо технически оснащенных транспортных коммуникаций, имеющих значительные резервы провозной способности;
- конкурентоспособность цены перевозки на всём маршруте груза;
- приемлемые сроки следования грузов от производителя до потребителя продукции в сравнении с конкурентными маршрутами;
- надлежащее качество перевозок.

К основным задачам формирования и развития международных транспортных коридоров относятся:

- рационализация взаимодействия между различными видами транспорта в интермодальной транспортной цепи;
- оптимизация транспортного процесса с целью повышения качества перевозок и снижения транспортных издержек в конечной стоимости товаров;
- содействие освоению новых территорий и развитию приграничного сотрудничества, освоению новых внутренних и международных рынков;
- повышение мобильности населения и улучшение транспортной доступности регионов;
- повышение привлекательности инвестиционных проектов развития международных транспортных коридоров;
- содействие развитию международного туризма и культурных связей.

При развитии сети транспортных коридоров исходят из следующего определения: **железнодорожный транспортный коридор** – это комплекс наземных железнодорожных магистралей и железнодорожно-водных переправ с современным техническим оснащением, предназначенных для концентрации в них международных транзитных перевозок с минимальными сроками доставки грузов и пассажиров, высокими эксплуатационными и экономическими показателями.

Коридоры разделены на три категории:

- широтного направления (Восток – Запад); меридионального направления (Север – Юг); занимающие промежуточное положение между коридорами широтного и меридионального направлений.

Основные требования к коридорам:

- коридор проходит по основной магистральной железной дороге, по которой осуществляется большой объём международных перевозок грузов и пассажиров или будет осуществляться в будущем;
- коридоры соответствуют международным техническим параметрам согласно требованиям Соглашения о международных магистральных железнодорожных линиях (СМЖЛ);
- коридор проходит по территории нескольких государств;
- маршрут коридора проходит по кратчайшему расстоянию между грузообразующими и грузопогашающими центрами.

Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД) определила 10 основных железнодорожных панъевропейских коридоров на основе грузоперевозок, осуществляемых между странами двух континентов:

I – Хельсинки – Таллин – Рига – Каунас – Варшава;

II – Берлин – Варшава – Минск – Москва – Нижний Новгород;

III – Берлин/Дрезден – Вроцлав – Львов – Киев;

IV – Берлин/Нюрнберг – Прага – Братислава – Будапешт – Констанца/Салоники/Стамбул;

V – Венеция – Триест/Копер – Любляна – Будапешт – Ужгород – Львов;

VI – Гдыня – Варшава – Катовице – Жилина;

VII – По р. Дунай;

VIII – Дуррес – Тирана – Скопье – София – Бургас;

IX – Хельсинки – С. Петербург – Москва – Киев – Кишинев – Бухарест – Димитровград – Александруполис;

X – Зальцбург – Любляна – Белград – Ниш– Скопье – Велес – Салоники, а также 13 основных железнодорожных направлений, которые соединяют Европу и Азию.

На сегодня активно работают и развиваются Международные транспортные коридоры, проходящие по территории Евразийского экономического союза. Территория ЕАЭС имеет важное экономико-географическое расположение в силу нахождения между такими крупными мировыми рынками, как Китай, Евросоюз, Азиатско-Тихоокеанский регион.

**Транспортный комплекс страны** – это совокупность отраслей экономики, целью деятельности которых является удовлетворение потребностей населения и субъектов экономической деятельности страны в перевозке пассажиров и грузов. К объектам транспортного комплекса обычно относятся транспорт, транспортная промышленность (транспортное машиностроение, транспортное строительство, материально-техническое обеспечение перевозочного процесса), учреждения и организации по подготовке кадров для транспорта, учреждения по проведению проектных и научно-исследовательских работ, ремонтные предприятия [27].

Комитет по внутренней комиссии ООН дал определение транспортного коридора.

**Транспортные коридоры** – часть национальной или международной транспортной системы, которая обеспечивает значительные международные грузовые и пассажирские перевозки между отдельными географическими районами, включает в себя подвижной состав и стационарные устройства всех видов транспорта, работающих на данном направлении, а также совокупность технических, организационно-правовых условий осуществления этих перевозок.

По типу Европейских были сформированы транспортные коридоры Евразийского региона.

**Евроазиатские транспортные коридоры** – железнодорожные транспортные коридоры, которые на данный момент являются приоритетным направлением для реализации транзитного потенциала в странах ЕАЭС ввиду развитости системы железнодорожной коммуникации на территории бывшего СССР. Доля международных перевозок в общем объеме грузооборота железнодорожным транспортом в России составляет 90 %, в Казахстане – до 72 % [27].

В настоящее время принято считать (и об этом говорится во всех трех декларациях международных евразийских конференций по транспорту, прошедших в г. Санкт-Петербурге в 1998, 2000 и 2003 годах, в которых принимали участие министры транспорта многих европейских и азиатских государств), что транспортировка грузов технологически в евразийском сообщении может осуществляться по следующим маршрутам.

1 Трансиб (Берлин – Находка) – 9200 км (основная) и 18596 км (с ответвлением). Ответвлений несколько – через Нижний Новгород и Казань на Казахстан – Китай, Монголию – Китай, Корейский полуостров. Есть два ответвления: от Архангельска до Перми и от Тайшета до Комсомольска на Амуре и порта Ванино.

2 Север – Юг – 6500 км. Европа (Хельсинки), через Санкт-Петербург – Рязань – Волгоград, по Каспийскому морю – Иран (Тегеран) – Дубай, по Аравийскому морю до Индии (порт Мумбай).

К основным грузам, перевозимым по коридору, относят зерно, пиломатериалы, нефтяные грузы и химикаты. Товары поставляют Азербайджан, Иран, Италия.

3 Северный Трансазиатский коридор (Чоп – Киев – Москва – Челябинск – Достык – Алашанькоу – Ляньюньган (Вост. Китай);

4 Центральный Трансазиатский коридор (Киев – Волгоград – Алматы – Актогай – Достык – Алашанькоу – Ляньюньган (Вост. Китай);

5 Южный – 11700 км. Ляньюньган (Вост. Китай) – Достык (Казахстан) – Узбекистан – Туркмения – Тегеран (Иран) – Пакистан – Индия (Калькутта) – Бангкок (Таиланд). Ветвь от Тегерана до Стамбула.

6 Трасека – Актогай (Казахстан, недалеко Достык) – Ташкент – Бухара – Ашхабад (Туркменистан) – Тбилиси – Потти (порт) – через Черное море разветвление на Одессу, Констанца (Румыния), Бургас (Болгария) и Стамбул (Турция) – 4500 км основная ось.

Морские коридоры: Северный морской коридор (путь) 5600 км. от Вост. Азии (Японское море до Гамбурга и Лондона) и Южный морской путь от Японского и Желтого морей ло Роттердама и Гамбурга.

В свете активно развивающихся торговых отношений европейских стран с Индией необходимо также отметить мультимодальный МТК Север – Юг, который связывает европейский северо-запад и страны Скандинавии с Центральной Азией и Персидским заливом. Маршрут Север – Юг опирается на мощную и разветвленную сеть транспортных коммуникаций России, Ирана, Казахстана и

ряда других стран. Общая протяженность коридора от порта Бомбей (Индия) до Санкт-Петербурга (Россия) составляет 7200 км [27].

Комплексные планы с мероприятиями по дальнейшему развитию железнодорожной инфраструктуры с технико-эксплуатационными показателями и паспортами всех коридоров утверждены сессиями Совещания Министров ОСЖД. В них даны мероприятия по развитию железнодорожной инфраструктуры по каждому участку коридора и показан ход их реализации, представлена сравнительная динамика объемов перевозок грузов, которая достигнута в результате реализации данных мероприятий. Технико-эксплуатационные показатели с паспортами показывают техническую оснащённость и «узкие места» коридора по каждому участку, дают характеристики терминалов, пункты пересечения границ и систему транспортного права и тарифов [27].

**Трансевропейские коридоры, проходящие через территорию Республики Беларусь.** Белорусская железная дорога, находясь на стыке железных дорог разной ширины колеи, располагает развитым грузовым потенциалом. Ее перегрузочные мощности в настоящее время имеют достаточные резервы для увеличения объемов грузовых железнодорожных перевозок. Являясь одним из звеньев транспортного конвейера, железная дорога Беларуси принимает всевозможные меры по беспрепятственному перемещению грузопотоков, следующих между странами Европы и Азии, созданию благоприятных условий развития транзитных перевозок грузов, удовлетворению интересов грузовладельцев, транспортно-экспедиционных компаний по поставкам товаров.

На современном этапе развития международных экономических отношений повышение транзитной привлекательности государства призвано стать одним из приоритетов в планировании его транспортной политики.

Республика Беларусь обладает уникальным географическим положением. На всех этапах исторического развития белорусская земля была и остается важным связующим звеном между странами Запада и Востока. Сегодня через территорию Беларуси проходит два крупнейших транспортных коридора Европы, что предопределяет высокий транзитный потенциал страны и создает возможности для роста экспорта транспортных услуг. Именно эти транспортные артерии составляют основу транзитной политики Республики Беларусь. Именно с ними связывается будущее в плане пополнения бюджета. Кроме того, международные транспортные коридоры влияют на промышленную, продовольственную, демографическую, военную и технологическую безопасность. Они играют особую роль в социально-экономическом развитии республики.

Для Республики Беларусь как внутриконтинентального государства, не имеющего выхода к морю, а также не обладающего значительными топливно-энергетическими и сырьевыми ресурсами, особое значение приобретают транзит и поиск новых перспективных рынков транспортных услуг. Прохождение через территорию нашей страны II и IX международных транспортных коридоров обуславливает высокую степень ее транзитивности. Благодаря развитой

инфраструктуре и привлекательности географического положения Беларусь может стать своеобразным интегрирующим звеном в торговле между странами Европейского союза и Азиатско-Тихоокеанского региона, если будет придавать значение транзиту как важнейшему потенциалу национальной экономики.

Транспортный комплекс Республики Беларусь имеет значительный потенциал для увеличения своего вклада в общий объем валового национального продукта. В первую очередь это относится к международным перевозкам, эксплуатации транспортных коридоров. Транспортный сектор обеспечивает значительные поступления в доходную часть бюджета за счет транзитных услуг, способствует развитию внутренней и внешней торговли и вносит вклад в платежный баланс страны, в котором по статье «услуги» наблюдается положительное сальдо.

В 2019 году железнодорожным транспортом перевезено 79,7 млн пассажиров, а также около 145,5 млн т грузов. Поездами городских линий воспользовались 4,0 млн человек, региональных эконом класса – 61,4 млн человек, региональных бизнес-класса и межрегиональных – 10,5 млн человек, международных – 3,8 млн человек.

Хорошим примером на рынке транспортных услуг стал курсирующий с 1995 г. по маршруту Берлин – Брест – Москва контейнерный поезд «Восточный ветер». В состав поезда включаются контейнеры назначением не только на станции Московского узла, но и на другие станции России и стран СНГ [8].

Начиная с 2002 г. по согласованию с железными дорогами Польши, России и Казахстана по станции Брест начато формирование контейнерного поезда по маршруту Брест – Осиновка – Красное – Илецк-1 – Актобе «Казахстанский вектор». В составе поезда следуют грузы назначением на станции казахских, узбекских, туркменских, таджикских, киргизских железных дорог. В 2007 г. маршрут поезда продлили до Арыси.

С начала 2001 г. по маршруту Роттердам – Бремерхафен – Брест – Бекасово курсирует контейнерный поезд, которому по обращению оператора присвоен статус контейнерного поезда «Содружество».

С марта 2002 г. курсирует специализированный контейнерный поезд «Монгольский вектор» по маршруту Брест – Наушки – Улан-Батор. В его состав включаются контейнеры, доставляемые в Брест как по железной дороге другими грузовыми поездами, так и автотранспортом. Прибывшие в Брест контейнеры накапливаются и хранятся на контейнерном терминале до начала формирования поезда.

В рамках поезда «Монгольский вектор» с марта 2005 г. организован пропуск контейнерного поезда по маршруту Китай – Монголия – Россия – Беларусь – Германия. В составе поезда следуют контейнеры назначением не только в Польшу и Германию, но и в Республику Беларусь. Время следования поезда из Монголии до станций Белорусской железной дороги составляет 8 суток [13].



По территории страны проходят два международных железнодорожных транспортных коридора (рисунок 1.1):

№ II Берлин – Варшава, Минск – Москва – Нижний Новгород (в пределах республики железнодорожный участок Брест – Минск – Орша – Осиновка);

№ IX – Хельсинки – С. Петербург – Киев – Кишинев – Бухарест – Димитровград – Александрополис (в пределах республики железнодорожные участки Езерище – Витебск – Могилев – Жлобин – Гомель – Терюха и ответвление IX В – Жлобин – Минск – Гудогой).

В 2021 году продолжена работа по наращиванию объемов перевозок с максимальным использованием возможностей развития западного маршрута международного транспортного коридора «Север – Юг», контейнерных перевозок «Китай – Европа – Китай».



Рисунок 1.1 – Схема транспортных коридоров на территории Республики Беларусь

В рамках развития железнодорожной инфраструктуры указанных транспортных коридоров Белорусской железной дорогой реализуются проекты, направленные на увеличение пропускной способности станций, ремонту пути, замене и модернизации технических средств сигнализации и связи, реконструкции искусственных сооружений и др.

Скорости движения пассажирских поездов по участкам П коридора составляют: 160 км/ч протяженностью 37 км, 140 км/ч протяженностью 636 км развернутой длины участка, 120 км/ч протяженностью 299 км развернутой длины участка, 100 км/ч протяженностью 170 км.

Перспективными являются перевозки в сообщении Север – Юг – Север, в том числе по IX Европейскому транспортному коридору между странами Балтийского и Черного морей. Связующим звеном в направлении Балтийское море – Черное море являются организованные железными дорогами Беларуси, Украины и стран Балтии перевозки грузов ускоренными контейнерными поездами.

## **1.2 Роль железной дороги в единой транспортной системе страны**

**Единая транспортная система** представляет собой совокупность всех видов транспорта, связанных экономическими, технологическими, техническими и нормативно-правовыми взаимоотношениями и обеспечивающих экономические и социальные потребности страны в перевозках. Базовой основой единой транспортной системы является сеть путей сообщения – железнодорожных, автодорожных, водных, трубопроводных, воздушных. Ведущее значение железнодорожного транспорта в этой системе обусловлено технико-экономическими преимуществами его над другими видами транспорта.

Ведущее значение железнодорожного транспорта обусловлено технико-экономическими преимуществами его над другими видами транспорта в единой транспортной системе страны, а также расположением Беларуси в центре Европы.

Эксплуатационная длина Белорусской железной дороги – 5,5 тыс. км из них двухпутные участки составляют 30,1 % эксплуатационной длины, электрифицировано 23 % железной дороги. Автоматической блокировкой оборудовано 67 %, диспетчерская централизация действует на 58,5 % эксплуатационной длины; электрической централизацией оборудовано 95,9 % стрелочных переводов; перевозки осуществляются тепловозной и электрической тягой, в основном на переменном токе.

В общем отправлении грузов ведущее место занимают строительные, лесные, машиностроительные грузы, калийные соли, щебень, песок, продукты сельского хозяйства, продовольственные товары и другие грузы. Большой удельный вес приходится на пассажирские перевозки.

Большое значение в экономике Беларуси имеет автомобильный транспорт. В республике имеется разветвленная сеть автодорог, обеспечивающая постоянную связь со всеми населенными пунктами. Через территорию страны совершается большой объем транзитных автомобильных перевозок, которые осуществляют перевозчики более чем полусотни стран. Террито-

рию Беларуси пересекают два трансъевропейских транспортных пути: Север – Юг и Запад – Восток. В год автомобильным транспортом перевозится свыше 160 млн т грузов (более 50 % среди всех видов транспорта) и свыше 1,4 млрд пассажиров (более 59 %).

Широкие границы применения автотранспорта определяются его достоинствами, преимуществами перед другими видами транспорта:

- возможностью непосредственной доставки грузов, пассажиров, т. е. «от двери до двери» (без перегрузок, пересадок);
- разнообразием типов подвижного состава по назначению, грузоподъемности, пассажироместимости, что позволяет перевозить грузы и пассажиров без накопления их в грузо- и пассажирообразующих центрах;
- приспособленностью к перевозке грузов различных размеров и массы;
- оперативностью организации перевозок;
- малыми первоначальными капитальными вложениями;
- высокой скоростью доставки;
- большой мобильностью, возможностью оперативно реагировать на изменение грузо- и пассажиропотоков.

Вследствие существенного развития международной торговли в значительной степени увеличились объемы перевозок грузов в международном сообщении. Самые короткие дороги, соединяющие страны Западной Европы со странами СНГ, а также Южную и Центральную Европу с северо-западными регионами России, Балтии и Скандинавии, проходят через территорию Республики Беларусь. Становление Республики Беларусь как суверенного государства, благоприятное географическое положение между странами Западной, Центральной, Восточной Европы, Балтии, Скандинавии, России, Украины и странами Азии и Ближнего Востока способствуют интеграции республики в мировую транспортную систему.

В настоящее время на транспорте Евразийского экономического союза проводится большая работа по дальнейшему укреплению транспортно-экономических связей, развитию инфраструктуры Евразийских транспортных коридоров, обновлению и восстановлению парков подвижного состава, созданию и расширению сети сервисных станций по диагностике, обслуживанию и ремонту автотранспортных средств, совершенствованию системы тарифо- и ценообразования, стабилизации финансового положения и развития транспортного комплекса [27].

Рост объемов промышленного производства и внешней торговли требует от отечественного транспорта наращивания объемов и повышения качества экспортно-импортных и международных транзитных перевозок грузов. Для увеличения экспорта транспортных услуг, интеграции в мировую транспортную систему необходимо продолжить создание благоприятных правовых, организационных и экономических условий в области международных перевозок грузов и пассажиров.

Проводятся исследования по разработке научных проблем экономии топливно-энергетических и материальных ресурсов, развитию научных принципов совершенствования диспетчерского управления на базе современных средств вычислительной и микропроцессорной техники, созданию надежной информационной базы для планирования и регулирования поездо- и вагонопотоками, соединению АСУЖТ с устройствами ЖАТ и автоматизации рабочих мест массовых профессий. Круг исследований включает в себя совершенствование пассажирских перевозок, создание на базе региональных систем АСУ «Экспресс-2» общей системы управления пассажирскими перевозками, разработку комплекса научно-технических вопросов организации движения объединенных пассажирских и пригородных поездов и фундаментальных научных вопросов организации высокоскоростного движения (250–300 км/ч) [11, 12].

Решаются проблемы оптимизации грузовой работы, комплексной механизации погрузочно-разгрузочных работ, совершенствования технологии и коммерческих правил перевозки грузов, обеспечения их сохранности, создания средств автоматизации управления локомотивами, диагностических систем для подвижного состава на базе микропроцессорной техники. Интенсификации процессов научных исследований способствует широкое внедрение автоматизированных систем проектирования и обработки экспериментальных данных, современных методов математического моделирования и ускоренных испытаний.

Современная железная дорога, являясь сложнейшей технической системой, ставит перед проектировщиком трудную и ответственную задачу по определению оптимальных параметров составляющих ее объектов-подсистем, между которыми существуют устойчивые различные взаимосвязи: структурные, функциональные, физические и др. Разнообразие природных, технических, экономических и прочих факторов приводит к появлению инвариантности инженерных решений, среди которых опытный проектировщик и должен отыскать лучшее.

Для получения исходных данных используется космическая съёмка. В наземных изысканиях при геодезических работах применяются новые приборы для измерения длин (свето- и радиодальномеры), геодезические инструменты-автоматы.

Значительную роль в развитии современных методов изысканий и определении параметров пространственного положения объектов, в том числе совершенствования определения координат, сыграло создание в 1990-х гг. глобальных систем позиционирования: в США – Global Positioning System (GPS), в России – глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС).

В процесс геодезических GPS-измерений вовлекаются как минимум четыре спутника и два приемника. GPS-технология позволяет построить про-

странственный вектор между двумя этими приемниками, создавая таким образом базовую линию. Измерения отличаются достаточно высокой точностью и позволят гораздо быстрее, чем с помощью привычных методов, определить расстояние с детализацией до сантиметра.

Основой системы ГЛОНАСС являются 24 спутника, движущихся над поверхностью Земли в трех орбитальных плоскостях с наклоном  $64,8^\circ$  и высотой 19 100 км. Принцип измерения аналогичен американской системе GPS.

В практику изыскательских работ прочно вошли приборы для определения географических координат, электронные тахеометры, георадары, а также прогрессивные методы георадиолокации земляного полотна для грунтово-гидрогеологических изысканий. Проектирование осуществляется с применением различных автоматизированных программных комплексов.

Научные и проектные организации разрабатывают, развивают и применяют автоматизированную систему проектирования железных дорог. Создаются и внедряются в практику проектирования составные части этой системы – технологические линии проектирования, ориентированные на применение персональных компьютеров. Автоматизация (цифровизация) проектирования – основное направление развития теории и практики проектирования железных дорог, призванное повысить качество проектов и сократить сроки их разработки. Сначала компьютеры применялись для выполнения расчётов с использованием традиционных известных методов с целью экономии времени. Это позволило расширить рамки проектирования, рассматривать и сопоставлять большее число возможных решений проектной задачи, что привело к улучшению конечных результатов проектирования.

Многие проектные задачи оказалось целесообразным решать в режиме взаимодействия инженера и компьютерной техники. Затем стали разрабатывать методы, основанные на применении математики и математического программирования, позволяющие находить оптимальное по некоторому критерию решение. Эти методы дали возможность при решении ряда задач проектирования железной дороги отказаться от применявшегося в течение длительного времени принципа варьирования, когда назначаются и сравниваются вариантные решения, в число которых может не войти лучший вариант.

Разработаны и внедрены технологические линии проектирования оптимального продольного профиля железных дорог, в основу которых положены методы, использующие проекцию градиента. Задача автоматизации проектирования трассы (плана и продольного профиля) новой железной дороги требует создания специальных методов цифровой информации о рельефе местности и других природных факторах, влияющих на положение трассы.

Надежным инструментом в разработке проектов железных дорог и реконструкции существующих в настоящий момент являются различного рода

САПР, а также отдельные программные продукты, широко используемые практически в каждой проектной организации. Именно поэтому, подготавливая высококлассных инженеров железнодорожников (в том числе проектировщиков), необходимо еще на студенческой скамье обучать их навыкам выполнения проектных работ с помощью современных средств автоматизации и цифровизации железной дороги.

### **1.3 Содержание проектов железных дорог и порядок их разработки**

При разработке проектной документации следует руководствоваться законодательными и нормативными актами Республики Беларусь, техническим кодексом, иными документами, регулирующими инвестиционную деятельность [24].

Основные стадии проектирования строительства и реконструкции железных дорог включают в себя:

- обоснование целесообразности инвестиций, то есть финансовой важности выполнения задачи;
- архитектурный проект;
- разработку строительного проекта.

Стадия «Обоснование инвестиций» включает в себя финансовый расчет, который позволяет судить о целесообразности реализации строительства или модернизации железной дороги. Для этого необходимо предоставить:

- свидетельства экономической выгоды внедрения такого решения;
- подтверждения социальных преимуществ – той пользы, которую получают пользователи линии;
- доказательства коммерческих вливаний – данные о том, какие компании готовы вложиться в материальный фонд строительства.

При этом приводятся технические показатели объекта (количество мостов, предполагаемый режим функционирования и т. п.), указываются сроки и очередность возведения, подсчитываются смета, трудовые ресурсы, число единиц техники. Всё это предполагает анализ местоположения, пропускной способности развязки, ее окупаемости, нагрузки и даже того влияния, которое железная дорога окажет на окружающую среду.

При положительном решении об эффективности железной дороги переходят ко второй стадии, которую называют «Архитектурный проект». *Архитектурный проект* включает разработку проектной и сметной документации; генеральный план и транспорт, технологические и строительные решения, организацию строительства, архитектурно-строительные решения, эффективность инвестиций, энергетическую эффективность, мероприятия по охране окружающей среды, паспорт объекта.

В общем случае проектную документацию разрабатывают в два последовательных этапа. На первом этапе разрабатывается проект, после согласования и утверждения которого переходят ко второму этапу – составлению рабочей документации.

При разработке проекта проводятся инженерные изыскания, которые дают информацию о прочности и деформациях грунта, о топографии и других характеристиках рассматриваемой площадки. Поэтому проект строительства железной дороги включает в себя следующие подвиды инженерных поисков:

*Геодезические* – изучается рельеф со всеми его впадинами и возвышенностями с рассмотрением целесообразности сооружения подложки и/или прокладки рельсов и оценкой техногенных особенностей.

*Геологические* – исследуются грунтовые породы (их содержание, строение, прочность), вычисляется вероятность возникновения сдвигов в коре и образования трещин или оползней.

*Гидрометеорологические* – определяется разница температур и количество осадков, и на основании этих данных выбираются материалы и конфигурация транспортных развязок.

*Гидрологические* – при проектировании железнодорожных путей необщего пользования и строительства железных дорог рассматривается даже состав подземных вод и особенности ближайших прудов, озер, рек. Это нужно, чтобы учесть влияние жидкости на образование коррозии и понять, требуется ли проводить какие-либо мероприятия по защите от действия влаги.

*Экологические* – устанавливается степень потенциального вреда для местности и предлагаются более щадящие способы возведения и эксплуатации маршрутов и станций.

Помимо инженерных проводятся еще и экономические изыскания, в ходе которых выясняется интенсивность нагрузок (через расстояния и общий тоннаж), востребованность линии среди пассажиров, неравномерность функционирования в течение годового цикла. Также выбирают варианты по использованию материалов, способов крепления шпал, эпюру шпал.

В состав строительного проекта входят расположение и проверка трассы на имеющемся рельефе, установка величины пикетажа, анализ и объединение некоторых элементов. И такой подход позволяет успешно осуществлять как типовое, так и индивидуальное проектирование железнодорожных путей. В состав строительного проекта также должен входить раздел «Основные положения по эксплуатации, эксплуатационная безопасность».

## **1.4 Строительно-технические нормы проектирования новых, скоростных и реконструкции существующих железных дорог**

Действующие строительно-технические нормы Республики Беларусь (Железные дороги колеи 1520 мм. СНБ 3.03.01–98) представляют собой основной нормативный документ по проектированию новых и реконструкции существующих железных дорог [21].

СНБ построены по общепринятому принципу комплексного проектирования железных дорог, содержат необходимые указания по всем основным разделам комплексного проекта, но не по всем элементам проекта определяют жесткие нормативные требования, т. к. ряд норм проектирования в значительной мере зависит от конкретных условий их применения. Этим обстоятельством и определяется разная степень конкретизации отдельных требований и норм, в которых содержатся следующие **в и д ы н о р м а т и в н ы х у к а з а н и й**:

а) принципиальные указания по выбору основных параметров проектируемых линий, по мощностям отдельных сооружений и устройств и технико-экономическому обоснованию тех или иных проектных решений;

б) требования стандартизации в таких разделах и элементах проекта, как типы верхнего строения пути, радиусы кривых, размеры поперечных профилей земляного полотна и др.;

в) ограничения ряда норм по их минимальным значениям (ширина земляного полотна, величина междупутья, толщина балластного слоя и т. д.) или по их максимальному значению (крутизна ограничивающих уклонов);

г) указания о возможности применения двух категорий норм, предельно допускаемых и рекомендуемых (по величине радиусов круговых кривых, сопряжению уклонов продольного профиля и др.);

д) расчетные нормы по проектированию различных сооружений и устройств на дороге, в том числе по плану и профилю железных дорог, земляному полотну и верхнему строению пути.

Объединение норм и правил проектирования новых и реконструкции существующих железных дорог в одном документе неслучайно, так как и к новым, и к существующим железным дорогам при их реконструкции предъявляются одинаковые требования по обеспечению безопасности движения поездов, созданию условий повышения производительности труда при строительстве и эксплуатации железных дорог.

Однако наряду с этим при усилении и реконструкции существующих железных дорог допускается чаще применять льготные нормы проектирования, нежели при проектировании новых железных дорог в аналогичных условиях (при одинаковых размерах движения, в одинаковых топографических условиях).



Это положение объясняется тем, что реконструкция проводится, как правило, на интенсивно работающей железной дороге, когда производство строительных работ сопряжено со значительными трудностями, обуславливающими более высокую их стоимость. Поэтому для объектов, проектирование реконструкции которых не связано с требованиями безопасности и бесперебойности движения поездов, а влияет только на эксплуатационные показатели дороги экономически в более широких размерах, чем на новой линии, может быть оправдано применение минимальных норм в тех случаях, когда это существенно удешевляет строительство и незначительно ухудшает эксплуатацию реконструируемых существующих дорог [20].

Нормы проектирования продольного профиля и земляного полотна приведены в приложении Г.

**Деление железных дорог на категории.** Важная роль железнодорожного транспорта с первых лет его развития определяла высокие требования к проектированию и строительству сети железных дорог. Талантливыми создателями первых магистральных железных дорог в России во главе с выдающимся инженером и ученым прошлого столетия П. П. Мельниковым были решены вопросы единства ширины колеи и габаритов железных дорог России.

Одновременно был заложен фундамент последующих работ ряда поколений ученых и практиков по созданию технических условий, норм и правил проектирования железных дорог, унифицированных для всей сети. Такие нормы и правила должны гарантировать необходимые общесетевые требования безопасности и бесперебойности круглогодичного движения поездов по всем железным дорогам общей сети и одновременно решать важные задачи унификации, а позднее и стандартизации важнейших размеров и условий проектирования железнодорожных сооружений (ширины земляного полотна, радиусов кривых, нагрузок на искусственные сооружения, условий размещения раздельных пунктов и т. д.).

По своему назначению железные дороги в современных условиях отличаются в значительных пределах – от подъездных путей и небольших тупиковых железнодорожных ветвей до очень мощных грузонапряженных железнодорожных магистралей.

Железнодорожные линии могут сильно отличаться также по характеру и размерам перевозок (грузовых и пассажирских, транзитных и местных), по разной величине начальных размеров перевозок, темпу их роста и размерам на расчетную перспективу. Поэтому при проектировании железных дорог различного назначения и с разным характером и размерами перевозок должен быть обеспечен различный подход к выбору основных технических параметров и средств технического оснащения железных дорог, а также к созданию резервов пропускной и провозной способностей.

Новые железнодорожные линии в зависимости от назначения, характера и размеров перевозок подразделяются на категории, принимаемые в соответствии с таблицей 1.1 [22].

Таблица 1.1 – Категории железных дорог по нормам проектирования

Категория железнодорожных линий	Назначение железных дорог	Расчетная годовая приведенная грузонапряженность нетто в грузовом направлении на десятый год эксплуатации, млн т·км / км	Максимальная скорость, км/ч
Скоростные	Железнодорожные магистральные линии для движения пассажирских поездов со скоростями свыше 160–200 км/ч	–	200
Особогрузонапряженные	Железнодорожные магистральные линии для большого объема грузовых перевозок	Св. 50	120
I	Железнодорожные магистральные линии	Св. 30 до 50	160
II		» 15 » 30	160
III		» 8 » 15	120
IV	Железнодорожные линии	До 8	80
	Внутристанционные соединительные* и подъездные пути	Независимо от грузонапряженности	80

\*К внутристанционным соединительным путям относятся пути, ведущие к контейнерным пунктам, базам, сортировочным платформам, пунктам очистки, промывки, дезинфекции вагонов, ремонта подвижного состава и производства других технологических операций.

## 1.5 Пропускная и провозная способности железных дорог

При проектировании новых железных дорог одной из важнейших и сложных задач является установление мощности дороги, которая характеризуется пропускной ( $N$ ) и провозной ( $\Gamma$ ) способностью, как на начальный период работы, так и на последующие годы эксплуатации.

*Пропускная способность* однопутной железнодорожной линии измеряется числом пар поездов установленной массы, а для двухпутных линий – числом поездов для каждого направления в отдельности, которое дорога (или отдельные ее участки) в состоянии пропустить в сутки по наиболее трудному ее перегону (участку).

*Провозная способность* железной дороги выражается количеством тонн груза, которое данная дорога может перевезти в единицу времени (обычно за год) в каждом направлении. Как правило, при проектировании железных дорог основные расчеты провозной способности ведутся по грузовому движению, а для обеспечения пассажирских перевозок предусматривается выделение необходимой части пропускной способности дороги [22].

Взаимосвязь между пропускной и провозной способностями применительно к грузовым перевозкам определяется по формуле

$$\Gamma = \frac{365 Q_n n_{\text{тр}}}{\gamma} \cdot 10^{-6}, \quad (1.1)$$

где  $Q_n$  – масса состава нетто, т;

$n_{\text{тр}}$  – пропускная способность по грузовому движению в каждом направлении, поездов в сутки;

$\gamma$  – коэффициент внутригодовой неравномерности перевозок (принимается 1,05),

$$\gamma = M_n / M_{\text{ср}}, \quad (1.2)$$

$M_n$  – наибольший месячный грузопоток, тыс. т;

$M_{\text{ср}}$  – среднемесячный грузопоток, тыс. т.

В расчетах величину коэффициента внутригодовой неравномерности перевозок можно принять равной 1,1–1,5 (большее значение – при преобладании грузов, имеющих сезонный характер).

Пропускная способность зависит от вида тяги и типа локомотива, которые определяют скорости движения поездов; характера профиля дороги, который также влияет на скорости движения поездов; размещения отдельных пунктов, которые ограничивают перегоны и влияют тем самым на время хода поезда по перегонам; способов организации движения поездов и затрат времени на отдельных пунктах при пропуске и скрещении поездов.

Провозная способность железных дорог [см. формулу (1.1)] зависит от возможной пропускной способности по грузовым поездам и массы нетто состава каждого поезда, что в свою очередь зависит от вида тяги, типов локомотивов и характера профиля дороги. Во всех случаях провозная способность проектируемой дороги должна быть не меньше намечаемых на дороге размеров перевозок.

Возможная провозная способность определяется по формуле (1.1).

**Пропускная способность по грузовому движению**, поездов в сутки, в каждом направлении

$$n_{\text{тр}} = N / (1 + p) - n_{\text{пас}} \epsilon_{\text{пас}} - n_{\text{сб}} (\epsilon_{\text{сб}} - 1) - n_{\text{уск}} (\epsilon_{\text{уск}} - 1), \quad (1.3)$$

где  $N$  – максимальная пропускная способность дороги, поездов в сутки;

$p$  – резерв пропускной способности [СТН];

$n_{\text{пас}}$ ,  $n_{\text{сб}}$ ,  $n_{\text{уск}}$  – число пассажирских, сборных и ускоренных поездов;

$\epsilon_{\text{пас}}$ ,  $\epsilon_{\text{сб}}$ ,  $\epsilon_{\text{уск}}$  – коэффициенты съема грузовых поездов соответственно пассажирскими, сборными и ускоренными поездами.

Коэффициенты съема показывают число поездов параллельного графика, эквивалентное по пропуску одного поезда данной категории. Для расчетов, осуществляемых в практике проектирования, коэффициенты съема могут приниматься в соответствии с данными, приведенными в справочнике эксплуатационника.

**Максимальная пропускная способность  $N$**  определяется аналитически. В основу расчета принимается парный параллельный график движения поездов (рисунок 1.2). Для такого графика

$$N = \frac{1440}{T} = \frac{1440}{t_T + t_0 + \tau_1 + \tau_2}, \quad (1.4)$$

где 1440 – количество минут в сутках;

$t_T$  и  $t_0$  – время хода по перегону в направлениях «туда» и «обратно», мин;

$\tau_1, \tau_2$  – станционные интервалы, мин.

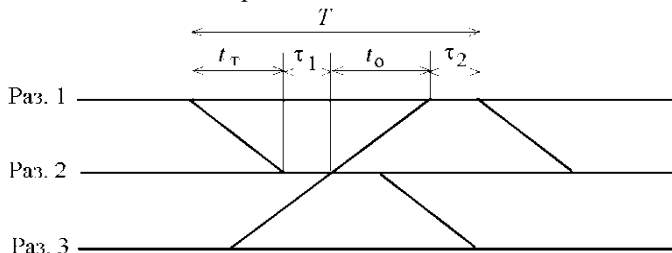


Рисунок 1.2 – Фрагмент парного параллельного графика движения поездов

В любом случае при определении  $N$  необходимо знать время хода по ограничивающему перегону. Это время устанавливается тяговыми расчетами. При проектировании новых железных дорог в качестве ограничивающего или лимитирующего перегона принимается перегон с затяжным руководящим уклоном, ограниченным с двух сторон площадками раздельных пунктов, который называется *расчетным* (рисунок 1.3).

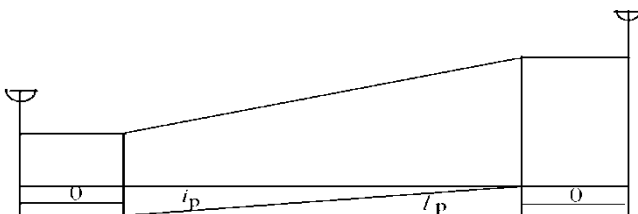


Рисунок 1.3 – Схема расчетного перегона

При движении по элементу профиля с руководящим уклоном в сторону подъема имеет место наибольшее время хода, которое и принимается для последующих расчетов. Размеры этого перегона устанавливаются по известному значению пропускной или расчетной провозной способности, которая принята для размещения раздельных пунктов.

## 2 ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ

---

### 2.1 Виды изысканий железных дорог

Строительство новых и переустройство существующих железных дорог производится по заранее разрабатываемым проектам. Проект состоит из экономического и технического разделов, в которых содержатся объёмно-планировочные и конструктивные решения, технико-экономические показатели, стоимость строительства и информация по организации строительства, мероприятия по охране окружающей среды и другие материалы, необходимые для реализации намеченных решений.

Исходными данными для разработки проекта являются материалы **технических и экономических изысканий**.

В начале производятся экономические изыскания, так как при их проведении устанавливаются объёмы грузовых и пассажирских перевозок, их структура, характер неравномерности перевозок по направлениям, грузонапряженность и другие экономические показатели.

В результате проведения экономических изысканий по каждому варианту проектируемой линии выявляют:

- ее роль и значение в единой транспортной сети;
- влияние проектируемой железной дороги на работу прилегающих звеньев железнодорожной сети и других видов транспорта (автомобильного и речного);
- преимущества и недостатки в обслуживании экономики района тяготения железной дороги;
- другие экономические показатели работы линии, необходимые для установления эффективных размеров мощности устройств и сооружений.

В результате проведения технических изысканий выявляются данные о рельефе местности, инженерно-геологические, гидрологические, климатические условия района проектирования, техническое оснащение и состояние переустраиваемых железных дорог.

От качества выполненных проектов зависит последующая эксплуатация железной дороги и ее эксплуатационные расходы, эффективность инвестиционных вложений, так как железная дорога является стратегическим долговременным объектом экономики страны.

## 2.2 Назначение, классификация и содержание экономических изысканий

**Назначение.** Экономические изыскания производятся как при разработке планов развития железнодорожного транспорта, так и при проектировании новых железных дорог [2] Экономические изыскания, выполняемые для целей планирования, являются составной частью разного рода технико-экономических работ предпроектного характера, имеющих назначением выбор возможных вариантов нового строительства, установление эффективности и очередности этих мероприятий.

При обосновании направления дороги могут возникнуть отдельные варианты направления и пунктов примыкания. Протяжение и районы прохождения трассы каждого из этих вариантов могут быть различными. Различными будут и размеры перевозок, и значение дороги для народного хозяйства, и населенные пункты через которые будет проходить трасса железной дороги [6].

Поэтому при составлении проекта перед экономическими изысканиями ставится **задача** – установить по каждому из вариантов:

- 1) местный и транзитный районы тяготения;
- 2) размеры грузовых и пассажирских перевозок;
- 3) преимущества и недостатки каждого варианта с точки зрения обслуживания экономики местного района тяготения дороги;
- 4) преимущества и недостатки с точки зрения обслуживания транзитных перевозок и увязки данной дороги с железнодорожной сетью и другими видами транспорта.

**Классификация.** Экономические изыскания подразделяются на *проблемные и титульные*.

*Проблемные* изыскания нацелены на изучение транспортно-экономических связей между экономическими районами с целью создания или развития существующей транспортной сети, обслуживающей эти районы. Проблемные изыскания осуществляются также при изучении возможных вариантов выхода из районов добычи полезных ископаемых, лесопромышленных районов, строительства гидроэлектростанций. В этом случае изучаемые варианты характеризуются различием направления линии, а также ее начальных и конечных пунктов. Проблемные изыскания выполняются на предпроектной стадии.

Проблемные экономические изыскания производятся для таких объектов транспортного строительства, для которых требуется предварительная проектно-изыскательская разработка технико-экономической проблемы обеспечения транспортных связей между взаимно тяготеющими экономическими районами или промышленными центрами страны.

Проблемные экономические изыскания могут быть связаны с сопоставлением разных видов транспорта или их сочетанием. Нередко при проблем-

ном проектировании даже в рамках одного вида транспорта требуется сравнение принципиально различных схем железнодорожного обеспечения транспортных связей при разном сочетании нового строительства существующих железных дорог. В результате разработки проблем выявляются объекты титульного проектирования вариантов, в сравнении которых может быть принято обоснованное проектное решение по данной транспортной проблеме.

*Титульные* изыскания проводятся по конкретным титулам (направлениям, например, Абакан – Тайшет, Краснодар – Туапсе, Сыня – Усинск). Титульные изыскания, базирующиеся на проблемных, выявляют роль железной дороги в обеспечении межрайонных транспортных связей, что необходимо для установления размеров и характера транзитных перевозок по строящейся дороге.

#### **Содержание экономических изысканий включает:**

1) значение дороги как части единой транспортной сети страны – ее роль для местного района тяготения, природные ресурсы, обслуживаемые крупные промышленные, портовые, административные и курортные пункты, сельскохозяйственные зоны; ее роль в деле рационализации перевозок, создания новых маршрутов для разгрузки или для более полного использования участков существующей сети, развития железнодорожно-водных и других видов смешанных перевозок;

2) экономику местного района тяготения – направление дороги, размещение станций, территория и население; природные богатства, пути сообщения; промышленность;

3) местные грузовые перевозки – обоснование размеров ввоза, вывоза и перевозок в местном сообщении по важнейшим индустриальным и сельскохозяйственным грузам;

4) транзитные грузовые перевозки – обоснование характера и размеров межрайонного и внутрирайонного грузообмена, осуществляемого проектируемой дорогой по отдельным участкам, направлениям и грузам;

5) общие грузовые перевозки и грузопотоки, включая перевозки для нужд самой железной дороги;

6) внутригодичную неравномерность перевозок;

7) расчеты средней нагрузки вагонов;

8) пассажирские перевозки – местные и транзитные;

9) общие размеры грузового и пассажирского движения по дороге в поездах.

Первоначальным этапом разработки планов развития железнодорожного транспорта, а также проектов сооружения новых и переустройства существующих железнодорожных линий, станций, узлов и прочих объектов является проведение экономических изысканий с целью *сбора, систематизации, обработки и анализа экономической информации*. В качестве такой информации выступают данные о размещении производства в изучаемом районе,

размеры выпуска продукции и потребления сырья, топлива и полуфабрикатов предприятиями, объемы грузовых и пассажирских перевозок, размеры грузопотоков и пассажиропотоков по направлениям, состав грузооборота по родам грузов, дальность перевозок и другие показатели.

Информация, получаемая при проведении экономических изысканий, включает в себя первичные и расчетные показатели. Первичные показатели собираются инженерами-экономистами при проведении обследования изучаемого района. Такими показателями являются, например, данные о развитии и размещении производительных сил, отчетные данные о работе транспортной сети.

Расчетные показатели получают на основе обработки первичной информации. Состав грузооборота по родам грузов и видам сообщения, грузовые потоки по участкам и другие показатели на перспективные годы выступают в качестве расчетных показателей. Экономические изыскания проводятся как на предпроектной стадии, так и при разработке проектов сооружения и переустройства объектов.

На предпроектной стадии экономические изыскания осуществляются при разработке программ развития и размещения объектов железнодорожного транспорта. Обоснование инвестирования «ОИ» строительства обозначает хозяйственную необходимость и экономическую целесообразность этих инвестиционных мероприятий.

При разработке «ОИ» строительства железнодорожной линии изучаются конкурентоспособные варианты направления и пункты примыкания линии. Варианты назначаются с учетом расположения крупных населенных пунктов, предприятий, и т. п. и обеспечения рациональных межрайонных и внутрирайонных транспортных связей.

Экономические изыскания проводятся при обосновании инвестирования строительства железной дороги, на стадии «Архитектурный проект» при двухстадийном проектировании. При составлении рабочей документации экономические изыскания, как правило, не ведутся.

**Развитие экономики регионов страны при проектировании объектов железнодорожного строительства.** Регионально-транспортная инфраструктура является частью регионально-транспортных исследований. **Региональная транспортная инфраструктура** – система пространственно-выраженных элементов, включающих транспортную сеть определенной конфигурации, используемую для осуществления перевозок, а также объекты организационно-сервисного информационного и логистического обслуживания для обеспечения эффективного размещения производительных сил региона и людей.

**Материально-техническая инфраструктура** региона является одним из ключевых факторов обеспечения национальных интересов любой страны. Наличие развитой сбалансированной инфраструктуры усиливает конкурентные преимущества региона, создает условия для устойчивого функциониро-



вания народного хозяйства и жизнедеятельности региона, поддерживает необходимый для обеспечения национальной безопасности уровень.

Основные *структурно-функциональные элементы региональной инфраструктуры железнодорожного транспорта*: опорная транспортная сеть, транспортные коридоры, железнодорожный транспорт общего и необщего пользования, технологический транспорт, промышленный железнодорожный транспорт. Опорная транспортная сеть представляет собой совокупность сети сообщения и транспортных узлов, обеспечивающих устойчивую взаимосвязь крупных населенных пунктов региона, экономических центров и внешнеэкономические связи. Опорная транспортная сеть должна развиваться в соответствии с перспективными планами развития производительных сил. Многие из регионов начали разработку программ развития производительных сил, в рамках которых рассматриваются и перспективы развития региональной транспортной инфраструктуры.

Значение проектируемых объектов железнодорожного строительства заключается в следующем:

- создание инфраструктурной основы для долгосрочного роста экономики и повышения качества жизни населения, комплексного освоения новых экономических районов страны и доступа к новым источникам природных ресурсов;

- получение высокого мультипликативного эффекта за счет реализации комплексной программы строительства железнодорожных линий;

- транспортной доступности субъектов, выравнивание их транспортной обеспеченности;

- снижение совокупных транспортных издержек за счет повышения эффективности работы железнодорожного транспорта и достижения конкурентоспособности уровня качества транспортных услуг;

- доведение технического и технологического уровня инфраструктуры подвижного состава, сферы их содержания и ремонта до лучших мировых стандартов;

- решение системной задачи организации движения тяжеловесных, грузовых и пассажирских поездов с высокими скоростями на единой железнодорожной сети, позволяющей оптимизировать себестоимость перевозок и снизить затраты на строительство автодорог для большегрузных автомобилей;

- создание условий для повышения мобильности населения, развития межрегиональных экономических и культурных связей на основе реализации высокоскоростного и скоростного сообщения крупнейшими центрами страны;

- реализация прорывных решений в области интеграции железнодорожного транспорта в глобальную транспортно-логистическую систему на основе достижения комплексности и высоких стандартов качества транспортных услуг.

- придание мощного импульса развитию отечественного научно-производственного комплекса на основе формирования долгосрочного платеже-

способного заказа на инновационную технику, технологии, материалы, программно-информационные продукты для технического перевооружения и развития железнодорожного транспорта.

### **2.3 Местные перевозки и определение местного района тяготения**

**Местным районом тяготения железнодорожной линии** называется территория, предприятия и населенные пункты, которые на заданные расчетные сроки получают и отправляют грузы через станции рассматриваемого железнодорожного пути.

Для установления местного района тяготения изучаются:

1) экономические и производственные связи отдельных населенных пунктов и предприятий, расположенных на территории, прилегающей к рассматриваемой железной дороге. При этом должны быть определены районы назначения для грузов, вывозимых из района дороги, и районы отправления для ввозимых грузов; установлены пути следования грузов, а также размер и характер взаимных экономических связей между отдельными пунктами и предприятиями района;

2) величина себестоимости перевозок и условия транспортирования по проектируемой и существующим линиям, в том числе по подъездным путям и автодорогам;

3) топографические и другие естественные условия местности.

Для установления местного района тяготения, в котором с возможной полнотой учитываются важнейшие факторы, определяющие район тяготения, используется аналитический метод. Если одно из предприятий поставляет сырье, материалы или топливо для другого, выпускающего готовую продукцию, и внешних производственных связей не имеет, то оба предприятия включаются в район тяготения той станции, к которой тяготеет предприятие, выпускающее готовую продукцию.

Может оказаться, что в результате изучения всех влияющих факторов для отдельных пунктов или грузов не удастся достаточно надежно определить границы района тяготения. В таких случаях решение вопроса принимается на основе сопоставления затрат по перевозке 1 т грузов по проектируемой и существующим путям сообщения. При этом границу района тяготения наиболее удобно находить путем подбора, определяя затраты от произвольных точек, лежащих между станциями проектируемой и существующей железных дорог, до общей точки, в которой сливаются оба сравниваемых маршрута.

Допустим, что затраты по перевозке 1 т груза от такого предприятия в направлении с использованием существующей дороги

$$E_{\text{сущ}} = C_{\text{сущ}} l_{\text{сущ}} + a l_{\text{а сущ}}, \quad (2.1)$$

где  $C_{\text{сущ}}$ ,  $a$  – себестоимость перевозки на 1 т·км по существующей железной дороге и автотранспортом;

$l_{\text{сущ}}$ ,  $l_{\text{а сущ}}$  – расстояния перевозки по существующей железной дороге и автотранспортом.

Если  $E_{\text{сущ}}$  окажется больше, чем  $E_{\text{пр}}$  (аналогично исчисленные затраты по маршруту с использованием проектируемой дороги), то, очевидно, рассматриваемая точка войдет в район тяготения новой дороги и затраты на перевозку грузов от границы района тяготения будут меньше  $E_{\text{сущ}}$  и больше  $E_{\text{пр}}$  на величину полуразности  $(E_{\text{сущ}} - E_{\text{пр}}) / 2$ , а граница района тяготения будет находиться от этой точки на расстоянии  $\Delta l = (E_{\text{сущ}} - E_{\text{пр}}) / (2a)$  в направлении к станции на существующей железной дороге.

Если в точном определении границ района тяготения нет необходимости (например, когда местный грузооборот дороги невелик), то границы эти могут быть установлены методом равных расстояний.

Сущность его сводится к установлению геометрического места точек, равноудаленных от сравниваемых станций. Соединяя сравниваемые станции прямыми (рисунок 2.1) и восстанавливая из середины этих прямых перпендикуляры, получаем границы района тяготения по отдельным станциям. Обоснование этого способа вытекает из условия, что от границы района тяготения затраты на перевозку 1 т груза по обоим маршрутам (существующему и проектируемому) должны быть равны:

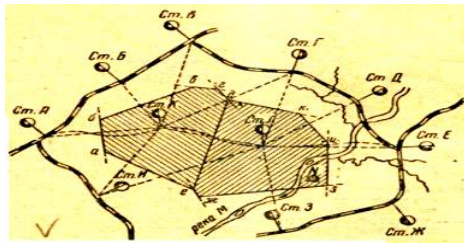


Рисунок 2.1 – Определение района тяготения по способу равных расстояний

$$E_{\text{сущ}} = E_{\text{пр}} = C_{\text{сущ}}l_{\text{сущ}} + al_{\text{асущ}} = C_{\text{пр}}l_{\text{пр}} + al_{\text{апр}}, \quad (2.2)$$

где  $E_{\text{пр}}$ ,  $C_{\text{пр}}$  и  $l_{\text{пр}}$  – соответственно затраты на перевозку 1 т, на 1 т·км и расстояние перевозки по проектируемой линии;

$l_{\text{апр}}$  – расстояние до станций проектируемой дороги от границы района тяготения.

Если допустить, что  $C_{\text{сущ}}l_{\text{сущ}} = C_{\text{пр}}l_{\text{пр}}$ , то  $al_{\text{асущ}} = al_{\text{апр}}$ , т. е. расстояния до станций существующей и проектируемой дорог равны ( $al_{\text{асущ}} = al_{\text{апр}}$ ) и должны составлять половину расстояния между сравниваемыми станциями. Применение метода равных расстояний допустимо при равнинном и среднем по трудности рельефе.

**Определение местных перевозок.** Для установления объема перевозок необходимо по главнейшим отраслям хозяйства района тяготения определить количество продукции, сырья, топлива или материалов, которые могут

вывозиться или должны ввозиться по рассматриваемой дороге, т. е. рассчитать так называемый **транспортный баланс по основным грузам**.

Для составления транспортного баланса необходимо установить: состояние данной отрасли хозяйства за последний отчетный год и перспективы ее развития на расчетные годы; объем производства на перспективу; количество продукции, которое будет потребляться на месте, с учетом необходимости создания резервов; избытки и недостатки продукции; районы и пункты вывоза или ввоза, куда будут поступать избытки или откуда будут покрываться недостатки продукции; распределение намечаемых перевозок между рассматриваемой железной дорогой и другими путями сообщения.

По грузам, которые в районе тяготения дороги не производятся, схема расчета остается той же, рассчитываются только размеры потребления. При составлении транспортных балансов возникает необходимость в различного рода нормах расхода топлива, сырья и материалов на единицу вырабатываемой продукции и в нормах по товарам народного потребления. Для этих норм рекомендуется использовать нормы, применяемые для балансовых расчетов плановыми органами.

Определение численности населения необходимо для расчетов: трудовых ресурсов, являющихся основой развития всякого производства; размеров потребления некоторых видов продукции, ввозимой и производимой на месте; размеров пассажирского движения. Численность населения рассчитывается с распределением на городское и сельское по отдельным участкам или станциям района тяготения.

В состав прочих грузов входят продукция машиностроения, металлообработки и деревообработки, химической, пищевой и легкой промышленности, различные виды сельскохозяйственной продукции и другие грузы, не включенные в состав ранее рассмотренных основных массовых грузов. Номенклатура прочих грузов весьма обширна и насчитывает сотни различных наименований.

В ходе экономических изысканий выделяются из этой обширной номенклатуры прочих грузов лишь важнейшие для проектируемой железной дороги грузы, по которым размеры перевозок устанавливаются расчетно. Остальные прочие грузы составляют долю неучтенных грузов, величина которых может быть установлена на основе анализа отчетных данных за ряд лет. Для проектируемых новых железных дорог используется в этом случае метод аналогии, предполагающий выявление доли прочих неучтенных грузов по аналогии с ближайшими существующими линиями.

Если величина неучтенных грузов превышает 10–15 %, то необходимо выявить среди неучтенных грузы, по которым размеры местных перевозок целесообразно определить более точным расчетным методом.

На основе материального производственно-потребительского баланса по уже рассмотренной номенклатуре грузов разрабатывается транспортный

баланс по каждому грузу. Транспортный баланс предполагает установление видов транспорта для перевозки местных грузов.

В результате составления транспортного баланса выявляется объем отправления и прибытия грузов по проектируемой железной дороге.

Дальнейшая обработка информации по местным грузам предполагает распределение перевозок по отдельным станциям, грузам, направлениям и видам сообщения (вывоз, ввоз, местное сообщение) на анализируемые отчетные годы.

По отдельным станциям проектируемой железной дороги распределяются местные перевозки между станциями, подъездными путями клиентуры и грузовыми дворами.

## **2.4 Показатели экономических изысканий и их влияние на выбор категории железной дороги и ее основных технических параметров**

**Грузонапряженность** (густота перевозок), характеризует степень загрузки железнодорожной линии. Средняя грузонапряженность линии рассчитывается путем деления выполняемых тонно-километров грузовой работы на протяженность линии.

Грузонапряженность может определяться как нетто, так и брутто (с учетом веса тары подвижного состава). Как правило, если не оговаривается форма исчисления грузонапряженности, то это **н е т т о**. Грузонапряженность нетто является важнейшим экономическим показателем, в соответствии с которым устанавливается потребный уровень мощности технических устройств и сооружений железной дороги, необходимый для обеспечения предстоящих объемов перевозок. Грузонапряженность нетто оказывает влияние на установление категории дороги, выбор направления линии, вида тяги, величины руководящего уклона и других важнейших параметров проектируемой железной дороги. Грузонапряженность **б р у т т о** используется для выбора типа верхнего строения пути.

С целью выявления возможности использования **автомобильного транспорта** при перевозке грузов местного сообщения определяется средняя **д а л ь н о с т ь п е р е в о з о к** этих грузов путем деления их грузооборота на общий объем грузов местного сообщения. Расчет дальности перевозки грузов осуществляется также для ориентировочной оценки экономии от сокращения пробега различных грузов при переключении их части или целиком на новую железную дорогу.

**Г р у з о в ы е п о т о к и** выявляются на все расчетные годы. В таблице 2.1 приведены суммарные грузопотоки как по участкам линии ст. А – ст. Г, так и на подходах к ней на анализируемые расчетные годы. На основе данных таблицы формируется схема грузовых потоков по проектируемой железной дороге (рисунок 2.2), при этом потоки показываются в соответствии с принципом правостороннего движения.

Таблица 2.1 – Общие размеры перевозок по линии ст. А – ст. Г

В тысячах тонн

Вид перевозок	Направления		Всего
	ст. А – ст. Г	ст. Г – ст. А	
Экспорт	1093	466	1559
Импорт	211	793	1004
Внутриреспубликанское сообщение	530	97	627
Транзит	25000	13000	38000
Общие размеры перевозок	26834	14356	41190

**Грузооборот** по направлениям определяется как произведение густоты потоков по участкам на их протяженности (таблица 2.2). Грузооборот дороги в целом представляет сумму грузооборотов туда и обратно. Грузонапряженность (густота потока) рассчитывается путем деления грузооборота на длину линии.

Таблица 2.2 – Грузооборот и грузонапряженность по линии ст. А – ст. Г

Вид перевозок	Направление				В обоих направлениях	
	ст. А – ст. Г		ст. Г – ст. А		грузооборот, млн т	грузонапряженность, млн т·км/км
	грузооборот, млн т	грузонапряженность, млн т·км/км	грузооборот, млн т	грузонапряженность, млн т·км/км		
Экспорт	140,2	934,7	47,20	314,7	187,40	1249,4
Импорт	94,2	628,0	23,55	157,0	117,75	785,0
Внутриреспубликанское сообщение	44,5	296,7	7,20	48,0	51,70	344,7
Транзит	3750,0	25000,0	1950,00	13000,0	5700,00	38000,0
<b>Итого</b>	<b>4028,9</b>	<b>26859,4</b>	<b>2027,95</b>	<b>13519,7</b>	<b>6056,85</b>	<b>40379,1</b>

**Неравномерность грузовых перевозок** может наблюдаться как по направлениям и участкам железнодорожной линии, так и во времени. Неравномерность перевозок по направлениям характеризуется коэффициентом, представляющим отношение грузонапряженности не грузового (порожнего) и грузового (груженого) направлений. Коэффициент неравномерности перевозок по направлениям  $a < 1$ . При значительной неравномерности и устойчивости ее по времени в негрузовом направлении может быть использовано большее значение ограничивающего уклона продольного профиля, чем в грузовом. Это обеспечивает (в общем случае) сокращение длины трассы железнодорожной линии и уменьшение строительной стоимости ее сооружения.

Для решения вопросов, связанных с организацией движения поездов, с проектированием отдельных пунктов линии необходимо учитывать и **неравномерность грузовых перевозок** по направлениям и во времени может анализироваться в течение года, квартала, месяца, декады, недели и суток. Внутригодовая неравномерность перевозок измеряется через *коэффициент месячной неравномерности*. Он определяется по отдельным видам грузов ( $y > 1$ ).

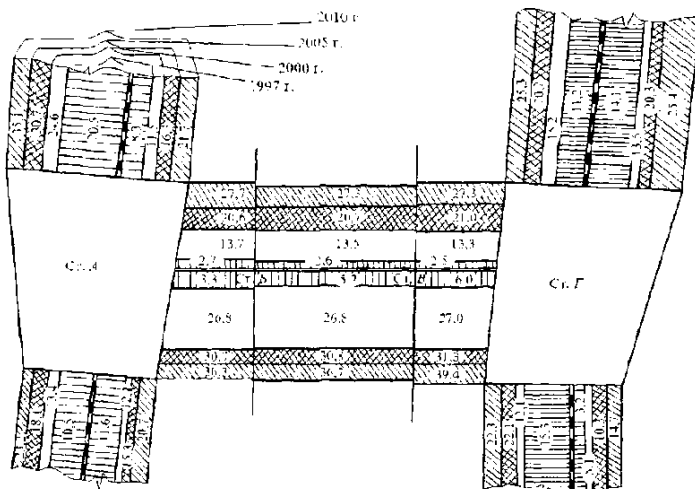


Рисунок 2.2 – Схема грузовых потоков по проектируемой железной дороге

Неравномерность перевозок во времени учитывается при расчете потребного эксплуатационного штата, пропускной способности, количества подвижного состава, разработке графика движения поездов, проектировании станций, расчетах складских площадей и решении ряда других вопросов. Основными факторами, влияющими на неравномерность грузовых перевозок во времени, являются:

- сезонность производства некоторых видов продукции, в особенности сельскохозяйственной;
- сезонность потребления минерального удобрения, горючего, машин и запасных частей в сельском хозяйстве, топлива для бытовых нужд, материалов для летних ремонтов железнодорожного пути и других грузов;
- сезонность работы водного транспорта.

Уменьшению неравномерности перевозок сельскохозяйственных грузов способствует сооружение элеваторно-складских емкостей, овощехранилищ, консервных и овощесушильных заводов.

**На выбор направления железной дороги** наибольшее влияние оказывают экономические и природные факторы: назначение дороги, размеры перевозок, размещение отдельных пунктов, рельеф местности, климатические, метеорологические, геологические и гидрологические условия [6]. Изучение гидрографических и орографических условий района проектирования железной дороги производится по топографической карте.

*Конфигурация речных систем* (как постоянных, так и периодических) дает представление о гидрографической сети, а колебания отметок рельефа местности, конфигурация горных хребтов, водоразделов, выпуклых и вогнутых форм рельефа – об орографических условиях района проектирования.

*Условия пересечения водотоков* влияют на трассу железной дороги. Необходимо выбирать благоприятные места пересечения рек, что часто приводит к отклонению трассы от прямого направления. Пересекать водоразделы следует в пониженных местах – седлах. На выбор трассы проектируемой линии влияют направление и естественные уклоны водоразделов, речных долин и косогоров. Возможно трассирование в пределах одной речной системы либо переход из одной речной системы в другую. В первом случае для трассирования следует использовать попутные долины рек, водоразделы либо их склоны; во втором могут быть намечены конкурирующие варианты через различные седла (попутные или менее попутные) на водоразделах.

*Наличие оползневых районов, заболоченных мест, неустойчивых косогоров* нередко приводит к необходимости обхода их либо к проложению трассы на этих участках с принятием особых мер по обеспечению устойчивости земляного полотна.

В результате обработки карты и изучения гидрографических и орографических условий района проектирования намечаются конкурентоспособные варианты проектируемой трассы между начальным и конечным пунктами.

При трассировании железной дороги, на которой намечаются преимущественно транзитные перевозки необходимо стремиться укладывать трассу между опорными пунктами как можно ближе к геодезической линии, чтобы сократить общую длину и тем самым уменьшить эксплуатационные расходы, связанные с длиной линии. Отклонения от кратчайшего направления всегда должны быть обоснованы.

*Для железнодорожных линий местного значения* трасса должна пройти через местные экономические центры и населенные пункты с целью лучшего их обслуживания. В данном случае прямолинейная геодезическая линия заменяется несколькими прямыми, соединяющими требуемые пункты обязательного прохождения линии.

Укладка трассы между опорными пунктами по кратчайшему направлению затруднительна в большинстве случаев из-за встречающихся контурных (заповедники, населенные пункты и т. п.) и высотных (водоразделы, горы и т. п.)



препятствий. В зависимости от сложности и типа препятствий иногда трудно или невозможно уложить трассу по кратчайшему направлению. В этом случае препятствия следует обходить или рационально пересекать.

Обход или пересечение препятствий определяют так называемые фиксированные точки трассы, что обуславливает отклонение трассы от геодезической линии. Обход препятствия приводит к удлинению трассы, а пересечение его – к сокращению длины линии, что нередко связано с увеличением объемов работ и стоимости железной дороги.

*Фиксированные точки обхода препятствий* намечаются по условию наименьшего отклонения трассы от кратчайшего ее направления (рисунок 2.3) в наиболее благоприятных местах. Например, на рисунке 2.3 для пересечения водораздела используются пониженные места (седла), что позволяет уменьшить длину трассы, сумму преодолеваемых высот и, следовательно, сократить строительную стоимость и эксплуатационные расходы. Благоприятных мест пересечения реки может быть несколько. В этом случае необходимо выявить наиболее устойчивые с прямолинейным руслом и неширокими поймами участки реки, узкие и менее глубокие места водохранилищ, озер.

Через выявленные фиксированные точки между опорными пунктами проводятся возможные варианты трассы. На рисунке 2.3 показан район проектирования с установленными фиксированными точками и вариантами трассы. Вариантов должно быть несколько. Если нет четко выраженных вариантов, в качестве одного из них может быть принята геодезическая линия.

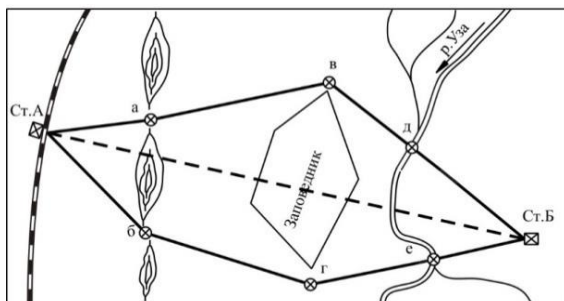


Рисунок 2.3 – Варианты возможных направлений трассы:  
 ——— варианты трассы; - - - - - геодезическая линия;  
 Ст. А, ст. Б – опорные пункты трассы; а–е – фиксированные точки;  
 а, б – пересечения водораздела в седлах; в, г – обходы заповедника;  
 д, е – возможные пересечения реки

При выборе конкурентноспособных вариантов необходимо прежде всего заложить определенный трассировочный замысел в каждый из намеченных

вариантов. Под трассировочным замыслом понимается задача проектирования трассы и методы ее решения. Если ставится задача укладки наиболее короткой трассы, то решить ее можно различными методами: применением более крутого руководящего уклона, участков кратной тяги, устройством тоннелей и т. п.

Чем меньше ожидаемые размеры перевозок тем целесообразнее укладывать трассу с меньшими объемами работ, хотя бы за счет соответствующего развития линии, и трассировочный замысел должен обеспечивать рассмотрение таких вариантов.

Чем больше ожидаемые размеры перевозок, тем целесообразнее спрямление трассы, применение более пологих руководящих уклонов, и трассировочный замысел должен обеспечивать рассмотрение вариантов за счет сокращения длины линии.

В любом случае трассировочный замысел каждого из вариантов рассматривается в противопоставлении, т. е. необходимо рассмотреть, что в данных конкретных условиях целесообразнее: применение вариантов с более пологим или более крутым руководящим уклоном, с уменьшением длины линии или с более развитой трассой. Такое противопоставление должно привести к решению задачи выбора конкурентоспособных вариантов трассы. Прежде всего, следует протрассировать тот вариант, который обеспечивает укладку трассы с заданным руководящим уклоном с минимальным отклонением от геодезической линии.

Направление дороги и размещение остановочных пунктов, особенно с грузowymi операциями, определяют условия транспортного обслуживания района тяготения железной дороги и в значительной мере влияют на размеры местного грузооборота.

Для дорог с преимущественно транзитным движением целесообразно более короткое направление, так как всякое дополнительное удлинение связано с увеличением издержек перевозок, а следовательно, целесообразнее использование такого основного технического параметра, как более крутой руководящий уклон.

К основным техническим параметрам относятся руководящий уклон, число главных путей, ширина колеи, размеры перевязок для размещения раздельных пунктов.

Для дорог с преобладающей местной работы целесообразен заход в ряд экономических пунктов, даже если при этом получается удлинение дороги, что связано с интересами более полного обслуживания местного района. При этом используется руководящий уклон такой же, как на линиях примыкания или на сети дорог в районе тяготения.

Средства технического оснащения (вид тяги, тип локомотива, полезная длина приемоотправочных путей, система связи и центральной блокировки, организация движения поездов и др.) могут быть приняты те же, что и на линиях примыкания.

Станции с грузовыми операциями необходимо располагать вблизи крупных населенных пунктов и промышленных предприятий, по возможности размещая грузовые устройства так, чтобы избежать пересечения железной дороги большим числом автомашин. Необходимо также учитывать наличие удобных подъездных автомобильных и водных путей.

При малых расстояниях между станциями с грузовыми операциями значительно возрастают издержки перевозки вследствие необходимости содержания добавочного штата и погрузочно-выгрузочных устройств. Поэтому на ряде железных дорог, особенно в районах, имеющих развитую сеть автодорог, необходимо рассмотреть вопрос о целесообразности закрытия малодейственных промежуточных грузовых станций и сосредоточения погрузки и выгрузки на зонных станциях, оснащенных высокопроизводительными механизмами и оборудованием.

На транзитных линиях с относительно небольшим местным грузооборотом станции с грузовой работой располагаются одна от другой на значительных расстояниях, и отдельные пункты открываются главным образом исходя из учета необходимости технических операций.

Пассажи́рские остано́вочные пункты́ в случае надобности размещаются чаще (главным образом на пригородных участках).

Подробнее о выборе основных технических параметров и средств технического оснащения железной дороги см. подразд. 4.2.

## **2.5 Транзитный район тяготения**

**Транзитный район тяготения.** Сооружение новой нетупиковой железнодорожной линии приводит к изменению маршрутов следования грузов по сети или полигону. Это обуславливается либо сокращением пробега груза, либо уменьшением транспортных издержек, либо необходимостью переключения перевозок с действующих звеньев сети при исчерпании их пропускной способности, а также проведения на существующих линиях различного рода мероприятий по усилению их мощности. В этом случае грузы переключаются на новую железную дорогу, как правило, в виде транзитных перевозок, характеризующихся расположением начального и конечного пунктов следования за пределами проектируемой линии.

Переключение перевозок может иметь место также и при переустройстве существующей железнодорожной линии с целью увеличения её пропускной способности, что приводит к росту объемов транзитных перевозок по линии.

Для установления размеров транзитных перевозок на расчетные годы необходимо выявить транзитный район тяготения линии, а также транзитный грузопоток по отдельным грузам. Транзитный район тяготения включает существующие и образующиеся экономические районы и пункты, грузовая корреспонденция между которыми проходит в виде транзита через проектируемую линию.

В качестве пунктов транзитного района тяготения могут выступать административно-экономические центры областей, крупные промышленные объекты, новостройки, железнодорожные станции, пристани и т. д.

Транзитный район тяготения устанавливается путем сопоставления маршрутов следования грузов для взаимно корреспондирующих районов и пунктов. Если в результате сравнения будет установлена целесообразность прохождения маршрута по проектируемой железной дороге, то эти районы и пункты включаются в транзитный район тяготения.

Маршруты при установлении транзитного района сравнивают в основном по критерию минимального расстояния перевозок. Следует заметить, что такой подход отвечает минимизации грузооборота, но не всегда обеспечивает отыскание наиболее выгодного маршрута, так как не учитываются резерв пропускной и провозной способностей звеньев железнодорожной сети, себестоимости перевозок по ним и другие технико-экономические показатели. Однако выявление транзитного района тяготения с помощью минимизации длины маршрутов обеспечивает достаточно хорошее соответствие фактическим направлениям грузовых перевозок.

Для определения минимальных расстояний перевозки можно использовать альбом схем кратчайших расстояний между узлами железнодорожной сети страны. При сравнении маршрутов перевозки грузов следует учитывать возможность сооружения новых железных дорог на анализируемые расчетные сроки.

## **2.6 Определение транзитных перевозок**

После выявления транзитного района тяготения проектируемой железнодорожной линии устанавливаются транзитные грузовые перевозки.

Определяются объемы транзитных перевозок на расчетные годы по каждому номенклатурному грузу, после чего формируется суммарный транзит. Номенклатура транзитных грузовых перевозок та же, что и для местных грузов.

Расчет транзитных грузовых перевозок базируется на отчетных и разрабатываемых на перспективу данных о межрайонном (межобластном) и междорожном грузообмене, а также общесетевых грузопотоках.

Размеры отправления и прибытия грузов по железнодорожной сети определяют с учетом участия в перевозках других видов транспорта. Все расчеты по отправлению, прибытию и корреспонденции грузов ведут в разрезе экономических районов с разбивкой по краям и областям.

При установлении перспективного грузообмена по железным дорогам отсеиваются корреспонденции, которые выполняются другими видами транспорта, и учитываются лишь те, которые выполняются в прямом железнодорожном или смешанном железнодорожно-водном, железнодорожно-автомобильном и железнодорожно-трубопроводном сообщениях.

При определении размеров транзитных грузовых перевозок по проектируемой линии в некоторых случаях необходимо наряду с межрайонным

(межобластным) грузообменом учитывать также внутриобластной обмен, следующий транзитом по анализируемой железной дороге.

Материалы анализа межрайонного обмена грузами используются не только для установления размеров транзитных перевозок, но и для выявления направлений корреспонденций грузов ввоза и вывоза (местных грузов) для проектируемой железнодорожной линии.

На базе показателей перспективного межрайонного грузообмена формируются грузовые потоки по сети железных дорог на перспективу.

Для разработки проектов новых железных дорог размеры транзитных перевозок приводятся в задании на проектирование.

## **2.7 Определение размеров пассажирских перевозок**

Пассажирские перевозки занимают особое место в работе транспорта. Это обусловлено их высоким социально-экономическим значением в жизни общества и выполнением одной из важнейших гарантий государства – свободы передвижения.

Потребность населения в перевозках связана как с производственной деятельностью (поездки к месту работы и в командировки), так и с культурно-бытовой необходимостью (поездки на отдых, туризм и экскурсии [2]).

Рынок транспортных услуг представлен следующими видами пассажирских перевозок:

- внутригородские;
- пригородные;
- междугородные;
- международные.

Каждый из видов перевозок характеризуется:

- различными емкостями рынка;
- видом и уровнем конкуренции;
- мотивацией поездки;
- эластичностью спроса (ценовой, перекрестной и от дохода).

Внутригородские перевозки являются наиболее значительными по количеству перевезенных пассажиров. В крупных городах транспортный рынок достаточно конкурентен и представлен метрополитеном, различными видами наземного городского транспорта, личными автомобилями и такси, а также железнодорожным транспортом, которым выполняется значительная часть внутригородских перевозок и значение которого в последние годы по мере роста крупных городов и численности населения в них существенно возрастает. В небольших городах и населенных пунктах транспортный рынок более монополизирован и представлен, в основном, автобусным транспортом и личными автомобилями населения.

Пригородные перевозки занимают второе место по массовости после внутригородских. Рынок этого вида транспортных услуг представлен железнодорожным, автобусным, а также личным автотранспортом. К целям пригородных поездок, кроме перемещений к месту работы, учебы и по другим личным надобностям, добавляется значительное количество дачных поездок. Большое влияние на окончательный выбор населением определенного вида транспорта оказывает такой неценовой фактор конкуренции, как удобство и надежность расписания. Для населения, совершающего ежедневные поездки в пригородном сообщении на работу и учебу, основным видом транспорта является железнодорожный из-за его высокой провозной способности, надежности и регулярности движения.

Велика его социальная роль в перевозках городского населения на дачные участки, к местам массового отдыха. Ежедневно в пригородном сообщении российскими железными дорогами перевозится около 3,1 млн пассажиров. По данным социологических опросов, более 41 % пассажиров пригородных поездов совершают поездки на работу и учебу, около 29 % – на дачу. Более 45 % всех пригородных пассажиров практически ежедневно пользуются железнодорожным транспортом.

Междугородние перевозки значительно различаются по расстояниям поездки пассажиров. Их можно разделить на местные и дальние перевозки. Местные перевозки выполняются, в основном, железнодорожным транспортом и автобусами, спрос на которые зависит от удобства времени отправления и прибытия, продолжительности поездки, местонахождения начального и конечного пунктов следования, количества багажа, разрешенного к платному и бесплатному провозу, безопасности и комфортности проезда.

Перевозки пассажиров на большие расстояния выполняются преимущественно железнодорожным и воздушным транспортом и небольшой долей автобусных и водных сообщений. Среди мотивации поездок населения на большие расстояния выделяются производственные, рекреационные (на отдых, в гости, экскурсии).

## **2.8 Особенности экономических изысканий при реконструкции железных дорог**

Строительство или реконструкцию железнодорожных линий выполняют по комплексным проектам, представляющим собой совокупность документов, включающую пояснительную записку с обоснованием принятых решений, схем и чертежей железнодорожных устройств и сооружений.

По крупным сооружениям (станциям и узлам, мостовым переходам, тоннельным пересечениям) разрабатывают отдельные проекты, которые являются составной частью комплексного проекта железной дороги [2].

Процесс проектирования делят на стадии (этапы), отличающиеся в зависимости от решаемых задач шириной охвата возможных вариантов и степенью детализации проектных разработок.

При проектировании реконструкции существующих железных дорог в задачи экономических изысканий входят:

- выявление возможного изменения роли и значения дороги в связи с ее реконструкцией;
- определение расчетных размеров перевозок на реконструируемой дороге и влияния ее усиления на работу существующей сети железных дорог и других видов транспорта в зоне реконструируемой дороги;
- установление технико-экономических показателей дороги после ее реконструкции.

Задача экономического обследования эксплуатируемых железных дорог выходит за отраслевые рамки и требует для своего решения привлечения материалов не только Белорусской железной дороги, но и всех отраслей народного хозяйства, предприятия которых расположены в исследуемом регионе.

Проектирование усиления эксплуатируемой магистрали происходит в условиях уже сложившихся достаточно устойчивых транспортно-экономических связей, и поэтому район тяготения железной дороги, участков и отдельных станций может быть установлен на основе данных об этих связях.

Для принятия проектных решений по реконструкции эксплуатируемых железных дорог в экономическом разделе проекта на основе технико-экономического обследования района тяготения определяются размеры и характер перевозок грузов и пассажиров с такой степенью детализации, которая позволяет установить при проектировании этапность наращивания мощности линии. Экономическая информация при проведении обследования может быть получена на основе сбора и анализа отчетных и плановых документов планирующих организаций, управлений и т. д.

Информация о размерах и характере перевозок за предыдущие годы позволяет проанализировать динамику экономических показателей во времени, оценить в сопоставлении с показателями эксплуатационной работы эффективность организации перевозочного процесса, что весьма существенно для выбора наиболее рациональных проектных решений по этапному усилению эксплуатируемых железных дорог.

Итогом экономических изысканий при реконструкции железных дорог являются варианты решения по распределению грузовых и пассажирских перевозок района тяготения по видам транспорта, характерным для данного района, с учетом возможности организации смешанных перевозок, на основе которых для исследуемой дороги определяются:

- отчетные и перспективные объемы перевозок транзитных грузов;

- местная работа железнодорожной линии в целом и по отдельным участкам;
- местная работа железнодорожной линии по узлам и станциям в увязке с мероприятиями по усилению направления или полигона железных дорог;
- размеры и темпы роста пассажирских перевозок на расчетные годы и перспективу.

В процессе разработки экономической части проекта могут быть выдвинуты предложения по улучшению структуры и размещения производительных сил, складов и баз в исследуемом районе, по более эффективному использованию местных ресурсов.

В технико-экономических расчетах переустройства существующих линий необходимо учитывать данные о перспективных перевозках, их себестоимости и темпах роста. Следует учитывать особенности определения стоимости при строительстве дополнительных путей на станциях или удлинении приемоотправочных путей при введении длинносоставных тяжеловесных поездов, определять затраты на выделение «окон», на электрификацию и другие работы по реконструкции участков дороги ( см. приложение Б).



# 3 ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРАССЫ, ПЛАНА И ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

## 3.1 Трассирование железных дорог

**Трасса** – ось железной дороги как в плане, так и в продольном профиле. **Трассирование** – комплекс проектно-изыскательских работ, выполняемый для определения положения трассы в пространстве. Различают трассирование камеральное, полевое и автоматизированное.

**Классификация трассировочных ходов.** **Трассировочный ход** – ход проложения трассы в определенных топографических условиях

Трассирование включает:

- выявление и предварительное обследование возможных принципиальных направлений проектируемой линии и выбор из них наиболее рационального;
- установление конкурентных вариантов трассы по выбранному принципиальному направлению;
- корректировку трассы принятого направления, перенос ее на местность и геодезическое закрепление.

По условиям использования ограничивающих уклонов ( $i_p, i_{ур}, i_y, i_j$ ) различают вольный и напряженный хода. *Вольный ход* – такой трассировочный ход, на котором среднеестественные уклоны местности меньше уклона трассирования  $i_{ест} < i_{тр}$ . Уклон трассирования определяется между фиксированными точками  $i_{тр} = i_{отр} - i_{э(к)}$ ;  $i_{э(к)} = 0,5 \text{ ‰}$  для легких участков трассы. Этот уклон соответствует наличию на 1 км трассы кривых с общим углом поворота  $85^\circ$ .  $i_{э(к)} = 1,5 \text{ ‰}$  для трудных участков трассы (соответствует углу поворота  $125^\circ$  на 1 км).

Трассировочный ход, на котором  $i_{ест} \geq i_{тр}$ , называется *напряженным ходом*. Трассирование начинается от фиксированной точки, если участок напряженного хода примыкает к ней. Сначала трассируются участки напряженного хода, которые затем сопрягаются между собой участками вольного хода.

В зависимости от топографических условий различают: долинный, косогорный, водораздельный, поперечно-водораздельный ходы.

*Долинный ход* – трассировочный ход, когда трасса проложена по долине реки. Трасса укладывается по одной из попутных долин реки. На пересеченной местности наряду с обходом излучины реки (рисунок 3.1) следует рассматривать вариант спрямления русла или пересечение излучины двумя мостами.

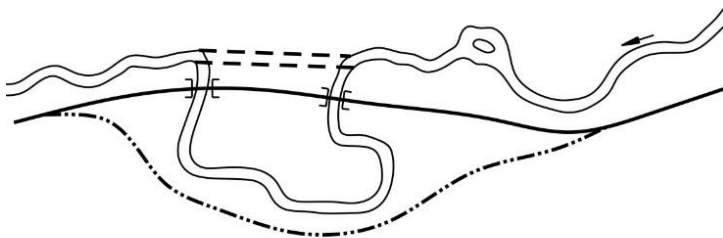


Рисунок 3.1 – Варианты трассы на участке излучины реки:

- ..... – обход излучины;
- – пересечение излучины двумя мостами;
- – спрямление русла

*Косогорный ход* укладывается между долиной реки и водоразделом по косогору (рисунок 3.2).

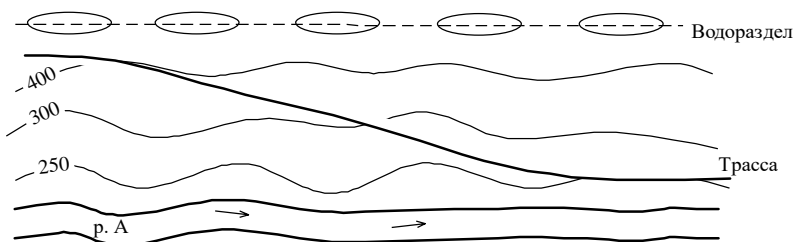


Рисунок 3.2 – Трасса на участке косогорного хода

Возможна укладка трассы у подошвы косогора.

*Водораздельный ход* применяется в равнинных и слабохолмистых районах, где имеются широкие водоразделы (рисунок 3.3). Для водораздельных ходов характерны небольшие объемы земляных работ и небольшое число водопропускных сооружений. Недостаток – сложность снабжения раздельных пунктов водой и большая стоимость водопропускных сооружений.

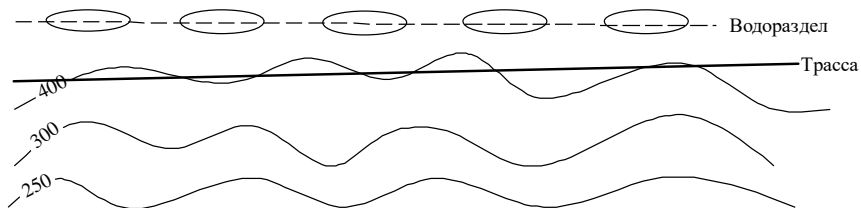


Рисунок 3.3 – Трасса на водораздельном ходу

*Поперечно-водораздельный ход* – трассировочный ход, при котором трасса из долины одной реки переходит в долину другой, пересекая водораздел (рисунок 3.4).

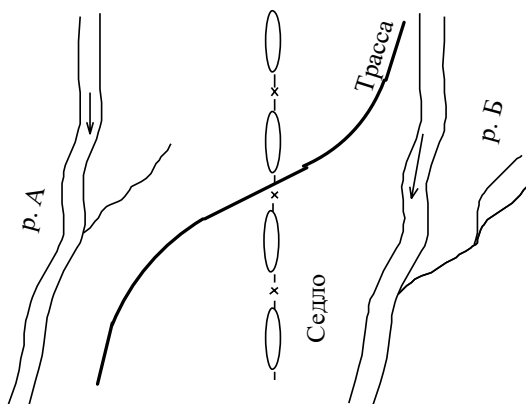


Рисунок 3.4 – Трасса на поперечно-водораздельном ходу

### 3.2 Трассирование на напряженных и вольных ходах

**Трассирование на участках вольного хода.** Как правило, на участках вольного хода отсутствуют значительные высотные препятствия, однако имеются местные высотные препятствия (мыс, лог).

Трасса на участке вольного хода укладывается по кратчайшему направлению между фиксированными точками. Местные препятствия пересекаются по кратчайшему направлению с использованием руководящего уклона. В профиле на таких участках получаются площадки и уклоны вплоть до руководящего.

В плане кривые появляются из-за обхода контурных и пересечения высотных препятствий.

*Основные положения трассирования на участках вольного хода*

1 Трасса укладывается по кратчайшему направлению, т. е. с препятствия на препятствие.

2 Не допускается произвольное проектирование кривых. Нужно указывать, с какой целью устраивается каждая кривая. В случае, представленном на рисунке 3.5, кривые запроектированы с целью обхода озера.

3 В лог надо вписываться трассой, мыс следует описывать трассой (рисунок 3.6).

4 При наличии двух препятствий, близко расположенных друг от друга, они обходятся как одно целое.

5 Вершина угла поворота должна находиться над препятствием, а само препятствие – внутри кривой.

6 Площадки раздельных пунктов по возможности должны располагаться попутно укладке трассы. Раздельные пункты (станции, разъезды) желательно располагать на горбах, придавая профилю перегона ямообразное очертание. Такой профиль в будущем обеспечит наименьшие эксплуатационные расходы.

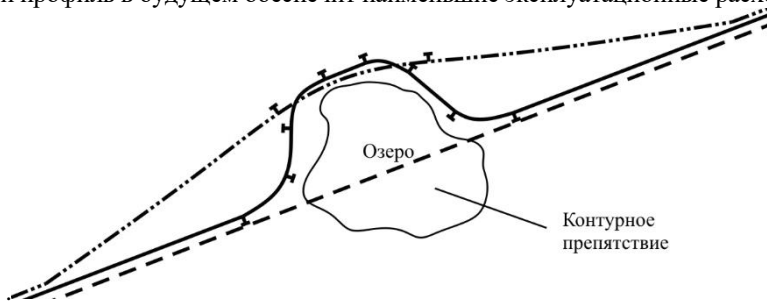


Рисунок 3.5 – Обход озера трассой:

..... – первый вариант трассы; ———— – второй вариант трассы;  
 - - - - - кратчайшее направление

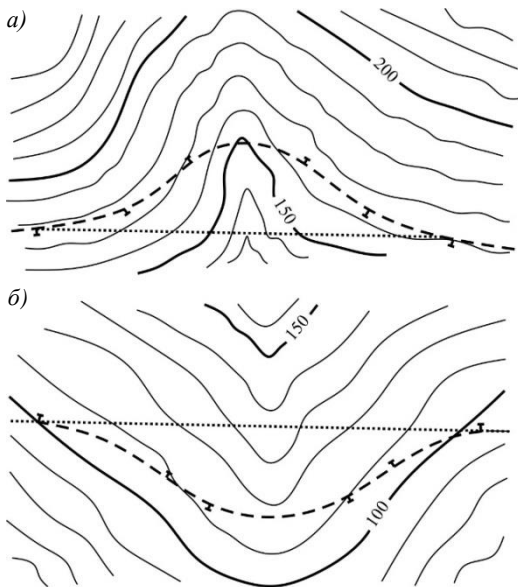


Рисунок 3.6 – Проектирование трассы в пределах:

а – лога; б – мыса; - - - - - ось трассы; ..... – кратчайшее направление

**Трассирование на участках напряженного хода.** Укладка трассы на участках напряженного хода производится наколкой измерителем линии нулевых работ с заданным руководящим уклоном. *Раствор циркуля* определяется по формуле

$$d = (\Delta h M \cdot 10^5) / i_{\text{ТР}}, \quad (3.1)$$

где  $\Delta h$  – сечение горизонталей, м;

$M$  – масштаб карты;

$10^5$  – коэффициент для перевода размерности в см;

$i_{\text{ТР}}$  – уклон трассирования, ‰,

$$i_{\text{ТР}} = i_p - i_{\text{Э(К)}}, \quad (3.2)$$

$i_p$  – руководящий или любой другой ограничивающий уклон, ‰;

$i_{\text{Э(К)}}$  – уклон, эквивалентный дополнительному сопротивлению от кривой.

Например, при  $\Delta h = 5$  м;  $M 1 : 25000$ ;  $i_p = 10$  ‰;  $i_{\text{Э(К)}} = 0,5$  ‰

$$d = \frac{5 \cdot 1 \cdot 10^5}{25000(10 - 0,5)} = 2,1 \text{ см.}$$

Полученная величина раствора циркуля откладывается на измерителе, и наколка линии нулевых работ осуществляется путем «шагания» измерителем с горизонтали на горизонталь. На рисунке 3.7 от точки А уложены раствором циркуля три варианта линии уклонами  $i_1$ ,  $i_2$  и  $i_3$ , что соответствует отрезкам заложения  $d_1$ ,  $d_2$  и  $d_3$ . Из рисунка 3.7 видно, что чем больше  $i_p$ , тем меньше величина  $d$ , т. е.  $l_1 > l_2 > l_3$ ,  $d_1 < d_2 < d_3$ . Ломаные линии на рисунке 3.7 А – Б<sub>1</sub>, А – Б<sub>2</sub>, А – Б<sub>3</sub> являются линиями нулевых работ, проложенных заданным уклоном трассирования.

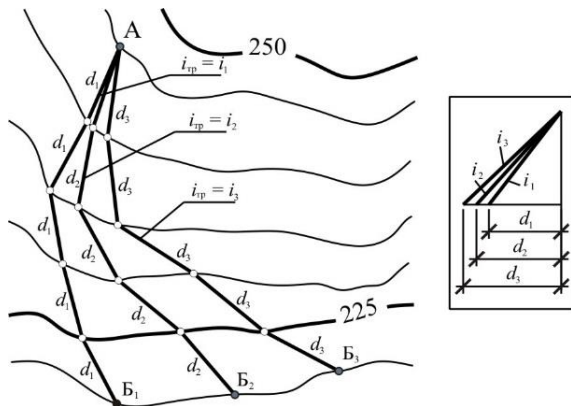


Рисунок 3.7 – Линия нулевых работ с разными уклонами трассирования на участке напряженного хода

Укладывая линию нулевых работ на затяжном участке напряженного хода, нужно ориентировочно учесть расположение раздельного пункта. Резервировать площадку для раздельного пункта на трассе следует через каждые 12–15 км: длина площадки должна быть равна примерно 2000 м, что соответствует полупродольной схеме расположения приемоотправочных путей [22].

Накалывая линию нулевых работ, нельзя шагать через горизонталь, так как это приведет к увеличению объема земляных работ на всём последующем участке напряженного хода (рисунок 3.8). Однако в отдельных случаях, укладывая линию нулевых работ, можно пересекать несколько горизонталей. На рисунке 3.8 показан такой случай.

На рисунке 3.9, а линия нулевых работ от седла с отметкой 372,4 м укладывается, начиная с отметки 360 м вместо 370 м, а при пересечении ручья Широкий от точки Б (отметка 335 м) переходит к точке В (отметка 330 м), минуя горизонталь 330 со стороны точки Б. Такое решение предусматривает выемку в седле и высокую насыпь при пересечении ручья (см. рисунок 3.9), что приводит к сокращению длины линии.

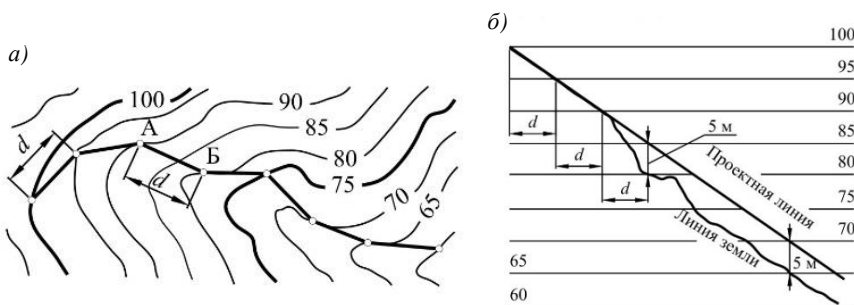


Рисунок 3.8 – Неправильная укладка трассы на участке А – Б

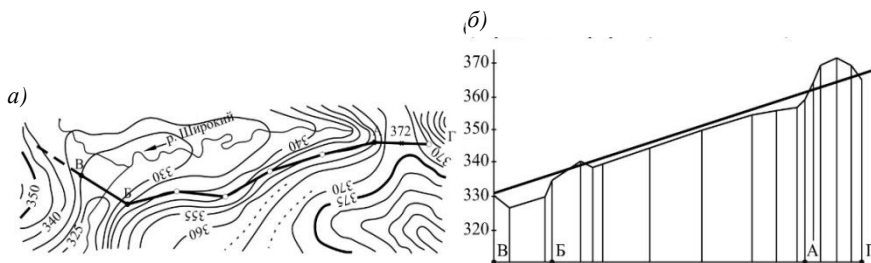


Рисунок 3.9 – Укладка линии нулевых работ при пересечении лога и водораздела:  
а – план; б – продольный профиль (по линии Г – А – Б – В)

**Развитие трассы на участках напряженного хода.** Различают напряженный ход без развития и с развитием линии (рисунок 3.10).

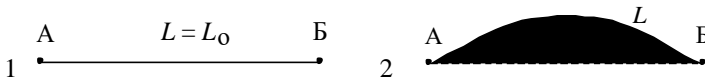


Рисунок 3.10 – Напряженный ход:

1 – без развития линии; 2 – с развитием линии; А, Б – фиксированные точки;  
 $L_0$  – длина трассы по кратчайшему направлению;  $L$  – длина трассы

Требуемое развитие трассы определится по формулам

$$L_p = \frac{\Delta H}{i_{тр}}; \quad (3.3)$$

$$\Delta H = H_B - H_A, \quad (3.4)$$

где А, Б – фиксированные точки пересечения реки и водораздела;

$H_A, H_B$  – отметки земли в фиксированных точках А и Б.

Тогда длина трассы

$$L_p = \frac{(H_B - h_B) - (H_A + h_H)}{i_p - i_{э(к)}}, \quad (3.5)$$

где  $h_B, h_H$  – глубина выемки и высота насыпи;

При необходимости размещения отдельных пунктов на напряженном ходу потребное развитие трассы

$$L_p = \frac{(H_B - h_B) - (H_A + h_H)}{i_p - i_{э(к)}} + nL_{ст}, \quad (3.6)$$

где  $n$  – число отдельных пунктов;

$L_{ст}$  – длина станционной площадки.

Трасса должна укладываться без избыточного развития линии и потерянных высот (рисунок 3.11).

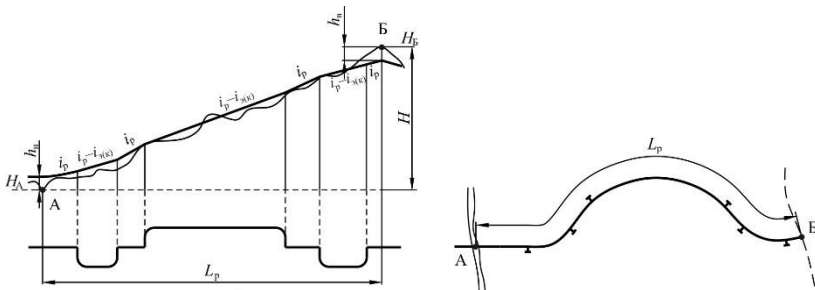


Рисунок 3.11 – Трасса на участке напряженного хода

На напряженном ходу не допускается недоиспользование руководящего уклона, т. к. удлинится линия и потеряется высота  $h_{\text{пот}}$  (рисунок 3.12).

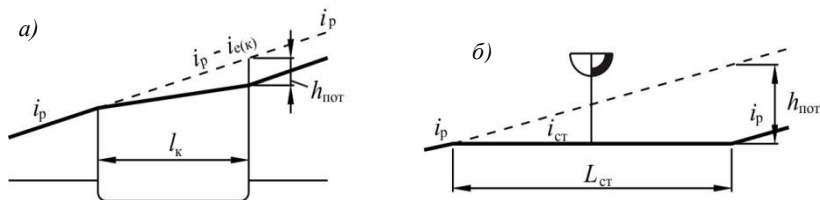


Рисунок 3.12 – Потеря высоты:  
в пределах кривой (а) и в пределах станционной площадки (б)

Трассирование должно вестись применительно к заранее составленному теоретическому профилю с подбором отметок земли, соответствующих этому профилю (рисунок 3.13).

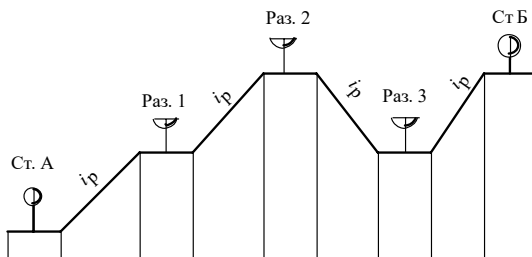


Рисунок 3.13 – Теоретический продольный профиль участка напряженного хода

Назначение положения углов поворота и подбор их величины должны производиться из условия обеспечения требуемого развития линии и удачного подбора отметок земли.

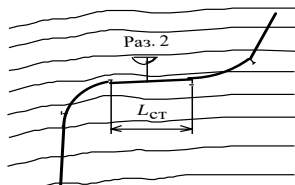


Рисунок 3.14 – Отклонение направления трассы для размещения станционной площадки

Расположение отдельных пунктов, как правило, требует отклонения трассы для размещения станционной площадки (рисунок 3.14).

**Трассирование по картам в горизонталях.** При трассировании линии по намеченному варианту, прежде всего, следует уточнить ее направление на участках напряженного хода путем укладки магистрального хода. Магистральный ход представляет собой первое приближение трассы, уложенное определенным руководящим уклоном. Длина трассы складывается из длин участков напряженных и вольных ходов. На участках напряженного хода трассу



необходимо уложить так, чтобы длина участков вольных ходов и, следовательно, общая длина трассы была наименьшей.

На рисунке 3.15 показаны два варианта магистрального хода от ст. Н в направлении Б. От точки А даны варианты укладки трассы напряженным ходом до точек В и Г, а далее, к точке Б, – вольным ходом. Более целесообразным является первый вариант, показанный сплошной линией, т. к. во втором варианте увеличивается общая длина линии А – Г – Б за счет большей протяженности участка вольного хода ГБ.

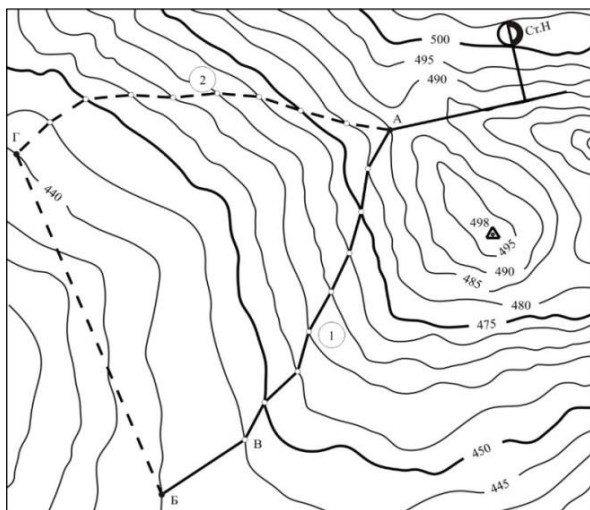


Рисунок 3.15 – Влияние положения участка напряженного хода на длину линии

При укладке магистрального хода между фиксированными точками могут чередоваться участки вольного и напряженного ходов. На рисунке 3.16 сплошной линией показан вариант укладки магистрального хода от фиксированной точки *a* (седло на водоразделе) до точки *b* руководящим уклоном в направлении на спуск к ст. А, а от *b* до *к* – вольным ходом. Пунктирной линией показан вариант магистрального хода, уложенный руководящим уклоном от ст. А (точка *к*) на подъем, отрезок линии *m* – *a* – участок вольного хода. Этот вариант трассы оказался короче. Однако наиболее коротким окажется вариант с участком вольного хода между точками *c* и *d*.

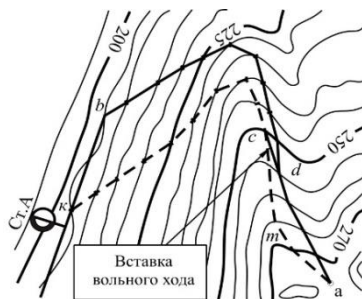


Рисунок 3.16 – Сокращение длины линии вольного и напряженного ходов

Участки магистрального хода должны максимально приближаться к геодезической линии. В этом случае трасса, как правило, состоит из участков напряженного хода со значительной суммой преодолеваемых высот. Могут быть варианты укладки трассы с отклонением от геодезической линии, то есть с некоторым удлинением, с чередованием участков вольного и напряженного ходов, но с меньшей суммой преодолеваемых высот. Выбор оптимального варианта решается технико-экономическими расчетами с учетом строительных затрат и эксплуатационных расходов.

После укладки магистрального хода и линии нулевых работ трассируются варианты трассы. Для этого от оси заданной станции откладывается половина длины станционной площадки согласно нормам [1]. Первый угол поворота может располагаться только за пределами станционной площадки таким образом, чтобы расстояние от вершины угла поворота до границы станционной площадки было бы не менее величины, равной тангенсу круговой кривой  $T$  с учетом половины длины переходной кривой и запаса  $a$  на возможное удлинение станционных путей в перспективе (рисунок 3.17).

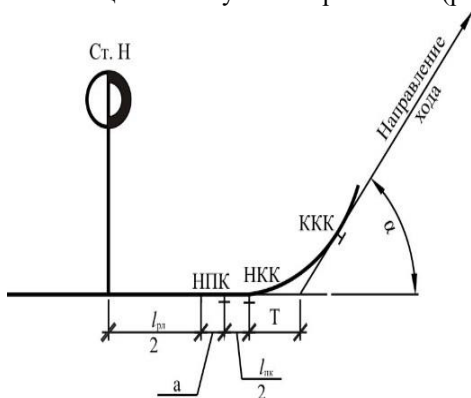


Рисунок 3.17 – Отход трассы станции Н

Значения  $T$  и  $l_{пк}$  определяются соответственно по таблицам для разбивки кривых и нормами [22], величина  $a$  может приниматься равной 200 м.

На участках напряженного хода точки, соответствующие линии нулевых работ, разбросаны, поэтому при укладке трассы производится осреднение точек наклона с одновременным вписыванием круговых кривых в образовавшиеся углы поворота (рисунок 3.18). Для вписывания круговых кривых в плане рекомендуется пользоваться шаблонами кривых. Начало (НКК) и конец (ККК) круговой кривой первоначально фиксируются шаблоном как точки касания кривой с прямыми: на рисунке 3.18 – точки  $A_1$  и  $A_2$  для первой кривой,  $B_1$  и  $B_2$  – для второй,  $V_1$  и  $V_2$  – для третьей. При этом нужно следить, чтобы расстояние  $L$  между смежными прямыми было не менее величины, установленной нормами [22], т. е. не менее прямой вставки, принимаемой по нормам, плюс половины переходных кривых для левой и правой круговых кривых.

Большие углы ( $\alpha > 120^\circ$ ) следует разбивать касательной на два угла, как это показано на рисунке 3.19; значения  $T$  и  $K$  нужно определять отдельно для углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

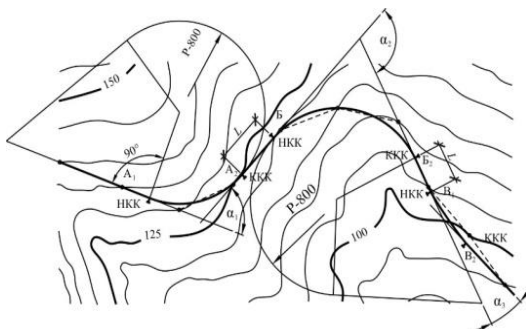


Рисунок 3.18 – Вписывание круговых кривых в плане при помощи шаблонов

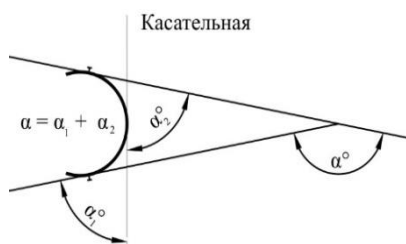


Рисунок 3.19 – Деление касательной одного угла на два

Одновременно с укладкой трассы составляется схематический продольный профиль в масштабе карты. Горизонтальный масштаб схематического профиля принимается равным масштабу карты, а вертикальный – 1 : 1000 (рисунок 3.20). Разметку отметок на шкале нужно производить так, чтобы отметки, кратные 50 м, совпадали с утолщенной линией миллиметровки.

Перенос отметок земли и плана линии с карты на профиль производится с помощью полоски миллиметровой бумаги шириной 2 см, длиной примерно 70–80 см (см. рисунок 3.20, б). На полоске откладываются отметки земли и план линии, проставляются километровые знаки с учетом масштаба карты. При этом полоску бумаги прикладывают к трассе таким образом, чтобы совместить начальный километр на полоске с осью станции. Затем с прямолинейного участка трассы переносятся на полоску отметки в местах пересечений горизонталей с полоской бумаги: эти отметки фиксируются на полоске, как это представлено на рисунке 3.20, а.

Помимо отметок земли на полоску переносятся начало и конец круговой кривой. Для этого на полоске фиксируется начало круговой кривой знаком «т», а затем полоска вращается по кривой (край полоски нужно прижимать карандашом) до того момента, пока не выйдет на прямолинейный участок: конец круговой кривой также фиксируется знаком «т». Полученное значение длины круговой кривой на полоске должно быть равно длине, определенной по таблицам для разбивки кривых.

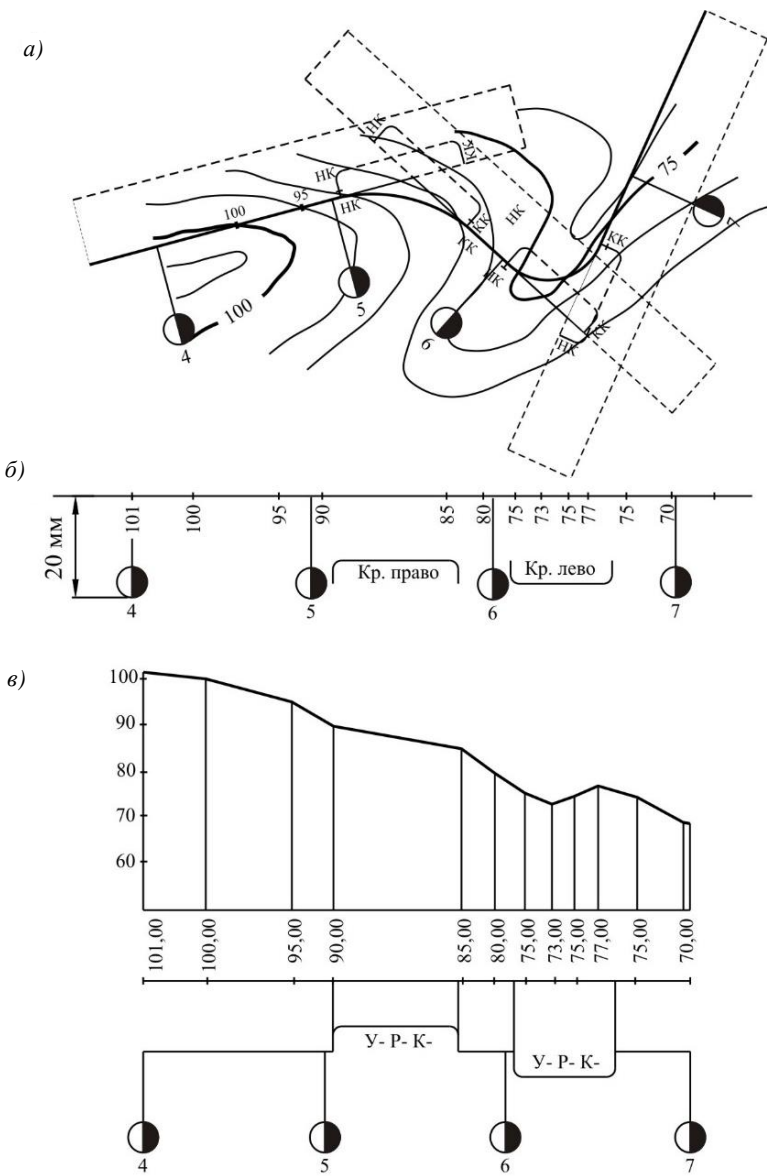


Рисунок 3.20 – Составление продольного профиля в масштабе карты:  
 а – определение отметок земли на плане в горизонталях; б – полоса бумаги;  
 в – продольный профиль (отметки земли и план)

Если трасса пересекает одну и ту же горизонталь несколько раз, то нужно зафиксировать наиболее характерные промежуточные точки между ними: отметки последних устанавливаются интерполяцией с точностью 0,5 м. Обязательно должны быть взяты отметки самых высоких и самых низких точек рельефа на пересечении логов и мысов. Так, на рисунке 3,20, *a*, вторая кривая трижды пересекает горизонталь 75, поэтому на полоску бумаги, а затем и на профиль нанесены дополнительные отметки земли: 73,00 м – при пересечении лога и 77,00 м – при прохождении трассы по склону. Одновременно с полоски бумаги переносятся километровые знаки и проставляются номера километров по трассе на карте, что позволяет избежать расхождения в длине линии на карте и профиле (см. рисунок 3.20, *a*, *в*). Затем полоска бумаги прикладывается к заготовленной сетке схематического профиля, отметки земли переносятся в соответствующую графу и в масштабе откладываются на профиле. Полученные точки, соединенные тонкими линиями, дают очертание профиля земли. В графу «План линии» переносятся начало и конец круговых кривых, условно обозначаются кривые (кривая «право» – выпуклостью вверх, кривая «лево» – выпуклостью вниз) и записываются элементы кривой: У, Р, К.

Укладка трассы ведется от начальной станции последовательно на участках напряженным и вольным ходами.

**Показатели трассы.** Трасса может быть оценена по показателям, которые отражают как степень сложности рельефа, так и качество трассы – правильность выбранных для данной линии параметров проектирования:

- длина  $L$ , км;
- коэффициент развития линии  $\lambda = L / L_0$ , то есть отношение длины трассы к длине геодезической прямой, которое характеризует как степень сложности рельефа, так и качество трассирования;
- удельное протяжения напряженных ходов  $\lambda = L_{\text{нх}} / L$ , то есть отношение протяжения напряженных ходов к общей длине трассы (иногда выражается в процентах). Этот показатель также характеризует степень сложности рельефа и правильность основных решений по трассе;
- строительная стоимость линии. В большей степени она определяется длиной линии, а эксплуатационные расходы – длиной линии и суммой преодолеваемых высот;
- коэффициент развития. Для обычных условий он находится в пределах 1,03–0,12. Слишком большой коэффициент развития часто свидетельствует о неправильном выборе основных трассировочных решений или о некачественном трассировании, при котором допущено неоправданное удлинение (лишние углы поворота, неправильное расположение вершин углов поворота, неудачная увязка вольных и напряженных ходов). В из-

вестной степени по этому коэффициенту можно судить и о правильности выбора ограничивающего, например, руководящего уклона, о его соответствии рельефу. Большие коэффициенты развития при больших удельных протяженностях напряженного хода свидетельствуют о том, что для данных условий выбран слишком пологий руководящий уклон.

### **3.3 Автоматизированное проектирование железных дорог с использованием программного продукта «ТОПОМАТИК ROBUR»**

Основное назначение программного продукта *«Топоматик Robur – Изыскания»* состоит в подготовке исходных данных для проектирования как автомобильных, так и железных дорог. Созданные в *«Топоматик Robur – Изыскания»* цифровые модели местности и геологии служат надежной основой для проектов, разрабатываемых в программных продуктах *«Топоматик Robur – Автомобильные дороги»* и *«Топоматик Robur – Железные дороги»*.

*«Топоматик Robur – Железные дороги»* – это узкоспециализированный программный продукт, заточенный под авто- и железнодорожную специфику. Он имеет весь необходимый функционал для автоматизации работы изыскательских служб.

Несмотря на то, что на рынке имеется много программ с аналогичными возможностями, *«Топоматик Robur – Железные дороги»* обладает целым рядом преимуществ, в совокупности делающих его незаменимым помощником инженера-изыскателя:

- поверхности могут содержать до пяти миллионов точек;
- коммуникации задаются в виде трехмерных объектов и динамически отображаются на сечениях;
- планшеты создаются в масштабах 1:500 и 1:1000 и оформляются в соответствии с региональными стандартами;
- трассы могут содержать составные (много радиусные) кривые;
- возможно задание рубленых (не равных 100 метрам) пикетов;
- создаются чертежи изыскательских продольного и поперечных профилей с коммуникациями, искусственными сооружениями и геологией;
- визуализируются поверхности с объектами ситуации;
- возможна коллективная работа над проектом.

**Построение цифровой модели местности и этапность создания трассы железной дороги.** В программе *«Топоматик Robur – Железные дороги»* наряду с термином «Поверхность» используется более общий термин «Цифровая модель местности». ЦММ (рисунок 3.21) представляет собой поверхность, связанную с векторной подложкой (ситуацией) для отображения топографических знаков (рисунок 3.22).

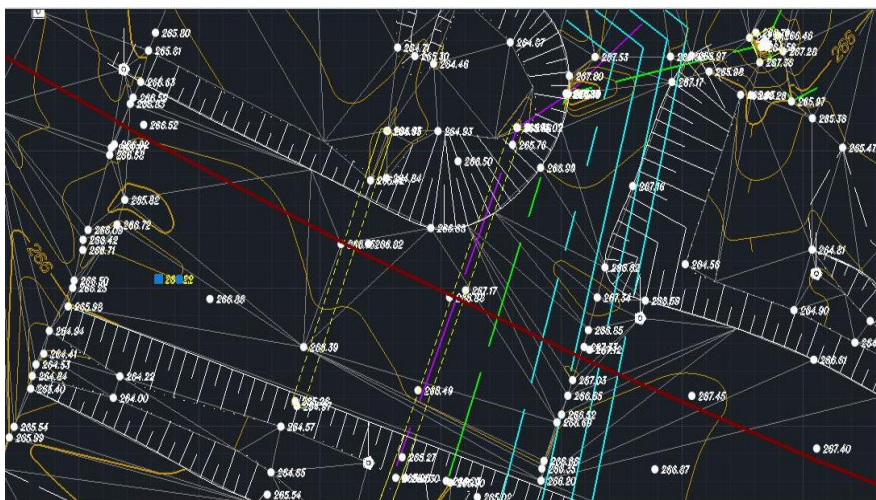


Рисунок 3.21 – Пример формирования цифровой модели местности

В процессе редактирования поверхность отображается как в окне плана, так и в окне 3D-вида, которое может быть вынесено на второй монитор.

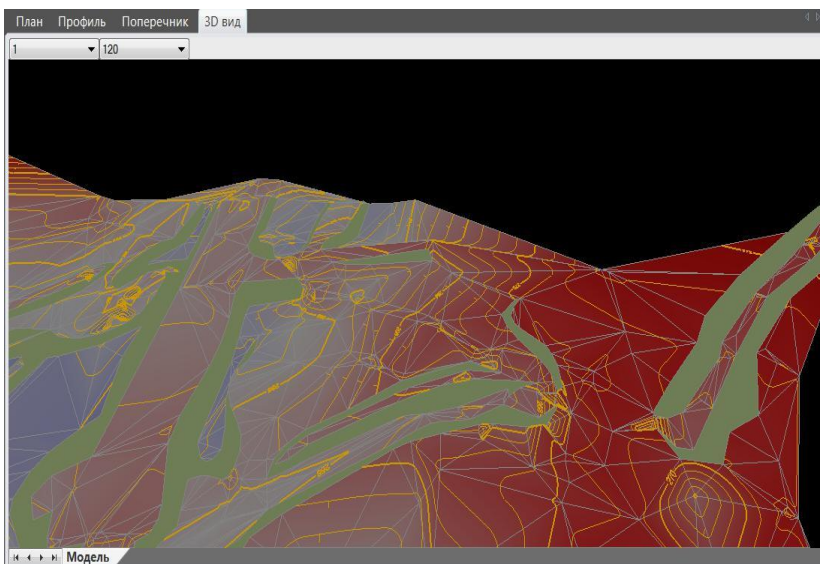


Рисунок 3.22 – Рельеф местности в 3D-виде

Все условные знаки являются частью единой модели, что полностью исключает дублирование данных (рисунок 3.23). Инструментарий по созданию и редактированию ЦММ сопоставим с инструментарием современных графических пакетов трехмерного моделирования. Это позволяет решать следующие задачи:

1) упрощает организацию слоев ситуации, так как они относятся только к одной поверхности;

2) упрощает передачу ЦММ с одного компьютера на другой и организацию коллективной работы, так как данные, относящиеся к данной ЦММ, находятся в одном файле;

3) позволяет разбить геодезическую подоснову на участки, разрабатываемые различными исполнителями (коллективная работа). В дальнейшем участки могут быть собраны в единую ЦММ.

4) редактор поверхностей имеет целый ряд преимуществ:

– поверхности могут содержать до пяти миллионов точек (лазерное сканирование);

– все функции оптимизированы и работают чрезвычайно быстро;

– поверхность по-настоящему динамическая (вставка или удаление точек приводит к изменению триангуляции, и нет необходимости перестраивать поверхность заново);

– функционал по объединению поверхностей позволяет создавать цифровую модель рельефа поэтапно, по мере поступления данных или компоновать из участков, созданных разными исполнителями, при этом исходная триангуляция полностью сохраняется;

5) удобный интерфейс.

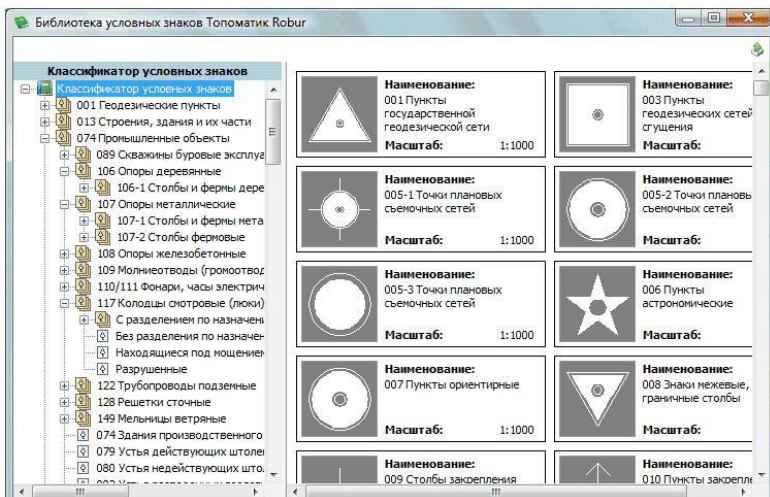


Рисунок 3.23 – Библиотека условных знаков



Наличие окна 3D-вида позволяет максимально просто контролировать правильность построения и безошибочно выполнять операции по сшивке и врезанию поверхностей.

Для работы с ситуационным планом в *Топоматик Robur* предназначен специализированный графический редактор. Графический редактор *ТопоматикRobur* позволяет вводить и редактировать примитивы чертежа ситуации, работать с блоками и подгружать растровые подложки, использовать привязки производить измерения. В качестве исходной информации можно использовать оцифрованные карты, в том числе результаты топографических съёмки. В *Топоматик Robur* имеется пополняемая библиотека условных знаков для топографических планов, а также возможность автоматизированного нанесения на сечения коммуникаций, труб и прочих объектов ситуации. Линейные объекты отображаются в рабочих окнах программы и на выходных чертежах.

Для создания трассы в программе *Топоматик Robur* в структуре проекта выбирается пункт новая трасса (рисунок 3.24).

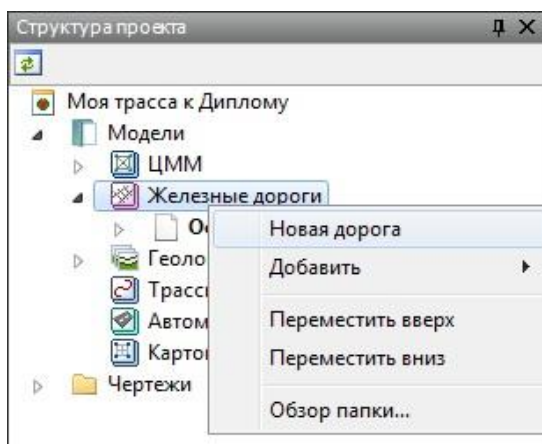


Рисунок 3.24 – Вкладка «Структура проекта»

Имеется возможность выбора исходных данных для построения (рисунок 3.25):

- в поле категория из выпадающего списка выбирается категория железнодорожной линии. В зависимости от заданной категории принимаются по умолчанию определенные нормативные параметры, используемые при дальнейшем проектировании;

- в поле «радиус кривой в профиле по умолчанию» – при проектировании продольного профиля (при добавления новой вершины перелома) программа автоматически впишет вертикальную кривую, и в зависимости от

выбранной опции в выпадающем списке «тип» величина радиуса будет равна либо нормативному значению радиуса выбранной категории, либо заданной величине в поле «радиус кривой».

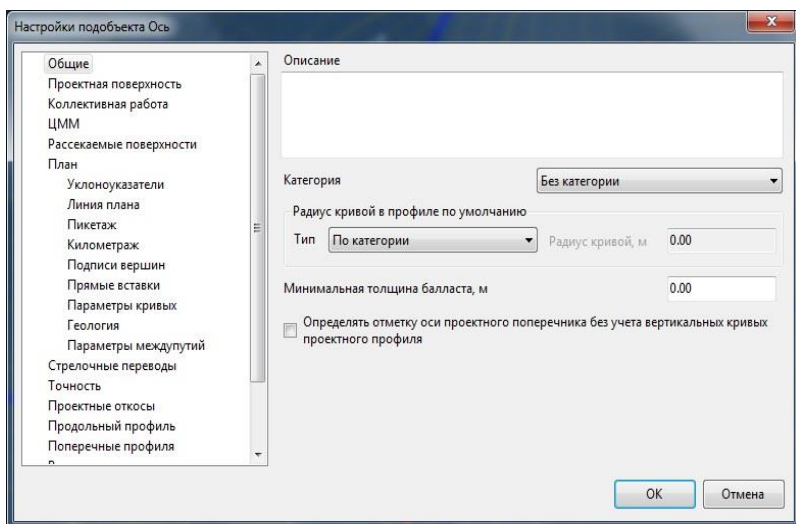


Рисунок 3.25 – Ввод исходных данных

После настройки будущей трассы создаётся сама трасса путём трассирования. Для этого во вкладке «Рисовать» выбирается «Линия нулевых работ». Далее в специальном поле вводится руководящий уклон трассы (рисунок 3.26), а затем шаг горизонталей (рисунок 3.27) и переходят непосредственно к самому процессу трассирования (рисунок 3.28). По завершении трассирования трасса спрямляется с обеспечением ее захода в населённые пункты, а в местах поворота трассы вписываются кривые, необходимые для данной категории дороги. Далее наносятся «километры» и раздельные пункты.



Рисунок 3.26 – Ввод уклона трассирования



Рисунок 3.27 – Ввод высоты сечения рельефа горизонталей

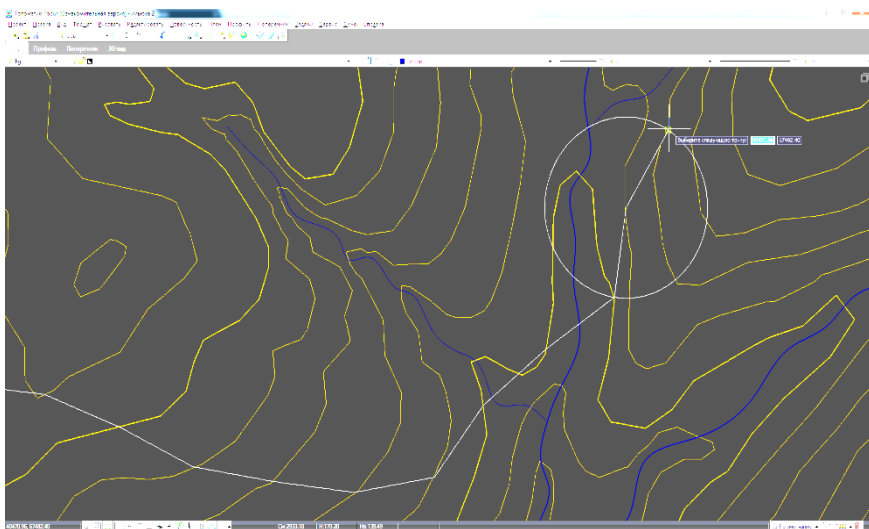


Рисунок 3.28 – Процесс трассирования

В «*Топоматик Robur – Железные дороги*» реализованы два метода трассирования: эскизное и детальное проектирование плана трассы.

*Эскизное проектирование* предназначено для быстрого редактирования горизонтального положения оси трассы. Ось представляется в виде набора вершин горизонтальных углов поворота. В каждый угол могут быть вписаны круговые и переходные кривые (рисунок 3.29). В программу заложен гибкий функционал для работы с трассами, содержащими как однорядусные, так и сложные составные кривые. Вершины углов или прямолинейные участки вместе с вписанными кривыми можно визуально перемещать и редактировать при помощи мыши.

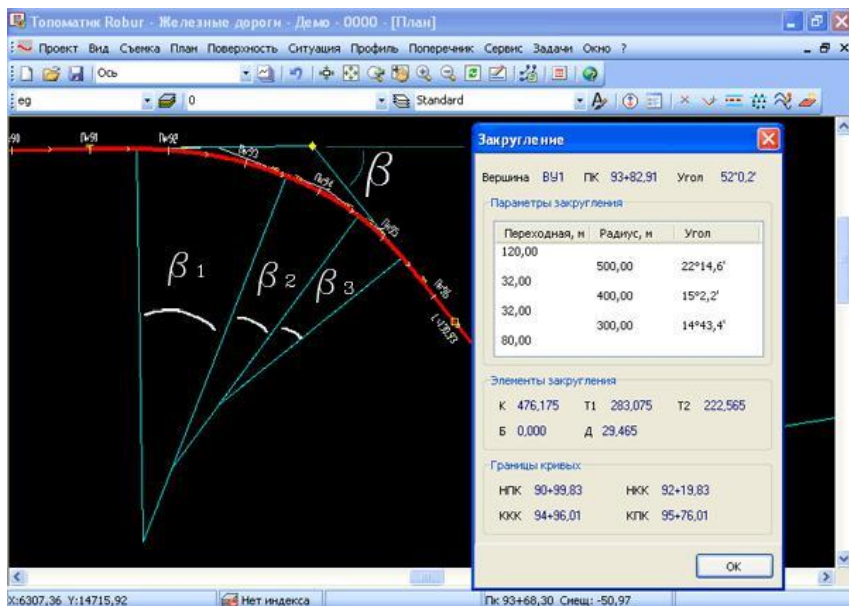


Рисунок 3.29 – Процесс вписывания круговой кривой с переходными

Данный модуль также имеет набор функций, позволяющих полноценно учитывать специфику железнодорожного трассирования. Например, для работы с объектами большой протяженности, выполняемой группой специалистов, имеется возможность «разрезки» и последующей «склейки» проектного решения. Для проектирования в сложных или стесненных условиях заложены механизмы трассирования по руководящему уклону, отображение значений междупутий и прочий набор задач детального проектирования.

Одним из наиболее мощных инструментов эскизного метода является режим *динамического трассирования*, позволяющий локально менять плановое положение оси трассы, сохраняя при этом запроектированные продольный профиль и поперечники на тех участках, где ось не менялась. Например, при увеличении радиуса круговой кривой, как показано на рисунке 3.30, ось трассы сместится, а «Топоматик Robur – Железные дороги» автоматически перепроектирует продольный профиль и земляное полотно на изменившемся участке, за границами изменений оно останется нетронутым.

*Динамическое трассирование* позволяет колоссально сократить время и затраты труда проектировщиков, особенно при реконструкции, обосновании инвестиций и многочисленных согласованиях проекта.



Рисунок 3.30 – Изменение положения оси трассы при реконструкции железной дороги

Детальное проектирование предназначено для скрупулезного подбора параметров оси трассы. Ключевую роль здесь играют примитивы типа «Осевая линия», состоящие из сопряженных элементов: отрезков, дуг и кло-тоид. Каждый элемент имеет фиксирующие точки, закрепляющие его от сдвига или поворота. При редактировании осевой линии, путем перетаскивания мышью фиксирующих точек, осевая линия динамически перестраивается, причем зафиксированные элементы остаются на месте.

### 3.4 План железных дорог

**Планом железной дороги** называется проекция оси пути на горизонтальную плоскость. Железная дорога в плане представляет собой сочетание чередующихся прямолинейных и криволинейных участков [2].

Прямолинейные участки характеризуются их длиной и направленностью (азимутом). С эксплуатационной точки зрения желательно иметь прямые участки как можно большей длины. В мировой практике строительства железных дорог есть прямые участки достаточно большого протяжения (528 км в Австралии, 330 км в Аргентине, 95 км в России и др.). Однако такие примеры являются исключением из общего правила.

Сопряжение прямолинейных участков между собой осуществляется при помощи кривых (приложение Д). Наличие в плане железной дороги кривых обусловлено необходимостью отклонения трассы от кратчайшего направления с целью лучшего вписывания в существующий рельеф местности и обхода различного рода препятствий (рисунок 3.31).

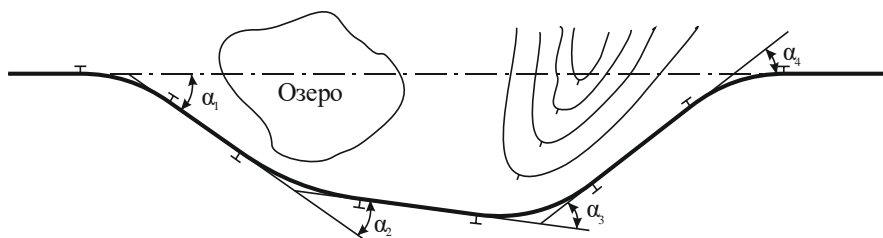


Рисунок 3.31 – Участок плана железной дороги

Удельный вес криволинейных участков пути на железных дорогах любой страны зависит от рельефа местности (в горной Швейцарии – 37 % всей длины железнодорожной сети, во Франции и Германии – 31 %, в России и Беларуси – 25 %).

**Круговые кривые.** Кривые в плане железнодорожной линии характеризуются параметрами: углом поворота  $\alpha$ , радиусом  $R$ , длиной кривой  $K$ , тангенсом  $T^*$ , биссектрисой  $B$ , домером  $D$  и направлением поворота. На рисунке 3.31 показан поворот на величину угла  $\alpha$  вправо по ходу линии.

Угол поворота и радиус кривой при трассировании новой железной дороги назначаются исходя из целесообразности и экономичности плана линии, диктуемыми топографическими или геологическими условиями рельефа местности. Остальные параметры в зависимости от принятых к проектированию значений  $\alpha$  и  $R$  либо для сокращения трудоемких вычислений при разбивке кривых на местности принимаются по специальным таблицам либо рассчитываются по известным формулам:

$$T = R \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}; \quad K = \frac{\pi R \alpha}{180},$$

$$B = R \left( \sec \frac{\alpha}{2} - 1 \right); \quad D = 2T - K.$$

С точки зрения уменьшения длины кривой желательно применять малые углы поворота. Но минимальное значение угла поворота ограничивается необходимостью устройства переходной кривой, т. е. условием  $K \geq l_{\text{пк}} + 50$ , где  $l_{\text{пк}}$  – длина переходной кривой, м; 50 – длина двух пассажирских ваго-

---

\* Параметры тангенс  $T$  и биссектриса  $B$  не имеют ничего общего с одноименными математическими понятиями, а являются в данном случае всего лишь условными обозначениями, принятыми в практике проектирования путей сообщения.

нов, м. Максимальное значение угла поворота теоретически не ограничивается и может быть, например при спиральном развитии линии, больше  $360^\circ$ .

От величины радиуса в значительной степени зависит положение железнодорожной линии в пределах кривой. Со строительной точки зрения целесообразнее назначать кривые малых радиусов, так как в общем случае чем меньше радиус кривой, тем меньше объемы земляных работ и работ по возведению водопропускных сооружений (рисунок 3.32).

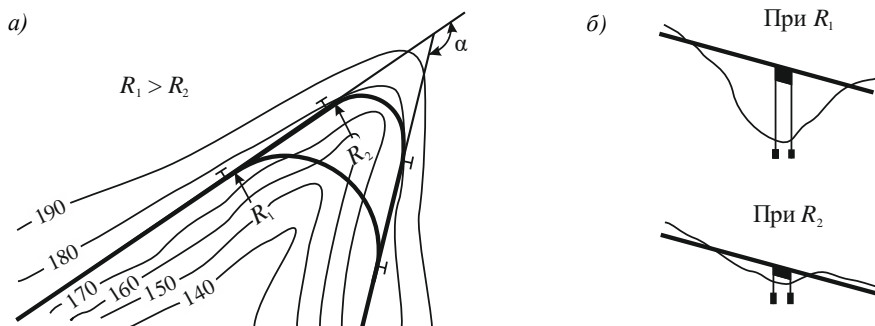


Рисунок 3.32 – Влияние величины радиуса кривой на объемы работ:  
а – план; б – продольный профиль

Однако применение криволинейных участков по сравнению с прямолинейными сопряжено с рядом существенных недостатков, которые в зависимости от места размещения кривой в плане и профиле железной дороги более или менее ощутимы.

К основным недостаткам кривых малых радиусов относятся: необходимость ограничения скорости движения поездов; удлинение проектируемой линии; повышенный износ рельсов; увеличение расходов на текущее содержание верхнего строения пути и ремонт подвижного состава; усиление контактной сети на электрифицированных линиях; снижение коэффициента сцепления колес локомотива с рельсами.

*Ограничение (снижение) скорости движения обусловлено требованиями обеспечения безопасности движения поездов, создания комфортных условий поездки для пассажиров, уменьшения износа рельсов в таких кривых под действием боковых сил. Дело в том, что на поезд массы  $m$ , движущийся в любой кривой (а в кривой радиуса  $R < 500$  м в особенности), действует сила  $F_{цб}$ , которая пропорциональна квадрату скорости  $F_{цб} = mv^2/R$  и направлена от центра наружу кривой (рисунок 3.33). Под действием этой силы имеет место значительная перегрузка наружного рельса, а при больших значениях скорости, кроме того, создается угроза опрокидывания подвижного состава.*

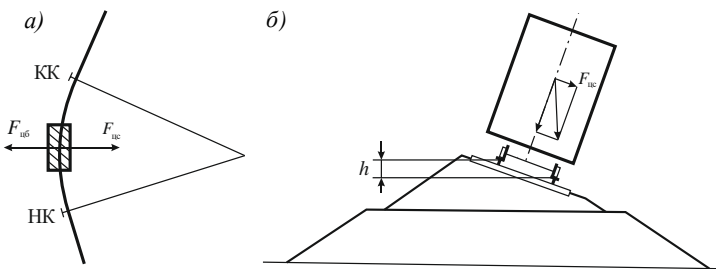


Рисунок 3.33 – Движение вагона в кривой:  
а – в плане; б – в профиле

Чтобы этого избежать, в кривых малых радиусов устраивается возвышение наружного рельса  $h$  по отношению к внутреннему. Благодаря возвышению возникает сила  $F_{цс}$ , стремящаяся к центру (центростремительная), которая несколько уменьшает вредное воздействие центробежной силы. Однако даже при максимально допустимом нормативными документами возвышении 150 мм центробежная сила полностью не уравнивается центростремительной.

Поэтому, чтобы перегрузка наружного рельса не превысила допустимой величины, требуется дополнительное уменьшение центробежной силы, что возможно только за счет снижения скорости движения. Максимально допустимая в кривых малых радиусов скорость может быть определена из выражения  $v_{доп} = 4,6\sqrt{R}$ .

Снижение скорости является едва ли не самым существенным недостатком кривых малых радиусов, так как влечет за собой увеличение времени хода поезда по ограничивающему перегону, а на линиях с плотным графиком движения – еще и к уменьшению пропускной способности. Кроме того, вынужденное торможение при снижении скорости и последующий разгон ведут к увеличению энергетических затрат на тягу поезда и к безвозвратной потере кинетической энергии, накопленной поездом на участке пути, предшествующем кривой.

Удлинение линии  $\Delta L$  при увеличении величины радиуса кривой в плане с  $R_1$  до  $R_2$  и неизменном угле поворота  $\alpha$  (рисунок 3.34) можно ориентировочно определить из выражения

$$\Delta L = 2(T_1 - T_2) + K_2 - K_1,$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – тангенсы кривых радиусов соответственно  $R_1$  и  $R_2$ , м;

$K_1$  и  $K_2$  – длины этих кривых, м.

При увеличении угла поворота увеличивается и удлинение линии, причем оно тем больше, чем больше угол поворота. Например, при уменьшении радиуса кривой с 1000 до 600 м и угле поворота  $60^\circ$  удлинение линии в 4 раза меньше, чем при угле поворота  $90^\circ$ , и почти в 13 раз меньше, чем при  $120^\circ$ .



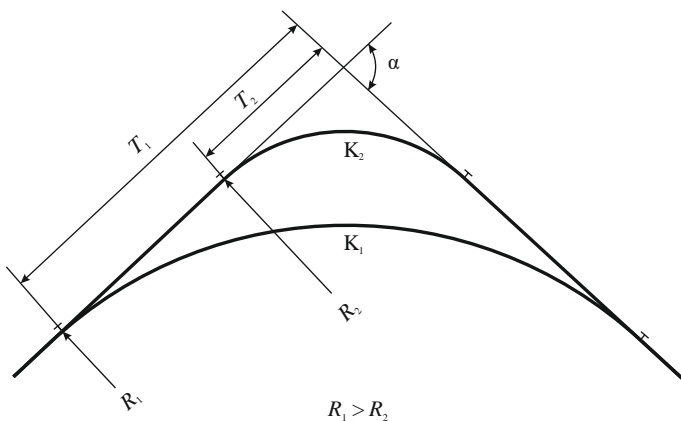


Рисунок 3.34 – Удлинение линии при уменьшении радиуса кривой и неизменном угле поворота

Удлинение линии, кроме того, влечет за собой рост строительной стоимости и ежегодных эксплуатационных расходов, а также увеличение времени хода поезда и общего пробега локомотивов и вагонов по проектируемой железной дороге [2].

*Повышенный износ рельсов и общее расстройство пути* в значительной степени зависит от радиуса кривой. Это является следствием прижатия реборды колеса подвижного состава к боковой грани наружного рельса под действием поперечных сил (боковой износ) и проскальзыванием колес, жестко насаженных на одну ось (вертикальный износ). Причем износ особенно интенсивно возрастает в кривых радиусом менее 600 м.

Это может привести к механическому износу и сокращению сроков службы шпал в кривых, уширению балластной призмы с наружной стороны кривой, увеличению расхода балласта, увеличению случаев повреждаемости и одиночного выхода рельсов и потребовать более частой рихтовки пути. Всё это значительно повышает расходы по текущему содержанию и ремонту пути, которые в кривых возрастают практически обратно пропорционально квадрату радиуса.

*Увеличение расходов на ремонт подвижного состава* обусловлено повышенным износом бандажей колес и расстройством ходовых частей локомотивов и вагонов под действием возрастающих в кривых боковых сил. Этот износ находится примерно в такой же зависимости, как и износ рельсов.

*Уменьшение коэффициента сцепления с рельсами* ведущих колес локомотива вызывается увеличением проскальзывания их по внутреннему рельсу из-за неравенства пути, проходимого одновременно по наружной и внутренней рельсовым нитям колесами каждой движущей оси. Оно становится особенно ощутимым в кривых радиусом менее 800 м на железнодорожных линиях с тепловозной тягой и менее 500 м – на электрифицированных линиях.

На участках с ограничивающими подъемами уменьшение коэффициента сцепления приводит к уменьшению силы тяги, ограниченной по сцеплению, по сравнению с ее расчетным значением. В этой связи может потребоваться либо снижение скорости движения (при небольшой длине нескольких разрозненно размещенных кривых), либо дополнительное смягчение ограничивающего уклона (в длинных кривых и кривых, близко расположенных друг к другу). Причем смягчение потребуется не только в самой кривой, но и перед ней с низовой стороны на длине, равной длине поезда.

*Усиление контактной сети* в кривых малых радиусов на электрифицированных линиях выражается в увеличении числа опор на один километр пути. Это обусловлено необходимостью обеспечения надежного токосъема пантографом электровоза с контактного провода на довольно крутом повороте трассы.

В то же время, хотя описанные выше недостатки вызывают увеличение отдельных составляющих строительной стоимости и ухудшение некоторых эксплуатационных показателей, в сложных топографических условиях уменьшение радиусов кривых может привести к существенному снижению общих строительных затрат.

С учетом всего вышесказанного для удобства полевой разбивки и эксплуатации пути в кривых нормами проектирования новых железнодорожных линий установлены округленные до 10 м стандартные величины радиусов круговых кривых в диапазоне от 4000 до 200 м [9] в зависимости от категории линии, скорости движения поездов и рельефа местности (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Радиусы кривых в плане

В метрах

Категория железнодорожной линии	Рекомендуемые	Допускаемые	
		в трудных условиях	в особо трудных условиях при технико-экономическом обосновании
Скоростные	4000–3000	2500	1200
Пассажирские	4000–2500	2000	1000
Особогрузонапряженные:	4000–2000	1500	1000
I	4000–2500	2000	1000
II	4000–2000	1500	800
III	4000–1200	800	600
IV	2000–1000	600	350
<p><i>Примечание</i> – Для развязок в железнодорожных узлах допускается применять кривые радиусом от 300 до 350 м для любой категории железнодорожной линии. В особо трудных условиях при обосновании технико-экономическими и тяговыми расчетами допускается применять радиусы кривых менее 350 м.</p>			

При этом радиусы подразделяются на рекомендуемые (большие), допускаемые в трудных условиях (средние) и допускаемые в особо трудных условиях при технико-экономическом обосновании (малые).

Для сокращения длины проектируемой линии и стоимости ее строительства, улучшения условий вписывания подвижного состава и увеличения скорости движения поездов, а также уменьшения пробега поездов и снижения эксплуатационных расходов желательнее назначать кривые как можно большего радиуса, если это не влечет за собой существенного увеличения объемов работ.

Однако при проектировании новых железных дорог в странах СНГ кривые радиусом более 4000 м, как правило, не назначаются. Это обусловлено определенными трудностями в их разбивке и текущем содержании (они под действием поездной нагрузки легко теряют свое правильное геометрическое очертание, т. е. сбиваются, превращаясь в отрезки прямых и кривых), а также довольно значительным общим удлинением кривых даже при малых углах поворота. Например, при угле поворота  $8^\circ$  и радиусе кривой 1000 м длина ее составляет всего 139,63 м, а при радиусе 4000 м – уже 558,52 м.

Следует, однако, отметить, что в отдельных случаях применяются и радиусы значительно большей величины (например, в России на линиях Москва – Нижний Новгород – 6400 м, Москва – Санкт-Петербург – 7240 м, а в США – даже 10000 м).

Величина минимально допустимого радиуса кривой в плане определяется условиями гарантии безопасного вписывания в нее подвижного состава, предполагаемого к обращению на проектируемой линии. Современные локомотивы вписываются в кривые радиусом 125–140 м. Практика, однако, показывает, что содержание пути в устойчивом состоянии при столь малых радиусах связано с очень большими трудностями, особенно при мощных локомотивах и тяжеловесных грузовых поездах. Поэтому с учетом необходимости некоторого запаса и возможных неточностей в разбивке и содержании таких кривых минимально допустимая величина радиуса на новых линиях по нормам проектирования увеличена до 200 м. Однако применение кривых такого радиуса даже в особо трудных условиях требует соответствующего технико-экономического обоснования.

Обоснование радиусов кривых заключается в сопоставлении экономии в объемах строительных работ при использовании кривых меньшего радиуса с увеличением годовых эксплуатационных расходов, вызываемых потерями времени хода и энергии при снижении скорости движения поездов и другими недостатками, которые присущи кривым малых радиусов. Однако установление оптимального значения радиуса кривой является достаточно сложной задачей, потому производится только в очень сложных случаях.

**Смежные кривые.** При проектировании новых железных дорог, особенно в условиях сложного рельефа местности, число кривых в плане увеличивается. При этом нередко расстояния между этими кривыми оказываются настолько малыми (меньше длины поезда), что одна кривая может оказывать влияние на условия движения поезда в другой, близко расположенной от нее кривой, в результате чего движение поезда становится неплавным. Такие кривые принято называть *смежными*, или *зависимыми*. Они могут быть направлены в одну или в разные стороны.

На таких участках поезд при своем движении с установленной скоростью входит во вторую кривую в то время, когда поперечные колебания экипажа от неуравновешенной центробежной силы, возникшие в первой кривой, могут еще не стабилизироваться, т. е. не затухнуть. Вход во вторую, близко расположенную, кривую, вновь вызывает наклон кузова экипажа и возникновение поперечных колебаний. Суммарная амплитуда этих колебаний может достигнуть критического значения. Для того чтобы поперечные колебания кузова после выхода из первой кривой до момента входа экипажа в следующую кривую успели стабилизироваться, т. е. стали такими, какими они обычно бывают на прямых участках большого протяжения, между этими кривыми, как правило, устраивается прямая вставка  $a$ , измеряемая между начальными точками переходных кривых (рисунок 3.35).

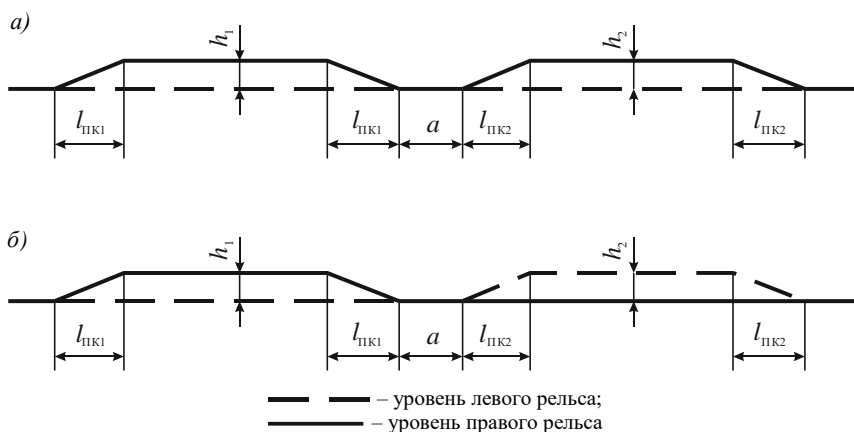


Рисунок 3.35 – Уровень правой и левой рельсовых нитей в кривых, направленных:  $a$  – в одну сторону;  $б$  – в разные стороны

Длина прямой вставки зависит от скорости движения поезда, продолжительности колебаний до их затухания и условий движения поезда в одно- и разнонаправленных кривых. Если кривые направлены в одну сторону, то при проходе

как первой, так и второй кривой подвижной состав наклоняется в одну и ту же сторону (см. рисунок 3.35, а). Если кривые направлены в разные стороны, то подвижной состав при входе в первую кривую наклоняется в одну сторону, затем на прямом участке выпрямляется, а при входе во вторую кривую наклоняется в обратную сторону, т. е. происходит его «покачивание» (см. рисунок 3.35, б). Считается, что во втором случае условия движения поезда более благоприятны, чем в первом. Поэтому нормами проектирования железных дорог разрешается устраивать прямые вставки между смежными разнонаправленными кривыми меньше, чем между кривыми одного направления (таблица 3.2) [2].

При камеральном трассировании переходные кривые на профильной схеме плана не указываются. Поэтому, проектируя смежные кривые, для обеспечения требуемого расстояния между двумя круговыми кривыми с учетом устройства переходной кривой предусматривается так называемая фиктивная, или строительная, прямая вставка  $b$  (рисунок 3.26). Длина этой вставки измеряется между конечными точками несдвинутых круговых кривых  $b = l_{пк1}/2 + a + l_{пк2}/2$ .

Таблица 3.2 – Длина прямой вставки

В метрах

Категория железнодорожной линии	В нормальных условиях между кривыми, направленными		В трудных условиях между кривыми, направленными	
	в разные стороны	в одну сторону	в разные стороны	в одну сторону
Скоростные	150	150	100	100
Пассажирские	150	150	50	75
Особогрузонапряженные:	75	100	50	50
I и II	150	150	50	75
III	75	100	50	50
IV	50	50	30	30

*Примечание* – В случаях, когда на особогрузонапряженных линиях предусматривается максимальная скорость движения пассажирских поездов свыше 120 км/ч, прямые вставки на указанных линиях следует принимать по нормам, предусмотренным для железнодорожных линий I категории.

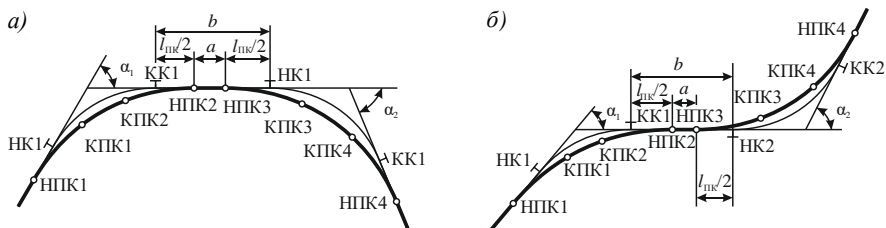


Рисунок 3.36 – Смежные кривые, направленные:  
а – в одну сторону; б – в разные стороны

**Переходные кривые.** При входе в круговую кривую в начальной точке сопряжения ее с прямым участком подвижной состав испытывает боковой удар, происхождение которого объясняется внезапным появлением центробежной силы. Эта сила действует по всей длине круговой кривой и исчезает в конечной ее точке так же внезапно, как и появилась в начальной точке. Такое внезапное появление и исчезновение центробежной силы вызвало бы нарушение плавности движения поезда. Для того чтобы этого не произошло, т. е. для обеспечения плавного перехода поезда из прямой в круговую кривую, а затем из кривой обратно на следующую прямую, устраивается переходная кривая переменной кривизны (рисунок 3.37). В пределах этой кривой обеспечиваются постепенное изменение радиуса от бесконечности на прямой до известного конечного значения его в круговой кривой; плавный отвод возвышения наружного рельса, устраиваемого в круговой кривой; в кривых радиуса менее 350 м – еще и переход от ширины колеи 1520 мм на прямом участке к увеличенной ширине колеи в кривой.

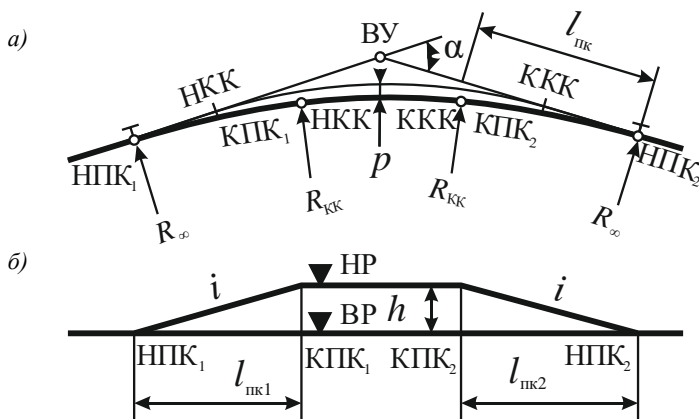


Рисунок 3.37 – Сопряжение прямых участков с помощью кривых:  
а – план; б – профиль

В качестве переходной кривой в станях СНГ применяют радиоидальную спираль (клотоиду), кривизна которой изменяется обратно пропорционально ее текущей длине.

Для удобства разбивки и содержания длину переходной кривой принимают равной длине участка отвода возвышения наружного рельса. Возвышение принято отводить по прямой наклонной линии (см. рисунок 3.37). В этом случае длина переходной кривой  $l_{пк}$  зависит от возвышения наружного рельса  $h$  и уклона отвода возвышения  $i$ :  $l_{пк} = h/i$ .

Уклон отвода возвышения в расчетах не должен превышать 1 ‰, а в затруднительных случаях разрешается увеличивать его до 2 ‰.

Полученные в результате расчета длины переходных кривых в практике проектирования округляются в большую сторону до значений, кратных 10.

При проектировании новых скоростных железных дорог и линий I и II категорий длины переходных кривых определяются в зависимости от возвышения наружного рельса  $h$ , мм, и максимально допустимой на линии скорости движения,  $v_{\max}$ , км/ч, из выражений:

$$\text{– в обычных (нормальных) условиях – } l_{\text{пк}} = \frac{hv_{\max}}{100};$$

$$\text{– в трудных и особотрудных условиях – } l_{\text{пк}} = \frac{hv_{\max}}{125}.$$

Согласно «Своду Правил РФ. Железные дороги колеи 1520 мм» [20] (далее – Свод правил) длины переходных кривых на особогрузонапряженных линиях и линиях III и IV категорий, проектируемых в среднеестественных условиях, принимаются по таблице 3.3 в зависимости от радиуса кривой, категории линии, а также зоны скоростей движения.

**Скоростные зоны** характеризуют очертание продольного профиля на участке пути, где располагается рассматриваемая кривая (рисунок 3.38).

К *первой* зоне относятся углубления профиля (ямы), уступы (ступени) продольного профиля и примыкающие к ним участки затяжных подъемов, а также другие участки, проходимые грузовыми поездами в обоих направлениях с максимальными или близкими к ним скоростями; ко *второй* зоне – горизонтальные площадки, уступы, углубления и возвышения профиля с нетормозными, незатяжными подъемами, которые поезда проходят в режиме тяги и на которых средневзвешенная квадратическая скорость близка к средним значениям скорости движения грузовых поездов; к *третьей* – возвышения профиля и примыкающие к ним участки затяжных подъемов (горбов), по которым грузовые поезда в обоих направлениях следуют со скоростями, близкими к расчетно-максимальным на руководящем подъеме.

Таблица 3.3 – Длины переходных кривых

В метрах

Радиус кривой	На железнодорожных линиях и подъездных путях								
	особогрузонапряженных			III категории			IV категории		
	Зона скоростей движения								
	1-я	2-я	3-я	1-я	2-я	3-я	1-я	2-я	3-я
4000	40	30	20	30	20	20	–	–	–
3000	60–40	40–30	20	40–30	30–20	20	–	–	–
2500	80–60	50–30	20	60–40	40–30	20	–	–	–
2000	100–80	60–40	30	60–50	50–30	20	40–30	30	20
1300	100–80	60–40	40–30	80–60	50–40	30–20	50–30	30	20

Окончание таблицы 3.3

Ра- диус кри- вой	На железнодорожных линиях и подъездных путях								
	особогрузонапряженных			III категории			IV категории		
	Зоны скоростей движения								
	1-я	2-я	3-я	1-я	2-я	3-я	1-я	2-я	3-я
1500	120–100	80–60	50–40	80–60	60–50	40–30	60–40	40–30	30
1200	140–120	100–80	60–50	100–80	80–60	40–30	60–50	50–30	30
1000	140–120	120–100	70–50	120–100	80–60	50–40	80–60	50–40	30
800	160–140	140–100	80–50	140–100	100–80	50–40	90–60	60–50	40–30
700	160–140	140–120	80–60	160–120	110–90	60–50	120–80	60–50	40–30
600	160–130	140–120	100–60	160–120	120–100	60–50	120–80	80–60	50–40
500	160–120	140–120	120–70	160–120	130–100	80–60	120–100	90–70	60–40
400	160–120	140–120	140–80	140–100	140–100	80–60	120–100	110–80	60–50
350	140–100	140–100	140–80	140–100	130–100	100–60	120–100	120–80	80–50
300	140–100	140–100	120–80	140–100	120–100	120–80	120–80	120–80	80–60
250	120–90	120–80	120–80	120–80	120–80	120–80	120–80	120–80	80–60
200	–	–	–	–	–	–	100–80	100–80	80–60

*Примечания*  
 1 При двух значениях длин переходных кривых меньшие значения допускается применять в трудных условиях.  
 2 Деление участков на зоны скоростей движения поездов следует производить в зависимости от конфигурации продольного профиля на основании тяговых расчетов.

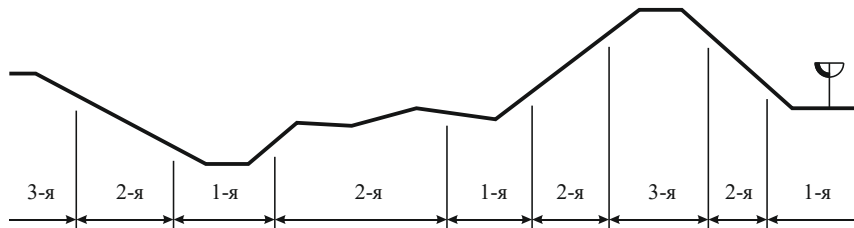


Рисунок 3.38 – Скоростные зоны

Вместе с тем Свод правил предусматривает в технико-экономически обоснованных случаях возможность для отдельных участков железных дорог особогрузонапряженных III и IV категорий длину переходных кривых устанавливать также непосредственным расчетом, если эти участки расположены в трудных условиях и на них не может быть реализована допускаемая принятым радиусом кривой скорость движения поездов.

### 3.5 Продольный профиль железных дорог

**Продольным профилем железнодорожной линии** принято называть проекцию по ее оси на вертикальную поверхность, развернутую затем на плоскость.

С точки зрения эксплуатации железных дорог в известной мере идеалом продольного профиля является горизонтальная линия (площадка), которой со-



ответствуют наименьшие расходы по тяге и движению поездов, зависящие на таком профиле только лишь от величины основного сопротивления движению.

Но другой не менее важный фактор – строительные расходы, на размеры которых оказывает огромное влияние топография района проложения трассы – вынуждает отказаться от такого, на первый взгляд, идеального эксплуатационного профиля и проектировать его такими элементами, которые дали бы возможность снизить строительную стоимость за счет проложения линии применительно к топографии местности.

В этой связи для преодоления железной дорогой различного рода высотных препятствий в вертикальной плоскости и уменьшения при этом объемов земляных работ линия в продольном профиле проектируется площадками и уклонами, которые в зависимости от направления движения поезда являются спусками или подъемами (рисунок 3.39).

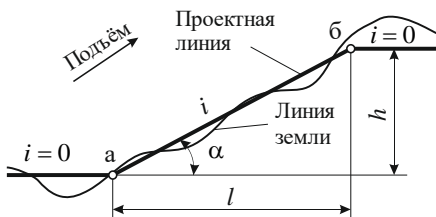


Рисунок 3.39 – Уклон и длина элемента продольного профиля

Участок профиля однообразной крутизны называется *элементом продольного профиля* (участок «а – б» на рисунке 3.39). Главнейшими характеристиками продольного профиля служат крутизна уклона, длина отдельных его элементов и сопряжение этих элементов в местах их пересечений.

*Крутизна уклона* измеряется отношением высоты подъема (спуска)  $h$  в метрах к горизонтальной проекции его длины (заложению)  $l$  в километрах (см. рисунок 3.39) и выражается в промилле (в практике проектирования железных дорог эту единицу принято называть «тысячная»). Таким образом, уклон элемента есть тангенс угла наклона элемента к горизонту: если  $\text{tg}\alpha = 0,010$ , то уклон  $i = 10 \text{ ‰}$ , т. е. на протяжении 1 км длины линии преодолевается (теряется) высота 10 м.

Уклон элемента, по которому поезд движется на подъем, считается положительным, а на спуск – отрицательным. Элемент профиля с уклоном  $i = 0$  называется *горизонтальной площадкой*, или просто *площадкой*. Площадка называется *разделительной*, если к ней с обеих сторон примыкают подъемы или спуски (рисунок 3.40).

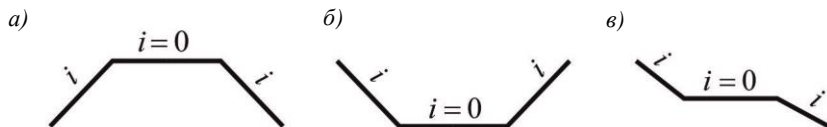


Рисунок 3.40 – Разделительные площадки:  
а – на «горбе»; б – в «яме»; в – на уступе

Точка сопряжения двух соседних элементов называется *точкой перелома профиля*. Перелом профиля характеризуется алгебраической разностью уклонов  $\Delta i = i_2 - i_1$ , которая принимается обычно по модулю  $\Delta i = |i_2 - i_1|$ .

Расстояние между двумя смежными точками перелома называется *длиной элемента*. Длину элемента профиля принято измерять не по гипотенузе (см. «а – б» на рисунке 3.39), а по катету, т. е. по проекции ее длины  $l$  на горизонтальную ось. Допускаемая при этом погрешность весьма незначительна. Так, даже при уклоне 30 ‰, максимальном для линии самой низкой IV категории, угол наклона элемента профиля к его горизонту  $\alpha = 1^\circ 43'$ , а разница между фактической длиной элемента и его горизонтальной проекцией составляет всего 4 см на 100 м длины.

### **3.6 Обеспечение плавности, безопасности и бесперебойности движения поездов при проектировании продольного профиля**

*Обеспечение допускаемой величины и скорости изменения продольных усилий в поезде.* При прохождении поездом переломов профиля в автосцепке возникают дополнительные продольные усилия. Если под поездом много переломов профиля, то продольные усилия суммируются, что может привести к разрыву автосцепки. Моделируя движение поезда и рассматривая его как систему твердых тел (вагоны), соединенных упругими связями (автосцепкой), можно выделить два вида движения: установившееся и неустойчивое.

*Установившееся движение* имеет место, если поезд длительное время едет в каком-то одном режиме (тяги или торможения), а это в свою очередь имеет место, если поезд движется по профилю с небольшой алгебраической разностью сопрягаемых уклонов, по «безвредному» спуску, уступу, «безвредной яме», на горбе.

*Неустойчивое движение* имеет место, если поезд часто переходит с одного режима движения на другой (включение-выключение тормозов, включение-выключение тяги), а это происходит тогда, когда поезд движется во «вредной яме», по «вредному спуску», уступу или горбу, расположенному вблизи конца тормозного спуска.

Чтобы не было разрыва сцепных приборов, продольное ускорение не должно превышать величину  $(0,1 - 0,15)g$ ; а для этого поезд должен двигаться по вертикальной кривой большого радиуса – 25000–70000 м. Такие радиусы практически трудно запроектировать и содержать, поэтому применяют огибающий такие кривые многоугольник. Длина элемента многоугольника

$$l = \frac{R_{\text{в}}}{1000} \Delta i.$$

Подставляя в формулу  $R_{\text{в}}$  и задаваясь величиной  $\Delta i$ , получаем значение  $l$ .

В [9] приводятся значения разности сопрягаемых уклонов  $\Delta i$  и длин элементов переходной крутизны  $l$  при сопряжении смежных элементов продольного профиля.

*Предохранение проектируемой линии от затопления и размыва.* Бровка железнодорожного земляного полотна должна возвышаться над уровнем высокой воды с учетом подпора и набега волны не менее чем на 0,5 м (рисунок 3.41).

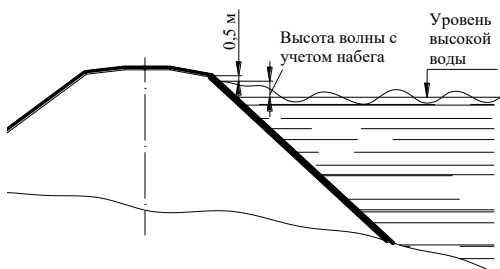


Рисунок 3.41 – Наименьшее возвышение бровки земляного полотна в пределах водотока

Вода отводится от земляного полотна по водоотводным канавам и резервам вдоль насыпей, по кюветам вдоль выемок. С основной площадки земляного полотна отвод воды осуществляется с помощью сливной призмы, размеры которой 0,15 м по высоте и 2,3 м по ширине (рисунок 3.42).

Площадка в выемке допускается длиной до 400 м. В противном случае она заменяется двумя обратными уклонами с целью обеспечения водоотвода (рисунок 3.43).

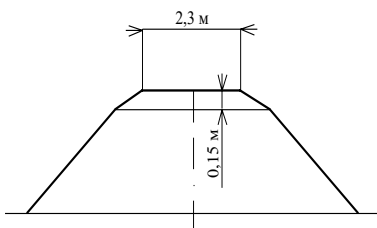


Рисунок 3.42 – Сливная призма

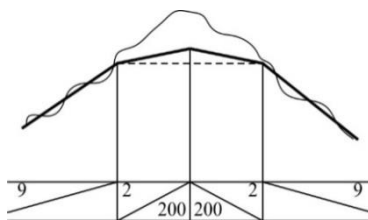


Рисунок 3.43 – Замена горизонтальной площадки в выемке

*Проектирование пересечений железной дороги с другими видами дорог.* Пересечения железных дорог с автомобильными и другими дорогами проектируются в разных уровнях для дорог I–III категорий.

**Обеспечение условий бесперебойности движения поездов при проектировании плана и профиля.**

Обеспечение условия невыхождения фактического сопротивления движению поезда расчетной величины. При движении по участку поезд должен испытывать одно и то же сопротивление движению как на прямых, так и на кривых участках пути. Масса состава определяется из условия движения поезда по расчетному подъему с расчетной скоростью по формуле

$$Q = \frac{F_k - P(w'_0 + i_p)g}{(w''_0 + i_p)g},$$

где  $F_k$  – сила тяги, Н.

Если в плане есть кривая, то появляется дополнительное сопротивление от кривой. Для уменьшения сопротивления движению поезда в кривой необходимо руководящий уклон уменьшить на величину уклона, эквивалентного сопротивлению от кривой, т. е. в кривой руководящий уклон  $i_p - i_{\psi(k)}$  (рисунок 3.44).

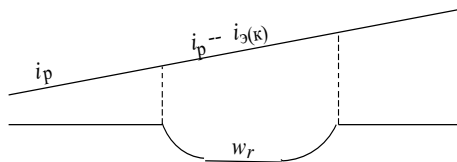


Рисунок 3.44 – Смягчение руководящего уклона в кривой

В кривых малого радиуса уменьшается коэффициент сцепления колес с рельсами. Сила тяги по сцеплению

$$F_{k(сц)} = 1000P\psi_{сц}.$$

Так как уменьшается коэффициент сцепления колес с рельсами, уменьшается и сила тяги по сцеплению. Для компенсации уменьшения силы тяги необходимо руководящий уклон  $i_p$  в кривой уменьшить на величину  $i\psi$ , а также на подходе со стороны подъема на длине, равной длине поезда на  $i\psi$ , для того, чтобы и локомотив, и вагоны испытывали одно и то же сопротивление движению.

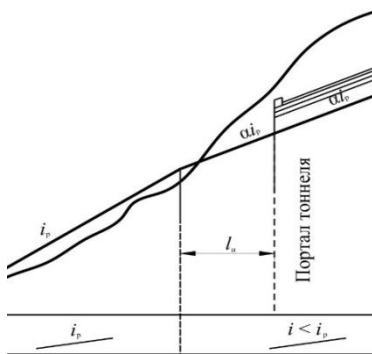


Рисунок 3.45 – Смягчение уклона в тоннеле и на подходах к нему

В тоннелях из-за повышенной влажности и плохой вентиляции сила тяги локомотива уменьшается. Для компенсации уменьшения силы тяги руководящий уклон в тоннеле и на подходе со стороны подъема на длине, равной длине поезда, уменьшается. Уменьшение руководящего уклона учитывается коэффициентом  $\alpha$ , значение которого приводится в СТН в зависимости от длины тоннеля (рисунок 3.45, таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Коэффициенты для определения наибольшего уклона в тоннелях

Длина тоннеля, км	0,3–1,0	1,0–3,0	Свыше 3,0
Коэффициент $\alpha$	0,90	0,85	0,80–0,75

*Предохранение земляного полотна от снежных заносов.* Практикой проектирования выработаны следующие основные положения.

1 При проектировании необходимо учитывать, по возможности, направления господствующих ветров, распространения снежных заносов из практики проектирования.

2 Преимущество при проектировании отдается насыпям, так как все выемки заносятся снегом.

3 Минимальная высота насыпи определяется по [3].

$$h_n^{\min} = h_p + 0,7 \text{ м} - \text{для однопутных линий};$$

$$h_n^{\min} = h_p + 1 \text{ м} - \text{для двухпутных линий},$$

где  $h_p$  – расчетная толщина снежного покрова в районе проектирования, м.

*Обеспечение трогания с места поезда при остановке его перед закрытым входным сигналом светофора на раздельном пункте.* Данная проекторка обеспечивает трогание с места поезда, остановившегося перед закрытым сигналом входного светофора (рисунок 3.46).

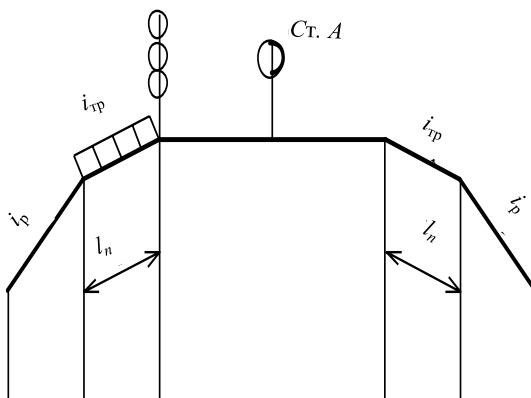


Рисунок 3.46 – Проектирование продольного профиля на подходах к раздельному пункту

*Безостановочное проследование поездом нейтральной вставки при электрической тяге.* На железной дороге с электрической тягой контактная сеть перегонов отделяется от контактной сети раздельных пунктов нейтральной вставкой. Поэтому необходимо обеспечить такую проектиров-

ку продольного профиля в пределах нейтральной вставки, чтобы поезд мог пройти ее без остановки с выключенными двигателями. Для проверки этого выполняются тяговые расчеты.

**Взаимное расположение переломов продольного профиля и кривых в плане.** Железнодорожный путь в процессе длительной эксплуатации неизбежно отклоняется от своего проектного положения, вызывая тем самым нежелательные изменения в продольном профиле и плане линии. Причем эти изменения в кривых возникают гораздо чаще, чем на прямых участках.

Для обеспечения плавности движения поезда в плане круговые кривые сопрягаются с прямолинейными участками с помощью переходных кривых, в пределах которых осуществляется постепенный отвод возвышения наружного рельса. Для выполнения этого условия в профиле смежные его элементы сопрягаются между собой посредством вертикальной кривой определенного радиуса.

Если железную дорогу запроектировать так, что переходная кривая в плане будет совпадать с сопрягающей кривой в вертикальной плоскости, то положение наружного рельса по высоте должно будет одновременно подчиняться обоим указанным условиям. В этом случае наружный рельс пришлось бы развешивать по довольно сложному профилю, что значительно затруднило бы содержание и ремонт пути.

Чтобы этого избежать, вертикальные кривые следует размещать вне переходных кривых. С учетом данного требования расстояние от начала или конца круговой кривой до точки перелома при проектировании схематического продольного профиля должно быть не менее  $L = T_B + l_{ПК} / 2$ , где  $T_B$  – тангенс кривой в вертикальной плоскости, м;  $l_{ПК}$  – длина переходной кривой, м (рисунок 3.47).

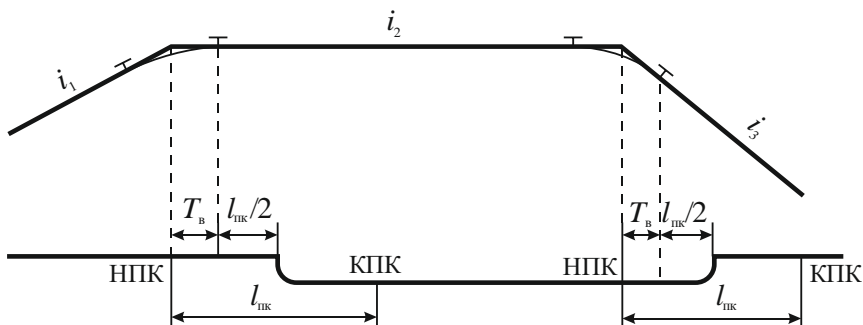


Рисунок 3.47 – Взаимное положение элементов профиля и плана (продольный профиль и план линии при несдвинутых круговых кривых)

Это требование необходимо учитывать только при тех значениях алгебраической разности уклонов смежных элементов профиля ( $\Delta i$ ), при которых требуется устраивать сопрягающую кривую в вертикальной плоскости, т. е. при алгебраической разности уклонов смежных элементов менее 2,0 ‰ при  $R_b = 20$  км; 2,3 ‰ – при  $R_b = 15$  км; 2,8 ‰ – при  $R_b = 10$  км; 4,0 ‰ – при  $R_b = 5$  км и 5,2 ‰ – при  $R_b = 3$  км вертикальные кривые допускается не предусматривать.

При значениях  $\Delta i$ , меньше указанных, переломы продольного профиля могут располагаться на границах круговых кривых, т. е. вне зависимости от плана линии. Это имеет место, в частности, при смягчении руководящего уклона в кривых, так как наибольшая алгебраическая разность сопрягаемых уклонов в этих случаях, как правило, не превышает 2 ‰.

При проектировании внутристанционных соединительных и подъездных путей IV категории в трудных условиях допускается располагать переломы профиля вне зависимости от размещения переходных кривых.

Перелом продольного профиля в пределах несдвинутых круговых кривых допускается устраивать беспрепятственно, поскольку возвышение наружного рельса в пределах круговых кривых постоянно.

### **3.7 Экономические требования к проектированию плана и продольного профиля**

Продольный профиль и план железных дорог должны удовлетворять наивыгоднейшему соотношению стоимости строительства линии и будущих эксплуатационных расходов. Намечая положение линии в плане и профиле, проектировщик получает определенные геометрические характеристики данного участка линии.

Уклоны, длину и переломы продольного профиля следует подбирать в соответствии с очертанием земли и в увязке с размещением ИССО.

Наименьшее время хода поезда и минимальный расход энергии на тягу достигаются при вогнутом профиле перегона, когда после станционной площадки следует спуск максимальной крутизны, на котором поезд достигает наибольшей допустимой скорости. После этого проектируется «безвредный» спуск. Расположение станций на возвышениях профиля обеспечивает снижение скорости перед торможением.

Следует также рассмотреть возможность увеличения радиуса кривых, ограничивающих скорости движения поездов, в особенности расположенных в ямообразных участках профиля.

Продольный профиль и план железных дорог должны удовлетворять требованиям рациональной технологии строительства. Для этого стремятся не только уменьшить рабочий объем земляных работ, но и обеспечить

соответствие размеров земляного полотна современным способам производства работ и парку строительных машин.

Таким образом, в результате проектирования плана и профиля должно быть найдено такое решение, при котором будет получено наилучшее сочетание строительной стоимости и эксплуатационных расходов. Эти решения индивидуальны, так как для каждого случая проектирования имеют место уникальные условия рельефа. Кроме того, следует иметь в виду, что эксплуатационная составляющая критерия прямо пропорциональна грузонапряженности проектируемой железной дороги. Этим определяется подход к проектированию железных дорог разных категорий и разной расчетной грузонапряженности.



## **4 ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ СРАВНЕНИЯ ВАРИАНТОВ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ**

---

### **4.1 Варианты, их роль и требования, предъявляемые к ним при проектировании трассы**

Вариант – одно из возможных решений поставленной задачи, которое затем сравнивается с другим возможным решением этой же задачи.

К сравниваемым вариантам трассы предъявляются следующие требования.

1 Варианты должны удовлетворять требованиям строительно-технических норм проектирования в одинаковой мере.

2 Полное решение поставленной задачи. Например, требуется обеспечить связью два населенных пункта железной дорогой. Возможны как минимум два варианта трассы железной дороги: один – по кратчайшему направлению, второй – с заходом в пункт С, который является грузообразующим центром (будет вывозиться продукция построенного металлургического завода).

3 Наличие общих точек сравнения. Например, из разрабатываемого карьера будет вывозиться щебень в направлении пункта А, находящегося на существующей трассе. Возможны несколько вариантов, которые требуется сравнить и выбрать наиболее целесообразное решение:

– первый вариант – строительство новой железной дороги от карьера до пункта А;

– второй вариант – строительство новой железной дороги до пункта В на существующей трассе, находящегося на наиболее близком расстоянии от карьера, а затем по существующей дороге до пункта А;

– третий вариант – строительство новой автомобильной дороги до пункта А на железной дороге;

– четвертый вариант – строительство новой автомобильной дороги до пункта В на существующей трассе, а далее до ст. А по существующей дороге.

В этих вариантах общие точки сравнения: ст. А на существующей железной дороге и отдельный пункт С в районе карьера. В местах стыковки железной дороги с автомобильными следует учитывать стоимость перегрузки щебня из автомобилей в железнодорожные вагоны.

4 Степень разработки вариантов должна быть одинакова. Нельзя сравнивать варианты, если один из них запроектирован по карте в горизонталях, а другой уложен на местности.

Проблема принятия решений состоит в выборе одного из возможных вариантов проектируемой железной дороги. При решении поставленной задачи сразу же возникает ряд вопросов по выбору основных технических параметров дороги и средств ее технического оснащения.

Основные технические параметры при их изменении в корне меняют трассу железной дороги. Например, руководящий уклон или расчетные размеры перевозок для размещения станций и разъездов. Средства технического оснащения: вид тяги, тип локомотива, полезная длина приемоотправочных путей, тип вагонного состава, средства управления, тип графика движения поезда – в процессе эксплуатации дороги можно изменить.

Сначала надо установить количество путей (однопутная или двухпутная будет строиться дорога), при какой тяге (тепловозной или электрической), какой руководящий уклон и полезная длина приемоотправочных путей. Сразу же возникает множество вариантов проекта железной дороги.

Железная дорога должна проектироваться так, чтобы были обеспечены заданные размеры перевозок, вовремя доставлялись грузы и пассажиры, обеспечивалась безопасность и бесперебойность движения поезда при наименьших затратах. Сразу же возникает вопрос, как это обеспечить при противоречивости отдельных элементов. Например, пропускной и провозной способности ( $\max$ ) и стоимости ( $\min$ ). При выборе варианта этой группы решающее значение имеет то, как вариант обеспечивает общегосударственные и транспортные цели.

В практике проектирования различают три группы вариантов, которые разрабатываются для выявления наиболее целесообразного проектного решения.

К *первой* группе относятся варианты, которые разрабатываются на стадии технико-экономического обоснования (ТЭО), когда решаются принципиальные вопросы по выбору направления трассы. Изменение направления проектируемой линии может привести к привлечению региональных инвестиций. При расчете инвестиций необходимо учесть также внутранспортные эффекты.

*Вторая* группа вариантов различается основными техническими показателями, к которым относятся различные руководящие уклоны, полезная длина приемоотправочных путей на перспективу, тип локомотива, тип верхнего строения пути, средства сигнализации и блокировки при принятом варианте первой группы.

Такие варианты сравниваются на стадии проектирования, когда устанавливается окончательное решение. Решающую роль при выборе варианта этой группы играют стоимостные показатели и эксплуатационные затраты. Решение по выбору этого варианта трассы принимает заказчик.

Принятый вариант второй группы подвергается улучшению на отдельных участках. Это может быть уменьшение объемов работ, способы их проведения, выбор типа малого водопропускного сооружения, определение числа пролетов моста, замена высокой насыпи эстакадой. Эти местные варианты составляют третью группу вариантов. По местным вариантам решение принимает проектировщик.

## 4.2 Показатели и критерии, используемые для сравнения вариантов

Для выбора наиболее качественного проектного решения используется классификация показателей по следующим признакам: содержанию, учитываемых свойств, форме выражения и степени определенности.

По содержанию выявляются следующие показатели: технические, технологические, экономические, социальные, экологические и эстетические.

*Технические* показатели включают длину варианта, коэффициент развития линии, протяжение участков с руководящим уклоном, процент его использования, долю кривых плана линии, минимальный и средний радиус кривых, сумму углов поворота кривых, протяжение площадок, вредных спусков, сумму преодолеваемых высот и другие.

*Технологические показатели* подразделяются на строительно-технологические и эксплуатационно-технологические. К *строительно-технологическим* относятся: индустриализация устройств и сооружений дороги, показатель использования прогрессивных конструкций, показатель унификации и типизации устройств и сооружений, а также их частей. *Эксплуатационно-технологические* показатели: весовая норма поезда, скорость движения поездов, время доставки грузов и пассажиров, время оборота локомотива и вагонов, резерв пропускной способности, показатель эксплуатационной надежности, сроки службы устройств и сооружений.

*Экономические показатели*: чистый дисконтированный доход (ЧДД), индекс доходности, внутренняя норма доходности, приведенные строительно-эксплуатационные расходы, срок окупаемости, суммарные капитальные вложения, срок строительства, объем земляных работ, эксплуатационные расходы, пропускная и провозная способность дороги, энерговооруженность объектов и другие.

*Социальные показатели*: изменение уровня занятости, обеспечение населения в районе проектирования в перевозках, улучшение условий труда, экономия свободного времени и другие.

*Экологические* показатели отражают степень загрязнения окружающей, воздушной и водной среды, засорение и деградацию земель, загрязнение территории промышленными отходами, негативное воздействие на растительный и животный мир.

*Эстетические* показатели характеризуют форму, гармоничность, выразительность, соответствие запроектированной железной дороги окружающей среде.

По количеству учитываемых свойств выделяются показатели единичные, комплексные и интегральные. *Единичные показатели* имеют одно из свойств проектного решения. Таким показателем может выступать, например, объем земляных работ. *Комплексный показатель* охватывает группу свойств простых показателей, которые учитываются весовым коэффициентом, устанавливаемым методом экспертных оценок или другими методами.

Примером комплексного показателя может служить категория проектируемой железной дороги (показатель научно-технического уровня дороги). ЧДД является комплексным показателем.

*Интегральный показатель* показывает соотношение полезного эффекта от ввода в действие объекта и затрат на его сооружение и эксплуатацию. Примером интегрального показателя может быть отношение провозной способности дороги к капитальным вложениям или отношение уровня надежности работы железной дороги к сметной стоимости ее строительства.

Если по показателям нельзя принять целесообразный вариант, то варианты сравниваются по денежным критериям.

Критерий – это показатель, с помощью которого производится оценка вариантов.

Теория принятия решений рассматривает железную дорогу как сложную техническую систему, характеристиками которой являются **технические параметры** (см. подразд. 6.2), которые определяют геометрические (руководящий уклон, полезная длина приемоотправочных путей), физические (масса состава поезда, скорость и время хода), структурные (число вагонов в составе, приемоотправочных и главных путей, схема расположения путей на станции и др.), функциональные (пропускная и провозная способность) и другие свойства железной дороги и ее элементов [2].

Параметры, являющиеся функциями нескольких параметров, называются *агрегатами*. Например, вагон характеризуется такими параметрами, как масса, грузоподъемность, число осей, масса тары и др. Параметры могут иметь ограничения: непрерывно меняющийся параметр – масса состава (от 0 до ограничения силой тяги локомотива либо полезной длиной приемоотправочных путей); дискретно меняющийся параметр – полезная длина приемоотправочных путей  $l_{по}$ .

Независимые параметры железных дорог определяются проектировщиками.

Для описания железной дороги как системы составляется список основных технических параметров: число главных путей – 1, руководящий уклон – 10 ‰, полезная длина приемоотправочных путей – 850 м, расчетные размеры перевозок для размещения отдельных пунктов –  $N_p = 36$  пар поездов в сутки при локомотиве 2ТЭ10Л, ширина колеи – 1520 мм. Поскольку параметры могут принимать различные значения, то составляется несколько списков, в которых определяются варианты железной дороги.

Количество железных дорог [2] определяется параметрами цели (функциональные параметры) – пропускной и провозной способностью в грузовом и пассажирском движении, которые в свою очередь определяют объем и время перевозок. Эти параметры являются существенными, так как определяют параметры цели. Остальные параметры в данной задаче несущественны, так как не влияют на конечный результат.

Таким образом, **главная задача разработки проекта железной дороги состоит в обосновании проектных решений по структуре элементов и их па-**

**раметров**, чтобы обеспечить заданные размеры перевозок (параметры цели) при минимальных затратах. Если же инвестиции в строительство ограничены, то возможна следующая постановка задачи: разработать проект железной дороги с такой структурой элементов и их параметрами, чтобы обеспечить максимальные размеры перевозок (параметры цели) при заданных затратах.

Проблема принятия решений состоит в выборе одного из возможных вариантов.

Решение поставленных задач проектирования железной дороги осуществляется *на основе методов теории принятия решений*. Задача принятия решений возникает при наличии:

1) цели (например, выбрать наилучший вариант прохождения трассы железной дороги, подобрать тип и отверстие трубы для пропуска воды и т. д.);

2) вариантов решения;

3) ограничений, накладываемых на параметры системы (например максимальное значение руководящего уклона, минимальная расчетная пропускная способность).

*Процедура принятия решений* состоит из следующих этапов [2]: содержательная постановка задачи, формализация задачи, выбор критерия, математическая постановка задачи, формирование множества возможных вариантов, выделение множества допустимых вариантов, выбор метода и решение задачи, принятие решения.

*Содержательная постановка задачи* – это естественное словесное ее описание.

*Формализация задачи*. Цель формализации состоит в переводе содержательной постановки с естественного языка понятий и терминов на язык математики – в символы и формулы.

*Выбор критерия*. Критерий – это показатель, с помощью которого производится оценка вариантов.

*Математическая постановка задачи*. Множество параметров, участвующих в задаче, можно разделить на три группы: параметры цели (размеры перевозок):  $x_1, x_2, \dots$ ; параметры системы (железной дороги):  $y_1, y_2, \dots$ ; критерий  $W$ .

Располагая параметрами и критерием, можно сформулировать математическую постановку задачи: найти такую совокупность удовлетворяющих ограничениям параметров  $y_1, y_2, \dots$  системы (железной дороги), при которой обеспечивались бы параметры цели  $x_1, x_2, \dots$  (размеры перевозок) при минимальном (максимальном) критерии (денежных затратах)  $W$ .

*Формирование множества возможных вариантов*. Любая проектная задача имеет множество решений (вариантов).

*Выделение множества допустимых вариантов*. Варианты, входящие в множество возможных, но не удовлетворяющие ограничениям, накладываемым на параметры железной дороги, исключаются из рассмотрения. Остальные варианты образуют множество допустимых.

*Выбор метода и решение задачи*. Выбор метода заключается в установлении наиболее подходящей математической процедуры для решения задачи, учитывающей ее формализованную модель, структуру критерия и ограничений.

*Принятие решения.* На основе информации, получаемой в результате применения математического аппарата, а также анализа всех показателей вариантов, учитывающих взаимодействие подсистем, взаимодействие системы с окружающей средой и надсистемой, принимается окончательное решение.

В качестве **денежных критериев** при выборе проектных решений используются: капитальные вложения  $K$  (инвестиционные затраты), эксплуатационные расходы  $C$ , дисконтированные затраты  $Z$  [2].

Капитальные вложения включают: стоимость строительства железной дороги, стоимость подвижного состава (приложение А), стоимость груза, находящегося в процессе перевозки.

Эксплуатационные расходы входят: расходы на заработную плату, на электрическую энергию и дизельное топливо, на ремонт технических устройств.

Дисконтированные затраты  $Z$  охватывают расходование всех денежных средств на строительство железной дороги за некоторый период времени  $T$ , обычно принимаемый равным 15 (20) годам.

Функция затрат  $Z(t)$  представляет собой распределение капитальных вложений и эксплуатационных расходов во времени. В зависимости от числа этапов капитальных затрат различают функции с одно- и многоэтапными капитальными вложениями. При *одноэтапных капитальных вложениях* функция затрат учитывает только первоначальные капитальные затраты на строительство железной дороги. При *многоэтапных капитальных вложениях* функции затрат помимо первоначальных учитываются последующие затраты, например, на электрификацию (если железная дорога первоначально запроектирована с тепловозной тягой), сооружение двухпутных вставок, строительство второго пути и т. п.

#### **4.3 Определение капитальных вложений для сравнения вариантов**

Определение строительной стоимости сравниваемых вариантов целесообразно вести путем подсчета стоимости объектов производственного назначения по отдельным главам сводной сметы и объектов жилищно-гражданского строительства. При проектировании новой линии капитальные вложения, которые в общем случае необходимы для строительства всех сооружений и устройств дороги, приобретения подвижного состава, сооружения сопутствующих объектов, определяются по формуле

$$K = \alpha(K_{зр} + K_{нс} + K_{вс} + K_{лин} + K_{рп} + K_{жт}), \quad (4.1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий стоимость временных сооружений и прочие затраты,  $\alpha = 1,4$ ;

$K_{зр}$  – стоимость работ по земляному полотну главных и станционных путей, тыс. руб.;

- $K_{ис}$  – стоимость работ по искусственным сооружениям, тыс. руб.;
- $K_{вс}$  – стоимость работ по верхнему строению путей, тыс. руб.;
- $K_{лин}$  – стоимость устройств, пропорциональная длине линии, тыс. руб.;
- $K_{рп}$  – стоимость сооружения раздельных пунктов, тыс. руб.;
- $K_{жг}$  – стоимость объектов жилищно-гражданского строительства, тыс. руб.

Стоимость земляного полотна и искусственных сооружений определяется непосредственным расчетом по данным об объёмах земляных работ и категории грунтов, а также в зависимости от размещения, типов и отверстий искусственных сооружений. Остальные затраты целесообразно определять по их величине, отнесенной на 1 км длины линии.

Стоимость строительства вторых путей для целей технико-экономического сравнения может быть принята по данным технико-экономических показателей вторых путей, приведенных в приложении А.

### **Определение объёмов работ и строительной стоимости земляного полотна**

Для сравнения вариантов новой железной дороги необходимо определить объёмы земляных работ:

- по сооружению земляного полотна главного пути;
- по сооружению земляного полотна для станционных путей на раздельных пунктах;
- дополнительных земляных работ.

Объём работ по сооружению земляного полотна главного пути (на перегонах и раздельных пунктах) рассчитывается по формуле

$$V_{зр} = V_{зр(гп)} + V_{зр(сп)}, \quad (4.2)$$

где  $V_{зр(гп)}$ ,  $V_{зр(сп)}$  – объём земляных работ соответственно по главному и станционным путям, тыс. м<sup>3</sup>.

Объём земляных работ по главному пути определяется по формуле

$$V_{зр(гп)} = \sum_{i=1}^n q_i l_i, \quad (4.3)$$

где  $q_i$  – объём работ отдельного  $i$ -го участка насыпи или выемки, тыс. м<sup>3</sup>;

$n$  – количество участков.

$l_i$  – длина участка насыпи или выемки, км;

Для определения объёма работ отдельного  $i$ -го участка (насыпь или выемка) весь профиль варианта разбивается на ряд участков с приблизительно одинаковыми рабочими отметками. Для каждого такого участка вычисляется средняя рабочая отметка с точностью до 0,01 м. Протяжение участка находится графически по профилю с округлением до 0,025 км при горизонтальном масштабе профиля 1 : 25000 и до 0,050 м – при масштабе 1 : 50000. Объём земляных работ по каждому участку определяется как произведение покилометрового объёма работ насыпи или выемки при данной средней рабочей отметке (см. приложение Б) на протяжении участка. При средних рабо-

чих отметках, отличающихся от значений, указанных в приложении Б, километровый объем работ следует определять по интерполяции.

Подсчет объемов земляных работ по главному пути для каждого варианта рекомендуется выполнять в табличной форме (таблица 4.1).

Если на части перегона предусматривается устройство двухпутной вставки с нормальным междупутьем, то объем земляных работ на этом участке рассчитывается по таблице километровых объемов работ для двухпутной линии.

Объем работ на сооружение земляного полотна для станционных путей на раздельном пункте  $V_{зр(сп)}$ , тыс. м<sup>3</sup> (за исключением работ по главному пути), может быть также определен по средним рабочим отметкам в пределах площадки раздельного пункта по формуле

$$V_{зр(сп)} = a(n - 1)l_{рп}h_{ср} \cdot 10^{-3}, \quad (4.4)$$

где  $a$  – ширина междупутья на раздельном пункте (для ориентировочных расчетов величина междупутья принимается равной 5,3 м);

$n$  – число путей на раздельном пункте, включая главный, принимается по таблице 4.2;

$l_{рп}$  – длина площадки раздельного пункта, м;

$h_{ср}$  – средняя рабочая отметка продольного профиля на раздельном пункте, м.

Для определения стоимости 1 м<sup>3</sup> земляного полотна, а также категории сложности строительства определяется средний километровый объем земляного полотна по главному пути по формуле

$$V'_{зп(гп)} = \frac{V_{зп(гп)}}{L} \quad (4.5)$$

где  $L$  – длина линии, км.

Таблица 4.1 – Подсчет объемов земляных работ; вариант N.....; L = ..., м

Но- мер учас- тка	Границы участка, км		Средняя рабочая отметка, м		Протяжен- ность участка, км	Объем, тыс. м <sup>3</sup>				
	начало	конец	насыпи	выемки		насыпи		выемки		
						на 1 км	на участок	на 1 км	на участок	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
$\Sigma l =$						$\Sigma V_n$	$\Sigma V_v$			
Итого по варианту .....						тыс. м <sup>3</sup> .				
В среднем на 1 км .....						тыс. м <sup>3</sup> .				
<i>Примечания</i>										
1 В графы 7–10 вписываются объемы работ с точностью до 0,1.										
2 Итоги подсчетов округляют: по варианту – до 1,0, в среднем на 1 км – до 0,1.										
3 Просуммированный итог по 6-й графе должен быть равен длине варианта.										



Таблица 4.2 – Число путей на раздельных пунктах

Раздельные пункты	Число приемо-отправочных путей (включая главный)					
	для однопутной линии при пропускной способности в парах поездов параллельного графика			для двухпутных линий	для трехпутных линий	для четырехпутных линий
	до 12	13–24	более 24			
Разъезды	2	2–3	3	–	–	–
Обгонные пункты	–	–	–	2–3	3–4	4–5
Промежуточные станции	3	3	3–4	3–4	4–5	5–6
<i>Примечание</i> – На преузловых раздельных пунктах допускается увеличивать число приемо-отправочных путей на один путь.						

Объем земляных работ, определенный по продольным профилям, составленным по картам и планам в горизонталях, как правило, имеет отклонение в сторону занижения против объемов, подсчитанных по профилям натуральных изысканий. Это объясняется недостаточной точностью отражения на картах микрорельефа. Кроме того, занижение объемов получается в результате приближенного определения средней рабочей отметки. Поэтому для объемов, подсчитанных по камеральным профилям, устанавливается общий поправочный коэффициент  $k_1$ . В подсчеты объемов земляных работ также вводится поправка  $k_2$  на уширение земляного полотна в кривых участках пути. Значения общего поправочного коэффициента  $k_1$  и поправки  $k_2$  в зависимости от категории сложности приводятся в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Значения общего поправочного коэффициента  $k_1$  и поправки  $k_2$

Показатель	Категория сложности строительства			
	I	II	III	IV
Общий поправочный коэффициент $k_1$	1,13	1,18	1,18	1,23
Поправка $k_2$	1,02	1,02	1,04	1,04

Категория сложности строительства в зависимости от километрового объема земляных работ, тыс. м<sup>3</sup>, устанавливается по таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Объем земляных работ на 1 км главных путей

Категория сложности строительства	Двухпутная линия	Однопутная линия			
		категория линии по нормам проектирования			
		скоростные, особогрузонапряженные, I	II	III	IV
I	До 31,0	До 23	До 18,0	До 16,0	До 14,0
II	31,1–50,0	23,1–38,0	18,1–32,0	16,1–28,0	14,1–24,0
III	50,1–70,0	38,1–54,0	32,1–48,0	28,1–43,0	24,1–38,0
IV	70,1–95,0	54,1–73,0	48,1–64,0	43,1–56,0	38,1–47,0

Объём дополнительных земляных работ  $V_{зр(доп)}$  (водоотводные и нагорные канавы, переезды и пр.) с достаточной для целей сравнения вариантов точностью принимается в размере 8–12 % от объема работ по сооружению земляного полотна главного пути.

Стоимость земляных работ по варианту определяется как сумма произведенных объемов земляных работ по главному пути, по отдельным пунктам и дополнительным земляным работам на стоимость разработки одного кубического метра грунта по формуле

$$K_{зр} = \sum V_{зр(i)} k_i, \quad (4.6)$$

где  $k_i$  – стоимость разработки 1 м<sup>3</sup> грунта, руб. (см. таблицу 4.5).

При сравнении вариантов, характеризующихся наличием участков с различными грунтами (обыкновенные и скальные) стоимость производства земляных работ должна определяться путем умножения профильного объёма этих работ по варианту на их средневзвешенную единичную стоимость.

Таблица 4.5 – Единичная стоимость производства земляных работ

Покилометровый объем земляных работ по главному пути, тыс. м <sup>3</sup> /км	До 23	23,1–38,0	38,1–54,0	54,1–73,0
Стоимость разработки 1 м <sup>3</sup> , руб.	1,80	2,25	2,40	2,60
<p><i>Примечания</i></p> <p>1 При среднем профильном объеме земляных работ по главному пути свыше 73,0 тыс. м<sup>3</sup> показатель стоимости увеличивается на 2,7 тыс. руб. на каждую 1 тыс. м<sup>3</sup> объема.</p> <p>2 При возведении земляного полотна из скальных грунтов стоимость определяется с учетом коэффициентов: при 100 % скальных грунтов <math>k = 1,8</math>; при 50 % – <math>k = 1,3</math>; при 20 % – <math>k = 1,0</math>. Промежуточные значения определяются по интерполяции.</p>				

Подсчеты строительной стоимости производства земляных работ помещаются в сводную ведомость, форма которой представлена в приложении В.

### Определение объемов работ и стоимости искусственных сооружений

При проектировании и строительстве железных дорог применяют, как правило, типовые конструкции искусственных сооружений. По этим типовым проектам и производится подсчет объёмов и стоимости искусственных сооружений для целей сравнения вариантов. В таблицах 4.6–4.8 приведены значения строительной стоимости типовых труб (круглых железобетонных, прямоугольных железобетонных и прямоугольных бетонных) для однопутных линий при ширине земляного полотна 7,0 м в зависимости от величины отверстия, числа очков и высоты насыпи для условий, когда ось трубы и ось земляного полотна перпендикулярны.

Таблица 4.6 – Строительная стоимость круглых железобетонных труб

В тысячах рублей

Высота насыпи, м	Одноочковые				Двухочковые				Трехочковые			
	диаметр (отверстие), м											
	1,0	1,25	1,5	2,0	1,0	1,25	1,5	2,0	1,0	1,25	1,5	2,0
2	8,37	10,3	12,5	16,5	16,33	19,47	22,8	28,54	23,43	28,17	33,0	39,76
3	9,66	11,91	14,65	18,51	18,99	23,02	27,52	35,74	27,85	35,09	41,69	52,64
	10,14	12,39	14,97	19,48	19,64	23,98	28,65	37,03	28,81	36,54	43,14	55,22
6	14,32	17,22	21,25	28,01	29,62	36,70	44,75	60,85	44,43	57,96	71,48	94,85
7	–	19,15 20,76	23,98	31,39	–	41,86 43,30	51,19	70,35	–	65,52 67,45	81,30	110,92
8	–	22,54	26,40 29,30	34,77 38,96	–	48,30	57,63 60,05	80,17 88,71	–	75,99	90,96 96,62	127,02 139,74
12	–	31,55	40,57	54,57	–	68,74	86,13	130,4	–	110,44	140,07	208,49
19	–	50,23	64,40	87,42	–	110,60	139,58	217,02	–	118,06	228,62	352,59

Таблица 4.7 – Строительная стоимость прямоугольных железобетонных труб

В тысячах рублей

Высота насыпи, м	Одноочковые						Двухочковые							
	отверстие, м													
	1,0	1,25	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	1,0	1,25	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0
2	13,04	14,81	18,19	22,05	–	–	–	15,77	18,67	21,89	28,01	–	–	–
3	14,01	15,93	19,96	24,63	30,91	36,22	48,62	17,38	20,93	24,79	33,00	43,47	58,28	85,33
	14,16	16,10						17,54	21,25					
3,5	15,81	17,06	21,25 21,57	26,08 26,88	32,52 33,97	39,44	52,96	19,48	22,21	27,85 28,33	35,25 37,35	47,33 49,91	64,40	95,79
6	18,83	21,89	27,53	34,61	44,11	54,90	75,18	26,88	32,20	39,28	52,16	70,19	94,99	138,46
7	20,76 21,41	24,31 25,11	30,10	38,31	49,26	62,14	85,65	29,30 29,94	36,22 37,35	44,43	58,60	79,69	108,19	159,06
9	24,63	29,14	36,06 38,47	45,72 51,03	59,08 66,81	77,28 84,36	106,58 120,42	35,74	44,59	54,74 58,60	73,25 80,82	99,17 111,41	136,85 151,66	201,25 230,23
12	30,26	35,74	47,65	63,75	84,36	98,67	156,97	46,04	57,03	75,18	104,16	144,09	198,83	303,48
19	45,08	53,45	72,12	98,85	131,53	174,36	255,18	71,48	91,44	119,94	167,44	233,77	325,54	502,32

Таблица 4.8 – Строительная стоимость прямоугольных бетонных труб

В тысячах рублей

Высота насыпи, м	Одноочковые					Двухочковые				
	отверстие, м									
	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6
3	37,19	46,36	56,67	61,34	64,88	53,61	69,87	82,43	94,18	105,13
6	56,18	74,22	93,05	103,84	111,98	83,07	115,11	142,32	163,09	183,37
7	64,23	85,65	108,83	121,71	131,85	95,31	133,79	165,77	192,55	217,18
	65,68	88,87	112,70	130,89	140,87	99,17	139,90	175,00	209,62	233,77
12	104,16	145,06	189,49	222,82	241,33	158,58	232,48	299,78	362,08	403,14
18	157,29	223,14	296,24	351,14	380,34	241,50	360,31	472,85	573,32	638,52
19	167,92	237,96	316,36	375,45	406,52	257,11	384,30	505,54	613,24	682,96

Если высота насыпи отличается от указанной в таблицах 4.6–4.8, стоимость трубы определяется линейной интерполяцией.

Строительная стоимость малых железобетонных мостов с обсыпными устоями в зависимости от ширины русла по дну и высоты насыпи приведена в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Строительная стоимость железобетонных мостов с обсыпными устоями

В тысячах рублей

Ширина русла по дну, м	Высота насыпи, м								
	4	6	8	10	12	14	16	18	20
6	39,8	63,8	90,2	119,5	154,2	192,3	233,2	275,0	321,4
10	46,7	71,8	98,7	130,5	165,3	205,4	247,8	291,7	337,0
14	53,4	80,3	108,8	141,2	178,1	218,3	261,4	306,3	352,4
18	60,7	88,8	119,7	152,8	190,4	232,0	276,6	321,7	368,0
22	67,2	97,3	129,7	164,3	203,3	245,5	291,0	336,7	385,6

Примечание – Стоимость моста включает укрепление конусов насыпи бетонными плитами.

Строительная стоимость средних и больших мостов, тыс. руб., приближенно определяется по формуле

$$K_M = k_M L, \quad (4.7)$$

где  $k_M$  – стоимость 1 погонного метра моста, тыс. руб.;

$L$  – длина моста, м.

Длина моста принимается как расстояние между задними гранями устоев. Стоимость 1 погонного метра моста зависит от характеристики применяемых пролетных строений, типа фундамента и от средней высоты моста. Средняя высота моста в метрах определяется по формуле

$$H_{cp} = F / L, \quad (4.8)$$

где  $F$  – площадь, перекрываемая мостом,  $m^2$ , ограниченная сверху уровнем подошвы рельса, а снизу – линией, проходящей по подошве опускных колодцев или на глубине, равной  $0,2l$  при низком свайном ростверке, и  $0,5l$  при высоком свайном ростверке ( $l$  – длина свай) (рисунок 4.1).

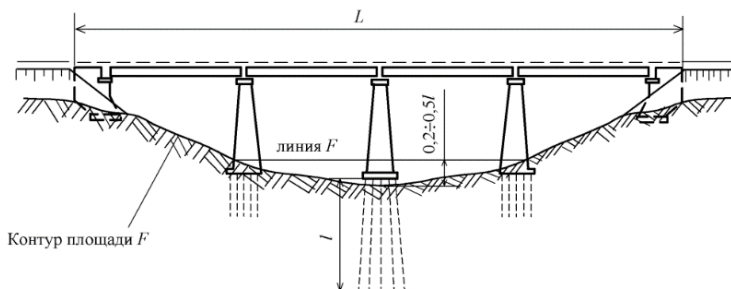


Рисунок 4.1 – Схема определения средней высоты моста

Таблица 4.10 – Стоимость 1 погонного метра моста

В рублях

Характеристика пролетного строения	Длина пролетного строения, м	Средняя высота моста $H_{ср}$ , м					
		5	10	15	20	25	30
<i>Мосты с железобетонными пролетными строениями</i>							
Из обычного железобетона	11,5	1247	–	–	–	–	–
С преднапряженной арматурой	16,5–23,6	–	1948	–	–	–	–
<i>Мосты с железобетонными пролетными строениями</i>							
С преднапряженной арматурой	27,6	–	–	2456	–	–	–
	34,2	–	–	–	2398	3305	–
<i>Мосты с металлическими пролетными строениями</i>							
–	45	–	3073	–	–	–	–
	55	–	–	3438	–	–	–
	66	–	–	–	4084	4466	4860
<i>Примечание – В стоимость вошли затраты на шпунтовое ограждение.</i>							

Таблица 4.11 – Стоимость строительства малых водопропускных сооружений на 1 км строительной длины линии

В тысячах рублей

Категория сложности строительства			
I	II	III	IV
8,0	10,8	16,0	24,6

### Определение объёмов работ и стоимости верхнего строения пути

Объёмы работ по верхнему строению пути определяются в зависимости от принятой мощности верхнего строения главных и станционных путей (типа рельсов, числа шпал на 1 км, рода балласта и его толщины под шпалой), в соответствии с требованиями СТН в зависимости от категории проектируемой линии и расчетной ее грузонапряженности брутто на один путь (на 5-й год эксплуатации) с учетом пассажирских поездов. При проектировании железных дорог обычно задается грузонапряженность нетто, поэтому необходим ее пересчет в грузонапряженность брутто. Ориентировочно грузонапряженность нетто можно определить по формуле

$$\Gamma_{бр} = (1,65 \dots 1,70)\Gamma_{н}. \quad (4.9)$$

Для сравнения вариантов можно ограничиться подсчетом стоимости верхнего строения пути по укрупненному измерителю покิโลметровой стоимости верхнего строения пути в зависимости от его мощности. В этом случае стоимость верхнего строения пути определяется по формуле

$$K_{вс} = K_{вс(гп)}L + K_{вс(сп)}\sum I_{ст},$$

где  $K_{вс(гп)}$ ,  $K_{вс(сп)}$  – стоимость 1 км верхнего строения соответственно главного и станционного путей, тыс. руб. (таблица 4.12);

$L$  – длина линии, км;

$l_{ст}$  – длина станционных путей одного раздельного пункта, км.

Таблица 4.12 – Стоимость 1 км верхнего строения пути

В тысячах рублей

Путь	Тип рельсов	Число шпал на 1 км, шт.	Однопутная линия		Двухпутная линия	
			$K_{вс(гп)}$	$K_{вс(сп)}$	$K_{вс(гп)}$	$K_{вс(сп)}$
Звеньевой	Р50	1840	79,3	88,3	157,3	175,4
		2000	84,7	–	171,1	–
	Р65	1840	86,1	100,3	174,0	200,4
		2000	91,3	–	184,2	–
Бесстыковой	Р65	1840	103,3	121,0	205,2	240,5
		2000	109,5	–	221,0	–

### Определение стоимости устройств, пропорциональной длине линии

Строительную стоимость, пропорциональную длине линии, целесообразно определять путем подсчета стоимости объектов производственного назначения и жилищно-гражданского строительства по отдельным главам сводной сметы, при этом стоимость земляного полотна и водопропускных сооружений определяется расчетом.

Затраты по остальным главам сметы целесообразно определять по их величине, отнесенной на 1 км длины линии. Эти данные в зависимости от категории сложности строительства и грузонапряженности на 5-й год эксплуатации приведены в таблице 4.13.

### Определение строительной стоимости раздельных пунктов

При проектировании новых железных дорог обычно назначаются типовые схемы разъездов и промежуточных станций, предусматривающие определенный комплекс устройств (путевое развитие, здания, АТС и т. п.). Поэтому стоимость этих устройств, установленная типовым проектом, непосредственно используется в расчетах без предварительного определения характера и объемов работ по каждому раздельному пункту.

Самостоятельный учет строительной стоимости разъездов и станций рекомендуется производить тогда, когда сравниваемые варианты различаются по числу раздельных пунктов. Как правило, это может быть при разработке дипломных проектов, когда варианты трассы проектируются при различных исходных данных (нормы размещения раздельных пунктов, величина руководящего уклона и др.). В таблице 4.14 приведены значения строительной стоимости разъездов и промежуточных станций при различных исходных данных. При использовании данных таблицы 4.19 следует иметь в виду, что указанные стоимости не учитывают затрат по сооружению земляного полотна и водопропускных сооружений на раздельном пункте. И то, и другое зависит от конкретных условий местности и подлежит специальному расчету (см. подразд. 3.1, 3.2).

Таблица 4.13 – Стоимость, пропорциональная длине линии, тыс. руб. на 1 км строительной длины

Вид работ и затрат	Категория сложности строительства															
	I				II				III				IV			
	Грузонапряженность нетто в грузовом направлении на 5-й год эксплуатации															
	1,0	3,0	7,0	12,0	1,0	3,0	7,0	12,0	1,0	3,0	7,0	12,0	1,0	3,0	7,0	12,0
Подготовка территории строительства	<u>6,4</u> –	<u>7,2</u> –	<u>7,7</u> 10,5	<u>8,3</u> 10,8	<u>7,5</u> –	<u>8,6</u> –	<u>9,7</u> 11,6	<u>10,5</u> 11,8	<u>8,8</u> –	<u>10,0</u> –	<u>11,6</u> 13,3	<u>12,7</u> 13,5	<u>10,2</u> –	<u>11,5</u> –	<u>12,4</u> 14,4	<u>13,5</u> 15,4
Верхнее строение пути	<u>99,5</u> –	<u>112,9</u> –	<u>123,1</u> 155,5	<u>135,4</u> 159,2	<u>99,5</u> –	<u>112,9</u> –	<u>123,1</u> 155,5	<u>135,4</u> 159,2	<u>99,5</u> –	<u>112,9</u> –	<u>123,1</u> 155,5	<u>135,4</u> 159,2	<u>99,5</u> –	<u>112,9</u> –	<u>123,1</u> 155,5	<u>135,4</u> 159,2
Устройства автоматики, телемеханики и связи	<u>48,05</u> –	<u>52,7</u> –	<u>56,8</u> 58,8	<u>62,3</u> 60,4	<u>49,7</u> –	<u>54,3</u> –	<u>59,5</u> 100,5	<u>64,5</u> 101,9	<u>50,6</u> –	<u>56,4</u> –	<u>62,7</u> 115,5	<u>68,6</u> 116,4	<u>51,5</u> –	<u>58,43</u> –	<u>64,17</u> 124,2	<u>70,99</u> 133,6
Производственные и служебные здания и сооружения	<u>20,41</u> –	<u>23,7</u> –	<u>26,69</u> 31,7	<u>29,2</u> 32,6	<u>21,03</u> –	<u>24,49</u> –	<u>27,94</u> 35,01	<u>30,3</u> 35,48	<u>21,5</u> –	<u>25,12</u> –	<u>29,2</u> 40,19	<u>31,87</u> 40,5	<u>20,56</u> –	<u>26,69</u> –	<u>30,61</u> 43,17	<u>33,75</u> 46,47

Окончание таблицы 4.13

Вид работ и затрат	Категория сложности строительства															
	I				II				III				IV			
	Грузонапряженность нетто в грузовом направлении на 5-й год эксплуатации															
	1,0	3,0	7,0	12,0	1,0	3,0	7,0	12,0	1,0	3,0	7,0	12,0	1,0	3,0	7,0	12,0
Энергетическое хозяйство	<u>9,3</u> –	<u>10,3</u> –	<u>11,38</u> 99,97	<u>12,4</u> 102,8	<u>9,3</u> –	<u>10,38</u> –	<u>11,31</u> 110,2	<u>12,4</u> 111,2	<u>9,91</u> –	<u>11,0</u> –	<u>12,4</u> 126,6	<u>13,64</u> 127,7	<u>9,6</u> – <u>1</u>	<u>11,47</u> –	<u>12,55</u> 136,2	<u>13,79</u> 146,9
Водоснабжение, канализация, теплофикация и газоснабжение	<u>7,59</u> –	<u>8,58</u> –	<u>9,40</u> 15,3	<u>10,39</u> 15,84	<u>8,52</u> –	<u>9,73</u> –	<u>10,72</u> 16,99	<u>11,71</u> 17,6	<u>10,06</u> –	<u>11,55</u> –	<u>13,20</u> 19,47	<u>14,35</u> 19,63	<u>11,38</u> –	<u>13,53</u> –	<u>14,68</u> 20,95	<u>15,84</u> 22,6
Эксплуатационный инвентарь и инструмент	<u>0,9</u> –	<u>0,9</u> –	<u>0,9</u> 1,4	<u>0,9</u> 1,4	<u>0,9</u> –	<u>0,9</u> –	<u>0,9</u> 1,4	<u>0,9</u> 1,4	<u>0,9</u> –	<u>0,9</u> –	<u>0,9</u> 1,4	<u>0,9</u> 1,4	<u>0,9</u> –	<u>0,9</u> –	<u>0,9</u> 1,4	<u>0,9</u> 1,4
Временные здания и сооружения	<u>22,76</u> –	<u>25,74</u> –	<u>27,94</u> 43,08	<u>30,77</u> 44,90	<u>26,06</u> –	<u>29,35</u> –	<u>32,65</u> 48,36	<u>35,32</u> 48,98	<u>30,45</u> –	<u>35,01</u> –	<u>39,56</u> 55,57	<u>43,33</u> 55,89	<u>34,38</u> –	<u>40,66</u> –	<u>43,96</u> 52,66	<u>47,72</u> 64,21



Прочие работы и затраты	<u>54,2</u> –	<u>63,04</u> –	<u>67,68</u> 109,4	<u>74,08</u> 112,4	<u>63,0</u> –	<u>71,0</u> –	<u>78,4</u> 105,7	<u>84,8</u> 122,5	<u>73,1</u> –	<u>84,0</u> –	<u>95,3</u> 138,7	<u>104,3</u> 139,8	<u>81,7</u> –	<u>96,3</u> –	<u>105,2</u> 149,1	<u>115,3</u> 160,4
Содержание дирекции строящихся предприятий	<u>1,30</u> –	<u>1,30</u> –	<u>1,30</u> 2,46	<u>1,30</u> 2,46	<u>1,30</u> –	<u>1,30</u> –	<u>2,46</u> 2,61	<u>2,46</u> 2,61	<u>2,03</u> –	<u>2,03</u> –	<u>2,03</u> 3,04	<u>2,03</u> 3,04	<u>2,32</u> –	<u>2,32</u> –	<u>2,32</u> 3,33	<u>2,32</u> 3,33
Недвижимые работы и затраты	<u>17,6</u> –	<u>19,8</u> –	<u>21,9</u> 34,4	<u>24,6</u> 35,2	<u>20,0</u> –	<u>22,7</u> –	<u>25,1</u> 37,2	<u>27,2</u> 38,4	<u>23,3</u> –	<u>26,8</u> –	<u>30,4</u> 43,15	<u>33,2</u> 43,18	<u>26,8</u> –	<u>31,2</u> –	<u>33,9</u> 46,7	<u>36,8</u> 50,4
Объекты жилищно-гражданского строительства	<u>71,28</u> –	<u>77,15</u> –	<u>95,20</u> 108,1	<u>99,49</u> 112,3	<u>72,10</u> –	<u>84,97</u> –	<u>96,03</u> 100,7	<u>100,3</u> 105,1	<u>72,93</u> –	<u>85,80</u> –	<u>97,02</u> 101,6	<u>101,3</u> 106,1	<u>73,75</u> –	<u>86,62</u> –	<u>97,84</u> 102,5	<u>102,1</u> 106,9

Таблица 4.14 – Строительная стоимость раздельных пунктов

В тысячах рублей

Тип раздельного пункта	Число боковых путей	Вид тяги					
		электрическая				тепловозная	
		переменного тока		постоянного тока			
		$l_{по} = 850 \text{ м}$	$l_{по} = 1050 \text{ м}$	$l_{по} = 850 \text{ м}$	$l_{по} = 1050 \text{ м}$	$l_{по} = 850 \text{ м}$	$l_{по} = 1050 \text{ м}$
Разъезд, обгонный пункт	2	393	431	400	438	316	342
	3	513	575	524	585	401	442
Промежуточная станция (однопутная линия)	4	1679	1753	1093	1767	1548	1601
	5	1844	1940	1862	1958	1667	1729
Промежуточная станция (двухпутная линия)	5	1966	2068	1984	2086	1779	1851
	6	1231	2255	2153	2277	1984	1929

В остальных случаях строительную стоимость раздельных пунктов следует определять по затратам, отнесенным на 1 км длины линии (см. подразд. 4.3).

#### 4.4 Эксплуатационные расходы для сравнения вариантов трассы

Для сопоставления вариантов и выбора из них экономически целесообразного производится расчеты единовременных и текущих затрат.

Е д и н о в р е м е н н ы е – затраты на строительство новой линии; усиление провозной способности примыкающих направлений; приобретение подвижного состава (вагонов и локомотивов); развитие производства в зоне тяготения к новой линии; постоянные сооружения и подвижной состав сопутствующих видов транспорта в зоне тяготения к новой линии; оборотные средства в пути следования («на колесах»).

В т е к у щ и е з а т р а т ы входят расходы: железнодорожного транспорта на рассматриваемом полигоне (включая новую линию и примыкающие направления); других видов транспорта; предприятий в зоне тяготения (связанных с перевозками).

При проектировании новых железных дорог для сравнения вариантов нет необходимости определять эксплуатационные расходы с большой точностью, в то же время следует выявить влияние на величину эксплуатационных расходов основных характеристик вариантов (показателей трассы, плана и профиля, массы поездов, технического оснащения дороги и т. п.). Поэтому представляется возможным не учитывать некоторые виды расходов, не оказывающих существенного влияния на общий уровень затрат и мало различающихся по вариантам (расходы по содержанию станций примыкания, общие для всех вариантов, во многих случаях расходы по штату управления дороги и т. п.).

На основе обработки отчетно-статистических данных по сети железных дорог за ряд лет и анализа намечаемых перспективных изменений в структуре эксплуатационных расходов основные слагаемые этих расходов были распределены по ряду так называемых эксплуатационных измерителей. Эти измерители позволяют достаточно полно учесть влияние плана и профиля вариантов на эксплуатационные расходы, а также на количество затрачиваемого труда и материалов для обеспечения расчетных размеров перевозок по вариантам.

**Эксплуатационные расходы** можно разделить на т р и г р у п п ы:

- непосредственно зависящие от работы подвижного состава ( $C_{зав}$ );
- вызванные остановками поездов ( $C_{ост}$ );
- связанные с содержанием и ремонтом постоянных устройств, т. е. не зависящие от работы подвижного состава ( $C_{нез}$ ).

*Первая группа* включает стоимость расходоуемого топлива и электроэнергии, расходы по ремонту и реновации подвижного состава, некоторую часть расходов по текущему содержанию и амортизации верхнего строения пути, расходы по содержанию локомотивных бригад, техническому осмотру вагонов и др.

*Вторая группа* учитывает расходы, связанные с остановками поездов при скрещении и обгонах на промежуточных отдельных пунктах и которые состоят из затрат, вызванных замедлением и разгоном поездов при остановке, а также расходы по простоям в ожидании обгона или скрещении.

*Третья группа* включает расходы по текущему содержанию главных и станционных путей, расходы по содержанию искусственных сооружений, устройств электроснабжения, связи и СЦБ, отдельных пунктов и пр. (приложение В). Эта группа эксплуатационных расходов, хотя и в меньшей мере, чем первая, тоже зависит от размеров движения, так как стоимость текущего содержания постоянных устройств определяется их мощностью.

Эксплуатационные расходы первой и третьей групп определяются путем суммирования слагаемых эксплуатационных расходов, соответствующих отдельным эксплуатационным измерителям:

$$C_{зав} = \sum_{i=1}^n a_i X_i ; \quad C_{нез} = \sum_{i=1}^m k_i Y_i , \quad (4.10)$$

где  $a_i, k_i$  – расходные ставки на измеритель.

$X_i, Y_i$  – измерители эксплуатационных расходов;

Расчеты расходов, связанных с остановками поезда, производятся по групповым расходным нормам, зависящим от работы подвижного состава ( $C_{зав}$ ).

**Определение годовых эксплуатационных расходов, зависящих от работы подвижного состава.** Величина  $C_{зав}$  определяется методом р а с х о д н ы х с т а в о к, суть которого заключается в следующем:

- все расходы, зависящие от работы подвижного состава, разбиваются на части по своему назначению (таблица 4.15, гр. 2), причем каждая такая часть в основном зависит от одного какого-либо измерителя работы (таблица 4.15, гр. 1);

– устанавливается расходная ставка на каждый измеритель работы (таблица 4.15, гр. 4), которая показывает расходы, зависящие от данного измерителя в расчете на один этот измеритель;

– для конкретных условий рассчитывается количество измерителей работы каждого вида (см. таблицу 4.15);

– умножением расходной ставки на соответствующее число измерителей работы получается величина расходов, зависящих от этого измерителя;

– суммированием всех расходов, зависящих от измерителей, определяется величина  $C_{зав}$ .

В таблице 4.15 приведены измерители работы, расходы, зависящие от каждого из них, и величина расхода в расчете на один измеритель (расходная ставка) по сериям локомотивов.

**Таблица 4.15 – Измерители работы, зависящие от них расходы и расходные ставки для грузового движения**

Измеритель	Расходы, зависящие от измерителя	Тип локомотива	Расходная ставка, тыс. руб.
1	2	3	4
Локомотиво-километр	Ремонт локомотивов зависящий от пробега	Электровоз Тепловоз	8,38 19,6
Вагоно-километр	Ремонт вагонов, зависящий от пробега	–	0,59
Вагоно-час	Ремонт вагонов, зависящий от времени, и реновационные отчисления	–	22,4
Локомотиво-час	Ремонт локомотивов, зависящий от времени	Электровоз Тепловоз	142,6 65,1
1000 т·км·брутто	Текущее содержание и амортизация верхнего строения пути	–	2,2
1 кг дизельного топлива	Топливо на тягу поездов плюс расходы на экипировку тепловозов	–	8,0
1000 кВт·ч электроэнергии	Электроэнергия на тягу поездов плюс расходы на экипировку электровозов	–	2,16
Бригадо-час локомотивной бригады	Содержание локомотивных бригад	Электровоз Тепловоз	249,8 353,1

Количество измерителей работы в расчете на один проведенный по участку поезд рассчитывается по формулам, приведенным в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Формулы для определения количества измерителей работы в расчете на один поезд, проведенный по участку

Измеритель	Расчетная формула
Локомотиво-километр	$nL$
Вагоно-километр	$mL$
Вагоно-час	$mt_x$
Локомотиво-час	$nt_x$
Механическая работа локомотива $R_m$ и сил сопротивления $R_c, R_m + R_c$	$R_m = F_{к(i)} l_i$ $R_c = R_m - (P + Q)(H_k - H_n) \cdot 10^{-3}$
Тонно-километр брутто	$(P + Q)L$
Расход дизельного топлива на тягу поезда $E$ , кг	$0,85 R_m$
Расход электроэнергии на тягу поезда $A$ , кВт·ч	При постоянном токе $3,42 R_m$ При переменном токе $3,36 R_m$
Бригадо-часы локомотивной бригады	$t_x (1 + k_{бр})$

В таблице 4.16 приняты следующие условные обозначения:

$n$  – число локомотивов в поезде;

$L$  – длина участка железной дороги, км;

$m$  – число вагонов в поезде (принимается 50–60);

$t_x$  – время хода поезда по участку, ч;

$F_{к(i)}$  – сила тяги локомотива на  $i$ -м элементе профиля, кН;

$l_i$  – длина  $i$ -го элемента профиля, км;

$Q$  – масса состава поезда брутто, т;

$H_n, H_k$  – начальная и конечная отметки участка трассы, м;

$P$  – масса локомотива, т;

$k_{бр}$  – коэффициент, учитывающий долю подготовительно-заключительного и вспомогательного времени работы локомотивных бригад; принимается 0,2–0,3 для грузовых поездов.

Для участка железной дороги между пунктами остановки время хода поезда определяется тяговыми расчетами с использованием компьютерной техники по программам, разработанным на кафедре «Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных объектов» БелГУТа. Разрешается определять  $t_x$  упрощенным способом по равномерным скоростям:

$$t_x = t_i l_i, \quad (4.11)$$

где  $t_i$  – время хода поезда, мин, на 1 км элемента профиля при равномерном движении;

$l_i$  – длина  $i$ -го элемента профиля, км.

Если же участок железной дороги расположен не между остановочными пунктами, то из механической работы силы тяги локомотива  $R_M$  вычитается величина  $4,17(P + Q)(v_k^2 - v_n^2) \cdot 10^6$ , учитывающая приращение кинетической энергии поезда при изменении скорости от начальной  $v_n$  до конечной  $v_k$  по длине рассматриваемого участка.

Масса состава поезда брутто  $Q$  в тоннах определяется из условия равномерного движения с расчетной скоростью на руководящем подъеме,

$$Q = \frac{F_k - Pg(\omega'_o + i_p)}{(\omega'_o + i_p)g}, \quad (4.12)$$

где  $F_k$  – сила тяги локомотива, кН;

$g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;

$\omega'_o, \omega''_o$  – основное удельное сопротивление соответственно локомотива и состава при движении под тягой, Н/кН;

$i_p$  – руководящий (расчетный) уклон, %.

Значения расчетных величин, входящих в формулу (4.12), принимаются согласно расчетам, выполняемым в соответствии с ПТР.

Значение  $Q$  принимается по данным, приведенным в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Значения массы состава  $Q$  для различных типов локомотивов

В тоннах

Тип локомотива	Величина руководящего уклона $i_p$ , %									
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2ТЭ10	7400	6500	5800	5200	4800	4200	3800	3500	3300	3100
ТЭЗ	5400	4750	4150	3750	3350	3000	2750	2550	2400	2250
ВЛ23	4500	4000	3550	3250	2900	2600	2400	2200	2050	2000
ВЛ10	6000	5250	4600	4200	3850	3500	3250	3000	2800	2550
ВЛ60 <sup>к</sup>	4750	4200	3750	3400	3000	2750	2500	2350	2150	2050
ВЛ80 <sup>к</sup>	6300	5500	4800	4400	4000	3650	3400	3100	2900	2700

По формулам, приведенным в таблице 4.16, определяется количество измерителей работы в расчете на 1 поезд (отдельно по грузовому и обратному направлениям). Из таблицы 4.15 выбираются расходные ставки. На основании этих данных подсчитываются зависящие расходы по пробегу на 1 грузовой поезд. Расчет удобно вести по форме таблицы 4.18.

Таблица 4.18 – Определение величины  $C_{зав}$  в расчете на один грузовой поезд, проведенный по участку железной дороги

Измеритель	Расходная ставка на измеритель, тыс. руб.	Расчет количества измерителей на один поезд	Расходы, зависящие от измерителя, млн руб. (гр. 2 × гр. 3)
1	2	3	4
Для поезда грузового направления			
.....			
Для поезда негрузового направления			

Годовые зависящие расходы по пробегу поездов находят умножением расходов, приходящихся на один поезд, на расчетное годовое число поездов соответственно в грузовом и негрузовом направлениях.

В *грузовом направлении годовое расчетное число грузовых поездов* определяется по формуле

$$N_{\text{гр}} = \frac{\Gamma_{\text{гр}} \cdot 10^{-6}}{Q_{\text{н}}}, \quad (4.13)$$

где  $\Gamma_{\text{гр}}$  – грузонапряженность нетто в грузовом направлении, млн т·км/км;  
 $Q_{\text{н}}$  – масса состава нетто, т,

$$Q_{\text{н}} = 0,71Q. \quad (4.14)$$

В *негрузовом направлении годовое расчетное число грузовых поездов* определяется с учетом порожних составов:

$$N_{\text{о}} = 0,71N'_{\text{о}} + 0,29N_{\text{гр}}, \quad (4.15)$$

где  $N'_{\text{о}}$  – годовое число полногрузных грузовых поездов в негрузовом направлении при размерах перевозок  $\Gamma_{\text{о}}$ ,

$$N'_{\text{о}} = \frac{\Gamma_{\text{о}} \cdot 10^6}{Q_{\text{н}}}. \quad (4.16)$$

Значения единичных норм расходов для обоих видов тяги применительно к основным сериям локомотивов приведены в таблице 4.18.

Эксплуатационные расходы по пробегу пассажирских поездов в тех случаях, когда число их невелико и не влияет существенно на выбор варианта, можно определить по системе групповых норм сразу в обоих направлениях движения:

$$C_{\text{зав}}^{\text{пас}} = 2 \cdot 365 L n_{\text{пас}} \text{ с}, \quad (4.17)$$

где  $n_{\text{пас}}$  – число пар пассажирских поездов в сутки на расчетный год;  
 $\text{с}$  – укрупненная норма на 1 поездо-километр передвижения пассажирского поезда, руб.

**Определение эксплуатационных расходов, вызванных остановками поездов.** Расходы, которые связаны с остановками поездов при скрещении и обгонах на промежуточных отдельных пунктах, состоят из затрат, вызванных замедлением и разгоном поездов при остановке и расходов по простоям поездов в ожидании обгона или скрещении.

Расчет этих затрат можно определить по групповым расходным нормам. Годовые эксплуатационные расходы, вызванные остановками, тыс. у. е./год определяются по формуле

$$C_{\text{ост}} = N_{\text{гр}} K_{\text{ост}} (c_{\text{р.з}} + t_{\text{ст}} + c_{\text{п.ч}} / 60) \cdot 10^{-3}, \quad (4.18)$$

где  $K_{\text{ост}}$  – количество остановок, приходящееся на одну пару поездов;

$c_{p.з}$  – стоимость одного разгона и торможения, руб.;

$t_{ст}$  – средняя продолжительность стоянки пары грузовых поездов, мин;

$c_{п.ч}$  – стоимость одного часа простоя поезда, руб.

Количество остановок грузовых поездов на промежуточных раздельных пунктах для скрещений и обгонов без учета стоянок по техническим надобностям на однопутных линиях, включая участки с двухпутными вставками, приходящиеся на пару сквозных грузовых поездов, определяется по формуле

$$K_{ост} = \frac{(T_T + T_o)(A_1 n_{гр} + 2A_2 n_{пас})}{1440 - (A_1 n_{гр} + 2A_2 n_{пас})} - A_1 \frac{L}{L_{уч}}, \quad (4.19)$$

где  $T_T, T_o$  – время хода по варианту трассы пары грузовых поездов без учета разгонов и замедлений, мин;

$A_1, A_2$  – коэффициенты, показывающие сокращение числа остановок грузовых поездов при скрещении и обгонах при частично-пакетном графике по сравнению с непакетным (таблица 4.19).

$n_{гр}$  – число пар грузовых поездов в сутки,  $n_{гр} = N_{гр} / 365$ ;

$n_{пас}$  – число пар пассажирских поездов в сутки;

$L$  – длина варианта трассы, км;

$L_{уч}$  – длина участка, в пределах которого грузовые поезда не имеют остановок по техническим надобностям ( $L_{уч} \approx 250 \dots 300$  км).

Таблица 4.19 – Значения коэффициентов  $A_1$  и  $A_2$

$n_{пас} / n_{гр}$	$A_1$		$A_2$	
	$\alpha_{пак} = 0,5$	$\alpha_{пак} = 0,67$	$\alpha_{пак} = 0,5$	$\alpha_{пак} = 0,67$
0	0,630	0,557	0,837	0,838
0,2	0,652	0,577	0,870	0,875
0,4	0,670	0,592	0,894	0,897
0,6	0,686	0,607	0,906	0,908
0,8	0,694	0,616	0,920	0,927
1,0	0,700	0,621	0,930	0,937

Средняя продолжительность стоянки пары грузовых поездов на промежуточных раздельных пунктах  $t_{ст}$  зависит от графика движения поездов и системы СЦБ и определяется по формулам:

– при не пакетном графике движения на участках с автоматической и полуавтоматической блокировкой и на участках с двухпутными вставками при безостановочных скрещении поездов при диспетчерской централизации стрелок и автоблокировке –

$$T_{ст} = (t_T + t_o)(0,10 + 0,25\gamma) + (\tau_1 + \tau_2) + t_{p.з}; \quad (4.20)$$

– при частично-пакетном графике движения на участках с диспетчерской централизацией стрелок или автоматической блокировке –

$$T_{ст} = (t_T + t_o)(0,10 + 0,3 \alpha_{пак}) + 1,5 \alpha_{пак} I + (\tau_1 + \tau_2) + t_{p.з}. \quad (4.21)$$



где  $t_T, t_0$  – среднее время хода пары грузовых поездов по перегону без учета разгона и замедления, мин;

$\gamma$  – коэффициент заполнения пропускной способности участка;

$\tau_1, \tau_2$  – станционные интервалы неодновременного прибытия и скрещения поездов (таблица 4.20);

$t_{p,3}$  – поправка времени на разгон и замедление, мин ( $t_{p,3} \approx 3$  мин);

$\alpha_{\text{пак}}$  – коэффициент пакетности, равный отношению числа поездов, следующих в пакетах, к общему числу поездов (принимается равным, как правило, не более 0,67);

$I$  – интервал между поездами в пакете (8–10 мин).

Таблица 4.20 – Станционные интервалы

Устройство СЦБ	В минутах	
	1	2
Полуавтоматическая блокировка с механической централизацией стрелок	5	3
Автоматическая блокировка с электрической централизацией стрелок	4	1
Диспетчерская централизация	2,5	0,5

Среднее время хода пары грузовых поездов по перегону

$$t_T + t_0 = \frac{T_T + T_0}{m_{\text{пер}}} + 4, \quad (4.22)$$

где  $m_{\text{пер}}$  – число перегонов на участке трассы, равное количеству раздельных пунктов;

4 – уменьшение периода графика на перегоне, примыкающем к участковой станции, мин.

Коэффициент заполнения пропускной способности участка

$$\gamma = (n_{\text{гр}} + \varepsilon_{\text{сб}} n_{\text{сб}} + \varepsilon_{\text{пас}} n_{\text{пас}}) / N_{\text{max}}, \quad (4.23)$$

где  $n_{\text{гр}}, n_{\text{сб}}, n_{\text{пас}}$  – количество пар грузовых, сборных и пассажирских поездов в сутки соответственно;

$\varepsilon_{\text{сб}}, \varepsilon_{\text{пас}}$  – коэффициенты съема грузовых поездов сборными и пассажирскими поездами соответственно;

$N_{\text{max}}$  – максимальная пропускная способность однопутного участка при параллельном непакетном графике движения поездов,

$$N_{\text{max}} = 1440 / T; \quad (4.24)$$

1440 – количество минут в сутках;

$T$  – период параллельного непакетного графика, мин,

$$T = t_T + t_0 + \tau_1 + \tau_2 + t_{p,3}. \quad (4.25)$$

В отдельных случаях расчет расходов, вызванных остановками поездов, можно выполнить приближенным методом с использованием коэффициентов, учитывающих затраты на остановки как долю от расходов по пробегу поездов:

$$C_{\text{ост}} = (K_{\text{р.з}} + K_{\text{пр}})C_{\text{зав}}, \quad (4.26)$$

где  $K_{\text{р.з}}$  – коэффициент, учитывающий расходы на разгон и замедление грузовых поездов на остановках (таблица 4.21);

$K_{\text{пр}}$  – коэффициент, учитывающий расходы по простоям поездов при остановках (таблица 4.22).

Таблица 4.21 – Значение коэффициента  $K_{\text{р.з}}$ , учитывающего расходы на разгон и замедление

Процент использования руководящего уклона	Число пар грузовых поездов $n_{\text{гр}}$			
	10	115	20	25
До 20	0,07	0,10	0,13	0,14
20–50	0,06	0,09	0,11	0,13
Более 50	0,05	0,07	0,09	0,11

Таблица 4.22 – Значение коэффициента  $K_{\text{пр}}$ , учитывающего расходы по простоям поездов

Процент использования руководящего уклона	Тепловозная тяга при $n_{\text{гр}}$				Электрическая тяга при $n_{\text{гр}}$			
	10	15	20	25	10	15	20	25
До 20	0,09	0,10	0,12	0,13	0,08	0,10	0,11	0,12
20–50	0,10	0,13	0,14	0,15	0,10	0,12	0,13	0,14
Более 50	0,13	0,15	0,17	0,19	0,11	0,13	0,15	0,16

**Определение годовых эксплуатационных расходов, не зависящих от работы подвижного состава.** Величина  $C_{\text{нез}}$  включает: расходы на содержание, ремонт и реновацию устройств связи ( $C_{\text{нез.1}}$ ), устройств СЦБ ( $C_{\text{нез.2}}$ ), контактной сети ( $C_{\text{нез.3}}$ ), тяговых подстанций ( $C_{\text{нез.4}}$ ), отдельных пунктов ( $C_{\text{нез.5}}$ ). Кроме того, учитываются расходы по снегоборьбе ( $C_{\text{нез.6}}$ ). Должны учитываться также расходы по водоотводу, если варианты трассы железной дороги значительно различаются по этому фактору.

Что касается содержания и ремонта главных путей, то эти расходы, как отмечалось выше (см. общие положения), частично зависят от размеров движения и учтены в составе  $C_{\text{зав}}$ .

Порядок и нормативы для расчета независящих расходов ( $C_{\text{нез.1}} - C_{\text{нез.}}$ ) указаны в таблице 4.23.

Таблица 4.23 – Нормативы для расчета эксплуатационных расходов, не зависящих от перевозочной работы

Условные обозначения	Наименование расходов	Измеритель	Норматив на измеритель, млн руб./км	
			Размеры движения реальных пар поездов в год	
$C_{\text{нез.1}}$	Содержание линейных устройств связи (воздушная линия)	1 км эксплуатационной длины	менее 24	24 и более
			0,26	0,31

Окончание таблицы 4.23

Условные обозначения	Наименование расходов	Измеритель	Норматив на измеритель, млн руб./км			
			Размеры движения реальных пар поездов в год			
			менее 24	24 и более		
С <sub>нез.2</sub>	Содержание линейных устройств автоматики и телемеханики: – диспетчерская централизация – автоблокировка полуавтоблокировка	1 км эксплуатационной длины				
			1,75	1,86		
			1,68	1,75		
			0,26	0,27		
С <sub>нез.3</sub>	Содержание контактной сети		Постоянный ток 1,96	Переменный ток 1,84		
С <sub>нез.4</sub>	Содержание тяговых подстанций (телеуправляемых)	1 тяговая подстанция	59,0	63,0		
С <sub>нез.5</sub>	Содержание раздельных пунктов: а) разъезд с одним разъездным путем, электровозная тяга: – постоянный ток – переменный ток тепловозная тяга	1 раздельный пункт	Управление стрелками и сигналами			
			Нецентрализованное	Централизованное	Диспетчерская централизация	
			70,6	43,8	21,5	
				70,4	43,6	21,3
				68,8	41,9	19,8
	б) разъезд с двумя разъездными путями: при электровозной тяге: – постоянный ток – переменный ток тепловозной тяге	1 раздельный пункт				
			77,4	52,8	30,5	
			77,0	52,4	30,0	
				73,7	49,1	26,7
в) промежуточная станция с тремя приемоотправочными путями, электровозная тяга: – постоянный ток – переменный ток тепловозная тяга	1 раздельный пункт					
		127,6	191,6	85,6		
		126,8	100,9	84,8		
			121,6	95,4	79,3	
С <sub>нез.6</sub>	Очистка от снега главных станционных путей, предупредительные мероприятия по борьбе со снегом и водой, содержание защитных лесонасаждений	1 км эксплуатационной длины путей, заносимых снегом	Категория заносимости *			
			I	II	III	
			1,3	0,65	0,33	

\* I категория заносимости – выемки глубиной от 04 до 8,5 м, станционные территории и нулевые места, расположенные на косогорах; II категория – мелки выемки до 0,4 м и нулевые места; III категория низкие насыпи до 0,65 м в равнинных местах и до 1 м – на косогорах и сильнозаносимые участки пути.

К независящим следует также отнести расходы на реновацию верхнего строения главных путей ( $C_{\text{нез.7}}$ ), амортизацию земляного полотна ( $C_{\text{нез.8}}$ ) и искусственных сооружений ( $C_{\text{нез.9}}$ ).

Расходы на реновацию верхнего строения пути ( $C_{\text{нез.7}}$ ), амортизацию земляного полотна ( $C_{\text{нез.8}}$ ) и искусственных сооружений ( $C_{\text{нез.9}}$ ) определяются по следующим формулам:

$$C_{\text{нез.7}} = (q_{\text{всп}} / 100)S_{\text{всп}}; \quad (4.27)$$

$$C_{\text{нез.8}} = (q_{\text{з.п}} / 100)S_{\text{з.п}}; \quad (4.28)$$

$$C_{\text{нез.9}} = \sum_1^i (q_{\text{ис}(i)} / 100)S_{\text{ис}(i)}, \quad (4.29)$$

где  $q_{\text{всп}}$ ,  $q_{\text{з.п}}$ ,  $q_{\text{ис}(i)}$  – нормативы соответствующих амортизационных отчислений (таблица 4.24);

$S_{\text{всп}}$ ,  $S_{\text{з.п}}$ ,  $S_{\text{ис}(i)}$  – стоимость верхнего строения пути, земляного полотна,  $i$ -го искусственного сооружения, руб. (подсчитывается при определении стоимости всей трассы по вариантам).

**Таблица 4.24 – Нормативы амортизационных отчислений на полное восстановление (реновацию) основных фондов**

Основные фонды	Норматив, %
Земляное полотно	0,2
Верхнее строение пути	0,2
Мосты железобетонные, бетонные и каменные	1,0
Мосты металлические с пролетными строениями длиной	
– до 25 м	1,0
– более 25 м	1,0
Мосты деревянные и металлические на деревянных опорах	5,0
Трубы и лотки железобетонные, бетонные, каменные и чугунные	1,0
Трубы и лотки деревянные	10,0
Трубы стальные гофрированные	1,7
Поддерживающие и защитные сооружения	1,7
Регуляционные и укрепительные сооружения мостов	2,5

## **5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ РАБОТЫ ГРУЗОВОГО Поезда для подсчета эксплуатационных расходов на основе тяговых расчетов**

---

### **5.1 Назначение тяговых расчетов. Расчетная модель поезда**

**Назначение тяговых расчетов.** При проектировании железных дорог и последующей их реконструкции решается ряд проектных задач, необходимых для нахождения наилучшего положения трассы и очертания продольного профиля, выбора типа локомотива и веса грузового поезда, расхода топлива и электроэнергии, для установления длины путей с целью увеличения провозной способности железной дороги и другие практические задачи, которые решаются на основе тяговых расчетов.

Тяговые расчеты ставят своей целью раскрыть использование их результатов (скорость, время хода, масса состава, расход топлива и электроэнергии) при выборе проектных решений. Поэтому все тяговые расчеты являются конечной целью для подсчета эксплуатационных расходов и в последующем их использовании для обоснований проектных решений.

Тяговые расчеты основаны на изучении сил, действующих на поезд, условий движения поезда под действием приложенных сил и методах решения ряда практических задач (определение веса грузового поезда при известном продольном профиле и заданном локомотиве, проверка его на трогание с места, определение скоростей движения и времени хода поезда (рисунок 5.1), решение тормозных задач, определение расхода электроэнергии электровозами и топлива тепловозами, определение механической работы силы тяги локомотива и работы сил сопротивления и др.)

Кривые участки пути оказывают большое влияние на скорость движения поездов. В зависимости от скорости рассчитываются длины переходных кривых, масса состава грузового поезда, расход топлива и электроэнергии, которые учитываются при определении эксплуатационных расходов железной дороги.

Кривые скорости и времени хода поезда приведены на рисунке 5.1.



Кривые участки пути оказывают большое влияние на скорость движения поездов. В зависимости от скорости рассчитываются длины переходных кривых, масса состава грузового поезда, расход топлива и электроэнергии, которые учитываются при определении эксплуатационных расходов железной дороги.

Кривые скорости и времени хода поезда приведены на рисунке 5.1. По кривой времени можно определить время хода грузового поезда от станции до любой точки на перегоне.

Руководящий (расчетный) уклон железной дороги и масса состава грузового поезда определяются из условия равномерного движения поезда по расчетному подъему равномерно с расчетной скоростью. Так как движение равномерное, то сила тяги локомотива  $F_k$  равна силе сопротивления движению поезда  $W$ , т. е.  $F_k = W$ .  $F_k = Pw'_0 + Qw''_0 + (P + Q) i_p$  (пояснения величин, входящих в формулу, приведены в подразд. 5.8). Решая это уравнение, получают зависимость для определения руководящего уклона или массы состава грузового поезда. При изменении расчетного уклона трасса железной дороги идет по другому направлению.

По массе состава грузового поезда подбирается тип локомотива, который будет обращаться на дороге. Для определения эксплуатационных расходов подсчитываются измерители тяговых расчетов: время хода поезда, механическая работа локомотива и работа сил сопротивления, расход топлива или электроэнергии. Эксплуатационные расходы необходимо определять для правильного принятия решений по выбору варианта железной дороги.

Особенность тяговых расчетов при проектировании железных дорог состоит в том, что в них основное внимание уделяется выбору проектного решения, в отличие от курса тяги поездов, где рассматриваются вопросы устройства, конструкции и испытания подвижного состава.

Тяговые расчеты широко используют компьютерную технику, где исходными данными служат параметры подвижного состава, продольный профиль и план линии. Результатом являются данные о скорости движения, времени хода, расходе электроэнергии или дизельного топлива, которые используются в дальнейшем при проектировании железной дороги.

Результаты тяговых расчетов широко применяются при реконструкции железных дорог, их электрификации и проектировании вторых путей, повышении скоростей движения, а также при проектировании специализированных высокоскоростных пассажирских магистралей.

Основным нормативным документом для производства тяговых расчетов являются «Правила тяговых расчетов для поездной работы» (ПТР), которые определяют порядок и методику решения задач и содержат основные характеристики локомотивов и вагонов и другие нормативные данные, являющиеся исходными для расчетов [18].

Использование на железных дорогах современного подвижного состава, укладка бесстыкового пути на железобетонных шпалах, развитие передовых методов эксплуатационной работы, а также проведение теоретических исследований и опытных испытаний локомотивов и вагонов приводят к необходимости периодического обновления расчетных норм. «Тяговые расчеты при проектировании железных дорог» изложены в соответствии с Международной системой физических единиц СИ и строительными-техническими нормами проектирования железных дорог колеи 1520 мм [20].

**Расчетная модель поезда.** Если в тяговых расчетах принять модель поезда как систему твердых тел (вагоны), соединенных упругими связями (автосцепка), то вычисления получаются достаточно сложными и громоздкими. Однако для разработки норм проектирования продольного профиля по условиям плавности и безопасности движения поездов принята именно такая модель поезда. При проектировании железных дорог для упрощения расчетов рекомендована следующая модель: поезд рассматривается как материальная точка, расположенная в его середине, масса которой равна массе поезда. Такая модель гарантирует достаточную точность расчетов и позволяет упростить вычислительную процедуру.

Однако развитие информационных технологий на транспорте требует не расширения информационной среды, а повышения её интеллектуального уровня. Проектирование переустройства железнодорожных станций должно осуществляться на основе их цифровой модели. При необходимости может выполняться дополнительная топографо-геодезическая съёмка территории, сведения о которой отсутствуют в базе данных вследствие её неполноты. После завершения проектирования возможна обратная загрузка цифровой модели станции проектом переустройства. К перспективам цифровой модели путевого развития относится создание базы данных электронных паспортов подъездных путей необщего пользования.

Цифровая модель описывает поезд не как материальную точку, к которой прилагаются силы, а как тело, обладающее фиксированной массой. Пространственная интерпретация поезда – динамический сплайн фиксированной длины. Под сплайном обычно понимается кусочно-заданная функция, совпадающая с функциями более простой природы на каждом элементе разбиения своей области определения. Динамичность сплайна означает, что в любой момент времени для сплайна существует система уравнений, описывающая размещение в пространстве поезда. Графически сплайн – кривая фиксированной длины. Динамический сплайн – «извивающийся червяк».

Бионический подход достаточно широко используется в современной науке, в том числе и при отыскании аналогов в природе. Достаточно привести в качестве примеров летательные аппараты и принципы их конструкций. Сходство поезда с кольцевым червем достаточно велико, он меняет свою длину в процессе движения.



Движение кольцевого червя в толще почвы иной природы, значительно более сложной. Каждое из его колец постоянно меняет свою геометрию, в то время как изменение длины вагона по осям автосцепок обеспечивается наличием полостей в конструкции поглощающих аппаратов. Более того, при прохождении червем плотных участков он регулирует плотность своих колец посредством перемещения физиологической жидкости между ними. Очевидно, что в чистом виде нет необходимости использования модели движения кольцевого червя для описания движения поезда. Достаточно существенно упрощённого аналога.

В качестве другого аналога можно использовать движение цепи по направляющей. Отличие таких моделей в том, что направляющая (железнодорожный путь) постоянно меняет свою конфигурацию. То есть модели, описывающие цепную передачу, не пригодны. Более того, наличие собственной системы управления у поезда ставит его значительно ближе к «живым» объектам. В качестве ещё одного ограничения выступает путь. Если червь в любой момент времени может двигаться в произвольном направлении, при этом лишь незначительная часть пространства, занятая его телом, исключает достаточно малый сегмент направлений (нельзя двигаться внутрь себя), то поезд всегда движется по направляющей, размещение которой в пространстве жёстко регламентировано.

Предлагается при описании поезда представлять его как цепь переменной длины, обладающую системой управления режимами движения, следующей по направляющей, на которую наложены внешние ограничения переменного характера. Под последними понимаются воздействия систем тягового электроснабжения и диспетчерского управления, погодные условия, перемещения динамических объектов в пространстве габарита подвижного состава на пути следования поезда и др. Звенья цепи – вагоны.

Подбор сплайна не зависит от поведения поезда. Положения головной и хвостовых меток транспондера определяют привязку поезда к цифровой модели пути. С неё снимается, на каких элементах в плане и профиле находится состав поезда. Например, одна часть поезда проходит круговую кривую известного радиуса на спуске, другая находится на переходной кривой, расположенной на площадке, а третья часть находится на прямой и на подъёме. В таком случае сплайн будет содержать три функции: по одной для каждого из участков. Число сплайнов в модели определяется точностью цифровой модели пути.

В цифровой модели путь описывается как линия, что соответствует пространственному размещению оси пути на уровне головок рельсов. Если следовать логике описания движения цепи по направляющей, то движение поезда должно описываться не одним сплайном, а целым семейством. В пространственной интерпретации это напоминает пучок нитей.

Поле исследования расчетной модели поезда достаточно широко. Его можно выполнять в рамках учебно-исследовательской работы (УИРС) или в научно-исследовательском кружке при кафедре с последующим докладом на студенческой научной конференции и использованием разработанных материалов в дипломном проектировании.

## 5.2 Силы, действующие на поезд, и условия движения поезда под действием этих сил

**Силы, действующие на поезд.** При движении на поезд действуют внутренние и внешние силы. Внутренние силы не оказывают влияния на условия движения поезда (силы, возникающие в автосцепке между вагонами, уравновешивают друг друга). Внешние силы оказывают влияние на условия движения поезда. К ним относятся сила тяги локомотива, силы сопротивления и тормозные силы.

*Сила тяги  $F$*  создается локомотивом при взаимодействии его ведущих колес с рельсами, регулируется машинистом или специальным устройством по заданной программе, направлена в сторону движения поезда. Тяговые расчеты производятся по касательной силе тяги  $F_k$ , приложенной к ободу движущихся колес.

*Тормозная сила  $B_m$*  создается тормозными средствами поезда и служит для остановки или уменьшения скорости движения поезда, регулируется машинистом, направлена в сторону, обратную направлению движения.

*Силы сопротивления  $W$  (не управляемые)* действуют на поезд в направлении как противоположном движению, так и совпадающем с ним. Значения индексов при обозначении горизонтальных сил будут приведены в соответствующих разделах.

Силы, действующие на поезд (локомотив, состав) называются полными силами и измеряются в ньютонах (Н). Не следует путать понятия веса и массы, чему в практической системе единиц не придавалось значения из-за однотипности единиц измерения.

Вес – вертикальная сила, сила тяжести (воздействие подвижного состава на железнодорожный путь). Масса – мера количества вещества, измеряется в килограммах (основная единица СИ). Для поезда в целом, локомотива и вагонов принимаем более крупную единицу измерения массы – тонну (т).

Горизонтальные полные силы  $F_k$ ,  $B_T$ ,  $W$  на порядок больше вертикальной силы тяжести (веса), измеряются в единицах силы – ньютонах (Н). Если полные силы  $F_k$ ,  $B_T$ ,  $W$  в ньютонах разделить на вес поезда в килоньютонах, то получим удельные силы в ньютонах на килоньютон (Н/кН) [18]:

– удельная сила тяги

$$f_k = F_k / (P + Q)g; \quad (5.1)$$

– удельная тормозная сила

$$b_T = B_T / (P + Q)g; \quad (5.2)$$

– удельное сопротивление

$$w = W / (P + Q)g, \quad (5.3)$$

где  $P$  – масса локомотива, т;

$Q$  – масса вагонного состава, т;

$P + Q$  – масса поезда, т;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

**Уравнение движения поезда.** В зависимости от того, какие силы действуют на поезд, различают **три режима движения**:

1) сила тяги и сила сопротивления (движение в режиме тяги, т. е. под тягой); равнодействующая сил, действующих на поезд,  $R = F_k - W$ . В зависимости от соотношения действующих сил возможны следующие варианты характера движения поезда:

если  $R > 0$ , т. е.  $F_k > W$ , то движение ускоренное;

если  $R < 0$ , т. е.  $F_k < W$ , то движение замедленное;

если  $R = 0$ , т. е.  $F_k = W$ , то движение равномерное;

2) силы сопротивления (движение в режиме холостого хода, т. е. без тяги), равнодействующая сил  $R = W_x$ ;

3) тормозные силы и силы сопротивления (движение в режиме торможения), равнодействующая сил  $R = -(W_x + \alpha B_T)$ .

Силы, направленные в сторону движения поезда, считаются положительными, в обратную – отрицательными. Характер изменения скорости и условия движения в каждом режиме зависят от величины и направления равнодействующей сил, приложенных к поезду.

**Уравнение движения поезда** зависит от режима его движения:

– режим тяги  $\frac{dv}{dt} = 120(f_k - w_0)$ ;

– режим холостого хода  $\frac{dv}{dt} = -120w_{0x}$ ;

– режим торможения  $\frac{dv}{dt} = -120(w_{0x} + \alpha B_m)$ .

Многие практические задачи тяговых расчетов решаются на основе уравнения движения поезда: установление характера движения поезда (ускоренное, равномерное, замедленное); определение массы поезда при установившемся и неустановившемся движении; определение скорости движения поезда по проектируемому участку пути, времени хода поезда и затрат электроэнергии или дизельного топлива на тягу поездов.









### 5.3 Силы сопротивления движению поезда

Силы сопротивления движению  $W_k$  состоят из основного сопротивления  $W_o$ , обусловленного трением в подшипниках, трением качения, сопротивлением воздушной среды, и дополнительных сопротивлений, которые возникают, если поезд следует по уклону  $W_i$  или по кривой  $W_r$ . Основное сопротивление испытывает поезд при движении по прямому горизонтальному участку пути. Оно всегда сопутствует движению поезда и направлено в сторону, противоположную направлению движения, а дополнительные сопротивления могут появляться и исчезать в зависимости от плана и профиля железнодорожного пути.

Сопротивление, действие которого противоположно направлению движения, считается положительным. Сопротивление от уклона в зависимости от направления может быть как положительным (при движении в сторону подъема), так и отрицательным (при движении поезда по спуску). Сопротивление от кривых всегда положительно.

Общее сопротивление движению ( $W_k$  – полное и  $w_k$  – удельное) равно алгебраической сумме основного и дополнительных сопротивлений. В зависимости от того, на каком элементе профиля (площадка, уклон) и плана (прямая, кривая) находится поезд, общее сопротивление подсчитывается по схеме, приведенной в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Определение величины общего сопротивления движению поезда  $W_k, w_k$

Профиль	0	$i$	0	$i$
				
План				
Полное сопротивление, Н	$W_o$	$W_o + W_i$	$W_o + W_r$	$W_o + W_i + W_r$
Удельное сопротивление, Н/кН	$w_o$	$w_o + w_i$	$w_o + w_r$	$w_o + w_i + w_r$

Силы основного сопротивления движению различаются в зависимости от единицы подвижного состава и режима работы локомотива. Для основного сопротивления приняты следующие обозначения с индексами (полного и удельного сопротивлений):

- локомотива при движении в режиме тяги –  $W_o', w_o'$ ;
- локомотива при движении без тяги (холостой ход) –  $W_x', w_x'$ ;
- вагонного состава –  $W_o'', w_o''$ ;
- поезда под тягой –  $W_o, w_o$ ;
- поезда без тяги –  $W_{ox}, w_{ox}$ .

## 5.4 Основное и дополнительные сопротивления

**Основное сопротивление движению.** Основное сопротивление движению различных единиц подвижного состава (вагонов, локомотива и поезда) определяется по расчетным формулам и графическим зависимостям, приведенным в ПТР [18].

Формулы основного удельного сопротивления действительны при движении поезда со скоростями не менее 10 км/ч при слабом ветре и температуре воздуха до минус 25°. Ниже приводятся формулы из ПТР для определения основного удельного сопротивления движению наиболее распространенных типов подвижного состава.

На звеньевом пути:

– четырехосные вагоны с подшипниками скольжения –

$$w_o'' = 0,7 + \frac{8 + 0,1v + 0,0025v^2}{q_o}; \quad (5.4)$$

– четырехосные вагоны с роликовыми подшипниками –

$$w_o'' = 0,7 + \frac{3 + 0,1v + 0,0025v^2}{q_o}; \quad (5.5)$$

– восьмиосные вагоны –

$$w_o'' = 0,7 + \frac{6 + 0,026v + 0,0017v^2}{q_o}; \quad (5.6)$$

– пассажирские цельнометаллические вагоны –

$$w_o'' = 0,7 + \frac{8 + 0,18v + 0,003v^2}{q_o}. \quad (5.7)$$

На бесстыковом пути:

– четырехосные вагоны на подшипниках скольжения –

$$w_o'' = 0,7 + \frac{8 + 0,08v + 0,002v^2}{q_o}; \quad (5.8)$$

– четырехосные вагоны на роликовых подшипниках –

$$w_o'' = 0,7 + \frac{3 + 0,09v + 0,002v^2}{q_o}; \quad (5.9)$$

– восьмиосные вагоны –

$$w_o'' = 0,7 + \frac{6 + 0,026v + 0,0017v^2}{q_o}; \quad (5.10)$$

– пассажирские цельнометаллические вагоны

$$w_o'' = 0,7 + \frac{8 + 0,16v + 0,0023v^2}{q_o} . \quad (5.11)$$

В формулах (5.4)–(5.11):

$w_o''$  – основное удельное сопротивление вагонов, Н/кН;

$v$  – скорость движения, км/ч;

$q_o$  – средняя нагрузка от оси вагона на рельсы, кН.

Подсчеты основного удельного сопротивления по приведенным формулам для груженых вагонов производятся при нагрузке от оси вагона  $q_o > 60$  кН.

На основании исходных данных о каждой группе вагонов в составе определяется вес вагона брутто, Н, по формуле

$$q = q_T + \alpha q_{гр}, \quad (5.12)$$

где  $q_T$  – вес тары вагона, Н;

$\alpha$  – коэффициент полногрузности вагона (процент использования грузоподъемности вагона), в долях единицы;

$q_{гр}$  – грузоподъемность вагона, Н.

Средняя нагрузка от оси вагона на рельсы  $q_o$  определяется делением веса вагона брутто на число осей. Если поезд сформирован из однотипных вагонов, то основное удельное сопротивление состава определяется непосредственно по формулам (5.4)–(5.11). Чаще составы формируются из вагонов разных типов. В этих случаях определяется основное средневзвешенное удельное сопротивление состава  $w_o''$ . Если, например, в составе имеются восьми- и четырехосные вагоны, то

$$w_o'' = (w_o''(8)Q_8 + w_o''(4)Q_4) / Q, \quad (5.13)$$

где  $Q_8$  и  $Q_4$  – веса группы вагонов соответственно восьми- и четырехосных, кН;

$Q$  – общий вес состава ( $Q = Q_8 + Q_4$ ), кН.

Обычно известным является не вес отдельных групп вагонов в составе, а соотношение их по весу или по количеству. Если известно соотношение вагонов различных категорий по весу, то *средневзвешенное сопротивление* определяется по формуле

$$w_o'' = w_o''(8)\beta_8 + w_o''(4)\beta_4, \quad (5.14)$$

где  $\beta_8$  и  $\beta_4$  – удельные веса (в долях единицы) восьми- и четырехосных вагонов;

$$\beta_8 = Q_8 / Q; \quad \beta_4 = Q_4 / Q; \quad \beta_8 + \beta_4 = 1.$$

Чаще бывает известным соотношение вагонов в составе не по весу, а по количеству. В этих случаях  $w_o''$  подсчитывается также по формуле (5.14), но предварительно должны быть определены значения  $\beta$  по формулам

$$\beta_8 = (\gamma_8 q_8) / (\gamma_8 q_8 + \gamma_4 q_4); \quad (5.15)$$

$$\beta_4 = (\gamma_4 q_4) / (\gamma_8 q_8 + \gamma_4 q_4), \quad (5.16)$$

где  $\gamma_8$  и  $\gamma_4$  – соотношение вагонов в составе из восьми- и четырехосных по количеству (в долях единицы), соответственно для различных групп вагонов.

В практических расчетах структура формул (5.13)–(5.16) должна соответствовать типам вагонов в составе.

При подсчете основного средневзвешенного сопротивления состава формулу (5.14) приводят к виду  $w''_0 = a + bv + cv^2$ , где переменной величиной будет только скорость  $v$ , а коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  – постоянными.

Основное удельное сопротивление тепловозов и электровозов в режиме тяги  $w'_0$  и в режиме холостого хода  $w'_x$  определяется по эмпирическим формулам, приведенным в нормах [20]:

$$w'_0 = 1,9 + 0,01v + 0,0003v^2 \quad (5.17)$$

$$w'_x = 2,4 + 0,011v + 0,00035v^2. \quad (5.18)$$

При расчетах, требующих повышенной точности, значения  $w'_0$  и  $w'_x$  определяют по опытным кривым, которые для некоторых серий локомотивов приведены в ПТР (рисунки 5.22 и 5.24 – для тепловозов).

Зная сопротивление движению состава и локомотива, определяется основное сопротивление поезда. Полное основное сопротивление поезда (на прямом горизонтальном участке пути:

$$- \text{при движении с тягой} - W_0 = w'_0 P + w''_0 Q; \quad (5.19)$$

$$- \text{на холостом ходу} - W_{0x} = w'_x P + w''_0 Q. \quad (5.20)$$

Основное удельное сопротивление поезда:

– при движении с тягой –

$$w_0 = (w'_0 P + w''_0 Q) / (P + Q) = \beta_l w'_0 + \beta_c w''_0; \quad (5.21)$$

– на холостом ходу –

$$w_{0x} = (w'_x P + w''_0 Q) / (P + Q) = \beta_l w'_x + \beta_c w''_0, \quad (5.22)$$

где  $\beta_l$  и  $\beta_c$  – весовые доли локомотива и состава в поезде.

**Дополнительные сопротивления от уклона и кривой** возникают при движении поезда по уклону и кривой.

**Дополнительное сопротивление от уклона.** Значение удельного дополнительного сопротивления от уклона в ньютонах на килоньютоны для всех видов подвижного состава равно числу промилле (‰) и имеет знак, соответствующий знаку уклона, т. е.

$$w_i = \pm i. \quad (5.23)$$

Например, при движении по элементу профиля 7 ‰ в сторону подъема  $w_i = +7$  Н/кН, а в сторону спуска  $w_i = -7$  Н/кН.

**Дополнительное сопротивление от кривой.** При расположении поезда целиком в кривой, т. е. когда длина поезда  $l_{п}$  меньше длины кривой  $s_{кр}$ , значение  $w_r$ , Н/кН, определяется по формуле

$$w_r = 700 / R, \quad (5.24)$$

или

$$w_r = 12,2\alpha / s_{кр}, \quad (5.25)$$

где  $R$  – радиус кривой, м;

$\alpha$  – угол поворота кривой, град.

При  $s_{кр} < l_{п}$  используется формула

$$w_r = (700 / R) (s_{кр} / l_{п}), \quad (5.26)$$

или

$$w_r = 12,2 \alpha / l_{п}. \quad (5.27)$$

Если поезд следует одновременно по нескольким смежным кривым, то

$$w_r = 12,2 \sum \alpha / l_{п}. \quad (5.28)$$

Нередко возникает необходимость (при спрямлении профиля) распространить дополнительное сопротивление от кривой или нескольких кривых равномерно на всю длину элемента продольного профиля. При этом длина элемента профиля может превышать длину поезда. В таких случаях дополнительное сопротивление от кривых подсчитывается по формуле

$$w_r = 12,2 \sum \alpha / l, \quad (5.29)$$

где  $l$  – длина элемента профиля.

**Приведенный уклон.** В случаях расположения кривых участков пути на уклонах необходимо учесть дополнительное сопротивление и от уклона, и от кривой. При этом сопротивление от кривой условно выражают эквивалентным подъемом, равным по величине дополнительному сопротивлению. Уклон с учетом влияния кривой  $i_k$ , ‰, который принято называть приведенным, определяется по формуле

$$i_k = \pm i + i_{э(к)}, \quad (5.30)$$

где  $i$  – действительный уклон профиля, ‰;

$i_{э(к)}$  – уклон, эквивалентный сопротивлению от кривой  $w_r$ , ‰.

Как видно из формулы (5.30), для этого же элемента профиля величина приведенного уклона неодинакова при движении поезда на подъем и по спуску. Она отличается не только знаком, но и абсолютной величиной.

**Сопротивление при трогании поезда с места.** На величину дополнительного сопротивления при трогании поезда с места влияют: осевая нагрузка, длина поезда, состояние ходовых частей подвижного состава, вязкость смазки, температура окружающего воздуха, продолжительность стоянки и другие факторы. В момент трогания с места сопротивление изменяется мгновенно. Начи-



ная со скорости 10 км/ч, на вагоны поезда действует основное удельное сопротивление движению  $w_o''$ , определяемое по формулам (5.4)–(5.11).

Согласно ПТР удельное сопротивление при трогании состава с места на площадке  $w_{тр}$ , Н/кН, определяется по формулам:

а) подвижной состав на подшипниках скольжения –

$$w_{тр} = \frac{142}{q_o + 7}, \quad (5.31)$$

где  $q_o$  – нагрузка от колесной пары, кН;

б) подвижной состав на подшипниках качения –

$$w_{тр} = \frac{28}{q_o + 7}; \quad (5.32)$$

в) состав, сформированный из разнотипных вагонов –

$$w_{тр} = jw_{тр(ск)} + \beta w_{тр(к)}, \quad (5.33)$$

где  $j, \beta$  – доля вагонов с подшипниками соответственно скольжения и качения в составе поезда.

**Дополнительное сопротивление движению поезда от ветра.** Согласно ПТР дополнительное сопротивление движению поезда от встречного и бокового ветра при его скорости 12 км/ч учитывается коэффициентом  $k_b$  [7] в зависимости от скорости движения поезда. Оно определяется в долях основного удельного сопротивления движению поезда  $w_o$ , Н/кН:

$$w_b = (k_b - 1) w_o. \quad (5.34)$$

При скоростях ветра больше 12 м/с дополнительное сопротивление от встречного и бокового ветра определяется по номограммам, приведенным в нормах [7, приложение 2].

**Дополнительное сопротивление движению от низкой температуры наружного воздуха.** Согласно [18] при температурах воздуха ниже минус 25 °С дополнительное сопротивление движению учитывается коэффициентом  $k_t$  в зависимости от скорости движения поезда [18, таблица 1].

Удельное сопротивление от низкой температуры  $w_t$  определяется в долях от основного удельного сопротивления движению поезда  $w_o$ , Н/кН,

$$w_t = (k_t - 1) w_o. \quad (5.35)$$

### Примеры решения задач

**Задача 5.1.** Определить основное удельное средневзвешенное сопротивление состава грузового поезда, сформированного из четырехосных и восьмиосных вагонов на роликовых подшипниках (локомотив ВЛ10) при различных скоростях движения на звеньевом пути. Весовые характеристики вагонов и их соотношение в составе по количеству приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Данные о вагонах в составе

Показатель	Вагоны	
	8-осные	4-осные
Грузоподъемность $q_{гр}$ , т	125,5	61,0
Масса тары $q_t$ , т	60,0	21,0
Соотношение по количеству $\gamma$ , %	15	85
Коэффициент полногрузости $a$	1,0	0,95

*Решение.* Определяем массу вагонов и среднюю нагрузку от оси вагона на рельсы по формуле (5.12):

$$q_8 = 60,0 + 1 \cdot 125,5 = 185,5 \text{ т}; \quad q_{o(8)} = 185,5 / 8 = 23,2 \text{ т};$$

$$q_4 = 21,0 + 0,95 \cdot 61,0 = 79,0 \text{ т}; \quad q_{o(4)} = 78,4 / 4 = 19,7 \text{ т}.$$

Вычисляем основное удельное сопротивление вагонов по формулам (5.5) и (5.6):

$$w''_{o(8)} = 0,7 + (6 + 0,038v + 0,0021v^2) / 23,2 = 0,96 + 0,0016v + 0,000091v^2;$$

$$w''_{o(4)} = 0,7 + (3 + 0,1v + 0,0025v^2) / 19,7 = 0,85 + 0,0051v + 0,000127v^2.$$

Находим соотношение вагонов в составе по весу по формулам (5.15) и (5.16):

$$\beta_8 = 15 \cdot 185,5 / (15 \cdot 185,5 + 85 \cdot 79,0) = 0,29;$$

$$\beta_4 = 85 \cdot 79,0 / (15 \cdot 185,5 + 85 \cdot 79,0) = 0,71.$$

$$\text{Проверка: } \beta_8 + \beta_4 = 0,29 + 0,71 = 1.$$

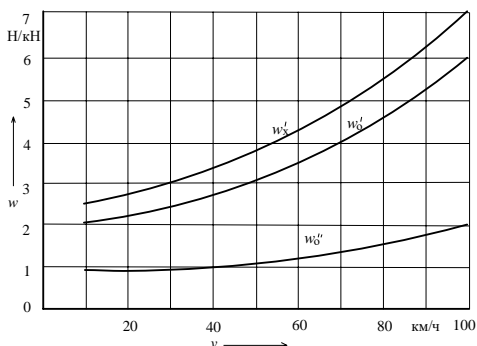
Подставив найденные величины в формулу (5.14), получим:

$$w''_o = (0,96 + 0,0016v + 0,000095v^2) \cdot 0,29 + (0,85 + 0,0051v + 0,000127v^2) \cdot 0,71 = 0,88 + 0,0041v + 0,000117v^2.$$

Подсчеты средневзвешенного сопротивления состава при различных скоростях производятся путем подстановки в полученную формулу значений  $v$ . Например, при  $v = 70$  км/ч  $w''_o = 0,88 + 0,0041 \cdot 70 + 0,000117 \cdot 70^2 = 1,74$  Н/кН.

Результаты подсчетов  $w''_o$  приводятся в табличной форме, строится график зависимости  $w''_o = f(v)$ . Применительно к рассмотренному примеру такой график показан на рисунке 5.2, где приведены также графики, выражающие зависимость основного удельного сопротивления электровоза ВЛ10 от скорости:  $w'_o = f(v)$  и  $w''_x = f(v)$ . Значения  $w'_o$ ,  $w''_o$  и  $w''_x$ , использованные для построения рисунка 5.2, приведены в таблице 5.3 (гр. 5, 3, 10). Подсчеты основного удельного сопротивления приводятся с точностью 0,01 Н/кН для состава и 0,1 Н/кН – для локомотива.

Рисунок 5.2 – Основное удельное средневзвешенное сопротивление состава и удельное сопротивление электровоза ВЛ10



**Задача 5.2.** Определить при скорости 60 км/ч средневзвешенное основное удельное сопротивление состава, сформированного из 70 % (по количеству) восьмиосных ( $q_8 = 176$  т) и 30 % четырехосных ( $q_4 = 80$  т) вагонов на роликовых подшипниках (путь бесстыковой).

*Решение.* Масса, приходящаяся на ось колесной пары восьмиосного вагона,  $q_{08} = q_8 / 8$ ;  $q_{08} = 176 / 8 = 22$  т/ось.

Основное удельное сопротивление восьмиосного вагона на роликовых подшипниках на бесстыковом пути согласно ПТР [18]

$$w''_{o(8)} = 0,7 + \frac{6 + 0,026v + 0,0017v^2}{q_o};$$

$$w''_{o(8)} = 0,7 + (6 + 0,026 \cdot 60 + 0,0017 \cdot 60^2 / 22) = 1,32 \text{ Н/кН.}$$

Масса, приходящаяся на ось колесной пары четырехосного вагона,  $q_{04} = q_4 / 4$ ;  $q_{04} = 80 / 4 = 20$  т/ось.

Основное удельное сопротивление четырехосного вагона на роликовых подшипниках на бесстыковом пути [18]

$$w''_{o(4)} = 0,7 + (3 + 0,09v + 0,002v^2) / q_o;$$

$$w''_{o(4)} = 0,7 + (3 + 0,09 \cdot 60 + 0,002 \cdot 60^2 / 19) = 1,55 \text{ Н/кН.}$$

Соотношение вагонов в составе по массе  $\beta_i$  при известном соотношении вагонов по количеству  $\gamma_i$ :

$$\beta_4 = \gamma_4 q_4 / (\gamma_4 q_4 + \gamma_8 q_8); \beta_8 = \gamma_8 q_8 / (\gamma_4 q_4 + \gamma_8 q_8);$$

$$\beta_4 = 30 \cdot 19 / (30 \cdot 19 + 70 \cdot 22) = 0,27; \beta_8 = 70 \cdot 22 / (30 \cdot 19 + 70 \cdot 22) = 0,73.$$

Основное удельное средневзвешенное сопротивление состава, сформированного из четырехосных и восьмиосных вагонов

$$w''_o = \beta_4 w''_{o(4)} + \beta_8 w''_{o(8)}; w''_o = 0,27 \cdot 1,55 + 0,73 \cdot 1,32 = 1,38 \text{ Н/кН.}$$

От в е т: средневзвешенное сопротивление движению состава 1,38 Н/кН.

Таблица 5.3 – Подсчеты ускоряющих и замедляющих усилий, действующих на поезд

Режим тяги									Режимы холостого хода и торможения							
$v$ , км/ч	$F_k$ , кН	$w'_o$ , Н/кН	$W'_o$ , Н	$w''_o$ , Н/кН	$W''_o$ , Н	$W_{ox}$ , Н	$F_k - W_{ox}$ , Н	$f_k - w_{ox}$ , Н/кН	$w'_x$ , Н/кН	$W'_x$ , Н	$W_{ox}$ , Н	$w_{ox}$ , Н/кН	$\varphi_{кр}$	$b_{т1}$ , Н/кН	$w_{ox} + b_{т1}$ , Н/кН	$w_{ox} + 0,5b_{т1}$ , Н/кН
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0	626	2,0	3680	0,93	32550	36230	589770	16,0	2,5	4600	37150	1,0	0,270	91,8	92,8	46,9
10	524	2,0	3680	0,93	32550	36230	487770	13,2	2,5	4600	37150	1,0	0,198	67,3	68,3	34,6
20	502	2,2	4048	0,94	32900	36948	465052	12,6	2,8	5152	38052	1,0	0,162	55,1	56,1	28,6
30	485	2,5	4600	1,00	35000	39600	445400	12,1	3,1	5704	40704	1,1	0,140	47,6	48,7	24,9
40	470	2,8	5152	1,13	39550	44702	425298	11,5	3,4	6256	45806	1,2	0,126	42,8	44,0	22,6
46,7	460	3,1	5704	1,33	46550	52254	407746	11,0	–	–	–	–	–	–	–	–
50	456	3,2	5888	1,38	48300	54188	401812	10,9	3,8	6992	53542	1,3	0,115	39,4	40,7	21,0
57,5	446	3,5	6440	1,49	52150	58590	387410	10,5	–	–	–	–	–	–	–	–
60	401	3,6	6624	1,54	53500	60124	340846	9,3	4,3	7912	56212	1,5	0,108	36,7	38,2	19,9
70	269	4,1	7544	1,74	60500	68044	200956	5,5	4,9	9016	69516	1,9	0,102	34,7	36,6	19,3
80	200	4,6	8464	1,95	68250	76714	123286	3,3	5,5	10120	78370	2,1	0,097	33,0	35,1	18,6
90	150	5,2	9668	2,19	76650	86310	63682	1,7	6,2	11408	88058	2,4	0,093	31,6	34,0	18,2
100	112	5,9	10858	2,48	86800	97658	14342	0,4	7,0	12880	99680	2,7	0,900	30,6	33,3	18,0
Данные о локомотиве и поезде																
1 Серия локомотива – ВЛ10							4 Расчетная скорость $v_p = 46,7$ км/ч									
2 Вес локомотива $P = 1840$ кН							5 Количество вагонов $n_4 = 30$ ; $n_8 = 8$									
3 Вес поезда $P + Q = 1840 + 35000 = 36800$ кН							6 Тормозной коэффициент поезда $\nu = 0,34$									

**Задача 5.3.** Определить основное удельное сопротивление поезда при движении под тягой со скоростью 60 км/ч, по звеньевому пути, если в составе по массе 20 % восьмиосных и 80 % четырехосных вагонов на роликовых подшипниках. Масса восьмиосного вагона брутто равна 176 т, четырехосного – 72 т. Масса состава – 3200 т, локомотива – 260 т.

*Решение.* Масса вагона, приходящаяся на ось колесной пары,  
 $q_0 = q / n$ ;  $q_{04} = 72 / 4 = 18$  т/ось;  $q_{08} = 176 / 8 = 22$  т/ось.

Основное удельное сопротивление движению груженых четырехосных вагонов по звеньевому пути [9]

$$w''_{o(4)} = 0,7 + \frac{3 + 0,1v + 0,0025v^2}{q_{o(4)}};$$

$$w''_{o(4)} = 0,7 + (3 + 0,1 \cdot 60 + 0,0025 \cdot 60^2 / 18) = 1,7 \text{ Н/кН.}$$

Основное удельное сопротивление движению груженых восьмиосных вагонов по звеньевому пути [9]

$$w''_{o(8)} = 0,7 + \frac{6 + 0,038v + 0,0021v^2}{q_{o(8)}};$$

$$w''_{o(8)} = 0,7 + (3 + 0,1 \cdot 60 + 0,0025 \cdot 60^2 / 18) = 1,7 \text{ Н/кН.}$$

Основное удельное средневзвешенное сопротивление состава

$$w'' = 0,2 \cdot 1,49 + 0,8 \cdot 1,7 = 1,66 \text{ Н/кН.}$$

Основное удельное сопротивление движению тепловоза по звеньевому пути [9]

$$w'_o = 1,9 + 0,01v + 0,00030v^2;$$

$$w'_o = 1,9 + 0,01 \cdot 60 + 0,00030 \cdot 60^2 = 3,58 \text{ Н/кН.}$$

Основное удельное сопротивление движению поезда

$$w_o = \frac{w'_o P + w''_o Q}{P + Q}; \quad w_o = \frac{3,58 \cdot 260 + 1,66 \cdot 3200}{260 + 3200} = 1,80 \text{ Н/кН.}$$

О т в е т: основное удельное сопротивление движению поезда равно 1,8 Н/кН.

**Задача 5.4.** Величина приведенного уклона при движении на подъем  $i_k = 5,7$  ‰, а при движении на спуск –  $i_k = -4,3$  ‰. Чему равен радиус кривой, если поезд располагается в ее пределах?

*Решение.* Величина приведенного уклона  $i_k = \pm i + i_{\vartheta(k)}$ . Тогда при движении на подъем  $i_k = +i + i_{\vartheta(k)}$ , на спуск –  $i_k = -i + i_{\vartheta(k)}$ .

Решим систему уравнений:

$$\begin{aligned}5,7 &= +i + i_{\text{э(к)}}, \\ -4,3 &= -i + i_{\text{э(к)}}.\end{aligned}$$

$$1,4 = 2 i_{\text{э(к)}}; \quad i_{\text{э(к)}} = 0,7; \quad i_{\text{э(к)}} = w_r = 0,7; \quad w_r = 700 / R.$$

Тогда  $R = 700 / w_r$ ;

$$R = 700 / 0,7 = 1000 \text{ м.}$$

О т в е т: радиус кривой равен 1000 м.

**Задача 5.5.** Поезд движется по кривой, расположенной на спуске 5 ‰. Общее удельное сопротивление поезда  $w_k = -1,9$  Н/кН, а средневзвешенное основное удельное сопротивление его  $w_o = 2,1$  Н/кН. Чему равен центральный угол кривой, если длина поезда 1000 м (длина кривой меньше длины поезда).

*Решение.* Общее удельное сопротивление поезда

$$w_k = w_o + w_r + w_i.$$

Отсюда  $w_r = w_k - w_o - w_i$ .

$$w_r = -1,9 - 2,1 - (-5) = 1 \text{ Н/кН.}$$

Дополнительное сопротивление от кривой

$$w_r = 12,2\alpha / l_{\text{п}}.$$

$$\text{Тогда } \alpha = w_r l_{\text{п}} / 12,2; \quad \alpha = 1 \cdot 1000 / 12,2 = 82^\circ.$$

О т в е т: угол поворота кривой равен  $82^\circ$ .

Другие задачи по силам сопротивления движению поезда см. в сборнике задач по тяговым расчетам [8].

## 5.5 Сила тяги локомотива

**Сила тяги электровозов и тепловозов.** В электровозе сила тяги создается тяговыми электродвигателями, получающими энергию от электрических станций через контактную сеть и превращающими во внутреннюю механическую работу вращения колес, которая благодаря сцеплению колес с рельсами превращается в механическую работу силы тяги.

В двигателе внутреннего сгорания (дизеле) у тепловозов химическая энергия топлива превращается во внутреннюю работу на его валу; передаточный механизм преобразует ее в механическую работу вращения колес. Благодаря сцеплению колес с рельсами внутренняя механическая работа превращается во внешнюю работу силы тяги локомотива.

**Ограничение силы тяги по сцеплению.** Сила тяги любого локомотива ограничивается его основными преобразователями энергии. Значения силы тяги, ограниченные отдельными преобразователями, получают по тяговым характеристикам, которые выражают зависимость силы тяги от скорости, и приведены в виде графиков  $F_k = f(v)$  и таблиц в ПТР [18].

Значения силы тяги по сцеплению зависят от типа локомотива, его веса и коэффициента сцепления, зависящего от скорости движения поезда. В [7] приводятся значения силы тяги по сцеплению в зависимости от скоро-

сти для различных типов локомотивов в табличной форме вместе с тяговой характеристикой.

**Ограничение силы тяги по двигателю.** Тяговые характеристики электровозов постоянного тока содержат серию кривых  $F_k = f(v)$ , построенных для разных схем соединения тяговых двигателей (последовательного С, последовательно-параллельного СП и параллельного П) и различных ступеней ослабления магнитного поля (ПП, ОП1, ОП2, ОП3, ОП4). У электровозов переменного тока тяговые характеристики содержат кривые  $F_k = f(v)$  для разных значений напряжения, снимаемого со вторичной обмотки главного трансформатора (разные позиции контроллера машиниста), и различных ступеней ослабления магнитного поля двигателя. Указанные кривые выражают ограничение силы тяги электровоза по двигателю [18].

Расчетному значению коэффициента ослабления поля соответствует автоматическая характеристика. На полных тяговых характеристиках, приведенных в ПТР, расчетные автоматические характеристики выделены жирными линиями. Для электровоза ВЛ10, например, за расчетную автоматическую характеристику принимается кривая  $F_k = f(v)$  при параллельном соединении тяговых двигателей и третьей ступени ослабления поля магнитного потока (П-ОП3); для электровоза переменного тока ВЛ80 расчетная автоматическая характеристика соответствует второй ступени ослабления поля при 33-й позиции контроллера машиниста (ЗЗП, ОП2) [18].

Для построения расчетной кривой сила тяги определяется по полной тяговой характеристике для значений скорости с интервалом 10 км/ч, а также для расчетной скорости и скорости, при которой резко изменяется очертание этой кривой. Масштаб для построения кривой должен обеспечить удобство пользования графиком при отсчетах по нему значений  $F_k$  при разных скоростях.

## 5.6 Тяговые характеристики тепловозов и электровозов

**Тяговая характеристика тепловозов.** В соответствии со схемой преобразования энергии сила тяги тепловоза ограничивается мощностью двигателя внутреннего сгорания (дизеля), передаточным механизмом и сцеплением движущих колес с рельсами. Наиболее распространенной является электрическая передача.

Путем непосредственных испытаний получены полные тяговые характеристики тепловозов, которые приводятся в ПТР [18]. Каждая характеристика содержит несколько серий кривых  $F_k = f(v)$ , обозначенных цифрами 1, 2, 3 и т. д. Эти цифры соответствуют определенной позиции поездного контроллера машиниста. При изменении позиции изменяется и количество топлива, которое поступает в цилиндры дизеля за один рабочий ход, следовательно, изменяется и сила тяги. У тепловозов серии 2ТЭ10Л, например, контроллер имеет 15 позиций. На каждой позиции контроллера работа тепловоза осу-

ществляется при разных режимах работы тяговых двигателей, характеризующихся схемой соединения их в электрическую цепь и степенью ослабления поля магнитного потока, причем переход от одного режима к другому с изменением скорости происходит автоматически. Помимо кривых  $F_k = f(v)$ , выражающих ограничение силы тяги по дизелю и электрической передаче, полные тяговые характеристики тепловозов содержат кривую ограничения силы тяги по сцеплению [7].

На тяговых характеристиках тепловоза показывают: 1) кривую ограничения силы тяги по сцеплению или по пусковому току; 2) кривую, выражающую ограничение силы тяги по дизелю и электрической передаче при расчетной (максимальной для данного тепловоза) позиции контроллера. Соответствующие этим кривым значения  $F_k$  определяются по тяговым характеристикам тепловозов для всех скоростей с интервалом 10 км/ч, а также для скоростей, при которых резко изменяется очертание кривой  $F_k = f(v)$ . Такой скоростью для тепловоза 2ТЭ10Л, например, является  $v = 22$  км/ч – скорость перехода от ограничения силы тяги по сцеплению на автоматическую характеристику при 15СП-ПП. Для скоростей, соответствующих моментам перехода от одного режима работы тяговых двигателей к другому, определять  $F_k$  не следует, так как при этом кривые силы тяги не имеют резких переломов. Для скоростей, в пределах которых на тяговых характеристиках имеются по две кривые  $F_k = f(v)$  при разных режимах работы тяговых двигателей, в расчет надо принимать среднее значение  $F_k$ .

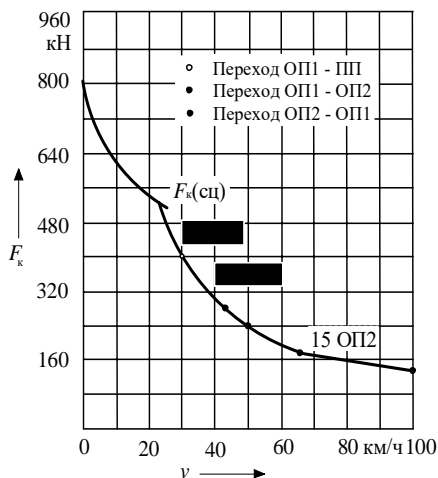


Рисунок 5.3 – Расчетная кривая силы тяги тепловоза 2ТЭ10Л (тяговые двигатели ЭД-107А)

На рисунке 5.3 в качестве примера показана расчетная кривая силы тяги тепловоза 2ТЭ10Л с тяговыми двигателями ЭД-107А. Построена она на основе полной тяговой характеристики тепловоза, приведенной в [7]. Для линий, проектируемых в районах с жарким климатом, сила тяги тепловоза умножается на коэффициент, равный  $1 - K_t - K_p$ , где  $K_t$  и  $K_p$  – коэффициенты, учитывающие снижение мощности дизеля от изменения температуры наружного воздуха и атмосферного давления.

**Тяговые характеристики электровозов.** Тяговые характеристики электровозов постоянного тока содержат серию кривых  $F_k = f(v)$ , по-



строенных для разных схем соединения тяговых двигателей (последовательного С, последовательно-параллельного СП и параллельного П) и различных ступеней ослабления магнитного поля (ПП, 0П1, 0П2, ОП3, ОП4). У электровозов переменного тока тяговые характеристики содержат кривые  $F_k = f(v)$  для разных значений напряжения, снимаемого со вторичной обмотки главного трансформатора (разные позиции контроллера), и различных ступеней ослабления магнитного поля двигателя. Указанные кривые называются автоматической характеристикой, выражающей ограничение силы тяги электровоза по двигателю [18].

Расчетному значению коэффициента ослабления поля соответствует расчетная автоматическая характеристика. На полных тяговых характеристиках, приведенных в ПТР, расчетные автоматические характеристики выделены жирными линиями. Для электровоза ВЛ10, например, за расчетную автоматическую характеристику принимается кривая  $F_k = f(v)$  при параллельном соединении тяговых двигателей и третьей ступени ослабления поля (П-ОП3); для электровоза переменного тока ВЛ80 расчетная автоматическая характеристика соответствует второй ступени ослабления поля при 33-й позиции контроллера (ЗЗП, ОП2).

Кроме расчетной автоматической характеристики на чертеж наносится кривая ограничения силы тяги по сцеплению и вертикальная прямая, соответствующая конструктивной скорости. У современных электровозов постоянного тока имеется ограничение силы тяги по максимальному току двигателей. Кривая  $F_k = f(v)$ , соответствующая этому ограничению, пересекает как кривую силы тяги по сцеплению, так и автоматическую характеристику. Эти точки пересечения при построении расчетной кривой силы тяги электровоза должны отмечаться особенно тщательно, так как в них происходит резкое изменение очертания расчетной кривой  $F_k = f(v)$ .

На рисунке 5.4 приведена расчетная кривая силы тяги электровоза ВЛ10. Она построена на основе полной тяговой характеристики электровоза [18].

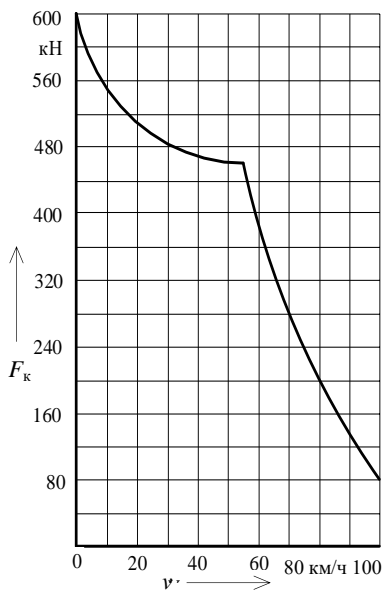


Рисунок 5.4 – Расчетная кривая силы тяги электровоза ВЛ10

Для построения расчетной кривой сила тяги определяется по полной тяговой характеристике для значений скоростей с интервалом 10 км/ч, а также для скоростей, при которых резко изменяется очертание этой кривой. Масштаб для построения кривой должен обеспечить удобство пользования графиком при отсчетах по нему значений  $F_k$  при разных скоростях.

Для вождения тяжеловесных (до 10000 т) длинносоставных поездов используются Китайские локомотивы БКГ1 и БКГ2. Скорость длительно-го режима составляет 51 км/ч.

**Регулирование скорости движения поезда.** Скорость движения поезда регулируется за счет различных схем соединения тяговых двигателей локомотива и различных ступеней ослабления поля магнитного потока.

Каждая тяговая характеристика содержит несколько кривых  $F_k = f(v)$ , обозначенных цифрами 1, 2, 3 и т. д. Эти цифры соответствуют определенной позиции поездного контроллера машиниста. При изменении позиции изменяется и количество топлива, которое поступает в цилиндры дизеля за один рабочий ход, а следовательно, изменяется и сила тяги. У тепловозов серии 2ТЭ10Л контроллер имеет 15 позиций. На каждой позиции контроллера работа тепловоза осуществляется при разных режимах работы тяговых двигателей, характеризующихся схемой соединения их в электрическую цепь и степенью ослабления магнитного поля, причем переход от одного режима к другому с изменением скорости происходит автоматически.

Тяговые характеристики электровозов постоянного тока содержат серию кривых  $F_k = f(v)$  для разных схем соединения тяговых двигателей (последовательного С, последовательно-параллельного СП и параллельного П) и различных ступеней ослабления магнитного поля (ПП, ОП1, ОП2 и др.).

Регулирование скорости движения поезда рассмотрим, решая задачи.

**Задача 5.6.** Напряжение на зажимах тягового электродвигателя электровоза серии ВЛ8  $U_d = 750$  В. По какой схеме соединены тяговые электродвигатели?

*Решение.* Регулирование напряжения  $U_d$  тяговых двигателей у восьмисоснового электровоза постоянного тока осуществляется с помощью трех схем их соединения (рисунок 5.5).

Так как напряжение в контактной сети постоянного тока  $U = 3000$  В, а на одном двигателе  $U_d = 750$  В, согласно условию задачи  $n = 3000 / 750 = 4$ , что соответствует последовательно-параллельной схеме соединения.

Ответ: соединение тяговых двигателей последовательно-параллельное.

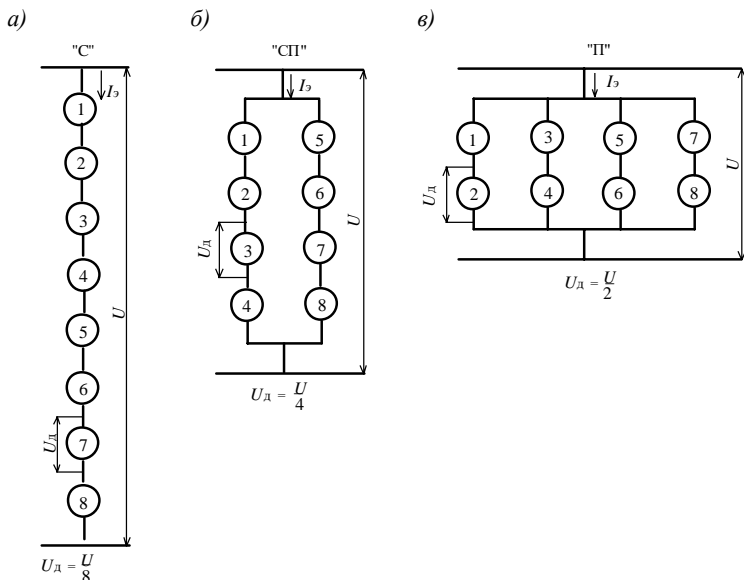


Рисунок 5.5 – Соединения тяговых двигателей:

а – последовательное; б – последовательно-параллельное; в – параллельное

**Задача 5.7.** Напряжение на зажимах тягового электродвигателя постоянного тока  $U_{\text{д}} = 500$  В. Двигатели электровоза соединены последовательно. Сколько двигателей имеет электровоз?

*Решение.* Напряжение в контактной сети постоянного тока  $U = 3000$  В. Так как двигатели соединены последовательно, число двигателей  $n = U / U_{\text{д}} = 3000 / 500 = 6$  (двигателей).

Ответ: 6 двигателей соединены последовательно у шестиосного электровоза.

**Задача 5.8.** Определить полезную силу тяги локомотива  $F_{\text{п}}$  при равномерном движении, если основное удельное сопротивление его  $w_0' = 2$  Н/кН, масса локомотива  $P = 260$  т, касательная сила тяги  $F_{\text{к}} = 50600$  Н. Поезд движется по подъему 8 ‰, расположенному в плане на прямой.

*Решение.* Полезная сила тяги приложена к автосцепке первого вагона. Значит,  $F_{\text{п}} = F_{\text{к}} - P(w_0' + w_i)g$ ;

$$F_{\text{п}} = 506000 - 260(2 + 8) \cdot 10 = 480000 \text{ Н} = 480 \text{ кН.}$$

От в е т: полезная сила тяги локомотива  $F_{\text{п}} = 480$  кН.

**Задача 5.9.** Определить по тяговой характеристике (ПТР), при какой позиции контроллера тепловоз серии 2ТЭ10М может реализовать касательную силу тяги 156000 Н и скорость 80 км/ч.

*Решение.* На с. 235 ПТР [7] по тяговой характеристике (точка пересечения прямых, которые проведены из точек, соответствующих скорости 80 км/ч, и силы тяги 156000 Н) определяем позицию контроллера 150П2.

О т в е т: при позиции контроллера машиниста 150П2.

## 5.7 Тормозные силы поезда

**Виды торможения поезда.** Торможение поезда необходимо для обеспечения его остановки или поддержания определенного уровня скорости движения. Различают механическое и электрическое торможение. Основным является механическое торможение, которое обеспечивается тормозными средствами поезда и является более надежным. Тормозная сила образуется за счет нажатия тормозных колодок на бандажи колес. Электрическое торможение осуществляется на спусках, где двигатели превращаются в генераторы, возвращающие электроэнергию в контактную сеть при торможении.

**Механическое торможение.** Тормозная сила поезда от действия тормозных колодок определяется по формуле

$$B_{\text{т}} = 1000 \varphi_{\text{кр}} \sum K_{\text{р}}, \quad (5.36)$$

где  $\varphi_{\text{кр}}$  – расчетный коэффициент трения тормозных колодок о бандаж колеса;

$\sum K_{\text{р}}$  – сумма расчетных нажатий всех тормозных колодок, кН.

Согласно ПТР, на спусках до 20 ‰ при автотормозах в грузовых поездах разрешается тормозную силу и вес локомотива не учитывать. Тогда удельная тормозная сила, Н/кН,

$$b_{\text{т}} = 1000 \varphi_{\text{кр}} \nu_{\text{р}}, \quad (5.37)$$

где  $\nu_{\text{р}}$  – расчетный тормозной коэффициент состава,

$$\nu_{\text{р}} = \sum K_{\text{р(в)}} / Q,$$

$\sum K_{\text{р(в)}}$  – сумма расчетных нажатий всех тормозных колодок вагонов, кН.

Расчетный коэффициент трения чугунных стандартных колодок и колодок с повышенным содержанием фосфора определяется согласно [18] по формуле

$$\varphi_{\text{кр}} = 0,27(\nu + 100) / (5\nu + 100);$$

для композиционных колодок – по формуле

$$\varphi_{\text{кр}} = 0,36(\nu + 150) / (2\nu + 150),$$

где  $\nu$  – скорость, км/ч.

Значения расчетных нажатий тормозных колодок вагонов принимаются по нормам [18, таблица 3].

**Тормозные силы при рекуперативном торможении.** При электрическом (рекуперативном торможении) необходимую тормозную силу создает локомотив. Тяговые электродвигатели локомотива при выключенном токе продолжают вращаться и, работая в генераторном режиме, отдают ток в контактную сеть. При электрическом торможении тормозная сила возрастает.

В качестве тормозной силы для остановки поезда, а также при определении наибольших допускаемых скоростей движения поезда по тормозам рекуперативное торможение не учитывается [18].

Тормозная сила  $B_{тр}$ , кН, необходимая для поддержания постоянной скорости  $v$ , определяется из условия равномерного движения поезда с этой скоростью:

$$B_{тр} = (P + Q)g (i_k - w_{ох}), \quad (5.38)$$

где  $i_k$  – абсолютная величина фиктивного (приведенного) уклона (спуска), ‰;  $w_{ох}$  – средневзвешенное основное удельное сопротивление поезда при движении без тяги, Н/кН.

Ток рекуперации рассчитывается в такой последовательности:

– тормозная сила  $B_{тр}$ , требуемая для поддержания заданной скорости  $v$ , определяется по формуле (5.46);

– для данного электровоза по тормозной характеристике при рекуперативном торможении  $B_{тр} = f(v)$  определяется схема соединения тяговых двигателей (С, СП, П) и позиция тормозного контроллера (1–15), соответствующая расчетному значению  $B_{тр}$  и заданной скорости  $v$ ;

– ток двигателя  $I_d$  определяется по токовой характеристике при рекуперативном торможении  $I_d = t(v)$  для данного электровоза по расчетной схеме соединения тяговых двигателей и позиции тормозного контроллера и заданной скорости  $v$ ;

– для данного конкретного случая и по известной схеме соединения тяговых двигателей после определения тока двигателя  $I_d$  находится величина тока, отдаваемого электровозом в контактную сеть, по выражению  $I_3 = n I_d$  ( $n$  – число параллельных цепей тяговых двигателей, зависящее от схемы соединения тяговых двигателей данного электровоза).

Тяговые и тормозные характеристики локомотивов при рекуперативном торможении приводятся в ПТР [7].

### **Примеры решения тормозных задач.**

**Задача 5.10.** Определить удельную тормозную силу грузового поезда, оборудованного автотормозами, для скорости движения  $v = 60$  км/ч при следующих исходных данных: масса состава  $Q = 3500$  т; число вагонов:  $n_4 = 30$ ;  $n_8 = 6$ ; процент тормозных вагонов:  $\alpha_{т(4)} = 100$ ;  $\alpha_{т(8)} = 100$ . Тормозные колодки чугунные стандартные. Режим торможения грузеный.

*Решение.*

Значения расчетных нажатий тормозных колодок вагонов принимаются по нормам [18, таблица 3].

Определяем:

1) число тормозных вагонов:

- четырехосных –  $n_{т(4)} = \eta_4 \alpha_{т(4)} = 30 \cdot 1,0 = 30$ ;

- восьмиосных –  $n_{т(8)} = \eta_8 \alpha_{т(8)} = 6 \cdot 1,0 = 6$ ;

2) расчетные нажатия на все оси одного вагона:

$$\begin{aligned} K_{p(4)} &= 4 \text{ оси} \cdot 70 \text{ кН/ось} = 280 \text{ кН}; \\ K_{p(8)} &= 8 \text{ осей} \cdot 70 \text{ кН/ось} = 560 \text{ кН}; \end{aligned}$$

3) сумму расчетных сил нажатия на оси всего состава

$$\sum K_p = K_{p(4)} n_{т(4)} + K_{p(8)} n_{т(8)} = 280 \cdot 30 + 560 \cdot 6 = 8400 + 3360 = 11768 \text{ кН};$$

4) расчетный тормозной коэффициент

$$v_p = \sum K_p / Q_g = 11768 : 35000 = 0,34 \text{ кН/кН}.$$

5) удельную тормозную силу

$$b_{т} = 1000 \varphi_{кр} v_p = 1000 \cdot 0,27(60 + 100) : (5 \cdot 60 + 100) \cdot 0,34 = 38 \text{ Н/кН}.$$

**Задача 5.11.** Определить наибольшие допускаемые скорости по тормозам при движении по спускам.

Наибольшая допускаемая скорость при движении на спуске определяется из условия, что машинист должен остановить поезд, увидев сигнал остановки, в пределах длины установленного тормозного пути. Для спусков крутизной до 6 ‰ тормозной путь установлен 1000 м, от 6 ‰ и круче – 1200 м [9].

Полный тормозной путь состоит из пути подготовки к торможению  $S_{п}$  и действительного пути торможения  $S_{д}$ :

$$S_{т} = S_{п} + S_{д}.$$

Путь подготовки к торможению, т. е. путь, проходимый поездом от начала торможения до начала снижения скорости,

$$S_{п} = v_{н} t_{п} \cdot 1000 / 3600 = 0,278 v_{н} t_{п}, \quad (5.39)$$

где  $v_{н}$  – скорость движения поезда в момент начала торможения (начальная скорость торможения), км/ч;

$t_{п}$  – расчетное время подготовки к торможению, с.

Для грузовых составов длиной 200 и менее осей при автоматических тормозах

$$t_{п} = 7 - 10i_c / b_{т}; \quad (5.40)$$

для грузовых составов длиной более 200 осей при автоматических тормозах без ускорителей экстренного торможения

$$t_{п} = 7 - 15i_c / b_{т},$$

где  $i_c$  – спрямленный уклон, ‰, на котором происходит торможение (величина  $i_c$  для подъемов принимается со знаком плюс, для спусков – со знаком минус);

$b_T$  – значение удельной тормозной силы поезда, соответствующее начальной скорости торможения.

Подсчеты по определению величины  $S_d$  производятся в табличной форме (таблица 5.4).

Таблица 5.4 – Подсчеты для построения кривых  $S_d$

$v$ км/ч	$0,278 v, \text{ м/с}$	$b_T = 1000 \Phi_{\text{пр}} \nu_{\text{пр}}, \text{ Н/кН}$	$i = -13 \text{ ‰}$			$i = -8,5 \text{ ‰}$			$i = -4 \text{ ‰}$		
			$t_n = 7 - 10i_c/b_T, \text{ м}$	$S_n = 0,278\nu_n t_n, \text{ м}$	$S_d = 1000 - S_n, \text{ м}$	$t_n = 7 - 0i_c/b_T, \text{ с}$	$S_n = 0,278\nu_n t_n, \text{ м}$	$S_d = 1000 - S_n, \text{ м}$	$t_n = 7 - 10i_c/b_T, \text{ с}$	$S_n = 0,278\nu_n t_n, \text{ м}$	$S_d = 1000 - S_n, \text{ м}$
0	0	91,87	8,4	0	1000	7,9	0	1000	7,4	0	1000
60	16,7	36,7	10,2	170	830	9,1	152	848	8,1	135	865
80	22,2	33,0	10,7	236	764	9,3	207	793	8,2	182	818
100	100	30,6	10,8	299	701	9,5	264	736	8,3	231	769

Действительный путь торможения  $S_d$ , м, т. е. путь, проходимый поездом от начала снижения скорости до полной остановки, определяется по формуле  $S_d = S_T - S_n$ .

Скорости, допускаемые по тормозам, при движении на спусках определяют графически. При этом на одном чертеже строятся кривые  $v = f(s)$  и  $S_d = f(v)$ . Пересечение их дает точку, ордината которой определяет допускаемую наибольшую скорость по тормозам (рисунок 5.6).

Кривая скорости при торможении  $v = f(s)$  (тормозная кривая) строится с использованием диаграммы удельных равнодействующих сил при экстренном торможении, т. е.  $w_{\text{ок}} + b_T = f(v)$ . На том же самом чертеже строится кривая  $s_d = f(v)$ , выражающая зависимость действительного пути торможения от скорости. Кривые  $v = f(s)$  и  $S_d = f(v)$  строятся в масштабах, указанных на рисунке 5.6, и связаны зависимостью  $y = 120 \text{ м}^2/\text{к}$ . На рисунке 5.6 построены тормозные кривые  $v = f(s)$  для значений уклонов  $i = -4$ ;  $i = -8,5$ ; и  $i = -13 \text{ ‰}$  с использованием диаграммы удельных равнодействующих сил при экстренном торможении. Данные для построений этой диаграммы были получены выше (см. таблицу 5.3). Для тех же значений уклонов построены кривые  $S_d = f(v)$ . Расчетный тормозной путь в примере принят равным  $S_T = 1000$  м. Тогда для состава длиной менее 200 осей  $S_d = 1000 - 0,278 \nu_n (7 - 10i_c / b_T)$ .

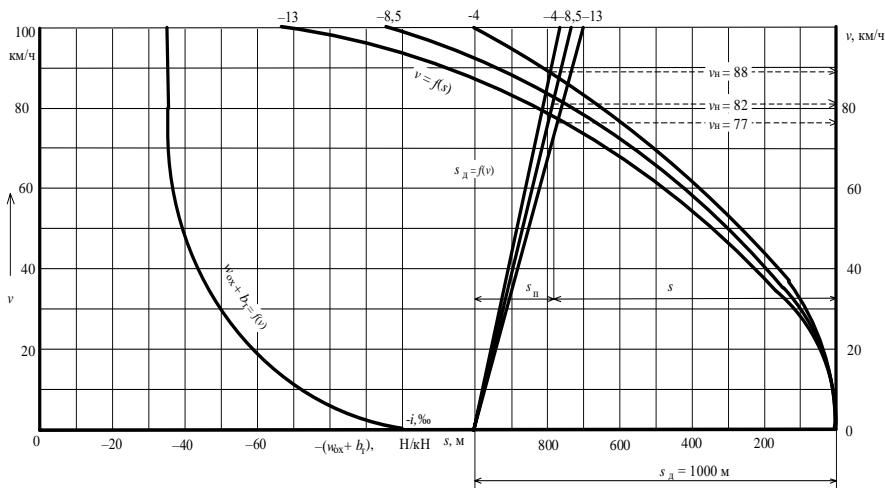


Рисунок 5.6 – Определение скоростей, допускаемых по тормозам.  
 Масштабы для графических построений: скорость 1 км/ч – 1 мм ( $m$ );  
 удельная сила 1 Н/кН – 1 мм ( $k$ ); путь 1 км –  $120 \text{ м}^2/k = 120 \text{ мм}$  ( $y$ )

Подсчеты для построения кривых  $S_d = f(v)$  при значениях уклонов  $i = -4$ ;  $i = -8,5$  и  $i = -13$  ‰ сведены в таблицу 5.4. Точки пересечения кривых  $v = f(s)$  и  $S_d = f(v)$  на рисунке 5.6 определили допускаемые скорости по тормозам  $v_H$ ; для спусков 4 ‰ – 88, 8 ‰ – 82 и 12 ‰ – 77 км/ч. По полученным точкам построен график  $v_H = f(i)$ , приведенный на рисунке 5.7.

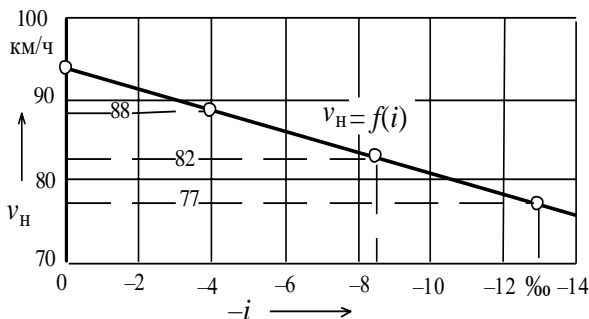


Рисунок 5.7 – Зависимость скорости, допускаемой по тормозам

## 5.8 Определение массы состава грузового поезда

**Масса вагонного состава.** Для определения массы состава при заданном локомотиве необходимо проанализировать продольный профиль



существующей железной дороги и выделить участки, где поезд идет с неравномерной скоростью, и подъемы, где скорость поезда становится постоянной.

Различают два случая расчета массы состава: 1) когда труднейшим (расчетным) оказался затяжной подъем, на котором скорость поезда, постепенно уменьшаясь, становится постоянной; 2) когда труднейшим оказался сравнительно короткий подъем, на котором скорость поезда, продолжая снижаться, не успевает выйти на постоянный уровень.

Методы расчета масса состава в этих случаях различны, но объединяет их одно условие – наименьшая скорость движения – расчетная скорость, установленная для данного типа локомотива, которая приведена в нормах [20].

При проектировании железных дорог масса состава определяется по установившемуся движению, т. е. из условия равномерного движения поезда на затяжном (руководящем) подъеме с установленной (расчетной) для данного локомотива скоростью.

**Определение массы состава из условия равномерного движения с расчетной скоростью на расчетном подъеме.** Из условия равенства сил, действующих на поезд (сила тяги равна полному сопротивлению  $F_{кр} = W_{кр}$ , при его движении по расчетному (руководящему) подъему  $i_p$  с постоянной расчетной скоростью  $v_p$ :

$$F_{кр} = gP(w'_o + i_p) + Q(w''_o + i_p)g.$$

Отсюда масса вагонного состава

$$Q = [F_{кр} - Pg(w'_o + i_p)] / (w''_o + i_p)g, \quad (5.41)$$

где  $F_{кр}$  – сила тяги локомотива при расчетной скорости, Н;

$P$  – масса локомотива, т;

$w'_o$  – основное удельное сопротивление локомотива при движении под тягой, Н/кН;

$i_p$  – расчетный (руководящий) подъем, ‰, или дополнительное сопротивление от подъема, Н/кН;

$w''_o$  – средневзвешенное основное удельное сопротивление состава, Н/кН.

Величины расчетной скорости и силы тяги указываются в ПТР. Значения основного удельного сопротивления локомотива и состава определяются в соответствии с указаниями, изложенными в подразделе 5.4.

**Задача 5.12.** Исходные данные: электровоз ВЛ10,  $P = 184$  т,  $v_p = 46,7$  км/ч,  $F_{кр} = 460000$  Н, руководящий подъем  $i_p = 11$  ‰, вагоны в составе те же, что и

в примере 5.1 подразд. 5.4 (см. таблицу 5.2). Определить массу состава грузового поезда.

*Решение.* Определяем средневзвешенное основное удельное сопротивление состава при расчетной скорости по формуле (5.14)

$$w_0'' = 0,88 + 0,0041 \cdot 46,7 + 0,000117 \cdot 46,7^2 = 1,33 \text{ Н/кН}$$

и основное удельное сопротивление локомотива по формуле (5.21)

$$w_0' = 1,9 + 0,01 \cdot 46,7 + 0,0003 \cdot 46,7^2 = 2,4 \text{ Н/кН.}$$

Подставив соответствующие значения в формулу (5.41), получим

$$Q = [460000 - 184 \cdot 10(2,4 + 11)] / (1,33 + 11) \cdot 10 = 3530 \text{ т.}$$

Принимаем для дальнейших расчетов  $Q = 3500$  т. Рекомендуется производить округление массы состава грузовых поездов до 50 т.

Графически зависимость  $Q = f(i_p)$  очень близка к кривой гиперболического очертания. На рисунке 5.8 приведены графики  $Q = f(i_p)$  для некоторых электровозов и тепловозов. При подсчете значений  $Q$  основное удельное сопротивление состава определено по формуле (5.21).

**Задача 5.13.** Определить массу состава нетто и длину поезда.

$Q = 3500$  т;  $\beta_v = 0,29$ ;  $q_v = 185,5$  т;  $\beta_{ч} = 0,71$ ;  $q_{ч} = 79$  т (исходные данные – из задачи 5.1 (подразд. 5.4)). Определяем число вагонов в составе. Так как в составе разнотипные вагоны, то число вагонов каждого типа определяется по формуле

$$n = \beta Q / q. \quad (5.42)$$

$n_8 = 0,29 \cdot 3500 : 185,5 = 5,5$  ед.;  $n_4 = 0,71 \cdot 3500 : 79 = 31,5$  ед. Принимаем  $n_8 = 6$  ваг.;  $n_4 = 31$  ваг.

Проверка:  $Q = n_8 q_8 + n_4 \beta_4 = 6 \cdot 185,5 + 31 \cdot 79,0 = 3562$  т.

Так как расчеты массы состава производятся с округлением до 50 т, то необходимо, чтобы полученная после округления числа вагонов масса состава  $Q'$  не отличалась от расчетной более чем на 50 т. Для соблюдения этого условия в данном случае следует принять  $n_8 = 6$  ваг. и  $n_4 = 30$  ваг. Тогда  $Q' = 6 \cdot 185,5 + 30 \cdot 79,0 = 3483$  т.

При известном числе вагонов масса полезного груза в составе (нетто, т)

$$Q_n = n_4 \alpha_4 q_{ГР(4)} + n_8 \alpha_8 q_{ГР(8)}. \quad (5.43)$$

Подставляем данные из примера, рассмотренного выше:  $\eta_4 = 30$  ваг.;  $\eta_8 = 6$  ваг.;  $\alpha_4 = 0,95$ ;  $\alpha_8 = 1,0$ ;  $q_{ГР(4)} = 60$  т;  $q_{ГР(8)} = 125,5$  т.

По формуле (5.43)

$$Q_n = 30 \cdot 0,95 \cdot 61,0 + 6 \cdot 1,0 \cdot 125,5 = 2491,5 \text{ т.}$$

**Коэффициент использования массы состава  $\eta$**  определяется отношением массы состава нетто к массе состава брутто. Для рассматриваемого примера

$$\eta = Q_n / Q = 2491,5 / 3500 = 0,71.$$

При данном соотношении вагонов в составе и данных типах вагонов величина  $\eta$  будет одинаковой при любом значении  $Q$ .

Часто в практике тяговых расчетов масса состава нетто находится без предварительного определения числа вагонов. Для заданного соотношения вагонов в составе и их полногрузности коэффициент использования массы состава можно определить по формуле

$$\eta = \beta_4 \alpha_4 q_{гр(4)} / q_4 + \beta_8 \alpha_8 q_{гр(8)} / q_8. \quad (5.44)$$

Тогда 
$$Q_n = \eta Q. \quad (5.45)$$

При исходных данных, приведенных выше, по формуле (5.44) получим

$$\eta = (0,95 \cdot 61,0) / 79,0 + 0,29 (1,0 \cdot 125,5) / 185,5 = 0,71.$$

**Длина поезда** определяется по формуле

$$l_n = l_d + \sum n_i l_i + 10, \quad (5.46)$$

где  $l_d$  – длина локомотива, м;

$n_i$  – количество однотипных вагонов в составе;

$l_i$  – длина вагонов по осям автосцепки, м.

Длина локомотива и вагонов при определении длины поезда принимается по нормам [18, таблица 12].

Принимая для рассматриваемого примера  $l_n = 34$  м,  $l_4 = 15$  м (крытые вагоны) и  $l_8 = 20$  м, получим

$$l_n = 33 + 30 \cdot 15 + 6 \cdot 20 + 10 = 603 \text{ м.}$$

**Проверка на трогание поезда с места.** Наибольшая масса состава  $Q_{тр}$ , т, которая может быть тронута с места на остановочных пунктах, определяется по формуле

$$Q_{тр} = F_{к\ тр} / (w_{тр} + i_{тр})g - P,$$

где  $F_{к\ тр}$  – сила тяги локомотива при трогании состава с места, Н (принимается из ПТР: по таблице 17 – для электровозов, по таблице 24 – для тепловозов);

$w_{тр}$  – суммарное удельное сопротивление состава при трогании с места (основное и дополнительное), Н/кН;  $i_{тр}$  – величина приведенного уклона, на котором расположен остановочный пункт, %.

Если  $Q_{тр}$  больше массы состава  $Q$ , рассчитанной по формуле (5.42), то условие трогания с места будет обеспечено, и для дальнейших расчетов принимается полученное значение  $Q$ . Если  $Q_{тр} < Q$ , то для дальнейших расчетов принимается  $Q_{тр}$ .

Величина  $w_{тр}$  определяется по формулам, приведенным в [18].

**Задача 5.14.** Необходимо проверить возможность трогания с места электровозом ВЛ80<sup>к</sup> состава массой  $Q = 4350$  т на остановочном пункте, расположенном на подъеме 2 ‰. Число вагонов в составе  $n_4 = 35$ ;  $n_8 = 8$  (все вагоны на подшипниках скольжения).

*Решение.* Из ПТР находим, что  $F_{к\ тр} = 662000$  Н.

Определяем  $q_0 = Q / (4n_4 + 8n_8) = 4350 / (4 \cdot 35 + 8 \cdot 8) = 21$  т/ось;

$w_{тр} = 142 / (21 + 7) = 5,07$  Н/кН.

Тогда  $Q_{тр} = 662000 / (5,07 + 2) \cdot 10 - 184 = 9179$  т (с округлением 9200 т).

Так как  $Q_{тр} > Q = 4350$  т, то для дальнейших расчетов принимаем  $Q = 4350$  т.

Проверку на трогание с места необходимо производить только для массы составов, соответствующей руководящим уклонам менее 4–5 ‰, или если остановочный пункт расположен на подъеме более 1–2 ‰ [3].

**Расчет массы состава с учетом использования кинетической энергии поезда.** Если на участке пути, по которому движется поезд, невозможно однозначно выбрать расчетный подъем, то массу состава определяют методом подбора (рисунок 5.8). Для этого за расчетный принимают подъем, меньший по крутизне, чем самый крутой на участке, и по формуле (5.41) определяют массу состава. Затем проверяют, может ли принятый локомотив, перемещая состав рассчитанной массы, преодолеть элементы профиля большей крутизны, чем расчетный подъем. Расчетным или руководящим подъемом называется наибольший уклон неограниченного протяжения, на котором при движении на подъем поезда расчетной массы с принятым на данной линии типом локомотива скорость поезда устанавливается равной расчетной для данного типа локомотива.

Проверка заключается в расчете скорости движения для всех подъемов с крутизной, превышающей крутизну подъема, для которого рассчитана масса состава. Масса состава будет определена правильно, если при преодолении этих подъемов скорость в конце каждого из них будет равна расчетной скорости для данной серии локомотива [5].

Для полученного значения массы состава  $Q$  вычисляют удельные равнодействующие силы  $f_k - w_0$  и определяют скорость движения поезда (графически или аналитически). Если в конце принятого расчетного подъема скорость  $v_k$  окажется выше расчетной  $v_p$ , то массу состава следует увеличить и снова определить  $v_k$ . Если, наоборот, скорость в конце подъема упадет ниже расчетной, то массу состава надо уменьшить. Расчет повторяется до получения удовлетворительного результата.

Во всех случаях достаточно произвести не более трех попыток. Определив при каждой из них  $v_k$ , можно построить график зависимости конечной скорости от массы состава  $v_k = f(Q)$  и по нему определить искомое значение  $Q$ . При первой попытке необходимо определить скорость для всего перегона

и если окажется, что минимальная скорость будет не в конце принятого подъема, а на другом элементе профиля, то применительно к нему и надо производить последующие расчеты по подбору  $Q$ .

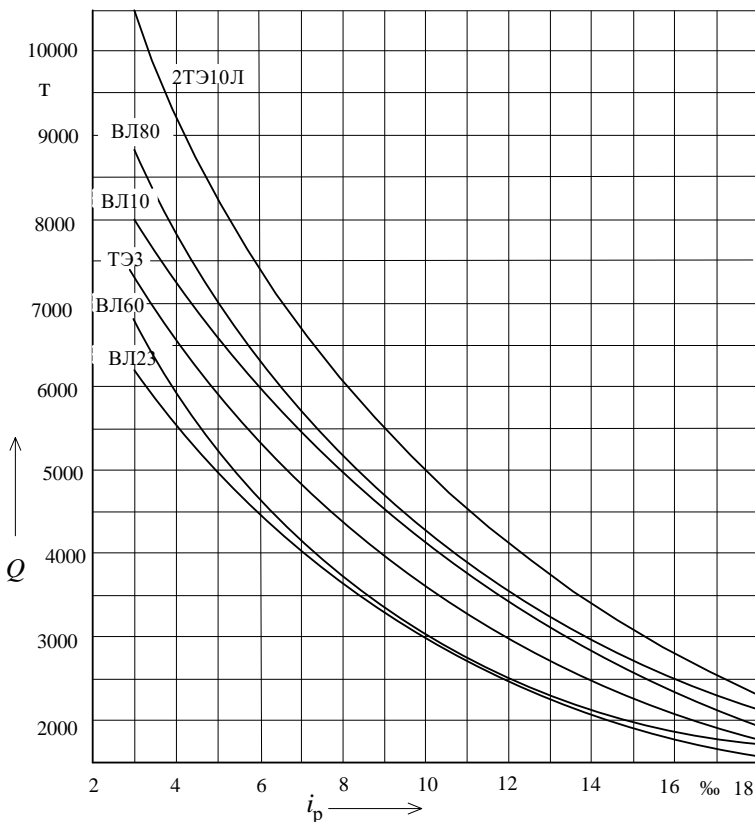


Рисунок 5.8 – Зависимость массы состава от руководящего уклона

Определение массы состава с учетом использования кинетической энергии производится на каждом перегоне отдельно. Полученные перегонные значения  $Q$  позволяют затем установить унифицированную норму массы состава для всего тягового участка или направления [2].

### 5.9 Диаграмма равнодействующих сил

**Подсчеты равнодействующих сил при разных режимах движения.** В режиме тяги на поезд действуют сила тяги и силы сопротивления. Удельная равнодействующая этих сил  $r = f_k - w_o$ , Н/кН. На поезд действуют толь-

ко силы сопротивления  $w_{\text{ок}}$ , Н/кН, при движении без тяги. При торможении на поезд действуют силы сопротивления движению и тормозная сила  $b_{\text{т}}$  – при экстренном торможении или  $ab_{\text{т}}$  – при служебном торможении. Значение коэффициента  $a$  принимается равным 0,5 при остановках грузовых поездов на отдельных пунктах. Удельная равнодействующая этих сил  $r = w_{\text{ок}} + b_{\text{т}}$  или  $r = w_{\text{ок}} + ab_{\text{т}}$ .

Зависимость  $f_{\text{к}} - w_{\text{о}} = f(v)$  называют диаграммой ускоряющих сил, а зависимости  $w_{\text{ок}} = f(v)$  и  $w_{\text{ок}} + b_{\text{т}} = f(v)$  или  $w_{\text{ок}} + ab_{\text{т}} = f(v)$  – диаграммой замедляющих сил. Эти диаграммы рассчитываются и строятся для случая движения по горизонтальной площадке, а дополнительные сопротивления от приведенного уклона учитываются путем изменения начала координат на диаграммах равнодействующих сил. Таким образом, подлежат установлению зависимости:  $f_{\text{к}} - w_{\text{о}} = f(v)$  – для случая движения под тягой,  $w_{\text{ок}} = f(v)$  – для случая движения без тяги,  $w_{\text{ок}} + b_{\text{т}} = f(v)$  и  $w_{\text{ок}} + ab_{\text{т}} = f(v)$  – для случая движения с экстренным и служебным торможением.

Все подсчеты удельных равнодействующих сил для разных режимов движения сводят в одну общую таблицу (см. таблицу 5.3). Таблицу заполняют следующим образом.

В *графу 1* заносят значения скорости от 0 до конструкционной с интервалом 10 км/ч, а также расчетную скорость  $v_{\text{р}}$  и скорости, соответствующие перепадам кривой  $F_{\text{к}} = f(v)$ . В рассматриваемом примере введена скорость 57,5 км/ч, т. е. скорость перехода от ограничения силы тяги электровоза ВЛ10 по сцеплению на автоматическую характеристику.

*Графа 2* содержит значения  $F_{\text{к}}$  при соответствующих скоростях, взятые по расчетной кривой силы тяги локомотива (см. рисунок 5.5); *графа 3* – значения основного удельного сопротивления локомотива в режиме тяги, полученные по формуле (5.17); *графа 4* – значения полного основного сопротивления локомотива в режиме тяги (произведение значений графы 3 на  $P$ ).

В *графе 5* приведены значения основного удельного средневзвешенного сопротивления состава (в рассматриваемом примере использована формула, полученная в подразд. 5.4); в *графе 6* – значения основного полного сопротивления состава (произведение значений графы 5 на  $Q$ ); *графе 7* – значения основного полного сопротивления поезда (сумма значений граф 4 и 6); *графе 8* – значения полных равнодействующих сил, подсчитанные как разность значений граф 2 и 7); *графе 9* – значения удельных равнодействующих сил при движении на площадке под тягой, полученные путем деления значений графы 8 на массу поезда.

*Графа 10* содержит значения основного удельного сопротивления локомотива при движении без тяги, полученные по формуле (5.18); *графа 11* – значения основного полного сопротивления локомотива при движении без тяги (произведение значений графы 10 на  $P$ ); *графа 12* – значения основного полного сопротивления поезда при движении без тяги (сумма значений граф 5 и 11); *графа 13* – значения удельных равнодействующих сил при

движении по площадке без тяги, полученные путем деления графы 12 на массу поезда; *графа 14* – значения расчетного коэффициента трения колодки о бандаж ( $\phi_{кр}$ ), подсчитанные по формулам, приведенным в подразд. 5.7; *графа 15* – значения удельной тормозной силы поезда, полученные по формуле (5.45).

*Графы 16 и 17* содержат значения удельных равнодействующих сил при экстренном и служебном торможениях. Они включают соответственно сумму значений *граф 13 и 15* и *граф 13 и 0,5 значений графы 15*, т. к.  $\lambda_T = 0,5$  – при служебном торможении,  $\alpha = 1$  – при экстренном торможении.

По данным *графы 9* строят график  $f_k - w_o = f(v)$  (рисунок 5.9).

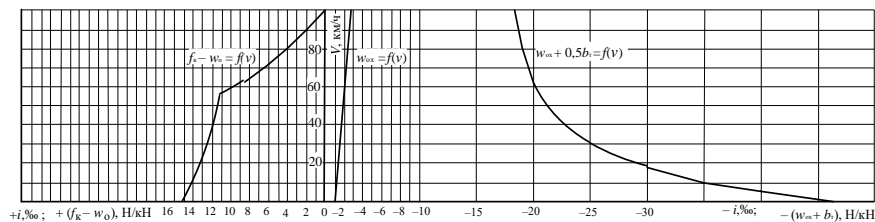


Рисунок 5.9 – Диаграмма равнодействующих сил (электровоз ВЛ10;  $i_p = 11 \text{ ‰}$ ;  $P = 184 \text{ т}$ ;  $Q = 3500 \text{ т}$ )

До построения графика  $f_k - w_o = f(v)$  необходимо проверить вычисления  $f_k - w_o$ . Контроль правильности подсчетов производится для скорости  $v_p$ . Равнодействующая сил при  $v_p$  должна быть численно равна величине руководящего подъема, так как именно при этой скорости определяется масса состава из условия  $f_k - w = f_k - (w_o + i_p) = 0$ . Очертание диаграммы  $f_k - w_o = f(v)$  определяется главным образом характером расчетной кривой силы тяги (для сравнения см. рисунок 5.4).

График  $w_{ox} = f(v)$  строят по данным *графы 13* (см. рисунок 5.9). На графике силы  $w_{ox}$  откладывают со знаком минус, так как они вызывают отрицательное ускорение (замедление). По данным *графы 17* строят график  $w_{ox} + 0,5b_t = f(v)$  (рисунок 5.9). Соблюдение масштабов обязательно.

**Анализ условий движения поезда по диаграмме равнодействующих сил.** Рассмотрим случай движения поезда под тягой на прямом и горизонтальном участке пути, т. е. поезд движется по площадке с начальной скоростью 46,7 км/ч (свойство 1). Ускоряющее усилие при этом составляет 11,5 Н/кН (см. рисунок 5.9). По мере роста скорости уменьшается сила тяги локомотива, увеличивается основное сопротивление движению, а следовательно, уменьшается ускоряющее усилие. Так, при скорости 40 км/ч ускоряющее усилие составит только 12 Н/кН, а при скорости 90 км/ч – 2 Н/кН. При этом скорость движения поезда всегда будет стремиться к равномерной (установившейся) при любом значении скорости.

Диаграмма ускоряющих усилий построена для частного случая – движения поезда по площадке. Для подъема или спуска любой величины равно-

действующие силы на диаграмме  $f_k - w_o = f(v)$  при любой скорости должны быть соответственно уменьшены на подъеме или увеличены на спуске на число тысячных подъема или спуска (свойство 2)

Для определения равномерной скорости на подъеме достаточно перенести начало координат графика влево, а при спуске – вправо на число тысячных уклона, равное по величине дополнительному сопротивлению от уклона в ньютонах на килоньютоны. Тогда пересечение перенесенной оси ординат с кривой  $f_k - w_o = f(v)$  и определит значение скорости, при которой будет иметь место равномерное движение на данном уклоне, т. е. значение равномерной скорости. Применительно к рисунку 5.9 на подъеме 4 ‰ равномерная скорость равна 80 км/ч, а на спуске 1 ‰ – 94 км/ч.

Диаграмма замедляющих усилий при движении без тяги  $w_{ок} = f(v)$  обладает теми же свойствами, что и диаграмма  $f_k - w_o = f(v)$ . Из графика на рисунке 5.9 видно, что на спуске 2 ‰ поезд при движении без тяги (за счет слагающей силы тяжести) будет двигаться равномерно с постоянной скоростью 60 км/ч, а на спуске 3 ‰ может достигнуть конструкционной скорости 100 км/ч.

По диаграммам ускоряющих и замедляющих усилий можно установить также, когда равнодействующая удельных сил, действующих на поезд, является положительной величиной и, следовательно, движение будет ускоренным, а когда эта равнодействующая является отрицательной величиной, т. е. движение будет замедленным. Для этого требуется установить, на каком уклоне движется поезд, при каком режиме (под тягой, без тяги или при торможении) и какова начальная скорость движения поезда (свойство 3). После этого на диаграмме равнодействующих сил надо сместить ось ординат соответственно уклону, на котором движется поезд, с учетом его знака.

Влево от смещенной оси отсчитываются положительные значения равнодействующих сил, вправо – отрицательные. Если точка, соответствующая начальной скорости, на диаграмме рассматриваемого режима находится левее смещенной оси ординат, то равнодействующая сила положительна, и скорость будет возрастать, стремясь к равномерной. Если же точка, соответствующая начальной скорости, на диаграмме рассматриваемого режима расположена правее смещенной оси ординат, то равнодействующая сила отрицательна, и скорость будет уменьшаться, стремясь к равномерной скорости для данного уклона.

Если, например, поезд при движении под тягой вступил на подъем 5 ‰ с начальной скоростью 40 км/ч (рисунок 5.9), то равнодействующая сила в этот момент будет равна 7 Н/кН и скорость под действием этой силы будет возрастать, стремясь к равномерной скорости, равной 75 км/ч. При достаточном протяжении этого подъема поезд достигает равномерной скорости, поскольку при этом равнодействующая будет равна нулю ( $f_k - w = 0$ ), и будет продолжать двигаться с постоянной скоростью 75 км/ч.



Если при том же режиме движения на тот же подъем (+5 %) поезд вступил с начальной скоростью 100 км/ч, то равнодействующая сила будет уже равна минус 5 Н/кН и скорость под действием этой отрицательной силы будет падать, стремясь опять-таки к равномерной скорости 75 км/ч.

Если поезд движется без тяги по спуску 2 ‰, а начальная скорость его 90 км/ч, то равнодействующая сила будет равна минус 0,5 Н/кН и скорость поезда будет падать, стремясь достигнуть равномерной – 60 км/ч.

## 5.10 Графические способы определения скорости и времени хода поезда

**Графический способ построения кривой скорости.** На рисунке 5.10 рассмотрен пример графического построения кривой  $v = f(s)$  с помощью треугольника и линейки. Исходные данные: диаграмма  $f_k - w_o = f(v)$  для электровоза с  $v_p = 36,8$  км/ч при  $i_p = 10$  ‰ и профиль участка.

Слева от сетки профиля помещается диаграмма равнодействующих сил с таким расчетом, чтобы оси сил ( $f_k - w_o$ ) и пути  $s$  находились на одной прямой (в дальнейшем по мере построения кривой  $v = f(s)$  диаграмму равнодействующих сил можно перемещать по чертежу вправо).

Построение кривой скорости начинается от оси ст. А. В начальный момент движения скорость будет возрастать. Рассмотрим первый интервал изменения скорости от 0 до 10 км/ч (рисунок 5.10). Первый элемент профиля (начало движения) – площадка, поэтому величина равнодействующей силы отсчитывается от 0 и берется при средней скорости 5 км/ч (на кривой  $f_k - w_o$  точка «а»). Через точку «а» и 0 – начало координат – проводим луч, а перпендикуляр к нему на участке дает отрезок кривой скорости в пределах ее изменения от 0 до 10 км/ч (при построениях по направлению луча устанавливается линейка, а перпендикуляр восстанавливается по угольнику).

В пределах от 10 до 20 км/ч принимается второй интервал изменения скорости. Величина равнодействующей силы берется при средней скорости 15 км/ч (точка «б» на кривой  $f_k - w_o$ ), а перпендикуляр к лучу «б» – 0 дает отрезок кривой скорости на участке 2–3 (рисунок 5.10).

В пределах от 20 до 30 км/ч принимается третий интервал изменения скорости. Величина равнодействующей силы берется при средней скорости 25 км/ч (точка «в» на кривой  $f_k - w_o$ ), а перпендикуляр к лучу «в» – 0 дает отрезок скорости на участке 3–4. При построении кривой  $v = f(s)$  на последующих участках нужно назначать интервалы скорости в соответствии с точками, где резко изменяется характер кривой  $f_k - w_o = f(v)$ , например, при  $v = 35,8$  км/ч; для построения кривой скорости в интервале от 30 до 35,8 км/ч назначена дополнительная точка «г» при  $v_{cp} = 33,4$  км/ч.

Последующий интервал скоростей расположен от 36,8 до 40 км/ч (точка «д» при средней скорости 38,4 км/ч). Соединив точки, получим кривую  $v = f(s)$  на участке пути при изменении скорости от 0 до 40 км/ч (рисунок 5.10).

Таким же образом можно производить дальнейшее построение кривой скорости, однако при этом нужно учитывать характер изменения продольного профиля.

Рассмотрим особенности построения кривой на участке 6–7. Здесь следует прежде всего обратить внимание на то, что заканчивается площадка. Если принять интервал скорости от 40 до 50 км/ч, то отрезок кривой на участке 6–7 ляжет частично на следующий элемент профиля. При этом не будет учтено дополнительное сопротивление от подъема  $i = +10\%$ . Следовательно, выбирать интервал скорости нужно таким, чтобы значение конечной скорости попадало на конец элемента (в нашем примере – площадки). Этого можно достичь только подбором. В данном случае при средней скорости  $v = 43$  км/ч (точка «е») на кривой  $f_k - w_0$  в точке 7 будет пересечение перпендикуляра с вертикальной линией – концом элемента при конечной скорости 45 км/ч.

С изменением крутизны элементов продольного профиля начало координат переносится в точку, соответствующую уклону продольного профиля.

Прежде чем приступить к построению кривой скорости для следующего элемента, необходимо установить, будет ли скорость повышаться или понижаться. Как известно, скорость движения поезда всегда стремится к установившейся (равномерной). В рассматриваемом примере подходная скорость в начале второго элемента  $v = 45$  км/ч, а установившаяся скорость на подъеме  $10\%$  равна  $36,8$  км/ч, следовательно, скорость начнет понижаться, и интервал нужно брать в обратном порядке, т. е. от  $45$  до  $40$  км/ч (при  $v_{ср} = 43$  км/ч – в точке «е») (см. рисунок 5.10).

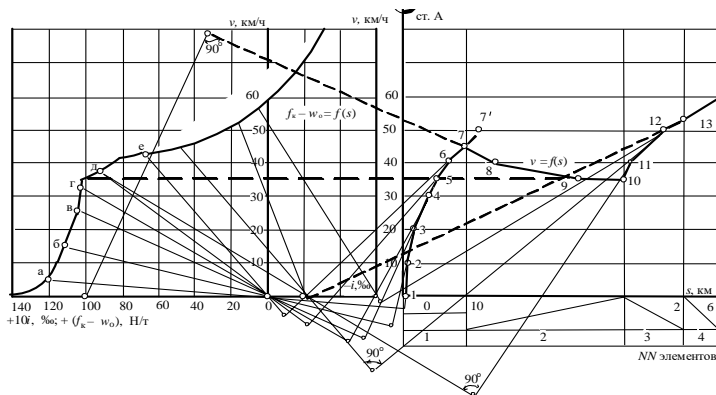


Рисунок 5.10 – Построение кривой  $v = f(s)$  графическим способом

Для последующих построений начало координат необходимо переместить в точку  $+10\%$  (учет дополнительного сопротивления от подъема), провести луч через точку «е» и  $+10$ , а перпендикуляр к этому лучу будет отрезком кривой скорости на участке 7–8.

При выборе следующего интервала нужно не пропустить равномерную скорость на элементе 2, которая составляет 36,8 км/ч. Интервал скорости должен быть взят от 40 до 36,8 км/ч при  $v_{cp} = 38,4$  км/ч, а в соответствии с интервалом отрезок 8–9 будет участком кривой  $v = f(s)$ . В точке 9 скорость достигает установившейся, и поезд будет следовать с этой скоростью до конца подъема 10 ‰.

Построение кривой  $v = f(s)$  от точки 10 ведется аналогичным образом. Начало координат следует перемещать в точку, соответствующую приведенному уклону продольного профиля (на 3-м элементе  $i = -2$  ‰, на 4-м  $i = -10$  ‰).

Кривая  $v = f(s)$  может быть построена для различных случаев движения: под тягой, без тяги и с торможением. При этом необходимо пользоваться соответствующей диаграммой равнодействующих сил, а принцип построения кривых скорости на участках движения при холостом ходе и с торможением остается таким же, как и для кривой  $v = f(s)$  при движении с тягой.

Рассмотрим особенности построения кривой скорости на подходах к раздельному пункту (рисунок 5.11). На станцию поезд может быть принят с остановкой на одном из боковых путей. В соответствии с Правилами технической эксплуатации (ПТЭ) скорость при движении по стрелочным переводам на боковые пути устанавливается начальником дороги в зависимости от типа стрелочных переводов. В примере принята скорость 50 км/ч.

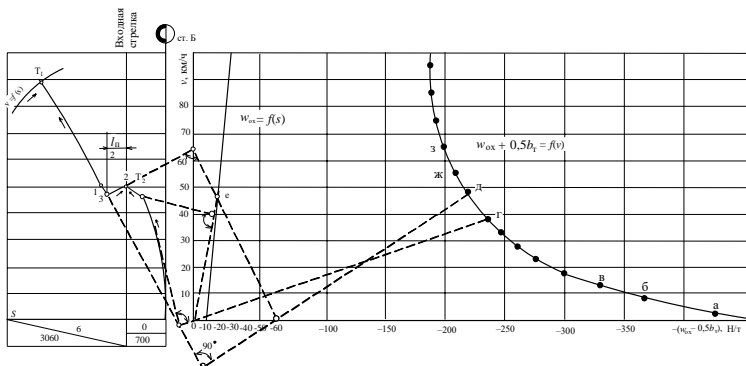


Рисунок 5.11 – Построение кривой  $v = f(s)$  с остановкой на раздельном пункте

На станции поезд нужно остановить так, чтобы середина его совпала с осью станции, а скорость при этом равнялась нулю. Разберем построение кривой  $v = f(s)$  с остановкой на ст. Б (см. рисунок 5.11). Поезд принимается на боковой путь. Положение входной стрелки отмечено на чертеже. Напомним, что кривую скорости строят по точке, расположенной в середине поезда. Отсюда нетрудно уяснить значение точки 1. В то время, когда середина поезда будет находиться в точке 1, локомотив приблизится к входной стрелке, при этом его скорость не будет превышать 50 км/ч.

Снижение скорости на подходах к станции и остановка поезда производятся путем применения служебного торможения и езды на холостом ходу. Построение кривой  $v = f(s)$  на этом участке выполняется с помощью кривых равнодействующих сил  $w_{\text{ox}} + 0,5b_{\text{т}}$  и  $w_{\text{ox}} = f(v)$ . Кривая  $v = f(s)$  на участке торможения строится в обратном порядке, т. е. построение начинается от скорости  $v = 0$  в точке, совпадающей с осью ст. Б, в сторону увеличения скорости до встречи с кривой  $v = f(s)$ , построенной для перегона. Сначала строится участок кривой скорости при торможении от  $v = 50$  км/ч. Для этого последовательно проводятся лучи из точек «а», «б», «в» и последующих, расположенных на кривой  $w_{\text{ox}} + 0,5b_{\text{т}} = f(v)$ , через начало координат 0 (торможение происходит на площадке), а перпендикуляры к этим лучам дадут участки кривой  $v = f(s)$  (на рисунке 5.11 показан один луч «г» – 0 и перпендикуляр к нему).

На участке изменения  $v$  от 40 до 50 км/ч кривую скорости предварительно нанесем пунктиром.

Затем назначаем точку 2 со скоростью 50 км/ч на ординате, соответствующей положению входной стрелки. От точки 2 до включения тормозов в целях остановки поезда (точка Т2) для построения кривой скорости целесообразно применить режим холостого хода локомотива. В этом режиме скорость поезда несколько снизится (равнодействующая силы при движении на площадке отрицательная). Подбором находим на диаграмме  $w_{\text{ox}} = f(v)$  точку «е», соответствующую средней скорости на этом участке, например 49 км/ч, и проводим через нее и начало координат 0 луч. Перпендикуляр к нему в пределах от точки 2 до точки Т2 и есть отрезок кривой скорости при движении на холостом ходу (на рисунке 5.11 положение луча и перпендикуляра к нему показано пунктиром).

Возвратимся к точке 1. Теперь нужно найти на кривой  $v = f(s)$ , построенной для перегона, точку Т<sub>1</sub>, в которой следует включить тормоза, чтобы на участке до точки 1 скорость поезда снизилась до 50 км/ч.

Кривую  $v = f(s)$  на этом участке будем строить от точки 1 к точке Т. Для этого последовательно проводим пучки из точек «ж», «з» и последующих, расположенных на кривой  $w_{\text{ox}} + 0,5b_{\text{т}} = f(v)$ , через начало координат, соответствующее спуску 6 ‰, а перпендикуляры к этим лучам в соответствующих интервалах скоростей дадут участки кривой  $v = f(s)$  при торможении.

При построении кривой скорости на участке 1–2 надо учесть следующее. Если в точке 1 будут отпущены тормоза и поезд далее проследует в режиме холостого хода, то скорость его на спуске 6 ‰ увеличится, т. е. превысит уровень принятого ограничения в 50 км/ч. Чтобы не допустить этого, надо торможением понизить скорость до такого уровня (точка 3), чтобы затем в режиме холостого хода скорость возросла только до 50 км/ч в точке 2. Необходимая скорость в точке 3 устанавливается подбором. Положение луча, проведенного через начало координат (–6) и точку «е» (средняя скорость на участке 1–3), и перпендикуляра к нему для построения кривой  $v = f(s)$  на участке 3–2 на рисунке 5.11 показано пунктиром.

**Построение кривой скорости способом подвижной диаграммы.** Для построения кривой  $v = f(v)$  способом подвижной диаграммы нужно в принятых масштабах вычертить на кальке диаграмму равнодействующих сил  $f_k - w_o = f(v)$ . На этой диаграмме в произвольном месте строится угол  $aNB$  так, чтобы  $\text{tg}(\mu/2) = 1/12$ , а биссектриса угла была параллельна оси  $f_k - w_o$ . Диаграмму на кальке накладывают на подготовленный чертеж – сетку для графических построений.

Тангенс угла  $\mu/2 = 1/12 = 0,083333$ . Отложив вертикальный тангенс, равный 1, и горизонтальный тангенс, равный 12, получаем угол  $\mu/2$ , равный  $4^\circ 45'$ , а весь угол  $\mu = 9^\circ 30'$  [8].

**Построение кривой времени графическим способом.** Для построения кривой времени графически (способом Лебедева) необходимо предвари-

тельно построить кривую скорости  $v = f(s)$ . Построение кривой  $t = f(s)$  состоит в следующем [4]. Пусть отрезок  $AB$  на рисунке 5.12 представляет собой участок кривой скорости  $v = f(s)$ , построенный способом МПС. Скорости по концам отрезка соответственно равны  $v_1$  и  $v_2$ . С левой стороны от начала координат на расстоянии  $\Delta = 30$  мм (получено из соотношения масштабов построения) проводится вертикальная прямая.

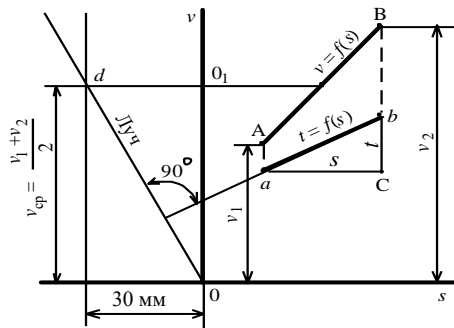


Рисунок 5.12 – Построение кривой времени хода поезда

Из точки  $O$  проводится луч к этой вертикали через точку  $d$ , соответствующую среднему значению скорости на данном участке кривой  $v = f(s)$ . Затем восстанавливается перпендикуляр к лучу  $Od$  в пределах рассматриваемого интервала скорости. Полученный отрезок  $ab$  является отрезком кривой  $t = f(s)$ , показывающим приращение времени  $\Delta t$  на участке  $\Delta s$  при движении со скоростью  $v_{cp} = (v_1 + v_2) / 2$  (см. рисунок 5.12).

Масштаб времени при указанном построении связан с масштабом пути, скорости и величиной отрезка  $\Delta$ . Если масштаб пути  $1$  км –  $y$  мм, масштаб скорости  $1$  км/ч –  $m$  мм, то масштаб времени  $1$  час –  $x$  мм =  $y\Delta/m$ ;  $1$  мин –  $x$  мм =  $y\Delta/(60m)$ . При построении кривой  $v = f(s)$  наиболее распространенными масштабами пути и скорости являются  $y = 20$  мм и  $m = 1$  мин. Тогда  $1$  мин –  $x$  мм =  $20\Delta / (60 \cdot 1) = \Delta / 3$ . Таким образом, при выбранных ранее масштабах пути и скорости масштаб времени зависит только от величины произвольного отрезка  $\Delta$ . Величина его обычно принимается равной  $30$  мм, и масштаб времени получает удобное для отсчетов значение  $1$  мин –  $x$  мм =  $10$  мм.

Построение кривой  $t = f(s)$  производится на том же чертеже, где построена кривая  $v = f(s)$  и по тем же интервалам скоростей. Поэтому каждому пе-

релому кривой скорости  $v = f(s)$  будет соответствовать перелом кривой  $t = f(s)$ . Вспомогательные линии при построении кривой времени хода на чертеж не наносятся. Кривая  $t = f(s)$  монотонно возрастает, в то время как кривая  $v = f(s)$  может возрастать и убывать в зависимости от уклона профиля.

В целях сокращения размеров чертежа по вертикали и удобства отсчета времени кривая  $t = f(s)$  обычно обрывается, когда ордината времени достигает 10 мин, и построение ее продолжается вновь от 0 до 10 мин. Время хода, прошедшее от момента трогания поезда до любого другого момента, определяется в выбранном масштабе ординатой кривой  $t = f(s)$  в интересующей нас точке. Общее время хода определяется как сумма ординат отдельных участков кривой (см. рисунок 5.1).

**Определение времени хода способом Дегтярева.** Способ, предложенный Дегтяревым для определения времени хода поезда по построенной кривой  $v = f(s)$ , основан на пропорциональности основания равнобедренного треугольника его высоте. Равнодействующая сила принимается постоянной в пределах заданного промежутка времени  $\Delta t$  [5].

В соответствии с принятыми при построении кривой  $v = f(s)$  масштабами пути и скорости строится равнобедренный треугольник, в основании которого откладывается отрезок, равный пути в 1 км. Высота треугольника равна отрезку, соответствующему скорости 60 км/ч. Любой другой треугольник, подобный указанному исходному, характеризуется тем, что путь, равный его основанию, будет пройден за одну минуту, если средняя скорость на данном отрезке пути равна высоте треугольника.

На кривую скорости наносятся один за другим треугольники, подобные исходному, так, чтобы вершины их располагались на кривой скорости, а основания совпадали с осью  $s$ . Тогда число оснований треугольников покажет время хода в минутах на участке. Такие построения выполнены на рисунке 5.1 для направления от разъезда 1 до ст. А. Здесь исходный минутный треугольник имеет основание 2 см, а высоту – 6 см, что при принятых масштабах для построения кривой  $v = f(s)$  соответствует пути в 1 км и скорости 60 км/ч.

### **5.11 Определение механической работы локомотива, работы сил сопротивления, расхода топлива и электроэнергии**

**Механическая работа силы тяги локомотива.** Механическая работа локомотива представляет собой работу силы тяги локомотива на всех участках пути, где локомотив движется под тягой или с частичным использованием тяги. Для определения механической работы силы тяги локомотива строится зависимость силы тяги в функции пути и определяется площадь,

заклученная между этой кривой и осью пути. Эта площадь будет представлять собой механическую работу силы тяги локомотива. Кривая  $F_k = f(s)$  строится на том же чертеже, что и кривая  $v = f(s)$ .

Кривая  $F_k = f(s)$  строится по тяговой характеристике силы тяги, соответствующей скорости в данной точке, и нанесению по ординате этого значения  $F_k$  в выбранном масштабе. На рисунке 5.1 для рассматриваемого примера построена кривая  $F_k = f(s)$  в одном направлении применительно к кривой  $v = f(s)$ , построенной без учета ограничения скорости по тормозам.

Ограниченная кривой  $F_k = f(s)$  и осью абсцисс площадь (см. рисунок 5.1) заштрихована, определяется либо при помощи прозрачной миллиметровки, либо другим методом. Если масштаб пути 1 км –  $y$  мм, а масштаб силы тяги 1000 Н –  $n$  мм, то масштаб механической работы 1 кН·км –  $yn$  мм<sup>2</sup>. Если площадь подсчитана в квадратных сантиметрах, то цена деления 1 см<sup>2</sup>

$$r = (100 \text{ мм}^2 \cdot 1 \text{ кН} \cdot \text{км}) / (yn \text{ мм}^2) = 100 / (yn) \text{ кН} \cdot \text{км}.$$

Тогда механическая работа на данном участке пути и в данном направлении

$$R_M = r\Omega, \quad (5.47)$$

где  $\Omega$  – площадь, ограниченная кривой  $F_k = f(s)$  и осью абсцисс, см<sup>2</sup>.

В рассматриваемом примере (см. рисунок 5.1)  $\Omega = 29,90 \text{ см}^2$ ;  $r = 4 \text{ кН} \cdot \text{км}$ . Следовательно,  $R_M = 119,6 \text{ кН} \cdot \text{км}$ .

**Работа сил сопротивления.** Механическая работа сил сопротивлений  $R_c$  складывается из работы сил естественного сопротивления  $R_w$  и работы тормозных сил  $R_b$ , т. е.

$$R_c = R_w + R_b. \quad (5.48)$$

Приращение кинетической энергии движущей системы равно работе всех действующих на данную систему сил. Применительно к движению поезда этот закон механики выражается следующим равенством:

$$4,1(P+Q)(v_2^2 - v_1^2) \cdot 10^{-6} = R_M - R_c - (P+Q)g(H_2 - H_1) \cdot 10^{-3}, \quad (5.49)$$

где  $4,1(P+Q)(v_2^2 - v_1^2) \cdot 10^{-6}$  – приращение кинетической энергии поезда при изменении скорости от начальной  $v_1$  до конечной  $v_2$ , кН·км;

$R_M$  – механическая работа локомотива, кН·км;

$R_c$  – работа сил сопротивлений, кН·км;

$(P+Q)(H_2 - H_1) \cdot 10^{-3}$  – работа силы тяжести поезда, кН·км, зависящая от разности отметок на рассматриваемом участке – начальной  $H_1$  и конечной  $H_2$ ; если  $H_2 < H_1$ , то работа силы тяжести суммируется с работой локомотива.

Если работа сил сопротивлений  $R_c$  определяется на участках, ограниченных отдельными пунктами ( $v_1 = v_2 = 0$ ), то

$$R_c = R_M - (P + Q)g(H_2 - H_1) \cdot 10^{-3}, \quad (5.50)$$

где  $(H_2 - H_1)$  – разность отметок конечного и начального пунктов, м, принимаемая с соответствующим знаком ( $\pm$ ).

Разность отметок  $(H_2 - H_1)$  подсчитывают по действительным уклонам.  $(H_2 - H_1) = -97,95$  м;  $R_M = 119,6$  кН·км. Тогда по формуле (5.50)

$$R_c = 119,6 - (258 + 3800) \cdot (-97,95) \cdot 10^{-3} = 517,1 \text{ кН} \cdot \text{км}.$$

Работа сил сопротивлений, как и механическая работа локомотива, подсчитывается поперегонно для каждого направления порознь с учетом разности отметок конечной и начальной точек.

**Кривая тока электровоза и определение расхода электроэнергии.** Расход электроэнергии на движение поезда по перегону (участку) определяется отдельно для каждого направления с использованием кривых тока  $I = f(s)$  и времени хода  $t = f(s)$ .

Кривая тока строится на основе кривой скорости (рисунок 5.13). Для построения кривой тока на кривой  $v = f(s)$  должны быть размечены режимы движения. На участках движения под тягой кривая тока строится с использованием токовых характеристик, приведенных в ПТР. При этом для электровоза переменного тока используется характеристика действующего значения активного тока [9].

Разделяя режимы тяги и рекуперативного торможения, полный расход электроэнергии электровозом, отнесенный к токоприемнику, определяется по формуле

$$A = A_d - A_p, \quad (5.51)$$

где  $A_d$  – расход электроэнергии на движение поезда при отсутствии рекуперации, Вт·ч;

$A_p$  – возврат электроэнергии в контактную сеть при рекуперативном торможении, Вт·ч.

Расход электроэнергии на движение поезда определяется выражением

$$A_d = \int_0^t U_{\text{кв}} I_3 dt, \quad (5.52)$$

где  $U_{\text{кв}}$  – напряжение в контактной сети, В;

$I_3$  – ток нагрузки электровоза, А.

В качестве  $I_3$  для электрической тяги на переменном токе принимают действующее значение активного тока, потребляемого на тягу,  $I_{da}$ . При рекуперативном торможении  $I_3$  принимают равным току рекуперации  $I_p$ , взятому со знаком минус.

Расчет расхода электроэнергии выполняют, используя построенные ранее кривые скорости  $v(s)$ , времени  $t(s)$  и тока нагрузки электровоза постоянного тока  $I_3(v)$  или  $I_{da}(v)$  для электровозов переменного тока, а также  $I_p(v)$  при рекуперативном торможении.



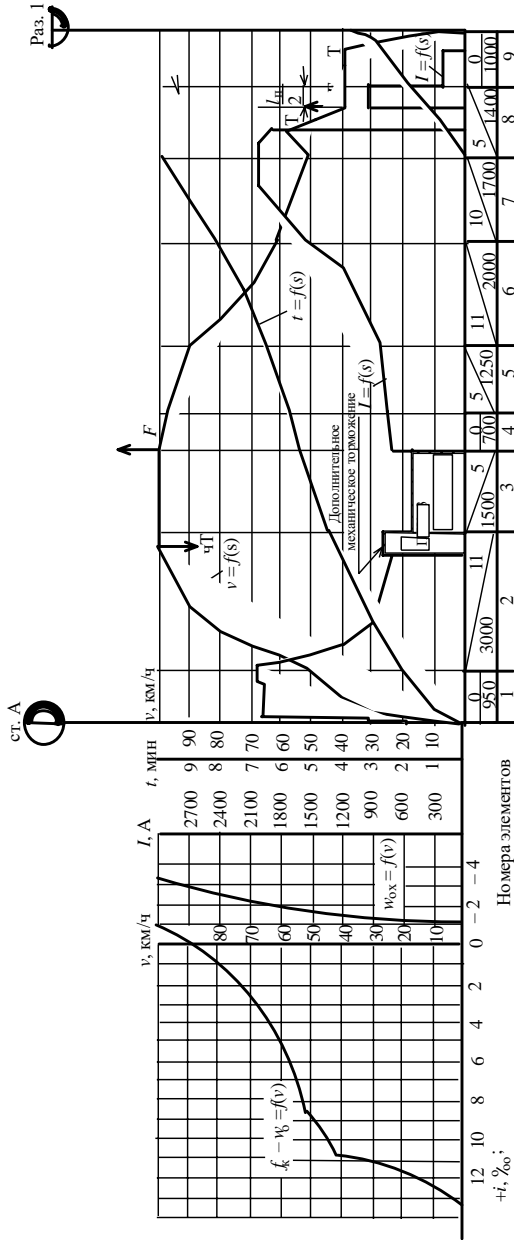


Рисунок 5.13 – Кривые скорости, времени хода и тока для примера подсчета электроэнергии

Разбивая весь участок на отдельные интервалы (см. рисунок 5.13), запишем в конечных приращениях расчетные выражения для определения расхода электроэнергии, кВт/ч [20].

Для электровозов постоянного тока

$$A_d = \frac{U_{\text{кв}} \sum I_{zi}^{\text{cp}} \Delta t_i}{60 \cdot 1000}, \quad (5.53)$$

где  $U_{\text{кв}}$  – напряжение в контактной сети постоянного тока, 3000 В;

$I_{zi}^{\text{cp}}$  – среднее на  $i$ -м интервале значение тока, А;

$\Delta t_i$  – время прохождения  $i$ -го интервала, мин.

Для электровозов переменного тока

$$A_p = \frac{U_{\text{кв}} \sum I_{dai}^{\text{cp}} \Delta t_i}{60 \cdot 1000}, \quad (5.54)$$

где  $U_{\text{кв}}$  – напряжение в контактной сети переменного тока,  $U_{\text{кв}} = 25000$  В;

$I_{dai}^{\text{cp}}$  – среднее на  $i$ -м интервале значение действующего активного тока, потребляемого на тягу поезда, А.

Количество электроэнергии, возвращаемой в контактную сеть при рекуперации,

$$A_n = \frac{U_p \sum I_{pi}^{\text{cp}} \Delta t_i}{60 \cdot 1000}, \quad (5.55)$$

где  $U_p = 3300$  В при постоянном токе и  $U_p = 25000$  В при переменном токе;

$I_{pi}^{\text{cp}}$  – среднее на  $i$ -м интервале значение тока рекуперации, А.

Расход электроэнергии на собственные нужды электровоза (вспомогательные машины, отопление, освещение) определяют по средним значениям электроэнергии, потребляемой вспомогательными машинами одного электровоза, приведенным в [18].

На основании построенных кривых тока и кривой времени произведен подсчет  $\sum I_{\text{cp}} \Delta t$  (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Подсчет ампер-минут

Номер элемента профиля	Значение тока, А			$\Delta t$ , мин	$I_{\text{cp}} \Delta t$ , А·мин
	$I_1$	$I_2$	$I_{\text{cp}}$		
	<i>Тяга</i>				
1	560	525	543	0,2	109
1	525	1020	525	0,1	53
1	1020	970	995	0,8	81
1	970	1950	1460	0,2	780

Окончание таблицы 5.5

Номер элемента профиля	Значение тока, А			$\Delta t$ , мин	$I_{cp}\Delta t$ , А·мин
	$I_1$	$I_2$	$I_{cp}$		
	<i>Тяга</i>				
1	1950	1900	1925	0,2	385
1	1900	2030	1965	0,2	385
1	2050	2030	1965	0,2	385
1 и 2	2030	2030	1965	0,2	385
2	2030	1520	1765	0,2	357
2	1520	1120	1270	0,4	532
2	1120	920	1075	0,3	321
2	920	790	855	0,5	428
2	790	690	740	0,4	296
Итого					4998
<i>Рекуперация</i>					
2	815	815	815	0,3	245
3	485	485	485	0,9	465
Итого					710
<i>Тяга</i>					
4	710	700	705	0,3	215
5	700	790	745	1,0	745
6	790	920	905	0,4	362
6	920	1120	1020	0,4	408
6	1120	1520	1320	0,8	1050
6 и 7	1520	2030	1775	1,3	2145
7 и 8	2030	2030	2030	1,3	2448
8	2030	1780	1905	0,3	525
Итого					7842
<i>Частичная тяга</i>					
8		965	965	0,4	386
9		230	230	1,1	253
Итого					639

Согласно таблице 5.5 для прохождения поезда между ст. А и раз. 1 затрачено  $4998 + 7842 - 639 = 12201$  А·мин и возвращено во время рекуперативного торможения 710 А·мин.

В рассматриваемом примере полный расход электроэнергии определяем по формуле (5.53):

$$A_d = \frac{3000 \cdot 12201}{60 \cdot 1000} = 610,05 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

По формуле (5.54) находим, что во время рекуперативного торможения в контактную сеть возвращено

$$A_p = \frac{3300 \cdot 710}{60 \cdot 1000} = 39,05 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Полный расход электроэнергии с учетом рекуперации

$$A = A_d - A_p = 610,05 - 39,05 = 571 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Удельный расход электроэнергии на движение поезда между ст. А и раз. 1 определяется согласно формуле

$$a = A \cdot 10^3 / Qs, \quad (5.56)$$

где  $Q$  – масса состава, т;

$s$  – длина участка, км

$$a = 571000 / (3500 \cdot 13,5) = 19,4 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{км}.$$

**Определение расхода топлива тепловозом.** Расход топлива тепловозом определяют по имеющимся кривым скорости и времени хода, построенным любым из рассмотренных выше способов. На кривой скорости в процессе ее построения выполняют разметку режимов работы локомотива, заключающуюся в обозначении участков движения поезда в режиме тяги, холостого хода (выбега), регулировочного или служебного торможения.

*Полный расход топлива за поездку*

$$E_t = \int_0^t G dt, \quad (5.57)$$

где  $G$  – мгновенное значение расхода топлива, соответствующее режиму работы локомотива, кг/мин;

$t$  – время движения локомотива в соответствующем режиме, мин.

Для расчета расхода топлива весь участок разбивают на отдельные отрезки, в пределах которых режим работы локомотива не меняется. *Общий расход топлива тепловозом за поездку*

$$E_t = \sum_{i=1}^n G_i \Delta t_i + g_x t_x + g_{ст} t_{ст}, \quad (5.58)$$

где  $G_i$  – расход топлива, соответствующий скорости движения поезда при используемой позиции контроллера машиниста на  $i$ -м отрезке пути, кг/мин;

$\Delta t_i$  – время движения поезда по  $i$ -му отрезку пути, мин;

$g_x$  – расход топлива тепловозом на холостом ходу, кг/мин;

$t_x$  – время работы дизеля на холостом ходу, мин;

$g_{ст}$  – расход топлива тепловозом на стоянках и при движении по станционным путям, кг/мин;

$t_{ст}$  – время работы дизеля на стоянках и при движении по станционным путям, мин.

Значения  $\Delta t_i$  и  $t_x$  определяют по кривой времени хода поезда с учетом разметки режимов. Значения  $G_i$  принимают по расходным характеристикам тепловозов, полученным экспериментально и приведенным в ПТР [7]. В качестве примера на рисунке 5.14 приведена расходная характеристика для тепловозов 2ТЭ10 различных модификаций.

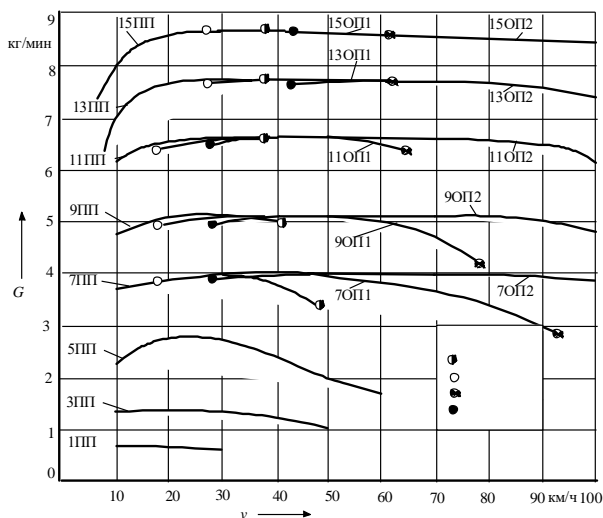


Рисунок 5.14 – Расход топлива тепловозами 2ТЭ10Л, 2ТЭ10В, 2ТЭ10М, 3ТЭ10М (одной секцией) при работе в режиме тяги

Удельный расход топлива  $e_T$ , кг/10<sup>4</sup> т·км,

$$e_T = \frac{E_T}{Q_s} \cdot 10^4, \quad (5.59)$$

где  $Q$  – масса состава, т;  
 $s$  – длина участка, км.

Для расчета условного топлива используется формула

$$e_y = e_T \Theta, \quad (5.60)$$

Для сравнения различных видов тяги и разных сортов топлива расчет удельного расхода дизельного топлива обычно приводится к расчету условного топлива, под которым понимают топливо с удельной теплотой сгорания 29,3 МДж/кг. Для пересчета расхода дизельного топлива в расход условного топлива вводится эквивалент  $\Theta = 42,7 / 29,3 = 1,45$ . С учетом этого эквивалента получаем выражение для расчета удельного расхода условного топлива  $e_y$ , кг/10<sup>4</sup> т·км.

# 6 ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И РЕКОНСТРУКЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

---

## 6.1 Принятие решений при одноэтапных и многоэтапных капитальных вложениях

**Последовательность принятия решений.** Принятие решений состоит в выборе одного из возможных вариантов проектируемой железной дороги. При решении поставленной задачи сразу же возникает ряд вопросов по выбору основных технических параметров дороги и средств ее технического оснащения. Основные технические параметры при их изменении в корне меняют трассу железной дороги. Например, руководящий уклон или расчетные размеры перевозок для размещения станций и разъездов. Средства технического оснащения: вид тяги, тип локомотива, полезную длину приемоотправочных путей, тип вагонного состава, средства управления, тип графика движения поезда – в процессе эксплуатации дороги можно изменять.

Сначала надо установить количество путей (однопутная или двухпутная будет строиться дорога), при какой тяге (тепловозной или электрической), какой руководящий уклон и полезная длина приемоотправочных путей. Сразу же возникает множество вариантов проекта железной дороги.

Железная дорога должна проектироваться так, чтобы были обеспечены заданные размеры перевозок, вовремя доставлялись грузы и пассажиры, обеспечивалась безопасность и бесперебойность движения поезда при наименьших затратах. Сразу же возникает вопрос, как это обеспечить при противоречивости отдельных элементов, например пропускной и провозной способности ( $\max$ ) и стоимости ( $\min$ ) [23].

Теория принятия решений рассматривает железную дорогу как сложную техническую систему, характеристиками которой являются **технические параметры**, которые определяют геометрические (руководящий уклон, полезная длина приемоотправочных путей), физические (масса состава поезда, скорость и время хода), структурные (число вагонов в составе, приемоотправочных и главных путей, схема расположения путей на станции и др.), функциональные (пропускная и провозная способность) и другие свойства железной дороги и ее элементов.

Параметры, являющиеся функциями нескольких параметров, называются *агрегатами*. Например, вагон характеризуется следующими параметрами: массой, грузоподъемностью, числом осей, массой тары и др. Параметры

могут иметь такие ограничения: непрерывно меняющийся параметр – масса состава (от 0 до ограничения силой тяги локомотива либо полезной длиной приемоотправочных путей); дискретно меняющийся параметр – полезная длина приемоотправочных путей  $l_{по}$ .

Независимые параметры железных дорог определяются проектировщиками.

Для описания железной дороги как системы составляется список основных технических параметров: число главных путей – 1, руководящий уклон – 10 ‰, полезная длина приемоотправочных путей – 850 м, расчетные размеры перевозок для размещения отдельных пунктов –  $N_p = 36$  пар поездов в сутки при локомотиве 2ТЭ10Л, ширина колеи – 1520 мм. Поскольку параметры могут принимать различные значения, то составляется несколько списков, в которых определяются варианты железной дороги.

Количество участков железной дороги [2] определяется параметрами цели (функциональные параметры) – пропускной и провозной способностью в грузовом и пассажирском движении, которые в свою очередь определяют объем и время перевозок. Эти параметры являются существенными, так как определяют параметры цели. Остальные параметры в данной задаче несущественны, так как не влияют на конечный результат.

**Главная задача разработки проекта железной дороги состоит в обосновании проектных решений по структуре элементов и их параметров,** чтобы обеспечить заданные размеры перевозок (параметры цели) при минимальных затратах. Если же инвестиции в строительство ограничены, то возможна следующая постановка задачи: разработать проект железной дороги с такой структурой элементов и их параметрами, чтобы обеспечить максимальные размеры перевозок (параметры цели) при заданных затратах.

Проблема принятия решений состоит в выборе одного из возможных вариантов.

Решение поставленных задач проектирования железной дороги осуществляется *на основе методов теории принятия решений*. Задача принятия решений возникает при наличии:

- 1) цели (например, выбрать наилучший вариант прохождения трассы железной дороги, подобрать тип и отверстие трубы для пропуска воды и т. д.);
- 2) вариантов решения;
- 3) ограничений, накладываемых на параметры системы (например, максимальное значение руководящего уклона, минимальная расчетная пропускная способность).

*Процедура принятия решений* состоит из следующих этапов [2]: содержательная постановка задачи, формализация задачи, выбор критерия, математическая постановка задачи, формирование множества возможных вариантов, выделение множества допустимых вариантов, выбор метода и решение задачи, принятие решения.

*Содержательная постановка задачи* – это естественное словесное ее описание.

*Формализация задачи.* Цель формализации состоит в переводе содержательной постановки с естественного языка понятий и терминов на язык математики – в символы и формулы.

*Выбор критерия.* Критерий – это показатель, с помощью которого производится оценка вариантов.

*Математическая постановка задачи.* Множество параметров, участвующих в задаче, можно разделить на три группы: параметры цели (размеры перевозок):  $x_1, x_2, \dots$ ; параметры системы (железной дороги):  $y_1, y_2, \dots$ ; критерий  $W$ .

Располагая параметрами и критерием, можно сформулировать математическую постановку задачи: найти такую совокупность удовлетворяющих ограничениям параметров  $y_1, y_2, \dots$  системы (железной дороги), при которой обеспечивались бы параметры цели  $x_1, x_2, \dots$  (размеры перевозок) при минимальном (максимальном) критерии (денежных затратах)  $W$ .

*Формирование множества возможных вариантов.* Любая проектная задача имеет множество решений (вариантов).

*Выделение множества допустимых вариантов.* Варианты, входящие в множество возможных, но не удовлетворяющие ограничениям, накладываемым на параметры железной дороги, исключаются из рассмотрения. Остальные варианты образуют множество допустимых.

*Выбор метода и решение задачи.* Выбор метода заключается в установлении наиболее подходящей математической процедуры для решения задачи, учитывающей ее формализованную модель, структуру критерия и ограничений.

*Принятие решения.* На основе информации, получаемой в результате применения математического аппарата, и анализа всех показателей вариантов, учитывающих взаимодействие подсистем, и взаимодействие системы с окружающей средой и надсистемой, принимается окончательное решение.

**Выбор основных технических параметров и средств технического оснащения железной дороги.** Вместе с выбором направления дороги должны быть выбраны ее основные технические параметры и средства технического оснащения как на начальный период, так и на отдаленную перспективу. Потребность в перевозках на дорогах с течением времени возрастает и в некоторый момент приближается к предельно возможной. Поэтому необходимо наращивать провозную способность за счет совершенствования технического оснащения, более полного его использования.

Этапное наращивание провозной способности сводится к определению эффективной работы при минимальных капитальных вложениях на ее периодическое этапное усиление и эксплуатацию. При разработке проекта проектируемой линии стратегия этапного наращивания провозной способности разрабатывается тогда же, что дает возможность заранее предусмотреть



мероприятия, сводящие к минимуму затраты на реконструкцию железнодорожной линии. Этапное наращивание мощности железной дороги наступает, когда возрастающий объём перевозок диктует необходимость проведения работ по повышению провозной и пропускной способностей дороги и её технической модернизации. Целью этапного наращивания мощности железной дороги является формирование оптимальной последовательности технических состояний, определяющих увеличение провозной способности дороги и выбор параметров её реконструкции.

**Основные технические параметры и средства технического оснащения.** Для обеспечения нормальной работы дороги должны быть обеспечены резервы ее пропускной способности. Необходимо, чтобы возможная провозная способность дороги превышала потребную.

Выбор основных технических параметров железной дороги и реконструкции существующей основан на технико-экономическом анализе этапного наращивания провозной способности. К **основным техническим параметрам дороги** относятся руководящий уклон; число главных путей; ширина колеи; расчетные размеры перевозок для размещения отдельных пунктов. Основные технические параметры дороги в процессе эксплуатации практически не изменяются, так как их переустройство требует значительных капитальных вложений и часто приходится изменять трассу.

К **средствам технического оснащения дороги** относятся вид тяги; тип локомотива; полезная длина приемоотправочных путей; способы организации движения поездов; размеры локомотивного и вагонного парков и др. Средства технического оснащения в процессе эксплуатации часто переустраиваются с незначительными или значительными капитальными вложениями.

Различают постоянные и переменные устройства дороги. **Постоянные устройства** дороги в процессе эксплуатации не изменяются и проектируются по стандартным нормам [22], **переменные же устройства** переустраиваются и проектируются с учетом работы дороги и обеспечения размеров перевозок на различные расчетные сроки. Они подразделяются на четыре группы, включающие сооружения и устройства, которые проектируются исходя из размеров перевозок:

- 1) на перспективу (например, месторасположение площадок отдельных пунктов);
- 2) 10-го года эксплуатации (полезная длина приемоотправочных путей);
- 3) 5-го года эксплуатации (число приемоотправочных путей);
- 4) 2-го года эксплуатации (складские помещения на станциях).

При проектировании железной дороги обосновываются основные технические параметры. Задача комплексного выбора основных технических параметров формулируется следующим образом: найти такое сочетание параметров, которое обеспечит минимальную сумму приведенных расходов на строитель-

ство, усиление и реконструкцию проектируемой железной дороги. Для решения этой задачи используется следующий алгоритм:

- 1) назначается возможное сочетание параметров проектируемой железной дороги и средств ее технического оснащения;
- 2) трассируется линия для каждого сочетания параметров и определяются капитальные вложения в ее строительство;
- 3) определяется начальное, конечное и промежуточные состояния линии ;
- 4) производятся расчеты пропускной и провозной способностей для каждого состояния, а также технические сроки исчерпания провозной способности каждого состояния;
- 5) определяются капитальные вложения, необходимые для перехода из одного состояния в другое, а также эксплуатационные расходы по каждому состоянию на все годы эксплуатации;
- 6) формируется оптимальная схема этапного наращивания провозной способности дороги.

Суммарные приведенные затраты оптимальной схемы и есть критерий оценки данного сочетания основных технических параметров. При другом сочетании параметров следует вернуться к началу алгоритма. Выбор основных технических параметров и средств технического оснащения дороги производится на графике овладения перспективными перевозками.

**График овладения перевозками.** График овладения перевозками или график этапного наращивания провозной способности дороги представляет собой чертеж, выполненный в прямоугольной системе координат, на котором нанесены линии возможной провозной способности  $\Gamma_{в}$ , линия потребной провозной способности  $\Gamma_{п}$  и схема овладения перевозками (рисунок 6.1).

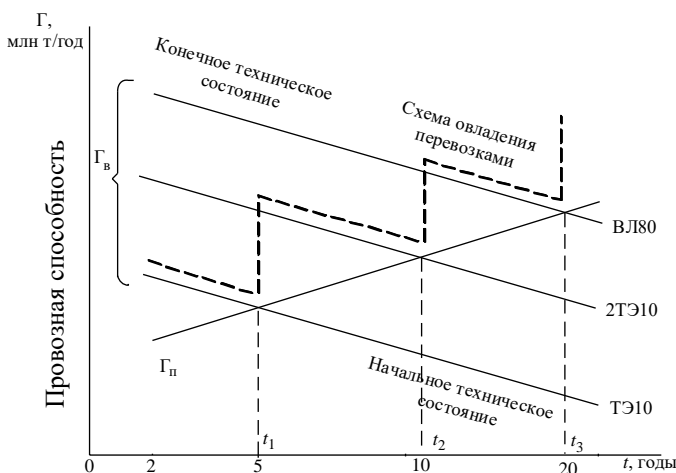


Рисунок 6.1 – График овладения перевозками

Под техническим состоянием понимается определенное сочетание основных технических параметров и средств технического оснащения дороги.

Начальное техническое состояние дороги – состояние, при котором дорога сдается в эксплуатацию, конечное состояние – состояние, которое обеспечивает овладение перспективными перевозками. Схема овладения перевозками – последовательный переход из одного состояния в другое во времени. Каждое состояние соответствует определенным основным техническим параметрам и средствам технического оснащения дороги.

Линия потребной провозной способности  $\Gamma_n$  наносится на график по данным экономических изысканий, линии возможной провозной способности  $\Gamma_b$  – по результатам аналитических расчетов.

График овладения перевозками для новых железных дорог строится применительно к перегону, лимитирующему пропускную способность, т. е. к перегону, имеющему наибольшее время хода (рисунок 6.2).

Расчетное время хода

$$t_p = (t_r + t_o)_p = \frac{1440}{N_p} - (\tau_1 + \tau_2), \quad (6.1)$$

где  $N_p$  – расчетная пропускная способность для размещения отдельных пунктов, пар поездов в сутки;

$\tau_1, \tau_2$  – станционные интервалы, мин.

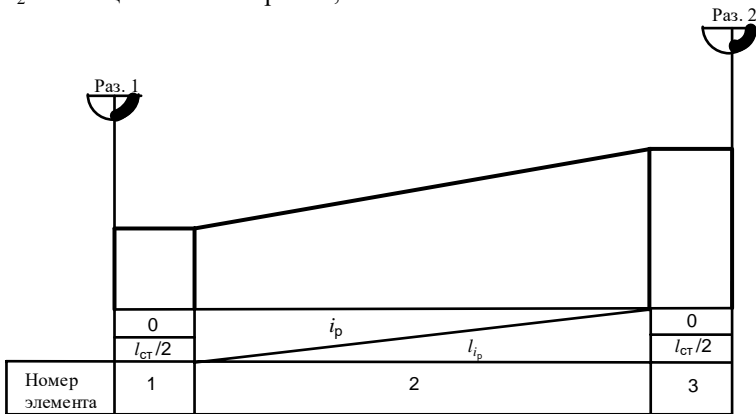


Рисунок 6.2 – Расчетный перегон

Длина расчетного перегона

$$l = \frac{t_p - 2 \frac{l_{ст}}{2} \cdot 2t_o}{t_{(+i_p)} - t_{(-i_p)}}. \quad (6.2)$$

где  $t_p$ ,  $t_{+i_p}$ ,  $t_{-i_p}$ ,  $t_0$  – расчетное время хода поезда при размещении отдельных

пунктов, при движении по подъему ( $+i_p$ ), спуску ( $-i_p$ ),  
площадке ( $i = 0$ ) (рисунок 6.3);

$l_{ст}$  – длина площадки раздельного пункта (по СТН [3]).

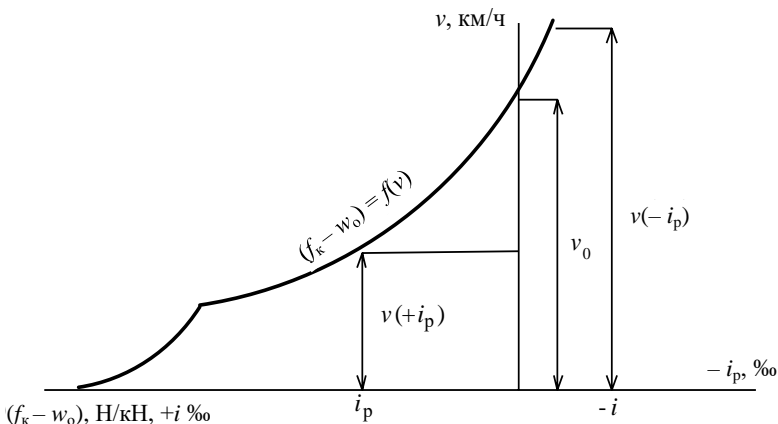


Рисунок 6.3 – Схема к определению скорости поезда по диаграмме равнодействующих сил при движении по подъему, спуску и площадке

### Свойства графика овладения перевозками (см. рисунок 6.1).

1 Позволяет сопоставить при любом техническом оснащении и на любой срок возможную  $\Gamma_B$  и требуемую  $\Gamma_{п}$  провозную способности.

2 Легко определить технический срок исчерпания провозной способности при данном техническом оснащении ( $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$  – технические сроки перехода из одного состояния в другое).

3 Легко определить работу дороги при данном техническом оснащении.

4 Позволяет определить резервы провозной способности дороги.

5 На графике намечаются схемы овладения перевозками.

6 Каждый график соответствует конкретным параметрам дороги. Если изменяется хотя бы один параметр (например,  $i_p$ ), то должен быть построен новый график.

### Аналитические расчеты к построению графика овладения перевозками.

Расчеты пропускной и провозной способностей производятся применительно к расчетному перегону (см. рисунок 6.2). Время хода пары поездов по расчетному перегону определяется по равномерным скоростям, при этом принимается время прохождения 1 км пути в минутах с равномерной для данного элемента скоростью по таблице 6.1. Все подсчеты рекомендуется выполнять в таблице 6.2.

Таблица 6.1 – Время хода на 1 км пути на различных элементах профиля

В минутах

Уклон элемента профиля, %	Тип локомотива			
	ТЭ3	ТЭ10	ВЛ60 <sup>к</sup>	ВЛ80 <sup>к</sup>
0	0,76	0,65	0,63	0,60
$i_p$	2,93	2,56	1,38	1,36
$-i_p$	0,60	0,60	0,60	0,55

Таблица 6.2 – Подсчет времени хода поезда по расчетному перегону

Тип локомотива	Номер элемента расчетного перегона	Длина элемента $l_i$ , км	Направление «туда»			Направление «обратно»		
			Уклон элемента $i$ , %	Время хода на 1 км элемента $t_i$ , мин/км	Время хода по элементу $t_i l_i$ , мин	Уклон элемента $i$ , %	Время хода на 1 км элемента $t_i$ , мин/км	Время хода по элементу $t_i l_i$ , мин
	1							
	2							
	3							
				$t_T = \sum t_i l_i =$			$t_o = \sum t_i l_i =$	
	1							
	2							
	3							
				$t_T = \sum t_i l_i =$			$t_o = \sum t_i l_i =$	

Максимальная пропускная способность, пар поездов в сутки, однопутной железной дороги при различном техническом оснащении ее в зависимости от типа графика движения поездов рассчитывается по следующим формулам:

– при обыкновенном парном параллельном графике –

$$N = \frac{1440}{T}; \quad (6.3)$$

– при безостановочном скрещении поездов –

$$N = \frac{1440}{T_{60}}; \quad (6.4)$$

– при пакетном графике –

$$N = \frac{1440}{T_{\text{пак}}} k; \quad (6.5)$$

– при частично пакетном графике –

$$N = \frac{1440k}{\alpha_{\text{пак}} T_{\text{пак}} + k(1 - \alpha_{\text{пак}}) T}, \quad (6.6)$$

где  $T$  – период обыкновенного (непакетного) параллельного графика движения поездов, мин;

$T_{\text{бо}}$  – период графика безостановочного скрещения поездов, мин;

$T_{\text{пак}}$  – период пакетного графика движения поездов, мин;

$k$  – число поездов в пакете;

$\alpha_{\text{пак}}$  – коэффициент пакетности.

Периоды обыкновенного графика движения поездов  $T$ , частично пакетного графика  $T_{\text{пак}}$  графика при безостановочном скрещении поездов  $T_{\text{бо}}$  определяются по следующим формулам:

$$T = t_T + t_o + \tau_1 + \tau_2 + t_{\text{рз}}; \quad (6.7)$$

$$T_{\text{пак}} = t_T + t_o + \tau_1 + \tau_2 + 2(k-1)I + t_{\text{рз}}; \quad (6.8)$$

$$T_{\text{бо}} = t_T + t_o, \quad (6.9)$$

где  $t_T$  и  $t_o$  – время движения поезда по перегону в направлениях «туда» и «обратно» (время хода пары поездов по перегону), мин;

$\tau_1$  и  $\tau_2$  – станционные интервалы при остановочном скрещении поездов, мин;

$t_{\text{рз}}$  – поправка на разгон и замедление на пару поездов, мин;

$I$  – интервал между поездами в пакете, мин.

Пропускная способность, пар поездов в сутки, по грузовому движению

$$n_{\text{гр}} = k_p N - [n_{\text{пас}} \varepsilon_{\text{пас}} + (\varepsilon_{\text{сб}} - 1) n_{\text{сб}} + n_y (\varepsilon_y - 1)], \quad (6.10)$$

где  $k_p$  – коэффициент резерва пропускной способностей:  $k_p = 0,8$  – новая железная дорога;  $k_p = 0,85$  – вторые пути. Учитывает технологические перерывы в движении («окна») непредвиденные остановки поездов;

$n_{\text{пас}}$ ,  $n_{\text{сб}}$ ,  $n_y$  – число пассажирских, сборных и ускоренных поездов;

$\varepsilon_{\text{пас}}$ ,  $\varepsilon_{\text{сб}}$ ,  $\varepsilon_y$  – коэффициент съема пассажирских, сборных и ускоренных поездов:  $\varepsilon_{\text{пас}} = 1,5$ ;  $\varepsilon_{\text{сб}} = 1,2$ ;  $\varepsilon_y = 1,1$ .

Все расчеты по определению пропускной и провозной способностей дороги рекомендуется выполнять по форме таблицы 6.3.

Таблица 6.3 – Сводные данные расчетов пропускной и провозной способностей

Тип локомотива	Тип графика	Период графика $T$ и $T_{\text{пак}}$ , мин	Максимальная пропускная способность $N$ , пар поездов в сутки	Пропускная способность по грузовому движению $n_{\text{гр}}$ , пар поездов/сут на расчетные годы				Масса состава поезда нетто $Q_{\text{н}}$ , т	Провозная способность $\Gamma$ , млн т/год на расчетные годы				
				2-й	5-й	10-й	20-й		2-й	5-й	10-й	20-й	

Возможная провозная способность железной дороги по грузовому движению, млн т/год,

$$\Gamma_{\text{в}} = \frac{365n_{\text{гр}}Q_{\text{н}}}{\gamma} \cdot 10^{-6}, \quad (6.11)$$

где  $Q_{\text{н}}$  – масса состава грузового поезда нетто, т;

$\gamma$  – коэффициент внутригодовой неравномерности перевозок,  $\gamma = 1,05$ .

Масса состава грузового поезда нетто т,

$$Q_{\text{н}} = \eta Q, \quad (6.12)$$

где  $\eta$  – коэффициент использования массы состава,  $\eta = 0,71$ ;

$Q$  – масса состава грузового поезда брутто, т (таблица 6.4).

Таблица 6.4 – Масса состава грузового поезда брутто  $Q$

В тоннах

Тип локомотива	Величина руководящего уклона $i_{\text{р}}$ , ‰									
	66	77	88	99	110	111	112	113	114	115
ТЭЗ	45500	44750	44200	37750	33400	33000	22750	2550	22450	22250
ТЭ10	3 3700	43250	22900	22550	22400	22100	11850	1750	11650	11600
ВЛ60 <sup>к</sup>	44750	44200	33750	33350	33000	22750	22500	2300	22200	22100
ВЛ80 <sup>к</sup>	66250	65500	54850	54450	44000	33650	33400	33150	22850	22700

По данным таблицы 6.3 на графике овладения перевозками строятся кривые возможной провозной способности при нескольких технических состояниях (см. рисунок 6.1).

На основе анализа взаимного расположения кривых возможной провозной способности и кривой потребной провозной способности на графике намечаются варианты (схемы) овладения перевозками.

Приведенная методология может быть применима и в случае использования на транспорте других типов локомотивов.

**Технико-экономическое сравнение вариантов овладения перевозками.**

Наметив на графике овладения перевозками возможные схемы (рисунок 6.4), производят их технико-экономический анализ. При этом отсеиваются явно нецелесообразные из них. Схема овладения перевозками является вариантом с многоэтапными капитальными вложениями, поэтому сравнение производится по суммарным дисконтированным расходам. Та схема, которая даст минимальные суммарные дисконтированные расходы, является оптимальной.

По первой схеме суммарные дисконтированные расходы определяются по формуле

$$S^I = K_0 + \sum_1^t C_t^{TЭ10} \eta_t + K^{2TЭ10} \eta_t + \sum_{t+1}^t C_t^{2TЭ10} \eta_t + K^{ВЛ80} \eta_t - K_{\text{возвр}}^{ВЛ80} \eta_{t_2} + \sum_{t_2+1}^T C_t^{ВЛ80} \eta_t, \quad (6.13)$$

где  $K_0$  – первоначальные капиталовложения в однопутную железную дорогу при тепловозной тяге;

$K^{2TЭ10}$  – капиталовложения на приобретение дополнительных тепловозов и на усиление деповского хозяйства;

$K^{ВЛ80}$  – капиталовложения на электрификацию железной дороги и затраты, связанные с приобретением электровозов (приложение Б);

$K_{\text{возвр}}$  – возвратные суммы, то есть стоимость тепловозов с учетом их износа;

$C_t^{TЭ10}$  – эксплуатационные расходы однопутной железной дороги при тепловозной тяге (ТЭ10), соответствующие году  $t$ ;

$T$  – период суммирования затрат;

$C_t^{2TЭ10}$  – эксплуатационные расходы однопутной железной дороги при тепловозной тяге (2ТЭ10), соответствующие году  $t$ ;

$C_t^{ВЛ80}$  – эксплуатационные расходы однопутной железной дороги при электрической тяге (ВЛ80), соответствующие году  $t$ ;

$\eta_t$  – коэффициент дисконтирования затрат,

$$\eta_t = 1 / (1 + E_n)^t,$$

$E_n$  – норма дисконта.

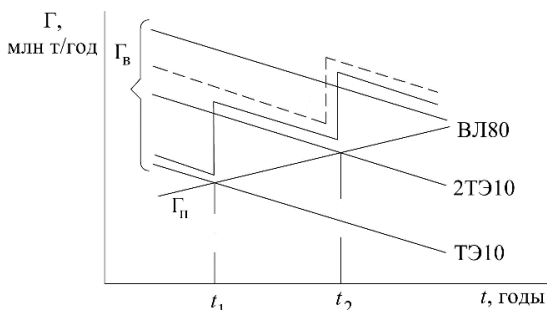


Рисунок 6.4 – График овладения перевозками

— 1-я схема; -- 2-я схема

По второй схеме суммарные дисконтированные расходы определяются по формуле

$$S^II = K_0 + \sum_I^{t_2} C_t^{2TЭ10} \eta_t + K^{ВЛ80} \eta_t - K_{\text{возвр}} \eta_{t_2} + \sum_{t_{2+1}}^T C_t^{ВЛ80} \eta_t. \quad (6.14)$$



## 6.2 Показатели общей эффективности проектных решений: ЧДД, ИД, ВНД, срок окупаемости

Показатели *общей* экономической эффективности инвестиций в реализацию дорожных проектов позволяют оценить в целом эффективность проектного замысла, а показатели *сравнительной* эффективности инвестиций – выбрать экономически наиболее рациональный вариант из множества рассматриваемых. Она показывает, насколько один из вариантов эффективнее другого.

При определении показателей общей эффективности учитываются весь объем необходимых инвестиций и вся совокупность экономических показателей (доход, себестоимость, налоги и др.) последующей эксплуатации объекта.

При определении показателей сравнительной эффективности учитываются только различающиеся по анализируемым вариантам части затрат и экономических результатов, что позволяет уменьшить трудоемкость выбора решения. Этот метод хорошо использовать, например, при сравнении вариантов организации строительства. Однако выбранный по показателям сравнительной эффективности инвестиций вариант должен иметь положительное значение общей эффективности вложений. Поэтому по выбранному варианту нужно оценить также показатель общей экономической эффективности необходимых для его реализации инвестиций.

Показатели как общей, так и сравнительной экономической эффективности могут иметь форму показателей общественной и коммерческой эффективности инвестиционных проектов.

*Общественная* эффективность характеризует социально-экономические последствия осуществления проекта не только для дорожного хозяйства, но и для общества в целом, коммерческая – его финансовые последствия для конкретных участников (инвесторов).

Общественная эффективность рассчитывается для народнохозяйственных и крупномасштабных инвестиционных проектов, реализация которых существенно влияет на экономическую, социальную и экологическую ситуацию в стране или в отдельных регионах и отраслях. К таким проектам относятся все проекты строительства и реконструкции автомобильных дорог общего пользования.

Получаемые при расчете общественной эффективности результаты – это экономические эффекты на транспорте и в социальной сфере от их полного воспроизводства, а затраты – общественно необходимые издержки по строительству, реконструкции, ремонту и содержанию дорог.

Расчет *коммерческой* эффективности строительства и реконструкции дорог осуществляется в том случае, если для воспроизводства используются внебюджетные источники финансирования.

Получаемые при расчете коммерческой эффективности результаты – это доходы каждого участника проекта (банка, акционерного общества, предприятия и т. д.) от вложенного в эти виды воспроизводства капитала, а затраты – реальные финансовые издержки на производство дорожных работ, рассчитываемые на основе рыночных цен.

**К** показателям общей эффективности проектных решений относятся чистый дисконтированный доход ЧДД, индекс доходности ИД, внутренняя норма доходности ВНД, срок окупаемости (возврата) инвестиций  $T_{ок}$  [26].

**Чистый дисконтированный доход (ЧДД)** – сумма дисконтированных потоков чистых выгод по проекту, определяемая как сумма разностей между результатами проекта и инвестиционными вложениями (затратами) на протяжении всего расчетного периода, которые приведены к одному (базисному), обычно начальному, году:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^{T_p} (R_t - K_t) \eta_t, \quad (6.15)$$

где  $T_p$  – расчетный период сравнения вариантов (горизонт расчета);

$R_t$  – экономический эффект от эксплуатационной деятельности на  $t$ -м шаге расчета;

$K_t$  – инвестиционные затраты на  $t$ -м шаге расчета;

$\eta_t$  – коэффициент дисконтирования, учитывающий фактор времени и связанное с ним удешевление доходов в сравнении с настоящим;

$t$  – номер шага расчета (месяц, квартал или год).

Как правило, затраты на осуществление проекта и результаты, получаемые от его реализации, происходят в разное время. Затраты осуществляют раньше, а доходы получают позднее. Это положение характерно для дорожных проектов, которые отличаются высоким объемом инвестирования в первые годы, а основной результат извлекается в последующий период.

**Дисконтирование** – процесс приведения денежных поступлений от инвестиций к их текущей стоимости, т. е. процесс определения настоящей стоимости будущих денег. При оценке эффективности инвестиционного проекта соизмерение разновременных показателей осуществляется путем приведения (дисконтирования) их к моменту времени  $t = 0$  непосредственно после первого шага или к другому фиксированному моменту (например, при сравнении проектов, начинающихся в различные моменты времени). Для приведения разновременных показателей проектов используется норма дисконта ( $E$ ). Норма дисконта предусматривает учет инфляции, риск и реальную стоимость отложенного потребления капитала.

Норма дисконта в значительной мере зависит от хозяйственной конъюнктуры, перспектив экономического развития страны, мирового хозяйства и является предметом серьезных исследований и прогнозов. Так, отдаленные во времени инвестиции  $K$  (предположим 10 млн руб.) могут быть направлены инвестором на сооружение других объектов и обеспечить при норме дохода на капитал  $E$  получение в течение 1-го года эффекта  $EK$ . В качестве дисконтной ставки воспользуемся ставкой рефинансирования, установленной Национальным банком Республики Беларусь (по состоянию

на 21.07.2021 г. – 9,25 %). Тогда общая сумма отдаленных инвестиций к концу 1-го года возрастет до величины

$$BK_1 = K + EK = K(1 + E),$$

$$BK_1 = 10 \text{ млн руб.} + 10 \text{ млн руб.} \cdot 0,0925 = 10 \text{ млн руб.} \cdot (1 + 0,0925) = 10,925 \text{ млн руб.}$$

Экономический эффект к концу 2-го года составит  $E[K(1 + E)]$ , а сумма отдаленных инвестиционных вложений к этому моменту увеличится до

$$BK_2 = [K(1 + E)](1 + E) = K(1 + E)^2, \\ BK_2 = [10(1 + 0,0925)](1 + 0,0925) = 10(1 + 0,0925)^2 = 11,94 \text{ млн руб.};$$

к концу трехлетнего периода

$$BK_3 = \{[K(1 + E)](1 + E)\}(1 + E) = K(1 + E)^3, \\ BK_3 = \{[10(1 + 0,0925)](1 + 0,0925)\}(1 + 0,0925) = 10(1 + 0,0925)^3 = 13,04 \text{ млн руб.},$$

то есть рост осуществляется по формуле сложных процентов. Через  $t$  лет средства возрастут до  $K(1 + E)^t$ . Следовательно, инвестиции  $K$ , реализуемые в настоящее время, экономически эквивалентны затратам  $K(1 + E)^t$ , произведенным через  $t$  лет, т. е.

$$BK = K(1 + E)^t, \quad (6.16)$$

где  $BK$  – будущая величина отдаленных инвестиций к концу  $t$ -го года;

$K$  – текущая величина инвестиций с целью получения дохода в будущем;

$E$  – величина доходности инвестиций (норма дисконта).

Для приведения инвестиционных вложений  $t$ -го года к начальному периоду необходимо поделить их величину на  $(1 + E)^t$ , что равнозначно умножению на коэффициент дисконтирования разновременных затрат  $\eta_t$ .

Для осуществления такого расчета используется формула, которая является обратной по смыслу формуле (6.16):

$$K = \frac{BK_t}{(1 + E)^t} = BK_t \frac{1}{(1 + E)^t}. \quad (6.17)$$

В нашем примере текущая величина инвестиций 10 млн руб., которые будут получены через 3 года при норме дисконта 9,25 %,

$$K = 10 \cdot \frac{1}{(1 + 0,0925)^3} = 7,67 \text{ млн руб.}$$

Таким образом, норма дисконта  $E$  представляет собой *величину годовой чистой прибыли, получаемой на единицу инвестиционных вложений*. Например, величина нормы дисконта  $E = 0,0925$  отражает получение 925 тыс. руб. чистой прибыли в год на 10 млн руб. инвестиционных затрат.

В условиях рыночной экономики норма дисконта может устанавливаться в соответствии с приемлемой для инвестора нормой дохода на вложенный капитал. Однако при принятии решений об инвестициях необходимо учитывать, что низкая процентная ставка (мягкая кредитно-денежная политика) приводит к росту инвестиций и расширению производства. Высокая же процентная ставка (жесткая кредитно-денежная политика) «душит» инвестиции и сдерживает производство. Инвестор не будет вкладывать средства в проект, реализация которого обеспечивает норму дохода меньше, чем величина депозитного процента по вкладам. В этом случае инвестор предпочтет положить деньги в банк, а не вкладывать в производство.

Таким образом, банковский депозитный процент выступает в условиях рыночной экономики в качестве минимальной нормы дохода на капитал. *Банковский процент* представляет собой депозитную ставку, или цену, которую выплачивает банк собственнику финансовых ресурсов за временное пользование ими. Собственник капитала предоставляет банку в пользование свои ресурсы, помещает их на депозит, за что банк начисляет проценты по депозитной ставке.

Допускается принятие ставки дисконта ( $E$ ) на уровне *ставки рефинансирования Национального банка Республики Беларусь* при проведении расчетов в национальной валюте или *фактической ставки процента по долгосрочным валютным кредитам банка* при проведении расчетов в условных единицах. Ставка платы за кредит – это цена, которую уплачивает банку пользователь этого кредита или инвестор в условиях рассматриваемой проблемы.

Если финансирование проекта производится за счет нескольких источников, то в расчетах экономической эффективности используется средневзвешенное значение нормы дисконта.

Например, доля заемных средств в общей сумме инвестиций составляет 40 %, остальная часть – собственные средства. Кредит получен под 7,3 % годовых, темп инфляции прогнозируется на уровне 11 %. Средневзвешенное значение нормы дисконта  $E = 0,4 \cdot 0,213 + 0,6 \cdot 0,11 = 0,1512$  ( $E = 15,12$  %).

В зависимости от прогнозируемых общеэкономических условий, способов учета прогнозируемой динамики цен и уровня риска проекта значения дисконта могут оставаться постоянными и меняться некоторым образом на протяжении расчетного периода рассматриваемого проекта.

Коэффициент дисконтирования при постоянной норме дисконта ( $E$ )

$$\eta_t = 1 / (1 + E)^t. \quad (6.18)$$

Если норма дисконта меняется во времени, то коэффициент дисконтирования в  $t$ -м году определяется по зависимости

$$\eta_t = 1 / \prod_{k=1}^t (1 + E_k), \quad (6.19)$$

где  $\Pi$  – знак произведения;

$k$  – номер шага расчета при изменяющейся норме дисконта.

На практике часто используется модифицированная формула определения чистого дисконтированного дохода. При этом из состава инвестиционных затрат выделяются дисконтируемые капитальные вложения. Тогда формула для расчета ЧДД выглядит следующим образом:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^{T_p} \frac{(R_t - K_t^*)}{(1+E)^t} - \text{KB}, \quad (6.20)$$

где  $K_t^*$  – инвестиционные затраты на  $t$ -м шаге расчета за вычетом капитальных вложений;

KB – дисконтируемые капитальные вложения

$$\text{KB} = \sum_{t=0}^{T_p} \frac{\text{KB}_t}{(1+E)^t}, \quad (6.21)$$

где  $\text{KB}_t$  – капитальные вложения на  $t$ -м шаге расчета.

Подставив значения формулы (6.21) в формулу (6.20), получим модифицированную формулу для расчета ЧДД:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^{T_p} \frac{(R_t - K_t^*)}{(1+E)^t} - \sum_{t=0}^{T_p} \frac{\text{KB}_t}{(1+E)^t}. \quad (6.22)$$

Годовой экономический эффект от эксплуатационной деятельности

$$R_t = B_t - Z_t,$$

где  $B_t$  – объем реализованной продукции или оказанных услуг (выручка от перевозки грузов и пассажиров – доход) в  $t$ -й год;

$Z_t$  – текущие затраты (эксплуатационные расходы) в  $t$ -й год.

Положительный ЧДД инвестиционного проекта означает, что ожидаемые от проекта поступления денежных средств:

– во-первых, возместят первоначальные и последующие капиталовложения, а также будущие эксплуатационные затраты;

– во-вторых, дадут необходимый уровень доходности (нормы прибыли) на вложенный капитал;

– в-третьих, обеспечат увеличение рыночной стоимости предприятия.

Чем больше ЧДД, тем эффективнее проект. Если инвестиционный проект будет осуществлен при отрицательном ЧДД, инвестор понесет убытки.

Правила принятия решения можно сформулировать следующим образом:

1) если ЧДД имеет положительное значение ( $\text{ЧДД} > 0$ ), то проект экономически оправдан при данной норме дисконта и его можно реализовать;

2) если ЧДД имеет отрицательное значение ( $\text{ЧДД} < 0$ ), то проект следует отклонить, так как доходность проекта ниже заданной нормы прибыли;

3) при значениях ЧДД, равных нулю ( $\text{ЧДД} = 0$ ), доходность проекта равна той минимальной норме, которая принята в качестве ставки дисконта. Таким образом, подобный проект также можно считать эффективным;

4) если сравниваются несколько проектов, то выбирается тот проект, который обеспечивает большее значение ЧДД.

Таким образом, интегральный эффект в виде ЧДД – важнейший показатель оценки эффективности проекта. Однако величина ЧДД не учитывает размеров проекта.

**Внутренняя норма доходности (ВНД)** тесно связана с показателем ЧДД. Она представляет собой такую ставку дисконта, при которой сумма дисконтированных эффектов от реализации дорожного проекта за определенное число лет становится равной первоначальным инвестициям, т. е. ЧДД от его реализации равен 0. Смысл расчета данного коэффициента при анализе эффективности планируемых инвестиций заключается в следующем: ВНД показывает максимально допустимый относительный уровень расходов, которые могут быть связаны с данным проектом.

Например, рассчитаем условные значения ЧДД при норме дисконта 10, 15, 20 % (таблица 6.5).

Таблица 6.5 – Расчет значений дисконтированных денежных потоков

Период	Год				
	1-й	2-й	3-й	4-й	Итого
При $E = 10\%$					
Чистый денежный поток (эффект)	31000	34500	38350	40700	144550
Ставка дисконта	10	10	10	10	
Дисконтированный денежный поток:	$\frac{31000}{(1+0,1)}$	$\frac{34500}{(1+0,1)^2}$	$\frac{38350}{(1+0,1)^3}$	$\frac{40700}{(1+0,1)^4}$	–
- расчет					
- значение	28182	28512	28813	27799	113306
При $E = 15\%$					
Чистый денежный поток (эффект)	31000	34500	38350	40700	144550
Ставка дисконта	15	15	15	15	
Дисконтированный денежный поток:	$\frac{31000}{(1+0,15)}$	$\frac{34500}{(1+0,15)^2}$	$\frac{38350}{(1+0,15)^3}$	$\frac{40700}{(1+0,15)^4}$	–
- расчет					
- значение	26957	26087	25216	23270	101530
При $E = 20\%$					
Чистый денежный поток (эффект)	31000	34500	38350	40700	144550
Ставка дисконта	20	20	20	20	
Дисконтированный денежный поток:	$\frac{31000}{(1+0,2)}$	$\frac{34500}{(1+0,2)^2}$	$\frac{38350}{(1+0,2)^3}$	$\frac{40700}{(1+0,2)^4}$	–
- расчет					
- значение	25833	23958	22193	19628	91613

$$\text{ЧДД} = 113306 - 100000 = 13306 \text{ млн руб. при } E = 10\%;$$

ЧДД = 101530 – 100000 = 1530 млн руб. при  $E = 15\%$ ;

ЧДД = 91613 – 100000 = –8387 млн руб. при  $E = 20\%$ .

На основе рассчитанных значений чистого дисконтированного дохода при ставке дисконта 10, 15, и 20 %, строится график (рисунок 6.5). При отражении графической зависимости ЧДД от нормы дисконта  $E$  кривая пересекает ось абсцисс в некоторой точке. Эта точка и есть ВНД.

Пользуясь графиком, определяется  $\text{ВНД} = 15,72\%$  для проекта с первоначальными инвестициями 100 000 млн руб.

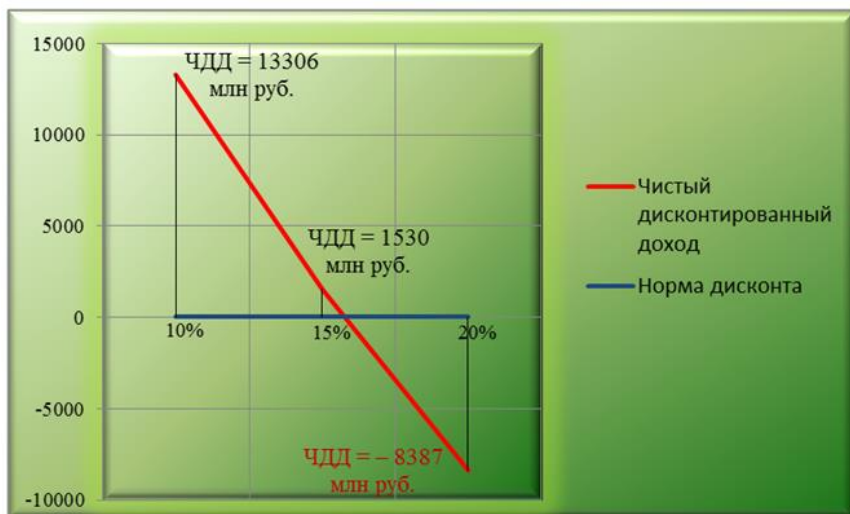


Рисунок 6.5 – Пример зависимости чистого дисконтированного дохода от нормы дисконта

Внутреннюю норму доходности инвестиций можно найти путем решения уравнения

$$\sum_{t=0}^{T_p} \frac{R_t}{(1 + \text{ВНД})^t} = \sum_{t=0}^{T_p} \frac{K_t}{(1 + \text{ВНД})^t} . \quad (6.23)$$

Таким образом, **внутренняя норма доходности инвестиций (ВНД)** представляет собой ставку, при которой величина разности дисконтированных результатов и затрат равна дисконтируемым капитальным вложениям за тот же период.

Внутренняя норма доходности показывает фактический уровень доходности общих инвестиционных издержек, т. е. характеризует величину чи-

стой прибыли, приходящуюся на единицу инвестиционных вложений и определяет максимально приемлемую ставку дисконта, при которой можно инвестировать средства без каких-либо потерь для собственника.

Если расчет ЧДД инвестиционного проекта дает ответ на вопрос, является ли он эффективным или нет при некоторой заданной норме дисконта ( $E$ ), то ВНД проекта определяется в процессе расчета и затем сравнивается с требуемой инвестором нормой дохода на вкладываемый капитал.

Если ВНД равна или больше требуемой инвестором нормы ( $\text{ВНД} \geq E$ ), то вложенный в проект капитал принесет положительное значение ЧДД, следовательно, инвестиции в данный проект оправданы, в противном случае ( $\text{ВНД} < E$ ) – неэффективны.

С помощью внутренней нормы доходности кроме определения уровня рентабельности инвестиции есть возможность сравнить проекты разного масштаба и различной длительности.

**Индекс доходности инвестиций (ИД)** – относительный показатель эффективности проекта. При наличии альтернативных вариантов этот показатель используется для выбора наилучшего (при прочих равных условиях) по величине минимальных инвестиций, необходимых для получения положительного ЧДД. Индекс доходности учитывает размеры проекта и представляет собой в общем виде отношение суммы дисконтируемых эффектов к величине дисконтируемых капитальных вложений:

$$\text{ИД} = \frac{\sum_{t=0}^{T_p} R_t \eta_t}{\sum_{t=0}^{T_p} K_t \eta_t}. \quad (6.24)$$

Индекс доходности инвестиций также тесно связан с показателем чистого дисконтированного дохода. Если ЧДД положителен, то  $\text{ИД} > 1$ , и наоборот. При  $\text{ИД} > 1$  инвестиционный проект считается экономически эффективным. В противном случае ( $\text{ИД} < 1$ ) проект неэффективен.

**Срок окупаемости ( $T_0$ )** называется такой минимальный интервал времени от начала осуществления проекта, за пределами которого интегральный эффект (ЧДД) становится и в дальнейшем остается неотрицательным, т. е. капитальные вложения покрываются разностью результатов и текущих затрат. Расчет этого показателя может быть выполнен по формуле

$$\sum_{t=0}^{T_0} \frac{R_t}{(1+E)^t} = \sum_{t=0}^{T_0} \frac{K_t}{(1+E)^t}, \quad (6.25)$$

где  $T_0$  – срок окупаемости (период возврата инвестиций).



Если величины денежных поступлений примерно равны по годам и величина срока окупаемости не более 5 лет, можно воспользоваться статическим методом расчета периода окупаемости по формуле

$$T_0 = K_0 / \mathcal{E}, \quad (6.26)$$

где  $K_0$  – первоначальные инвестиции;

$\mathcal{E}$  – годовой экономический эффект от эксплуатационной деятельности.

**Пример 6.1.** ПМС вкладывает в реализацию проекта по модернизации щебеночного завода  $K_0 = 15,3$  млн руб., а в результате эксплуатации ежегодно получает  $\mathcal{E}_t = 3,06$  млн руб. дохода. Через какой временной период инвестиции окупятся за счет получаемого дохода?

По формуле (6.26) определим срок окупаемости вложенных денежных средств  $T_0 = 15,3 : 3,06 = 5$  лет.

Одной из особенностей железнодорожного строительства являются неравномерные объемы работ в течении строительного сезона, что обуславливает разный уровень получаемого дохода. При этом для расчета срока окупаемости необходимо использовать кумулятивный метод, суть которого заключается в определении временного периода, при котором суммарные доходы от реализации проекта станут равны суммарным инвестициям.

**Пример 6.2.** ПМС вкладывает в реализацию проекта по модернизации щебеночного завода 15,3 млн руб. Сумма инвестиций распределяется на несколько лет (таблица 6.6). В результате эксплуатации ежегодно обеспечивается поступление определенного дохода, нарастающего во времени в связи с увеличением объемов выпуска щебня. Через какой временной период инвестиции окупятся за счет получаемого дохода?

Таблица 6.6 – Исходные данные для примера 6.2

Денежные потоки, млн руб.	Год								
	0-й	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й
Инвестиции	7,0	5,5	2,8	–	–	–	–	–	–
Доход	–	–	–	1,0	1,8	3,5	4,0	5,0	5,5

Для расчета срока окупаемости кумулятивным методом воспользуемся следующей формулой:

$$\sum_{t=0}^n K_t = \sum_{t=0}^{T_0} \mathcal{E}_t, \quad (6.27)$$

где  $K_t$  – инвестиции в проект в  $t$ -м временном интервале;

$\mathcal{E}_t$  – доход от эксплуатации проекта в  $t$ -м временном интервале;

$n$  – инвестиционный цикл (лет);

$t$  – количество временных интервалов функционирования проекта, за которое суммарные инвестиции сравниваются с суммами дохода от эксплуатации проекта (срок окупаемости).

При этом расчет предполагает пошаговое суммирование годовых денежных поступлений до тех пор, пока результат не станет равным сумме инвестиций.

В рассматриваемом примере период окупаемости составляет 5 лет, так как за этот период (начиная с 3-го года по 7-й включительно) денежные поступления ( $1,0 + 1,8 + 3,5 + 4,0 + 5,0 = 15,3$  млн руб.) достигнут величины суммарных инвестиционных вложений ( $7,0 + 5,5 + 2,8 = 15,3$  млн руб.).

Часто бывают ситуации, когда рассчитанный срок окупаемости не кратен целому числу лет. В этом случае расчет выполняется следующим образом.

**Пример 6.3.** Воспользуемся исходными данными предыдущего примера, изменив годовую динамику доходов от реализации проекта (таблица 6.7).

Таблица 6.7 – Исходные данные для примера 6.3

Денежные потоки, млн руб.	Год								
	0-й	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й
Инвестиции	7,0	5,5	2,8	–	–	–	–	–	–
Доход	–	–	–	1,0	2,3	3,5	4,0	5,0	5,0

Определяется нарастающим итогом сумма денежных поступлений за целое число периодов, которая максимально близка к величине суммарных инвестиций, но не превышает их значение. По данным примера  $1,0 + 2,3 + 3,5 + 4,0 = 10,8$  млн руб. за 4 года.

Рассчитывается непокрытый поступившими доходами остаток инвестиций:  $15,3 - 10,8 = 4,5$  млн руб.

Путем деления непокрытого остатка суммарных инвестиций (4,5 млн руб.) на величину дохода в следующем году (5,0 млн руб.), определяется коэффициент, характеризующий долю данного периода, которая необходима для образования общей величины периода окупаемости.

Так, 4,5 млн руб. составляют 0,9 суммы денежных поступлений на 7-м году реализации инвестиционного проекта (5,0 млн руб.), тогда общий срок окупаемости составит  $4 + 0,9 = 4,9$  лет.

Существует также графический метод определения срока окупаемости инвестиций кумулятивным методом. Процедура построения графика определения срока окупаемости, изменяющихся во времени инвестиций заключается в следующем. По оси абсцисс отражается расчетный период времени в соответствии с принятым шагом расчета (в нашем примере – годы). По оси ординат – денежные единицы в размере, соответствующем максимальной величине накопленных инвестиций и дохода. В результате последовательного откладывания нарастающим итогом в пределах расчетного периода инвестиций и полученных доходов формируются две кривые, которые в определенный момент времени достигнут равного уровня денежных единиц. Проекция данной точки с кривой дохода на ось абсцисс определяет срок окупаемости инвестиций.

В рассмотренном примере срок окупаемости составляет 4,9 лет. Как следует из графика (рисунок 6.6), суммарные инвестиции (15,3 млн руб.) срав-

няются с суммой доходов от эксплуатации проекта через 4,9 лет, что полностью соответствует условию формулы (6.27).

При анализе инвестиционных проектов предпочтение отдается вариантам с короткими периодами окупаемости, т. к. в этом случае инвестиции обеспечивают поступление доходов на более ранних стадиях и более высокую ликвидность вложенных средств, а также уменьшается отрезок времени, в котором инвестиции подвергаются риску невозвращения.

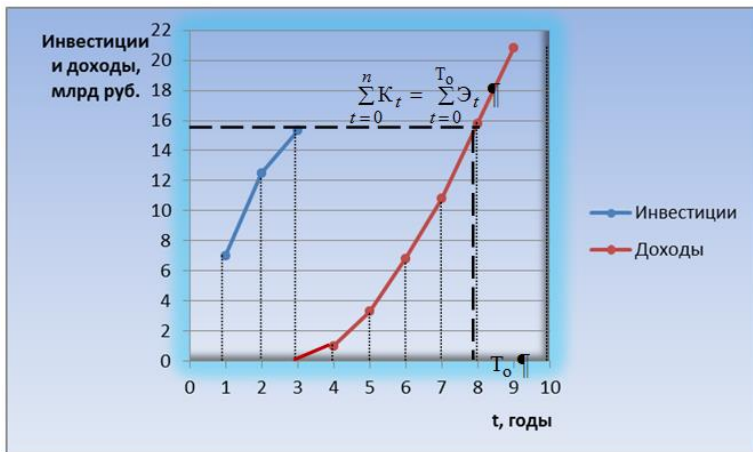


Рисунок 6.6 – График определения срока окупаемости инвестиций

Рассмотрим пример расчета срока окупаемости двух инвестиционных проектов методом, основанным на дисконтировании всех доходов и расходов. Инвестиционные затраты по вариантам одинаковы и составляют 1800 млн рублей. Потоки доходов по каждому из вариантов представлены в таблице 6.8. Из формулы (6.27) следует, что период окупаемости с учетом дисконтирования текущих доходов и расходов равен такому периоду, при котором его ЧДД = 0. Определим ЧДД проекта для различных периодов его использования, полагая, что ставка дисконта  $E = 10\%$ .

Таблица 6.8 – Доходы от эксплуатации проектов А и Б

Период реализации проекта (год)	Инвестиционный проект	
	А	Б
Инвестиционные затраты, млн руб.	-1800	-1800
1-й	800	200
2-й	700	250
3-й	600	600
4-й	250	700
5-й	200	800

Так, для периода в один год для предприятия А

$$\text{ЧДД}(A) = -1800 + \frac{800}{1+0,1} = -1000 \text{ млн руб.}$$

Для предприятия Б, когда  $t$  составляет два года,

$$\text{ЧДД}(A) = -1800 + \frac{200}{1+0,1} + \frac{250}{(1+0,1)^2} = -1412 \text{ млн руб.}$$

Результаты аналогичных расчетов для предприятий А и Б при различных значениях  $t$  представлены в таблице 6.9.

**Таблица 6.9 – Чистый дисконтированный доход проектов А и Б в зависимости от периода их реализации**

В миллионах рублей

Период реализации проекта (год)	Проект А	Проект Б
1-й	-1000	-1600
2-й	-494	-1412
3-й	-43	-961
4-й	127	-483
5-й	252	14

Данные таблицы 6.9 показывают, что дисконтированный период окупаемости для проекта А превышает 3 года, а для проекта Б – 4 года.

Точнее показатели определяются при использовании методики расчета срока окупаемости кумулятивным методом:

– для проекта А –  $3 + \frac{43}{(127 + 43)} = 3,25$  года;

– для проекта Б –  $4 + \frac{483}{(483 + 14)} = 4,97$  года.

По полученным значениям делается вывод, что проект А более предпочтителен для инвестора, поскольку он имеет меньший дисконтированный период окупаемости.

Однако показатель срока окупаемости, следует использовать не в качестве критерия выбора инвестиционного проекта, а лишь в виде ограничения при принятии решения. Проекты железнодорожного строительства преследуют долгосрочные социально-экономические цели и, как правило, характеризуются длительным сроком окупаемости. Поэтому длительный срок окупаемости некоммерческих проектов не снижает уровня их эффективности. Однако основной недостаток срока окупаемости как показателя эффективности капитальных вложений в строительство железных дорог заключается в том, что он учитывает только начальные денежные потоки, именно те, которые укладываются в период окупаемости, и не учитывает весь пери-

од функционирования производства, следовательно, на него не влияют доходы, которые будут получены за пределами срока окупаемости.

Так, если бы в рамках второго проекта Б в последний год поток составил, например, 1 млрд руб., то результат расчета дисконтированного периода окупаемости не изменился бы, хотя совершенно очевидно, что проект станет в этом случае гораздо привлекательнее.

Инвесторы могут сравнивать срок окупаемости с некоторым принятым граничным значением, и если он выше требуемого ( $T_o > T_n$ ), то инвестиционный проект исключается из состава рассматриваемых.

**Показатели сравнительной экономической эффективности инвестиций.** Для сравнения вариантов инвестиционных проектов используются следующие **показатели сравнительной экономической эффективности**: сравнительный интегральный эффект; приведенные строительно-эксплуатационные расходы; срок окупаемости дополнительных инвестиций.

Как правило, проекты характеризуются различными показателями капитальных вложений  $K_1$  и  $K_2$  и годовых текущих (эксплуатационных) затрат  $C_1$  и  $C_2$ . Это усложняет процесс отбора наилучшего варианта инвестиционных вложений в рассматриваемые проекты. При этом могут возникать следующие варианты:  $K_1 = K_2$ ;  $K_1 > K_2$  и  $K_1 < K_2$ ;  $C_1 = C_2$ ;  $C_1 > C_2$  и  $C_1 < C_2$ . Например, капитальные вложения для одного из вариантов больше, чем для другого ( $K_1 > K_2$ ), но текущие затраты по этому варианту ниже ( $C_1 < C_2$ ), что означает большие вложения инвестиций на первоначальном этапе строительства, которые в последствии компенсируются экономией текущих затрат.

Предположим, что требуется модернизировать щебеночный завод для выпуска смесей оптимально подобранного состава фракций. При этом капитальные вложения в рассматриваемые варианты (покупка новой щебнедробильной установки или дооборудование существующей) различны и влияют на стоимость выпускаемых щебеночных смесей. Перед предприятием встает вопрос, какой из этих вариантов наиболее предпочтителен с точки зрения затратного критерия?

В общем виде годовые эксплуатационные затраты на производство продукции определяются следующей формулой:

$$C = Z_T + K N_a, \quad (6.28)$$

где  $Z_T$  – годовые текущие затраты по производству продукции;

$K$  – капитальные вложения в основные производственные фонды предприятия;

$N_a$  – годовая норма амортизации основных производственных фондов.

Графически зависимость уровня общих годовых затрат (эксплуатационных расходов) от величины капитальных вложений представлена на рисунке 6.7.

Как показывает практика, текущие затраты с увеличением фондоёмкости производства с применением прогрессивной технологии имеют тенденцию к сокращению (кривая  $Z_t$ , имеющая вид гиперболы). В свою очередь амортизационные отчисления растут прямо пропорционально капитальным вложениям в основные производственные фонды (кривая  $КН_a$ ). Если просуммировать обе составляющие общих годовых затрат, то закономерность их изменения по мере насыщения производства основными фондами будет иметь вид кривой  $C$ , которая вначале показывает падение текущих затрат до определенного уровня, а затем их рост.

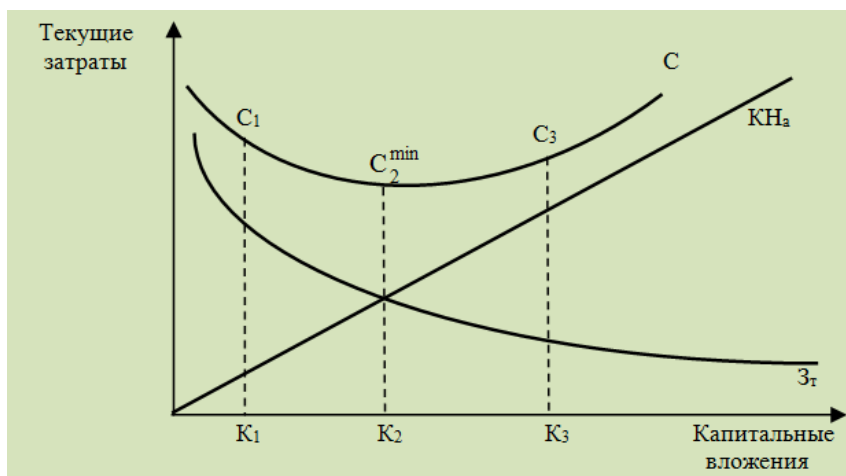


Рисунок 6.7 – График взаимосвязи текущих затрат и капитальных вложений при выборе оптимального варианта капитальных вложений

Рассмотрим несколько вариантов капитальных вложений в производство ( $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ). Пользуясь графиком на рисунке 6.6, определяем, что величине  $K_2$  соответствует минимальное значение текущих затрат на производство продукции  $C_2^{\min}$ . В точках  $K_1$  и  $K_3$  текущие затраты на производство продукции, соответственно  $C_1$  и  $C_3$ , несколько выше, чем в точке  $K_2$ . По значениям  $K_1$  и  $K_3$  наиболее конкурентоспособным варианту со значением  $K_2$  является первый вариант, так как, несмотря на несколько большее значение текущих затрат ( $C_1 > C_3$ ), капитальные вложения значительно меньше ( $K_1 < K_3$ ). Вариант  $K_3$  проигрывает остальным вариантам и в текущих затратах, и по капитальным вложениям, поэтому не представляет интереса для инвестора.

Таким образом, вариант  $K_2$  выступает в качестве правой границы сравниваемых вариантов эффективности капитальных вложений. Все варианты, лежащие левее этой границы, представляют экономический интерес и должны рассматриваться при сравнении и выборе лучшего инвестиционно-го проекта.

Итак, если внедрить вариант  $K_2$  (приобрести новую, более современную щеднедробилку, то можно за год сэкономить за счет снижения текущих затрат. Эта экономия  $(C_1 - C_2)$  показывает, какой эффект получится, если реализуется вариант  $K_2$ . Однако при этом будет не только эффект, за счет снижения текущих затрат, но и большие затраты в форме капитальных вложений, которые составят  $K_1 - K_2$ . То есть внедрение варианта  $K_2$  требует дополнительных капитальных вложений.

Целесообразность дополнительных затрат оценивается с помощью показателей срока окупаемости дополнительных инвестиций и коэффициента сравнительной экономической эффективности дополнительных капитальных вложений.

*Срок окупаемости дополнительных инвестиций* ( $T_0^{\text{доп}}$ ) соответствует временному периоду, за который дополнительные инвестиционные вложения на более дорогостоящий вариант окупаются вследствие прироста экономических результатов, обусловленных реализацией инвестиций.

При сравнении двух вариантов срок окупаемости дополнительных инвестиций определяется из равенства

$$\sum_{t=0}^{T_0^{\text{доп}}} [(R_{t,2} - C_{t,2}) - (R_{t,1} - C_{t,1})] \eta_t = \sum_{t=0}^{T_0^{\text{доп}}} (K_{t,1} - K_{t,2}) \eta_t, \quad (6.29)$$

где  $R_{t,1}, R_{t,2}$  – экономический результат инвестиционных вложений по первому или второму варианту в  $t$ -й год;

$C_{t,1}, C_{t,2}$  – эксплуатационные (текущие) расходы по первому или второму варианту в  $t$ -й год;

$K_{t,1}, K_{t,2}$  – потребные инвестиции (капитальные вложения) в реализацию первого или второго варианта проекта в  $t$ -й год.

Если дополнительные инвестиционные вложения в более капиталоемкий вариант окупаются за счет прироста экономического эффекта от реализации более дорогого варианта, то срок окупаемости дополнительных инвестиций может определяться из равенства

$$\sum_{t=0}^{T_0^{\text{доп}}} (\mathcal{E}_{t,1} - \mathcal{E}_{t,2}) \eta_t = \sum_{t=0}^{T_0^{\text{доп}}} (K_{t,1} - K_{t,2}) \eta_t, \quad (6.30)$$

где  $\mathcal{E}_{t,1}, \mathcal{E}_{t,2}$  – эффект в  $t$ -м году от реализации первого или второго варианта инвестиционного проекта.

Если сравниваемые варианты отличаются только текущими затратами по производству продукции или эксплуатационными расходами и инвестиционными вложениями, то срок окупаемости дополнительных инвестиций находится из уравнения

$$\sum_{t=0}^{T_0^{\text{доп}}} (C_{t,2} - C_{t,1}) \eta_t = \sum_{t=0}^{T_0^{\text{доп}}} (K_{t,1} - K_{t,2}) \eta_t, \quad (6.31)$$

где  $C_{t1}$ ,  $C_{t2}$  – текущие затраты по производству продукции или эксплуатационные расходы по первому или второму варианту в  $t$ -й год.

Если инвестиционные вложения по сравниваемым вариантам являются одноэтапными, а также при постоянных во времени эффекте ( $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$ ), экономических результатах ( $R_{t1}$  и  $R_{t2}$ ) и затратах ( $C_{t1}$  и  $C_{t2}$ ), срок окупаемости дополнительных инвестиций может определяться следующим образом:

$$T_0^{\text{доп}} = \lg[1 - [(K_1 - K_2)/(\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2) - 1]E] / \lg(1 + E), \quad (6.32)$$

где  $K_1, K_2$  – инвестиционные вложения в первый или второй варианты проекта;

$\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$  – годовой экономический эффект от эксплуатации первого или второго варианта проекта;

$E$  – постоянная норма дисконта или дохода на капитал, в качестве которой могут быть приняты ожидаемая эффективность создаваемого производства, ставка платы за кредит или ставка банковского процента, ставка рефинансирования в зависимости от рассматриваемого случая.

Формула (6.32) может быть представлена в следующем виде:

$$T_0^{\text{доп}} = - \frac{\lg \left[ 1 - \left( \frac{K_1 - K_2}{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2} - 1 \right) E \right]}{\lg(1 + E)}. \quad (6.33)$$

Если отсутствует необходимость в дисконтировании денежных потоков (небольшой расчетный период)

$$T_0^{\text{доп}} \approx \frac{K_1 - K_2}{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}. \quad (6.34)$$

Если экономические результаты инвестирования отличаются по вариантам только текущими затратами по производству продукции или эксплуатационными расходами, то зависимости (6.33) и (6.34) приобретают вид

$$T_0^{\text{доп}} = - \frac{\lg \left[ 1 - \left( \frac{K_1 - K_2}{C_2 - C_1} - 1 \right) E \right]}{\lg(1 + E)}, \quad (6.35)$$

где  $C_1, C_2$  – текущие затраты по производству продукции или эксплуатационные расходы по первому или второму варианту;



$$T_0^{\text{доп}} \approx \frac{K_1 - K_2}{C_2 - C_1}. \quad (6.36)$$

Для выбора варианта расчетное значение срока окупаемости дополнительных вложений ( $T_0^{\text{доп}}$ ) сравнивают с его нормативным значением ( $T_H = 1/E$ ), приемлемым для инвестора. Дополнительные инвестиции в капиталоемкий вариант оправданны лишь тогда, когда расчетный срок их окупаемости ниже приемлемого значения. То есть если  $T_0^{\text{доп}} < T_H$ , то выбирается более капиталоемкий вариант, если  $T_0^{\text{доп}} > T_H$ , то принимается более ресурсоемкий вариант.

Величина, обратная сроку окупаемости дополнительных инвестиций, представляет собой коэффициент эффективности дополнительных инвестиций, или *коэффициент сравнительной эффективности инвестиций* ( $\Theta_{\text{ср}}$ ). Данный коэффициент показывает, какой эффект в виде превышения годовых экономических результатов над затратами образуется при увеличении инвестиций на единицу. Согласно (6.38) и (6.39) данный показатель определяется по формуле

$$\Theta_{\text{ср}} = \frac{(\Theta_2) - (\Theta_1)}{K_1 - K_2}, \quad (6.37)$$

или

$$\Theta_{\text{ср}} = \frac{C_2 - C_1}{K_1 - K_2}. \quad (6.38)$$

Расчетное значение коэффициента эффективности  $\Theta_{\text{ср}}$  сравнивается со значением  $E$ , соответствующим удовлетворяющей инвестора норме дохода на капитал. При  $\Theta_{\text{ср}} > E$  реализуется инвестиционнеемкий вариант, в противном случае – ресурсоемкий.

Как правило, на практике при сравнении вариантов проектных решений рассматривается более двух альтернативных вариантов. При простом переборе множества вариантов теряется рейтинг каждого из них. В этом случае целесообразно в качестве критерия сравнительной экономической эффективности дополнительных инвестиций использовать критерий приведенных затрат.

В случае одноэтапных инвестиций, постоянной величины текущих затрат и отсутствия необходимости дисконтирования денежных потоков *годовые приведенные затраты* рассчитываются по формуле

$$Z_{\text{прив}}^I = Z + EK_0, \quad (6.39)$$

где  $Z$  – годовые эксплуатационные (текущие) затраты;  
 $K_0$  – единовременные инвестиционные затраты.

Суммарные затраты выбранного варианта должны быть минимальны.

Если сравниваемые варианты имеют одинаковый объем выполненных работ (доход) и отличаются друг от друга только размерами необходимых инвестиций (капитальными вложениями) и эксплуатационными расходами (текущими затратами), то наиболее эффективное решение будет отвечать минимуму приведенных строительно-эксплуатационных расходов

*Приведенные строительно-эксплуатационные расходы* в общем случае рассчитываются по формуле

$$Z_{\text{прив}} = \sum_{t=0}^{T_p} K_t \eta_t + (1-\alpha) \sum_{t=0}^{T_p} C_t \eta_t, \quad (6.40)$$

где  $K_t$  – инвестиционные вложения в  $t$ -м году;

$\alpha$  – доля налоговых отчислений от прибыли;

$C_t$  – текущие затраты по производству (строительно-монтажных работ) продукции или эксплуатационные расходы в  $t$ -м году.

Если инвестиции поступают из государственного бюджета или приведенные затраты рассчитываются для оценки народнохозяйственной сравнительной эффективности,  $\alpha = 0$ .

При этом в случае изменения эксплуатационных расходов во времени по линейному закону и одноэтапных инвестициях зависимость (3.26) приобретает вид

$$Z_{\text{прив}} = K_0 + \sum_{t=0}^{\infty} \frac{(C_0 + bt)}{(1+E)^t} \approx K_0 + \int_0^{\infty} \frac{(C_0 + bt)dt}{(1+E)^t} \approx K_0 + \frac{C_p}{E}, \quad (6.41)$$

где  $C_0$  – начальные эксплуатационные расходы;

$b$  – параметр, характеризующий годовой прирост эксплуатационных расходов;

$C_p$  – эксплуатационные затраты в  $t_p$ -й год ( $t_p = 1/E$ ).

Приведенные затраты являются частным случаем сравнительного интегрального эффекта. *Сравнительный интегральный эффект*  $\Delta \mathcal{E}_{\text{инт}}$  характеризует дополнительную величину интегрального эффекта, полученную от реализации проекта, по сравнению с другими.

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{инт}} = \sum_{t=1}^{T_p} \Delta P_t \cdot \eta_t - \sum_{t=1}^{T_p} \Delta Z_t \cdot \eta_t - \sum_{t=1}^{T_p} \Delta K_t \cdot \eta_t, \quad (6.42)$$

где  $T_p$  – расчетный период сравнения вариантов;

$t$  – текущий расчетный шаг (месяц, год);

$\Delta P_t$  – разница результатов по сравниваемым вариантам реализации инвестиций на  $t$ -м шаге расчета;

$\Delta Z_t$  – разница текущих затрат по сравниваемым вариантам реализации инвестиций на  $t$ -м шаге расчета;

$\Delta K_t$  – разница инвестиционных затрат по сравниваемым вариантам реализации инвестиций на  $t$ -м шаге расчета.

Данный показатель определяется с учетом только различающихся по вариантам составляющих затрат. Критерием выбора варианта служит максимальная величина сравнительного интегрального эффекта.

### **6.3 Однокритериальные и многокритериальные статические, детерминированные и недетерминированные задачи проектирования**

Задачи принятия решений в зависимости от числа критериев делятся по трем классификационным признакам [2].

1 Число критериев принятия решений (задачи однокритериальные и многокритериальные).

2 Наличие случайных факторов, влияющих на изменение показателей цели (детерминированные и недетерминированные задачи).

3 Зависимость критериев от времени (статические – не зависят от времени и динамические задачи – критерии зависят от времени).

В качестве **денежных критериев** при выборе проектных решений используются капитальные вложения  $K$  (инвестиционные затраты), эксплуатационные расходы  $C$ , дисконтированные затраты  $Z$ .

Под **инвестициями** понимается любое имущество и иные объекты гражданских прав, принадлежащие инвестору на законном основании, вкладываемые инвестором на территории Республики Беларусь в целях получения прибыли (доходов) и (или) достижения иного значимого результата либо в иных целях, не связанных с личным, семейным, домашним и иным подобным использованием, в частности:

– движимое и недвижимое имущество, в том числе акции, доли в уставном фонде, паи в имуществе коммерческой организации, созданной на территории Республики Беларусь, денежные средства, включая привлеченные, в том числе займы, кредиты;

– права требования, имеющие оценку их стоимости;

– иные объекты гражданских прав, имеющие оценку их стоимости, за исключением видов объектов гражданских прав, нахождение которых в обороте не допускается (объекты, изъятые из оборота).

Основными признаками инвестиций являются:

– целевой характер вложения капитала в объекты инвестирования;

– потенциальная способность инвестиций приносить доход;

– наличие конкретного расчетного периода вложения средств, индивидуального для каждого проекта;

– использование разных видов инвестиционных ресурсов;

– наличие риска вложения капитала.

На макроуровне инвестиции являются основой для повышения эффективности общественного производства и развития экономики, обеспечиваемых ускорением научно-технического прогресса, улучшением качества продукции и снижением затрат на ее производство, созданием необходимой сырьевой базы, развитием социальной сферы, обновлением основных производственных фондов, что в свою очередь способствует увеличению объемов производства.

Выполняя представленные функции, инвестиции представляют собой вложение капитала во всех его формах в различные объекты предпринимательской и иных видов деятельности с целью получения дохода или достижения иного полезного результата, в т. ч. и социального эффекта.

При классификации инвестиций используются различные признаки (таблица (6.10)).

**Таблица 6.10 – Классификация форм инвестиций**

Признак классификации	Вид инвестиций	Характеристика
Содержание экономических ресурсов, вкладываемых в развитие предприятия	Денежные	Денежные средства, ценные бумаги, банковские вклады
	Натуральные	Материальные (движимое и недвижимое имущество) и нематериальные инвестиции (интеллектуальные ценности, имущественные, авторские права, товарные знаки и т. п.)
Уровень инвестора	Республиканские источники	Средства, выделяемые из республиканского бюджета и внебюджетных фондов
	Местные источники	Средства местной администрации
	Средства предприятий и организаций	Собственные (прибыль, амортизационный фонд и др.) и заемные средства (кредиты банков, займы и др.)
	Частные инвестиции	Покупка населением ценных бумаг
Системный признак	Прямые	Капитальные вложения в объекты, необходимые непосредственно для реализации инвестиционного проекта (затраты на строительно-монтажные работы по возведению земляного полотна, строительству искусственных сооружений и т. п.)
	Сопутствующие	Вложения в объекты, строительство, реконструкция или ремонт которых необходимы для нормального функционирования основного объекта
	Сопряженные	Вложения в объекты смежных отраслей народного хозяйства, обеспечивающие основными и оборотными фондами строительство и эксплуатацию основного объекта (затраты на развитие предприятий стройиндустрии, энергетической и сырьевой базы, охрану окружающей среды)

Окончание таблицы 6.10

Признак классификации	Вид инвестиций	Характеристика
Период инвестирования	Долгосрочные	Период – более 1 года
	Краткосрочные	Период действия – в течение года
Источник финансирования	Бюджетные	Целевое финансирование из бюджетов разных уровней
	Собственные	Использование части прибыли
	Привлеченные	Средства от продажи акций
	Заемные	Кредиты банков и иностранных инвесторов
Воспроизводственная структура объектов	Инвестиции в новое строительство	Затраты на строительные-монтажные, транспортные, вспомогательные и прочие работы (научно-исследовательские, экспериментальные или опытные)
	Инвестиции в расширение	Затраты на строительство, расширение технических зданий на территории дорожных организаций и их производственных баз, строительство или расширение существующих цехов на заводах и ремонтных предприятиях
	Инвестиции в реконструкцию	Затраты на проведение работ и мероприятий, направленных на изменение и повышение основных технико-экономических показателей и потребительских свойств существующей железной дороги или отдельных ее участков и дорожных сооружений
	Инвестиции в капитальный ремонт	Затраты на восстановление основных технико-экономических показателей и потребительских свойств железной дороги или ее участков и дорожных сооружений, утраченных в процессе эксплуатации
	Инвестиции в техническое перевооружение	Затраты на механизацию дорожно-строительных работ с целью повышения их технического уровня; на модернизацию отопительных и вентиляционных систем, реализацию мероприятий по охране труда и окружающей среды, внедрение автоматизированных систем обработки информации, модернизацию дорожной техники

Денежные средства дорожно-строительных организаций направляются в основном на строительство, реконструкцию, ремонт и содержание железных дорог. Это сложные и многофакторные процессы, требующие значительных материальных и трудовых затрат, а также финансовых ресурсов – капитальных вложений в течение длительного периода (от начала проектирования до ввода объекта в эксплуатацию).

**Капитальные вложения** – это инвестиции в основной капитал (основные средства), в том числе затраты на новое строительство, расширение,

реконструкцию и техническое перевооружение действующих предприятий, приобретение машин, оборудования, инструмента, инвентаря, проектно-изыскательские работы и другие затраты [20].

Понятие «капитальные вложения» более узкое и менее емкое, чем понятие «инвестиции». Переход к рыночной экономике, связанный с расширением видов и источников вложений капитала, обусловил необходимость введения нового термина. Как было отмечено ранее, инвестиции могут направляться на развитие основных фондов предприятия, покупку ценных бумаг, в нематериальные активы и так далее. Инвестиционные затраты в нематериальные активы не относятся к капитальным вложениям.

В путевом хозяйстве инвестиции в настоящее время выступают в основном в виде капитальных вложений, так как расходуются на обновление, реконструкцию и ремонт основных производственных и непроизводственных фондов. При этом капитальные вложения, как правило, носят денежный характер.

Реконструкция в дорожных работах в большей степени означает повышение качества дороги и ее категории, в то время как ремонт подразумевает значительное увеличение прочности уже готового полотна и избавление от появившихся недостатков.

Основным источником финансирования путевого хозяйства в Республике Беларусь служат республиканский и местные бюджеты.

В эксплуатационные расходы входят: расходы на заработную плату, на электрическую энергию и дизельное топливо, на ремонт технических устройств и т. п. (подробнее см. п. 4.4).

Дисконтированные затраты  $Z$  охватывают расходование всех денежных средств на строительство железной дороги за некоторый период времени  $T$ , обычно принимаемый равным 15 (20) годам.

Функция затрат  $Z(t)$  представляет собой распределение капитальных вложений и эксплуатационных расходов во времени. В зависимости от числа этапов капитальных затрат различают функции с одно- и многоэтапными капитальными вложениями. При *одноэтапных капитальных вложениях* функция затрат учитывает только первоначальные капитальные затраты на строительство железной дороги. При *многоэтапных капитальных вложениях* функция затрат, помимо первоначальных, учитывает последующие затраты, например, на электрификацию (если железная дорога первоначально запроектирована с тепловозной тягой), сооружение двухпутных вставок, строительство второго пути.

**Многокритериальные статически детерминированные задачи проектирования.** Рассмотренные выше оптимизационные задачи имеют единственную цель – найти минимум (максимум) функции, например функции затрат. В многокритериальных задачах появляется несколько целей (несколько критериев, которые желательно оптимизировать).

Для облегчения принятия решений в условиях многокритериальных задач существуют несколько процедур, которые используют разработчики.

**Линейная свертка.** Она сводит многокритериальную задачу к однокритериальной. Вместо нескольких частных критериев  $W_1, W_2, \dots, W_n$  рассматривается один критерий в виде

$$F = \sum_{i=1}^n W_i \alpha_i, \quad (6.43)$$

где  $\alpha_i$  – некоторые положительные числа (веса), с помощью которых производится соизмерение частных критериев.

Примером линейной свертки является рассмотренный выше критерий «дисконтированные строительно-эксплуатационные затраты», рассчитываемый по формуле (6.40), объединяющей два частных критерия: капитальные вложения  $K$  с весом 1 и эксплуатационные расходы  $C$  с весом  $1/E$ . Заметим, что задача свертки здесь облегчается тем, что размерность и характер оптимизации (минимизация) у всех трех критериев  $K, C$  и  $Z$  одинаковы.

**Выделение основного критерия.** В ряде задач можно выбрать один (основной критерий). Например, в некоторых задачах в качестве основного критерия рассматривается строительная стоимость  $K$ , при этом игнорируются эксплуатационные расходы, поскольку изменение их по вариантам пренебрежительно мало, т. е. принимается  $Z = K$ .

**Ранжирование вариантов.** Неопределенность, возникающая в многокритериальных задачах, может быть снижена не только за счет сокращения числа критериев, но и за счет уменьшения числа вариантов решений [2, с. 316].

**Однокритериальные статически детерминированные задачи проектирования.** Однокритериальные статические детерминированные задачи относятся к оптимизационным, т. е. к задачам отыскания экстремума критерия. Методы решения этих задач различаются в зависимости от вида критерия [2].

Расчет сравнительной экономической эффективности вариантов с неизменными во времени эксплуатационными расходами выполняется по формуле дисконтированных затрат

$$\Theta = C + E_n K. \quad (6.44)$$

Вариант считается экономически обоснованным, если общая эффективность не меньше нормативной эффективности капитальных вложений  $E_n$ , т. е.  $\Theta_n \geq E_n$  [2].

Если  $\Theta_n < E_n$ , то возникает задача выбора варианта железной дороги, размеры перевозок на которой постоянны во времени.

Для того чтобы вычислить критерий – дисконтированные строительно-эксплуатационные затраты  $Z$ , необходимо затраты каждого года  $t$  (независимо от того, являются они капитальными вложениями или эксплуатацион-

ными расходами) умножить на коэффициент дисконтирования затрат года  $t$ , т. е. получить дисконтированные затраты каждого года, а затем их сложить.

$$Z = \sum_{t=0}^T K_t \eta_t + \sum_{t=1}^T C_t \eta_t .$$

**Однокритериальные статически недетерминированные задачи проектирования.** В ряде случаев бывает, что конкретная величина размеров перевозок неизвестна, а информация о них носит вероятностный характер.

Необходимо разработать проект железной дороги, обеспечивающий заданные размеры перевозок при минимальных денежных затратах и минимальном денежном ущербе в случае изменения размеров перевозок.

Пусть известны возможные  $n$  значений размеров грузовых перевозок  $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n$ . Для каждого из этих значений  $\Gamma$  получим  $n$  оптимальных вариантов железной дороги  $B_1, B_2, \dots, B_n$ , приведенные строительно-эксплуатационные затраты для которых составляют величины  $Z_{11}, Z_{22}, \dots, Z_{nn}$ . Результаты расчетов представляются в виде диагональной матрицы дисконтированных приведенных затрат по оптимальному варианту [2].

**Многокритериальные статически недетерминированные задачи.** В настоящее время многокритериальные статические недетерминированные задачи наименее разработаны и находятся в стадии становления, хотя именно они наиболее полно отражают реальные ситуации, с которыми сталкивается разработчик проекта железной дороги.

При проектировании железной дороги, как правило, имеется не одна, а несколько целей, зачастую противоречивых, для оценки которых необходимо располагать соответственно не одним, а несколькими критериями, также противоречивыми, т. е. **реальные задачи в большинстве своем многокритериальные**. Кроме того, планируемые параметры цели подвержены по разным причинам изменениям, что вносит неопределенность в их значения, а значит, делает задачу недетерминированной.

Для изучения многокритериальных статических недетерминированных задач и принятия решения применяются экспертные процедуры.

Основной причиной возникновения проблемы принятия решений является отыскание варианта с оптимальным критерием, помимо которого в процессе принятия решений должны учитываться и другие факторы. Понять и оценить их позволяет теория принятия решений. Ее основные положения следующие.

1 *Множество целей.* В задачах принятия решений обычно имеется несколько целей, как правило, противоречивых, причем не обязательно эти цели имеют формальный характер, как в многокритериальных задачах.

2 *Неопределенность.* В момент принятия решения (выбора варианта) можно только прогнозировать (утверждать с некоторой вероятностью) обстановку, которая сложится в будущем, например размеры перевозок, как в недетерминированных задачах.



3 *Будущие последствия принятия решения.* Если решение задачи не исчерпывает проблемы, и спустя несколько лет придется принимать очередное решение, то необходимо учитывать, какие возможности могут открыться (или закрыться) в будущем вследствие принятия сегодняшнего решения.

4 *Неформализованные понятия.* Исторические ценности, эстетические представления, комфортабельность, престиж, настроение и т. д. являются примерами неформализованных понятий, которые необходимо учитывать, но которые и усложняют задачу.

5 *Проведение аналогий и сравнений.* Сопоставление вариантов с отечественными и зарубежными аналогами и установление соответствия их лучшим мировым образцам являются необходимым элементом процедуры принятия решений.

6 *Социальные, экологические и стратегические аспекты.* В процессе принятия решений при проектировании железных дорог возникают два вида проблем: формальные и неформальные.

#### **6.4 Методология выбора оптимального варианта железной дороги по данным расчета капитальных вложений и эксплуатационных расходов**

*Приведенные строительно-эксплуатационные расходы* в общем случае рассчитываются по формуле (6.40).

В случае изменения эксплуатационных расходов во времени по линейному закону и одноэтапных инвестициях расчет выполняется по формуле (6.41).

*Сравнительный интегральный эффект*  $\Delta \mathcal{E}_{\text{инт}}$  определяется по формуле (6.42)

#### **Отыскание оптимального положения трассы в сложных условиях рельефа местности**

Конечной целью проектирования и сравнения вариантов является отыскание наилучшего или оптимального решения. До 1940 г. для этой цели использовалось дифференциальное и интегральное исчисление. В 1950–1960 гг. – методы линейного и динамического программирования, теория массового обслуживания, теория графов. В настоящее время широко используется компьютерная техника, которая позволяет сократить время расчетов и расширить круг рассматриваемых решений на базе применения математических методов.

В общем случае оптимизация проектных задач сводится к выявлению показателя, по величине которого можно произвести оценку сравниваемых вариантов. Такой показатель является критерием оптимальности.

В зависимости от характера решаемых задач критерием оптимальности могут быть объемы земляных работ, трудоемкость, строительные показатели и др.

В проектировании задачи с выявлением оптимального решения наиболее распространены, и к ним относится нахождение одного из главных технических параметров или средств технического оснащения железной дороги руководящего уклона; полезной длины приемоотправочных путей; радиуса кривой; определение оптимальной глубины и длины тоннеля и др. Для решения таких задач могут применяться методы упорядоченного и неупорядоченного перебора. Первый приемлем для выбора оптимального решения из трех или четырех возможных вариантов. Если число сравниваемых вариантов больше, то применяется второй метод. Он связан с решением транспортных задач, нахождением кратчайшего пути в графе, применением динамического программирования и др.

Рассмотрим применение упорядоченного перебора к решению задачи отыскания оптимального положения трассы в сложных условиях рельефа. Для решения такой задачи целесообразно применить метод, который разработан профессором Турбиным И. В., подобный методу отыскания кратчайшего пути в графе.

На карте между начальным и конечным пунктами трассы отыскиваются фиксированные точки (точки обхода и пересечения препятствий), через которые пройдет трасса.

Фиксированные точки трассы принимаются за вершины графа, а участки между вершинами являются звеньями в цепи графа (рисунок 6.8).

Для каждого такого звена определяется сумма приведенных строительных и эксплуатационных затрат. Эти расходы и принимаются за измеритель длины звена графа:

$$S_{\text{пр}}^r = \frac{K}{t_{\text{ок(н)}}}$$

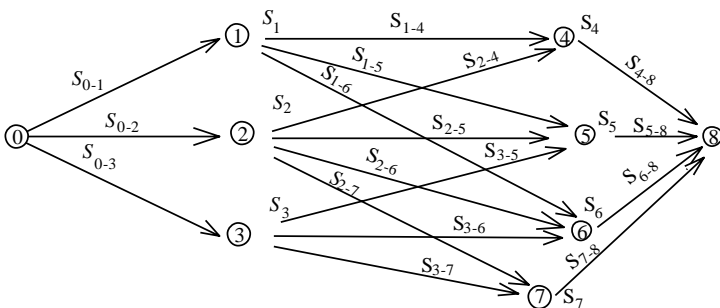


Рисунок 6.8 – Направленный граф с фиксированными точками в вершинах

Критерием оптимального решения будет минимальная сумма длин последовательно включаемых звеньев, обеспечивающих непрерывную цепь от начальной до конечной вершин графа. Например,

$$S_1 = S_0 + S_{1-2}, \quad S_2 = S_0 + S_{0-2}, \quad S_3 = S_0 + S_{0-3};$$

$$\min \left\{ \begin{array}{l} S_4 = S_1 + S_{14}; \\ S_4 = S_2 + S_{2-4}; \end{array} \right.$$

$$\min \left\{ \begin{array}{l} S_5 = S_1 + S_{15}; \\ S_5 = S_2 + S_{2-5}; \\ S_5 = S_3 + S_{3-5}; \end{array} \right.$$

$$\min \left\{ \begin{array}{l} S_6 = S_1 + S_{16}; \\ S_6 = S_2 + S_{26}; \\ S_6 = S_3 + S_{3-6}; \end{array} \right.$$

$$\min \left\{ \begin{array}{l} S_7 = S_2 + S_{27}; \\ S_7 = S_3 + S_{37}; \end{array} \right.$$

$$\min \left\{ \begin{array}{l} S_8 = S_{4(\min)} + S_{4-8}; \\ S_8 = S_{5(\min)} + S_{5-8}; \\ S_8 = S_{6(\min)} + S_{6-8}; \\ S_8 = S_{7(\min)} + S_{7-8} \end{array} \right.$$

Кратчайший путь в графе проходит через точки 0–2–6–8.

Таким образом, трасса будет иметь наименьшие затраты, если пройдет через фиксированные точки 2 (пересечение водораздела) и 6 (пересечение реки). Если принять другие технические параметры и средства технического оснащения, может получиться совершенно другое решение, т. е. задача носит исследовательский характер.

Для того чтобы найти оптимальную по суммарному критерию приведённых расходов схему наращивания мощности железной дороги, можно применить принцип варьирования, т. е. наметить варианты этапного усиления мощности железной дороги, а затем выбрать тот из них, который имеет минимальные суммарные приведённые расходы. Этот принцип используется, если схем этапного наращивания мощности не много (не более 8). Если же их много, то применяется метод этапного наращивания мощности железной дороги [2].

# **7 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПРИ ПЕРЕУСТРОЙСТВЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

---

## **7.1 Основы технико-экономического обоснования проекта**

Технико-экономическое обоснование (ТЭО) – это анализ и расчет экономической целесообразности осуществления проекта, основанный на сравнительной оценке затрат и результатов, эффективности использования, срока окупаемости вложений.

Технико-экономическое обоснование проекта составляется в случае развития предприятия, когда требуется обосновать внедрение инновации (новое оборудование, технология, маркетинговый канал и т. д.). Учитывая, что ТЭО содержит не полное обоснование бизнеса, а только его часть, в нем не будет разделов, которые есть в бизнес-плане. Так, маркетинговая часть будет содержаться в ТЭО только в случае, если внедрение инновации может существенно повлиять на маркетинговую стратегию предприятия. Анализ рисков проводится не полностью, а рассматриваются только риски, связанные с внедрением инновации и т. п.

### *Структура ТЭО.*

1 Основная идея проекта. Рассмотрение его основных аспектов и реализации в рамках определенного предприятия.

2 Краткий обзор рынка. Проведение маркетинговых исследований на предмет выявления спроса на производимую продукцию (оказываемые услуги).

3 Инженерное проектирование и технология.

3.1 Характеристика технологического процесса.

3.2 Обоснование выбора оборудования.

3.3 Рассмотрение достоинств и недостатков.

3.4 Анализ соответствия выпускаемой продукции международным стандартам.

4 Экономическая оценка и финансовый анализ.

4.1 Полные инвестиционные затраты.

4.2 Финансирование проекта: механизм и источники финансирования.

4.3 Полные издержки на проданную продукцию.

4.4 Оценка экономической эффективности с учетом окупаемости и своевременного возврата заемных средств (в случае их использования), валютная окупаемость.

4.4.1 Чувствительность проекта к основным рискам.

4.4.2 Показатели чистой текущей стоимости и нормы внутренней возвратности капиталовложений.

5 Оценка влияния финансовых результатов на экономику предприятия.

Задача проектного анализа состоит в установлении ценности проекта, определяемой как разность между его положительными результатами (выгодами) и отрицательными результатами (затратами).

Основные принципы проектного анализа реализуются с помощью аналитических методов, основанных на приведении текущих и будущих выгод и затрат в сопоставимый вид. Финансовый анализ инвестиционных проектов имеет несколько разновидностей, которые могут понадобиться в зависимости от типа проекта:

- анализ потребности в финансировании;
- финансовый анализ фирмы – держателя инвестиционного проекта;
- анализ возмещения издержек (как особый случай).

Каждый из указанных видов финансового анализа имеет особую задачу, зависящую от того, рассматривается ли финансовая целесообразность проекта с позиций проекта в целом или с точки зрения лиц, в интересах которых проект осуществляется, финансирующей проект организации и других экономических агентов, которые могут участвовать в осуществлении проекта.

ТЭО является предпроектной стадией разработки вариантов развития железнодорожной сети и ее сооружений и устройств на основе региональных и отраслевых программ развития регионов и страны в целом. При разработке ТЭО обосновываются экономическая целесообразность и техническая необходимость инвестиционного проекта. Оно разрабатывается для новых железных дорог, подъездных путей, железнодорожных путей, усиливающих действующие направления, для строительства дополнительных главных и приемоотправочных путей, при электрификации железных дорог, реконструкции линий, в том числе под скоростное движение поездов и для других сооружений и устройств железнодорожной инфраструктуры.

Проект строительства включает три раздела [СП]:

- 1) формирование инвестиционного замысла и анализ возможностей инвестирования;
- 2) разработку «Обоснования инвестиций в строительство»;
- 3) разработку, согласование, экспертизу и утверждение проектной документации;

Рассмотрим технико-экономическое обоснование, включающее второй раздел согласно Своду Правил, а именно «Обоснование инвестиций в строительство».

Понятие «строительство» в СП обозначает новое строительство, расширение, реконструкцию и техническое перевооружение предприятий, зданий

и сооружений. Понятие «строительство» в экономических изысканиях при проектировании железных дорог нами будет использовано как новое строительство железных дорог и подъездных путей, развитие, реконструкция, модернизация и техническое перевооружение (выбор основных технических параметров и средств технического оснащения) железных дорог с использованием инновационных методов и технологий.

Для разработки ТЭО производится техническое и экономическое обследование района проектирования переустраиваемого участка железной дороги.

**ТЭО содержит** общую часть, оценку существующего положения, экономический раздел, варианты оказания транспортных услуг и основные технические параметры и средства технического оснащения переустраиваемого участка дороги, безопасность и бесперебойность движения поездов, ориентировочную стоимость строительства, социальное развитие района тяготения к развиваемому железнодорожному объекту, принципиальные схемы организации строительства, экономическую эффективность принимаемого решения с основными технико-экономическими показателями.

Рассмотрим составляющие ТЭО на примере технико-экономического обоснования электрификации участка Белорусской железной дороги.

В общей части указывается значение анализируемого объекта для развития транспортного комплекса региона и страны в целом. Устанавливаются инвесторы, проектная и строительные организации, цели инвестиционного проекта.

Цели инвестирования могут быть разными: 1) сохранение продукции (услуг) на рынке; 2) расширение объемов производства и улучшение качества продукции (услуг); 3) выпуск новой продукции (услуг); 4) решение социальных и экономических задач.

В Федеральном Законе «Об инвестиционной деятельности в Российской Федерации, осуществляемой в форме капитальных вложений» *инвестиции* представлены в виде *имущественных, финансовых и интеллектуальных ценностей, вкладываемых в объекты предпринимательской или иных видов деятельности с целью получения прибыли (дохода) или достижения социального эффекта.*

Субъектами инвестиционной деятельности (реципиентами) могут являться отечественные и иностранные инвесторы, заказчики, подрядчики, пользователи объектов капитальных вложений.

Понятие «инвестиционный проект» (ИП) в отечественной литературе употребляется в двух смыслах:

- как деятельность, мероприятие, предполагающее осуществление комплекса каких-либо действий, обеспечивающих достижение определенных целей – *такое понимание ИП применяется в настоящем учебном пособии;*
- как система, которая включает в себя определенный набор организационно-правовых и расчетно-финансовых документов, необходимых для осуществления каких-либо действий или описывающих такие действия.

Объекты инвестирования различаются: масштабами проекта; направленностью проекта (коммерческая, общественная, связанная с государственными интересами и т. д.); характером и содержанием инвестиционного цикла; характером и степенью участия государства; эффективностью использования вложенных средств.

По количеству участников и степени влияния проекта на окружающий мир ИП могут быть малыми; средними; крупными; международными; глобальными.

Окончательные оценки размера требуемых инвестиций и издержек производства, а также последующие расчеты финансовой целесообразности и экономической выгоды делаются в том случае, когда масштаб проекта четко определен и уточнена стоимость всех необходимых компонентов. Проработки проекта фиксируются в чертежах, схемах и расчетах, которые в дальнейшем служат в качестве вспомогательного материала для дальнейшей работы над проектом.

В качестве заказчиков прединвестиционных исследований могут выступать правительственные институты, занимающиеся привлечением инвестиций в создание отечественных, иностранных или смешанных предприятий; общественные организации; банки промышленного развития; частные компании и предприятия, которые прямо заинтересованы в данном инвестировании.

Прединвестиционные исследования могут осуществляться различными организациями: правительственными учреждениями, занимающимися вопросами промышленного развития; промышленными предприятиями; консультативными фирмами; генеральными подрядчиками и поставщиками оборудования.

Работу по проведению технико-экономического исследования целесообразно поручать группе экспертов, в состав которой должны входить специалисты по основным аспектам проблем, затрагиваемых в проекте.

Важную роль в проведении исследования играет инвестор. Во многих случаях осуществление проекта начинается инвестором, который часто является лицом, проводившим исследование возможностей. Поэтому его можно считать одним из главных поставщиков информации об общих условиях осуществления проекта. Во время подготовки исследования инвестору принадлежит право решения многих вопросов (например, по маркетингу и производственным программам, выбору альтернативных вариантов).

Прединвестиционные исследования охватывают период от месяца (для проведения относительно простого исследования возможностей) до одного или двух лет (для проведения подробного технико-экономического исследования сложного проекта).

В состав основных технико-экономических и финансовых показателей, на основании которых готовится документ об утверждении проекта, входят:

1) мощность предприятия (годовой выпуск продукции, в соответствующих единицах, пропускная способность) в натуральном выражении (по видам продукции);

- 2) стоимость товарной продукции, тыс. руб.;
- 3) общая численность работающих, в том числе рабочих, чел.;
- 4) количество (прирост) рабочих мест;
- 5) общая стоимость строительства, тыс. руб., в том числе:
  - объектов производственного назначения;
  - объектов жилищно-гражданского назначения;
  - прочих объектов;
- 6) стоимость основных производственных фондов, в том числе вводимых;
- 7) продолжительность строительства, лет;
- 8) удельные капитальные вложения, руб./ед;
- 9) себестоимость основных видов продукции, руб./ед.

*Пример.* Цель **технико-экономического обоснования** – определение условий эффективности электрификации участка Белорусской железной дороги.

**Источник финансирования** – средства Белорусской железной дороги и кредитные ресурсы.

**Актуальность проекта.** Электрификация железнодорожных направлений на полигоне Белорусской железной дороги является одним из перспективных направлений развития железнодорожной инфраструктуры. Построена АЭС, которая обеспечит железную дорогу собственной электроэнергией на тягу поездов. Повышение конкурентоспособности железнодорожного транспорта при электрификации обеспечивается посредством снижения себестоимости перевозок и предопределяется обостряющейся конкуренцией за грузо- и пассажиропотоки со стороны автомобильного транспорта.

По состоянию на 2021 г. длина электрифицированных линий на Белорусской железной дороге 1 215 км, что составляет 22 % от общей эксплуатационной длины дороги (5 480 км). Электрифицированы участки II и IX транспортных коридоров – соответственно Госграница с Польшей – Брест – Барановичи – Минск – Орша – Осинówka – Госграница с Российской Федерацией и Гомель – Жлобин – Осиповичи – Минск – Молодечно – Гудогай – Госграница с Литвой, участок Гродно – Брузги – Госграница с Польшей, а также участки Шабаны – Гатово – Асеевка и Колядичи – Помыслище – Крыжовка.

По участку (принятому для условий примера) осуществляются перевозки грузов и пассажиров (в международном, межрегиональном и региональном сообщениях). По итогам года по этому направлению перевезено во всех видах сообщений например около 33,4 млн т грузов, что составляет 25,4 % от общего объема грузовых перевозок на Белорусской железной дороге за отчетный период (цифры и участок условные). Суммарный пассажирооборот на направлении составил 166 тыс. пас·км.

В соответствии с данными ежегодной отчетности в денежном выражении годовые затраты на топливо для тяги поездов составили 188,7 млн руб., на электрическую энергию – 89,8 млн руб. Удельный вес затрат на топливо



и электрическую энергию для тяги поездов составил около 16 % от суммарных расходов по деятельности железнодорожного транспорта, в том числе 11 % на топливо, на электрическую энергию – 5 %.

Электрификация железнодорожной инфраструктуры позволяет снизить себестоимость перевозок за счет снижения потребления топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов; сокращения затрат на техническое обслуживание и ремонт тягового подвижного состава, содержание локомотивных бригад, сокращения времени хода поезда и др.

Актуальность данного проекта подтверждается также переходом к снабжению дешевой электроэнергией других потребителей; сокращением затрат на замену тормозных колодок и ходовых частей вагонов, а также содержание верхнего строения пути (при использовании рекуперации); снижением вредного воздействия железнодорожного транспорта на окружающую среду (за счет использования в пассажирском движении в региональном сообщении на участках современных электропоездов серии ЭП вместо дизельпоездов серий ДР1А и ДР1П может быть достигнута экономия времени нахождения пассажиров в пути следования); сокращением вредных выбросов, в первую очередь при использовании электрической энергии, полученной на ГЭС и АЭС.

Плавное торможение, являющееся неотъемлемым условием осуществления рекуперации, уменьшает износ тормозных колодок и тем самым способствует повышению безопасности движения поездов.

В разделе «*Оценка существующего положения*» приводится существующее состояние объекта и его инфраструктура.

*Пример.* Участок железной дороги обслуживается дистанциями пути. Приводится краткая характеристика существующей инфраструктуры дистанций пути.

Развернутая длина путей: главных – 319,19 км, станционных – 198,5 км, подъездных – 72,2 км. Всего – 589,89 км. Протяженность бесстыкового пути составляет 306,1 км. Мощность рельсов в бесстыковом пути типа Р-65. На главных путях имеются не забалластированные участки протяженностью 1,2 км (мосты).

Диаграммы характеристики дистанции представлены на рисунке 7.1.

Приводится схема дистанции пути и другие данные о существующей инфраструктуре, а также размеры перевозок существующие и прогнозируемые на перспективу.

В экономическом разделе обоснования на основе материалов экономических изысканий на расчетные годы 2, 5, 10 устанавливаются грузонапряженность, объем прибывающих и отправляемых грузов, весовые нормы грузовых поездов, размеры пассажирского движения.

Оценивается техническая категория железнодорожной линии ее техническая оснащенность (вид тяги, тип локомотива род тока, число главных путей, способы организации движения поездов и другие параметры). Сроки

изменения параметров устанавливаются на основе графиков овладения перспективными перевозками, определяется потребность в новом подвижном составе, этапность ввода в эксплуатацию отдельных участков и объектов с учетом отдачи от вложенных инвестиций.

Приводятся отдельные расчеты по экономическому разделу обоснования инвестиций в электрификацию участка, даются ссылки на подразделы пособия, в которых представлена методика выполнения расчетов.

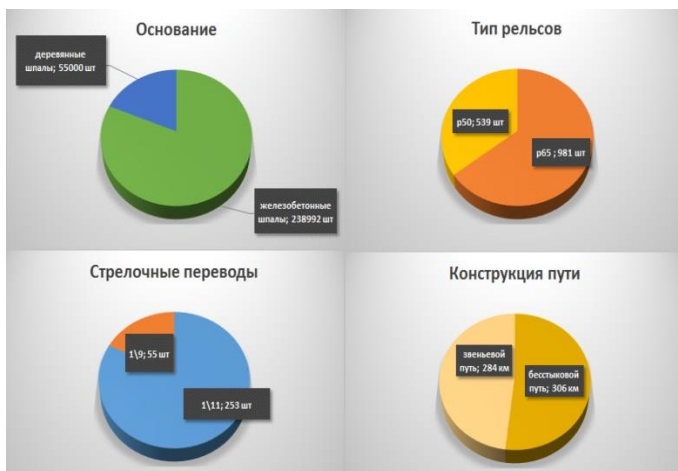


Рисунок 7.1 – Диаграммы-характеристики существующей инфраструктуры

Значения основных показателей, влияющих на величину эксплуатационных расходов: тариф на дизельное топливо – 0,59 дол. за 1 кг, тариф на электроэнергию – 0,1076 дол. за 1 кВт·ч; грузооборот – 10430 млн т·км брутто; пассажирооборот – 172 млн пасс·км (расчеты в ценах на 2021 г.).

Основные технические и эксплуатационные показатели приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Основные расчетные технические и эксплуатационные показатели по существующей и проектируемой инфраструктуре

Показатель	Существующий вариант	Проектный варианты
Годовой расход дизельного топлива, т/год	24 686,1	781,6
Годовой расход электроэнергии, не менее тыс. кВт ч	8 629	106 110
Годовые затраты не более, млн дол.:		
– дизельное топливо	14,6	0,5
– электроэнергия	1,0	11,5

Расчет эксплуатационных затрат по существующему и проектным вариантам в разрезе участков электрификации выполнен в соответствии с отраслевыми особенностями формирования затрат и себестоимости перевозок на железнодорожном транспорте и оценен методом расходных ставок. В качестве калькуляционных измерителей, изменяющихся в случае электрификации участка при одинаковых объемах перевозочной работы на участке, рассмотрены следующие: локомотиво-километры, локомотиво-часы, бригадо-часы локомотивных бригад, тонно-километры брутто, расход дизельного топлива и электроэнергии на тягу поездов и др.

Кроме того, для оценки изменения эксплуатационных затрат при замене существующих пассажирских составов, курсирующих в межрегиональном сообщении, на моторвагонный подвижной состав наряду с перечисленными выше калькуляционными измерителями использовались также вагоно-километры, вагоно-часы и вагоно-часы в движении пассажирских вагонов.

При определении расхода дизельного топлива пассажирскими и грузовыми поездами, курсирующими по участкам в настоящее время, использовался показатель удельного расхода топлива на измеритель перевозочной работы (кг/10000 т·км брутто).

Удельный расход электроэнергии тяговым подвижным составом при смене вида тяги определен с учетом особенностей организации движения поездов на участках и местных условий.

Для определения индексов пересчета удельного расхода дизельного топлива в удельный расход электроэнергии на участках перспективной электрификации проанализирована эксплуатация тягового подвижного состава на участке, на котором в настоящее время наряду с электрическим подвижным составом эксплуатируются также тепловозы и дизель-поезда.

При расчете объёмных показателей перевозочной работы на участках проанализированы существующие объёмы перевозок грузов, а также оценены перспективные грузопотоки, которые могут возникнуть при вводе в эксплуатацию производственных мощностей: горно-обогажительного комбината на базе определенного месторождения полезных ископаемых или карьера по разработке щебня и др.

Капитальные затраты на электрификацию участков определены по объектам-аналогам.

*В разделе об экономической эффективности принимаемого решения для оценки эффекта от реализации настоящего проекта проанализировано соотношение затрат Белорусской железной дороги на эксплуатацию участка при его электрификации и без нее.*

Для расчета интегральных показателей эффективности проекта (чистого дисконтированного дохода и внутренней нормы доходности) была использована расчетная ставка дисконтирования на уровне 1,48 %, рассчитанная методом средневзвешенной нормы дисконта для собственных и заемных средств по формуле

$$D_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{ск}} \cdot \text{СК} + \sum P_{z_i} \cdot z_i}{100},$$

где  $D_{\text{ср}}$  – средневзвешенная норма дисконта для собственного и заемного капитала, %;

$P_{\text{ск}}$  – стоимость собственного капитала, принята равной 4,02 %, что соответствует стоимости собственного капитала ГО «Белорусская железная дорога» по итогам 2017 года;

СК – доля собственных средств в общем объеме инвестиционных расходов, %;

$P_{z_i}$  – процентная ставка по заемным ресурсам, %, была рассчитана как полная процентная ставка;

$z_i$  – доля заемных ресурсов в общем объеме инвестиционных расходов;

$i$  – вид заемных ресурсов.

При этом полная процентная ставка за пользование заемными ресурсами рассчитана из выражения

$$\text{ППС}_{\%} = \left( \frac{\text{РСП} + \text{РС}}{\text{РСЗО}} \right) \cdot 12 \cdot 100,$$

где  $\text{ППС}_{\%}$  – полная процентная ставка, %;

РСП – сумма процентов за весь срок пользования кредитом, млн дол.;

РС – расчетная сумма комиссионных и иных платежей банку за весь срок пользования кредитом/аккредитивом, млн дол.;

РСЗО – расчетная сумма ежемесячных остатков задолженности по кредиту/аккредитиву за весь срок пользования кредитом/аккредитивом, млн дол.

В расчетах использован тариф на электрическую энергию на уровне тарифа для промышленных потребителей в 2021 году – 0,1076 дол. без НДС. Принятая величина тарифа на дизельное топливо – 0,594 дол./кг.

Расчет денежных потоков производился по годам. Горизонт расчетов по проекту принят равным 20 годам, начиная с 2021 года.

**Полные инвестиционные расходы.** Общая сумма потребности в инвестициях (таблица 7.2) для целей финансового анализа была определена в

объёме капитальных вложений в электрификацию на обеспечение прироста чистого оборотного капитала при эксплуатации проектного участка, НДС и издержек финансирования проекта.

Таблица 7.2 – Общая потребность в инвестициях

Показателя	Проектный вариант
Капитальные вложения, млн дол.	117,8
НДС, млн дол.	21,2
Итого капитальные вложения с НДС, млн дол.	139,0
Прирост чистого оборотного капитала, млн дол.	1,2
Издержки финансирования, млн дол.	6,2
Всего	146,4
Возмещение из бюджета части процентов по кредиту (50 %), млн дол.	3,1
Доля собственных средств, %	17,5
Доля заемных средств, %	80,4
Государственное участие, %	2,1

Было оценено влияние сокращения объёма капитальных вложений, изменения грузооборота и снижения тарифа на электроэнергию вплоть до уровня, при котором инвестиции могут окупиться в течение 15 лет.

Для определения наиболее предпочтительного варианта последовательности реализации проекта по ожидаемым эффектам от смены вида тяги на участках выбран показатель чистого накопленного эффекта в дисконтированном исчислении денежных потоков.

Установлено, что инвестиционные затраты для электрификации проектных участков железной дороги при соотношении действующих тарифов на дизельное топливо и электроэнергию и ожидаемом объёме перевозок пассажиров и грузов, несмотря на появление новых месторождений и промышленных грузоотправителей, могут окупиться за период около 28 лет. Чистый дисконтированный доход к концу горизонта расчетов будет иметь отрицательное значение на уровне –39 млн дол.

Такие показатели характерны для проектов электрификации железнодорожной инфраструктуры, финансируемых, как правило, за счет средств правительственного и местных бюджетов или кредитных ресурсов международных финансовых организаций либо сопровождаемых государственной поддержкой в иных формах, определяемых законодательством.

В ходе анализа установлены следующие показатели энергетической и экологической эффективности проекта.

1 Сокращение расхода дизельного топлива в грузовом и пассажирском движении составит более 23 тыс. т в год. Экономия затрат на энергоресурсы в целом составит 3,6 млн дол. (или 23 % от уровня затрат при тепловозной тяге); снижение выброса загрязняющих веществ оценивается в

размере не менее 2,2 тыс. т в год. Социальный эффект от сокращения непроизводительных потерь времени пассажиров при электрификации участков может составить 19,8 млн дол.

2 При снижении объёма капитальных вложений на 10 % проектные убытки сокращаются до –4,3 млн дол., а чистый дисконтированный доход – до –26,9 млн дол.;

3 Уменьшение стоимости электроэнергии на аналогичную величину позволит снизить отрицательное значение чистого дисконтированного дохода до –19,6 млн дол., в то время как в случае роста стоимости дизельного топлива на 10 %, проект окупается в течение 26,4 года, в то время как снижение стоимости дизельного топлива на 10 % значительно увеличивает этот период более чем на 37 лет.

4) Задача окупить проектные инвестиции в течение 15 лет за счет снижения тарифа на электроэнергию решения не имеет, но при одновременном увеличении грузооборота можно добиться снижения срока окупаемости до 15 лет.

## **7.2 Особенности выбора оптимального проектного решения при реконструкции плана железных дорог**

К параметрам, которые ограничивают скорости движения поездов, относятся:

- план линии;
- уклоны продольного профиля;
- верхнее строение пути;
- состояние земляного полотна и т. д.

К плану железных дорог при реконструкции предъявляются дополнительные требования. В частности, это касается трех элементов плана: величины радиуса кривых, длины переходных кривых и длин прямых вставок между смежными кривыми.

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

Реконструкция плана линии на железной дороге связана прежде всего с величиной радиуса круговых кривых. При движении экипажа по кривой (рисунок 7.2) на него действует центробежная сила  $I$ , направленная по радиусу от центра кривой. Эта сила прижимает экипаж к наружной нити, затрудняет его поворот, и тем самым увеличивая направляющую силу и, как следствие, боковой износ наружного рельса. Для обеспечения равномерного вертикального износа обеих рельсовых нитей устраивается возвышение наружного рельса.

Наибольшие скорости движения поездов по существующим кривым устанавливается исходя из неперевышения непогашенного поперечного ускорения  $a_n = 0,7 \text{ м/с}^2$  для пассажирских поездов и  $a_n = \pm 0,3 \text{ м/с}^2$  для грузовых поездов и возвышения наружной нити 150 мм [2].

Наименьшая величина радиуса определяется двумя условиями:

1) обеспечение комфортабельности пассажиров при движении по кривой;

2) обеспечение одинаковых нагрузок на обе нити рельсов.

Первое условие дает следующее соотношение:

$$h = 12,5 \frac{v_{\max}^2}{R} - a_n \frac{S}{g}, \quad (7.1)$$

где  $R$  – радиус кривой, м;

$v_{\max}$  – максимальная скорость, установленная в данной кривой для скоростного пассажирского движения;

$a_n$  – поперечное непогашенное ускорение,  $\text{м/с}^2$ ;

$S$  – ширина колеи по осям рельсов, мм;

$g$  – ускорение силы тяжести,  $\text{м/с}^2$ .

Если за возвышение принимать его максимальную, принятую в практике строительства железных дорог величину ( $h = 150 \text{ мм}$ ), при  $a_n = 0,7 \text{ м/с}^2$ ,  $S =$

$= 1600 \text{ мм}$ ,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ , а также зная, что  $\sin\beta = \frac{h}{S}$ , из формулы (7.1) мож-

но определить максимально допускаемую по условиям комфортабельности скорость движения

$$v_{\max \text{ пас}} = 3,6 \sqrt{R(a_n + 0,00613h)}, \quad (7.2)$$

$$v_{\max \text{ пас}} = 4,6 \sqrt{R}. \quad (7.3)$$

Из формулы (7.3) следует, что для реализации скоростей порядка 160–200 км/ч необходимы радиусы круговых кривых 1200 м и более. Рассматривая отдельные линии, можно убедиться в том, что увеличение скоростей до вышеупомянутого уровня может потребовать значительной реконструкции трасс линий в плане.

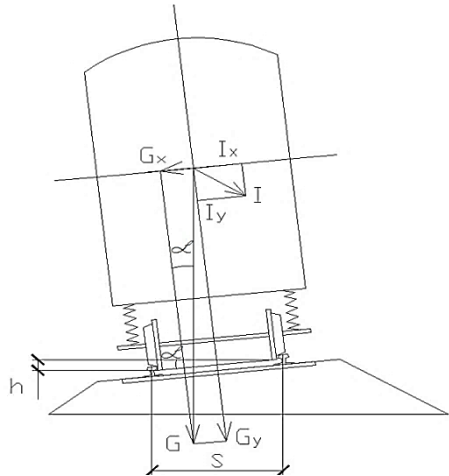


Рисунок 7.2 – Схема положения экипажа и действующие на него силы при движении по кривой

Уположение кривых в плане, т. е. увеличение радиусов является дорогостоящим мероприятием. Также следует добавить, что на линиях будут выполняться смешанные грузопассажирские перевозки, поэтому производство работ в условиях непрерывной эксплуатации.

Для выбора оптимального варианта реконструкции существующего пути предлагается алгоритм определения рекомендуемых радиусов круговых кривых в плане для каждой отдельной кривой с учетом скорости проследования ее поездами разных категорий и размеров движения (рисунок 7.3).

Предварительно необходимо выполнить тяговые расчеты для всех категорий поездов и установить скорости движения по каждой из кривых (блок 1).

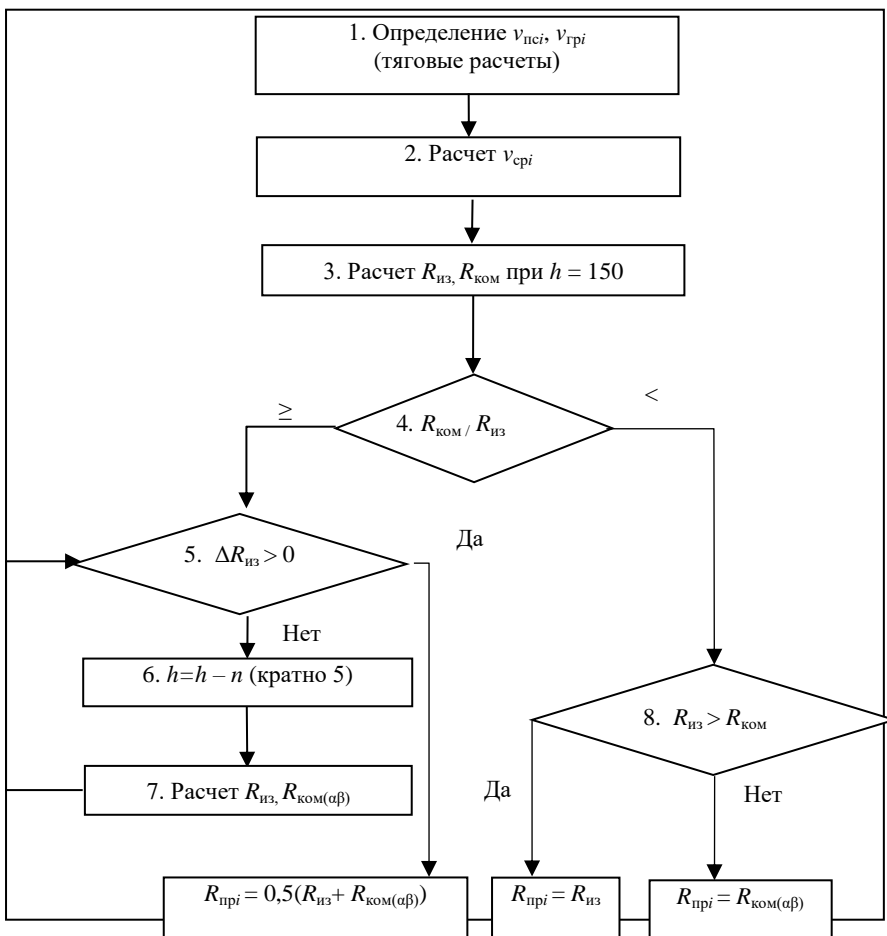


Рисунок 7.3 – Блок-схема алгоритма определения нормативных радиусов кривых



С использованием данных тяговых расчетов и заданных на заданный год размеров перевозок вычисляется средневзвешенная скорость движения поездопотока  $v_{cp}$  (блок 2).

В блоке 3 выполняется расчет радиуса кривой по условию одинакового износа рельсов  $R_{из}$  и комфортабельной езды пассажиров  $R_{ком}$  при максимальном возвышении 150 мм.

В блоке 4 выполняется сравнение радиусов, полученных по равномерному износу и по комфортабельности. На рисунке 7.4 показана зависимость  $R_{из}$  и  $R_{ком}$  от возвышения наружного рельса.

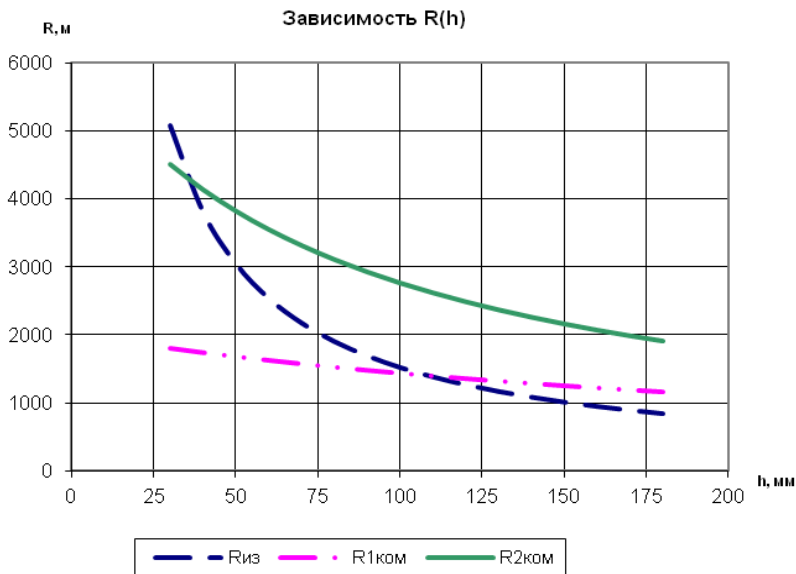


Рисунок 7.4 – График зависимости величины радиуса кривой от возвышения наружного рельса:  $R_{из}$  – радиус по условию одинакового износа рельсов;  $R_{1ком}$ ,  $R_{2ком}$  – радиусы по условию комфортной езды пассажиров соответственно в вагонах с наклоном кузова и в обычных вагонах

При  $R_{ком} \geq R_{из}$  необходимо установить положение точки пересечения кривых  $R_{ком}(h)$  и  $R_{из}(h)$ . При этом будут выполнены оба условия: по одинаковому износу и комфорту пассажиров. Необходима циклическая операция расчета до тех пор, пока разность между  $R_{ком}$  и  $R_{из}$  не будет  $\leq 0$  (блоки 5–8). На каждой итерации возвышение наружного рельса уменьшается на  $n$  мм, кратно 5 (блок 6).

При  $R_{ком} < R_{из}$  определение радиуса производится в блоке 8. В этом случае необходимо принимать больший из радиусов  $R_{из}$  и  $R_{ком}$  при  $h = 150$  мм. При этом если  $R_{из} > R_{ком}$ , то при проектном значении радиуса, равно  $R_{из}$ ,

будет обеспечено равномерное давление на рельсы и непогашенное ускорение меньше нормативного значения.

Если  $R_{\text{ком}} > R_{\text{из}}$ , то будут обеспечены комфортабельные условия, а давление на внутренний рельс и его износ будут большими (в данном случае износ определяется с учетом грузового движения).

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет определять величины радиуса кривой с учетом условий её эксплуатации – скоростей движения и размеров перевозок. Алгоритм реализуется в электронных таблицах Excel. На рисунке 7.5 приведен пример таких расчетов.

а)

Грузонапряженность $\Gamma_{\text{нт}}$ , млн ткм нетто/км в год	$n_{\text{пс}}$ , п. п./сут	$Q_{\text{пс}}$ , Т	$a_{\text{нп}}$ , м/с <sup>2</sup>	$\alpha$
45,066	25	651	0,5	6

б)

с наклоном кузова)

№ кривой	$v_{\text{пс}}$ , км/ч	$v_{\text{гр}}$ , км/ч	$v_{\text{ср}}$ , км/ч	$R_{\text{из}}$ , м	$R_{\text{ком}}$ , м	$R_{\text{рек}}$ , м	$h$ , мм
1	200	86	100	1012	1246	1394	108
2	150	90	97	934	702	934	150

Рисунок 7.5 – Определение радиуса в таблицах Excel

На рисунке 7.5, а приводятся характеристики условий эксплуатации реконструируемой железной дороги: размеры грузового движения по рассматриваемому пути  $\Gamma_{\text{н}}$ , т; число пар пассажирских поездов  $n_{\text{пс}}$ ; масса пассажирского поезда  $Q_{\text{пс}}$ ; непогашенное ускорение  $a_{\text{нп}}$ ; угол наклона кузова вагона  $\alpha$  (для обычного подвижного состава  $\alpha = 0$ ) [16].

На рисунке 7.5, б заданы скорости движения пассажирских ( $v_{\text{пс}}$ ) и грузовых ( $v_{\text{гр}}$ ) поездов по каждой кривой, полученные в результате тяговых расчетов. В последних двух колонках приведены результаты определения рекомендуемого радиуса  $R_{\text{рек}}$  и соответствующего ему возвышения наружного рельса  $h$ .

### 7.3 Эффективность повышения провозной способности железной дороги за счет введения в эксплуатацию тяжеловесных длинносоставных поездов

Перевозки грузов и пассажиров на железных дорогах с течением времени возрастают. Основными грузами, перевозимыми как внутри страны, так и на экспорт, являются нефть и нефтепродукты, строительные материалы, металлы, удобрения, зерно, цемент, древесина, щебень, калийная соль и др. Для перевозки грузов используются различные типы вагонов. Разделим их условно на две группы: большегрузные (восьмиосные, в том числе вагоны-цистерны) и остальные (четырёхосные – открытые грузовые вагоны, плат-

формы, вагоны для перевозки цемента, зерна, древесины, опрокидывающиеся, крытые и другие вагоны). Вагонный парк требует обновления. Средний возраст вагона – более 20 лет.

Дальнейшее развитие железнодорожного транспорта будет идти в направлении продолжения электрификации железных дорог и приобретения современного подвижного состава. Вождение тяжеловесных поездов (весом до 9000 т) имеет преимущества при электрической тяге, так как движение с расчетной скоростью на руководящем подъеме в 2 раза быстрее, чем при тепловозной тяге, быстрее разгон и торможение поезда, меньше себестоимость перевозок и расход условного топлива на тягу поездов.

К поездам повышенной массы и длины относятся поезда с массой более 6000 т и количеством осей не менее 350. При массе состава грузового поезда до 9000 т число осей не более 400, локомотивы расположены в голове поезда, а при массе состава до 12000 т и числе осей до 540 локомотивы расположены в голове и хвосте поезда. Возможная провозная способность при этом определяется по формуле, приведенной в подразделе 6.2. Средняя масса состава, сформированного из части большегрузных вагонов определяется по формуле

$$Q = (1 - \beta_i) q_i (l_{но} + \alpha) + \beta_i q (l_{но} + l + \alpha),$$

где  $\beta_i$  – соотношение тяжеловесных вагонов в составе по весу;

$q_i$  – средняя погонная нагрузка поездов повышенной массы и длины;

$l_{но}$  – существующая длина приемоотправочных путей;

$q$  – средняя погонная нагрузка обычного грузового поезда;

$\alpha$  – величина площадки раздельного пункта с учетом длины локомотивов и установки поезда,

$$\alpha = n_k l_k + 10,$$

$n_k, l_k$  – число локомотивов в поезде и длина локомотива;

$l$  – величина удлинения станционных путей.

Увеличение пропускной способности участков железной дороги связано с повышением массы состава грузового поезда, которая, в свою очередь, зависит от типа и грузоподъемности вагонов. Так как поезда часто формируются из разнотипных вагонов, что существенно влияет на длину поезда и на количество груза, которое он может перевезти, то его длина зависит от доли большегрузных вагонов в составе. Допустим, поезд сформирован из большегрузных (восьмиосных) вагонов. В этом случае длина поезда будет минимальной. Если же поезд сформирован из четырехосных вагонов, то длина поезда будет максимальной. Поэтому определение длины поезда в зависимости от соотношения различных групп вагонов в составе по количеству для различной массы состава является актуальной практической задачей.

Пропускная способность железных дорог может быть повышена за счет увеличения массы состава грузового поезда, полезной длины приемоотправочных путей, изменения структуры путевого развития, увеличения скорости движения поездов.

Увеличение массы состава грузового поезда предусматривает увеличение полезной длины приемоотправочных путей от существующей (850, 1050 м до максимальной в перспективе 1700, 2100 м), используя обращение сдвоенных поездов. Поэтому трасса железной дороги для реализации данной стратегии должна проектироваться с длиной площадок раздельных пунктов, допускающих увеличение длины путей до перспективной.

Полезная длина приемоотправочных путей определяется делением расчетной массы поезда на перспективу на среднюю погонную нагрузку состава, которая принимается равной для руды и угля 60–80 Н/м, для нефти и нефтепродуктов 55–75 Н/м, для остальных грузов – 40 Н/м за вычетом 50 м (длина локомотивов и установки поезда) по формуле

$$L_{\text{по}} = Qq - 50.$$

Увеличению скорости движения поездов способствует введение электрической тяги. Проектируемый продольный профиль железной дороги должен учитывать последующую электрификацию, в том числе по размещению раздельных пунктов и обеспечению выхода электровоза на расчетную характеристику при разгоне.

Изменение структуры путевого развития производится в поперечном и продольном направлениях. Если в перспективе не предусматривается строительство второго главного пути, то изменение путевого развития осуществляется только на раздельных пунктах для частично-пакетного движения. Площадки раздельных пунктов проектируются шириной, достаточной для укладки дополнительных боковых путей в перспективе. Если же предусматривается строительство второго главного пути, то увеличение пропускной способности предусматривает следующие этапы путевого развития: строительство разъездов для обеспечения непакетного графика движения поездов, сооружение двухпутных вставок, двухпутных перегонов, строительство второго главного пути [9].

При возрастании пропускной и провозной способности железных дорог увеличивается масса состава грузового поезда. Ее можно повысить за счет увеличения доли большегрузных вагонов в составе или обращения сдвоенных поездов. Исследуем влияние доли большегрузных вагонов в составе на длину поезда при различной массе состава.

Масса состава грузового поезда определяется из условия равномерного движения по расчетному подъему с расчетной скоростью [9].

Установленный предварительно наиболее трудный подъем принимается за расчетный ( $i_p$ ) и для него определяется масса состава из условия равномерного движения на расчетном подъеме:

$$Q = \frac{F_k - Pg(w'_o + i_p)}{(w''_o + i_p)g}, \quad (7.4)$$

где  $F_k$  – расчетная сила тяги локомотива, Н;  
 $P$  – масса локомотива, т;  
 $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.  
 $w'_o$  – основное удельное сопротивление движению локомотива, Н/кН;  
 $w''_o$  – средневзвешенное удельное сопротивление состава, Н/кН;  
 $i_p$  – расчетный подъем, ‰;

С другой стороны, масса состава, соответствующая полезной длине приемоотправочных путей, определяется по формуле

$$Q_{\text{поп}} = \frac{l_{\text{поп}} - l_{\text{л}}}{\sum \beta_i \frac{l_{\text{в}(i)}}{q_i}}, \quad (7.5)$$

где  $l_{\text{поп}}$  – существующая полезная длина приемоотправочных путей, м;  
 $\beta_i$  – соотношение в составе по массе (в долях единицы) вагонов данной категории;  
 $l_{\text{в}(i)}$  – одного вагона данной категории, м.

Задача использования большегрузных вагонов в составе грузового поезда формулируется следующим образом. На железной дороге обращаются поезда, сформированные из разнотипных вагонов: большегрузных количеством  $n_k$ , имеющих длину  $l_k$ , массу одного вагона  $q_k$ , и остальных количеством  $n_i$ , длиной  $l_i$ , массой вагона  $q_i$ . Требуется количественно оценить влияние большегрузных вагонов на длину грузового поезда  $L$  при различной массе состава. Пусть индекс  $k$  относится к большегрузным вагонам, а « $i$ » – к остальным. При указанных обозначениях длина состава

$$L = n_i l_i + n_k l_k + 10; \quad (7.6)$$

$$L = \left( \frac{\beta_i Q}{q_i} \right) l_i + \left( \frac{\beta_k Q}{q_k} \right) l_k = Q \left[ \left( \frac{\beta_i}{q_i} \right) l_i + \left( \frac{\beta_k}{q_k} \right) l_k \right]. \quad (7.7)$$

Заменив в формуле (7.4) весовые доли  $\beta_i$  количественным соотношением вагонов  $\gamma_i$ , получим

$$\beta_i = \frac{\gamma_i q_i}{\gamma_i q_i + \gamma_k q_k};$$

$$\beta_k = \frac{\gamma_k q_k}{\gamma_i q_i + \gamma_k q_k}.$$

Тогда длина поезда

$$L = \frac{Q(\gamma_i l_i + \gamma_k l_k)}{\gamma_i q_i + \gamma_k q_k}, \quad (7.8)$$

где  $Q$  – масса состава грузового поезда, т.

Обозначим  $\gamma_i + \gamma_k = 1$ , то  $\gamma_i = 1 - \gamma_k$ , получим

$$L = \frac{Q[(1 - \gamma_k)l_i + \gamma_k l_k]}{[(1 - \gamma_k)q_i + \gamma_k q_k]} = \frac{Q[l_i + \gamma_k(l_k - l_i)]}{[q_i + \gamma_k(q_k - q_i)]}; \quad (7.9)$$

$$L = \frac{Q\{l_i[1 + \gamma_k(l_k / l_i - 1)]\}}{\{q_i[1 + \gamma_k(q_k / q_i - 1)]\}}. \quad (7.10)$$

Обозначим  $l_i / l_k = n$  и  $q_i / q_k = m$ , тогда

$$L = \frac{Q\{l_i[1 + \gamma_k(n - 1)]\}}{\{q_i[1 + \gamma_k(m - 1)]\}}. \quad (7.11)$$

Всегда  $n > 1$  и  $m > 1$ , поэтому и  $m > n$  (по сравнению с вагонами меньшей грузоподъемности у большегрузных вагонов грузоподъемность увеличивается в большей степени, чем их длина [13]).

Приняв в формуле (7.8)  $\gamma_k = 0$  (в составе большегрузные вагоны отсутствуют), получим максимальную длину состава, и наоборот, если  $\gamma_i = 0$  (в составе только большегрузные вагоны), получим минимальную длину состава

$$L_{\max} = \frac{Ql_i}{q_i}; \quad L_{\min} = \frac{Ql_k}{q_k}. \quad (7.12)$$

При увеличении доли большегрузных вагонов ( $0 < \gamma_k \leq 1$ ) длина состава уменьшается на  $\Delta L = L_{\max} - L$  или, в процентах,

$$P = \left(\frac{\Delta L}{L_{\max}}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{L}{L_{\max}}\right) \cdot 100. \quad (7.13)$$

Подставляя в (7.10) значение  $L_{\max}$  и  $L$  из формул (7.8) и (7.9), получим после преобразований

$$P = \left\{ \frac{[\gamma_k(m - n)]}{[1 + \gamma_k(m - 1)]} \right\} \cdot 100. \quad (7.14)$$

Как следует из формулы (7.8), при отсутствии в составе большегрузных вагонов ( $\gamma_k = 0$ )  $p = 0$ . Максимальное уменьшение длины состава при увеличении доли большегрузных вагонов (при  $\gamma_k = 1$ ), %,

$$P_{\max} = \left(1 - \frac{m}{n}\right) \cdot 100. \quad (7.15)$$

Построен график зависимости  $p = f(\gamma_k)$  (рисунок 7.6), по которому определяется относительное изменение длины состава в зависимости от доли большегрузных вагонов.

В качестве примера определена длина состава поезда и её относительное изменение в зависимости от доли большегрузных вагонов, при следующих исходных данных. Состав сформирован из четырех- и восьмиосных вагонов: масса состава  $Q = 3250$  т, длина соответственно четырехосного и восьмиосного вагонов  $l_4 = 15$  м,  $l_8 = 20$  м, масса брутто четырехосного и восьмиосного вагонов  $q_4 = 80$  т,  $q_8 = 187,5$  т.

Выполнив расчеты по выше приведенным формулам, получим максимальную и минимальную длины состава грузового поезда  $L_{\max} = 610$  м, максимальную и минимальную длины состава грузового поезда  $L_{\min} = 346$  м. Результаты вычисления длины состава при различном соотношении большегрузных вагонов в составе по количеству, изменение при этом длины состава поезда в количественном и процентном соотношениях приведены в таблице 7.6.

Уменьшение длины состава при наличии только большегрузных вагонов составляет 43 % (рисунок 7.6). Относительное уменьшение длины поезда определяется по формулам (7.4)–(7.15) для любой массы состава.

Таблица 7.3 – Длина состава и относительное её изменение при различных соотношениях вагонов по количеству

$\gamma_k$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$L$ , м	610	512	448	404	371	346
$\Delta L$ , м	0	98	162	206	239	264
$p$ , %	0	16	27	34	39	43

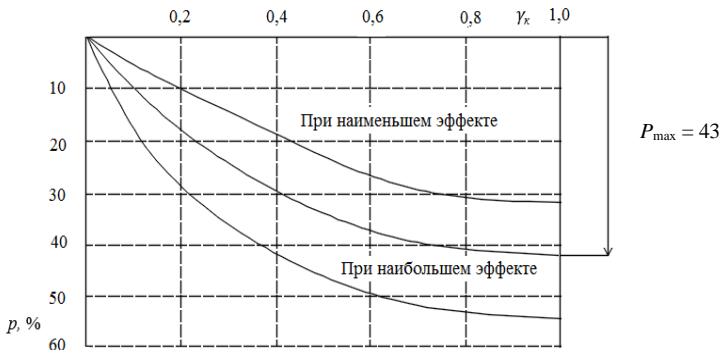


Рисунок 7.6 – Относительное уменьшение длины состава при увеличении доли большегрузных вагонов

Выполнив аналогичные подсчёты для других групп вагонов в поезде, получено максимальное уменьшение длины состава.

Наряду с относительным изменением длины состава используются в практической работе абсолютные значения длины состава при различной структуре вагонов.

В общем случае для определения длины состава  $L$  используется формула (7.9), которая при любом количестве групп вагонов с равными характеристиками принимает вид

$$L = Q(\sum_1^n \gamma_i l_i) / (\sum_1^n \gamma_i q_i), \quad (7.16)$$

где  $n$  – число вагонов в составе;

$\gamma_i, l_i, q_i$  – характеристики вагонов  $i$ -й группы.

Из формулы (7.13) видно, что длина состава пропорциональна коэффициенту  $\alpha$ .

$$\alpha = \left( \sum_1^n \gamma_i l_i \right) / \left( \sum_1^n \gamma_i q_i \right),$$

$$L = Q\alpha.$$

Для определения значений  $\alpha$  построена номограмма (рисунок 7.3, квадрант справа), по оси абсцисс которой размещены  $\left( \sum_1^k \gamma_i l_i \right)$ , а по оси ординат – значения  $\alpha$ . Серии прямых линий на номограмме соответствуют различным значениям  $\left( \sum_1^k \gamma_i q_i \right)$ .

Для практических расчетов удобна номограмма, дополненная вторым квадрантом с размещением на нем серии прямых, соответствующих различным значениям массы состава  $Q$ . Тогда по оси абсцисс определяется искомое значение длины состава  $L$  (левый квадрант на рисунке 7.7, последовательность отсчетов показана пунктиром со стрелками).

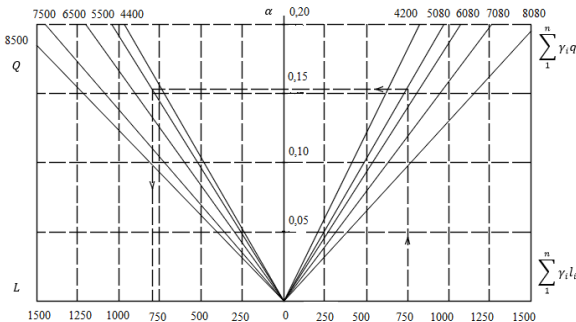


Рисунок 7.7 – Номограмма для определения длины состава



В случае использования большегрузных вагонов длина состава, определенная с учетом условия движения на расчетном подъеме с расчетной скоростью может оказаться меньше длины приемоотправочных путей. В этом случае возможно увеличение числа вагонов разных типов до длины, не превышающей полезную длину приемоотправочных путей, что позволит повысить весовую норму поезда [13].

Масса состава, определенная по полезной длине приемоотправочных путей, превышает определенную из условия движения поезда по расчетному подъёму, поэтому должны быть предусмотрены меры по преодолению затяжных подъемов с руководящим уклоном или близких к нему: использование разгонного толкания на части перегона или двойной тяги на всём перегоне.

## 7.4 Особенности электрификации железных дорог

Электрификация железнодорожных линий связана с развитием всего топливно-энергетического комплекса страны. Она снижает себестоимость перевозок, повышает производительность труда на транспорте, снижает нагрузку на экологию и экономит энергетические ресурсы на тягу поездов.

### Преимущества электрической тяги:

- большая пропускная и провозная способности (таблица 7.4) приведены основные показатели сравнения электрической и тепловозной тяги);
- меньшая себестоимость перевозок за счет рекуперации электрической энергии и больших скоростей движения;
- большая простота конструкции и меньшая первоначальная стоимость;
- отсутствие потребности в дорогом жидком топливе;
- возможность работы в суровых климатических условиях.

Таблица 7.4 – Показатели сравнения тепловозной и электрической тяги

Тип локомотива	$v_p$ , км/ч	$F_k$ , Н	$Q_t$ , т	$\Gamma_b$ , млн т/год
ВЛ80	46,7	482000	4300	24,2
2ТЭ10	23,4	540000	4900	17,1

### Недостатки электрической тяги:

- неавтономность тяги (зависимость от работы устройств энергоснабжения);
- большая первоначальная стоимость.

### Преимущества тепловозной тяги:

- автономность тяги (не зависит от работы других устройств);
- большой КПД.

**Недостатки тепловой тяги** – потребность в жидком топливе высокого качества;

- большая первоначальная стоимость;
- меньшая удельная мощность.

**Выбор вида тяги** производится по графикам овладения перевозками. Переход к электрической тяге может происходить не только в технический срок перехода по графику овладения перевозками, но и в экономически рациональный срок, который может наступить раньше технического срока (рисунок 7.8).

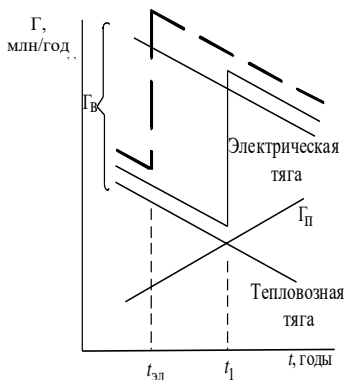


Рисунок 7.8 – Технический ( $t_1$ ) и экономически рациональный ( $t_{эл}$ ) сроки перехода

Год перехода к электрической тяге определяется на основе графиков овладения перевозками (рисунок 7.9) в следующем порядке.

1 Задаются несколько лет перехода к электрической тяге  $t_{эл} = 0; 4; 8; 12$  лет.

2 Схемы, соответствующие этим годам, показываются на графике овладения перевозками.

3 По каждой схеме определяются суммарные дисконтированные расходы:

$$S = K_0 + \sum_1^{t_{эл}} C_t^{т.т} \eta_t + K^{эл.т} + \sum_{t_{эл}+1}^T C_t^{эл.т} \eta_t - K_{возв} \eta_{эл}, \quad (7.17)$$

где  $K_0$  – первоначальные капиталовложения, производимые до сдачи дороги в эксплуатацию (с учетом затрат на приобретение подвижного состава и стоимости устройств энергоснабжения);

$C_t^{т.т}$   $C_t^{эл.т}$  – ежегодные эксплуатационные расходы при тепловозной и электрической тяге;

$K^{эл.т}$  – капиталовложения на электрификацию дороги;

$K_{возв}$  – возвратные суммы при переходе от тепловозной тяги к электрической;

$\eta_t$  – коэффициент приведения (дисконтирования), учитывающий уменьшение значимости затрат, совершаемых через  $t$  лет;

$T$  – год, ограничивающий период суммирования затрат.

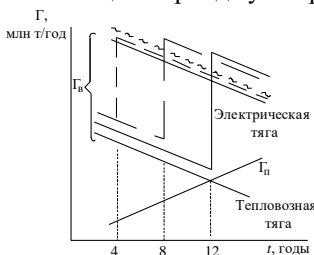


Рисунок 7.9 – Возможные схемы перехода от тепловозной тяги к электрической

4 Строится график зависимости  $S = f(t_{эл})$  (рисунок 7.10).

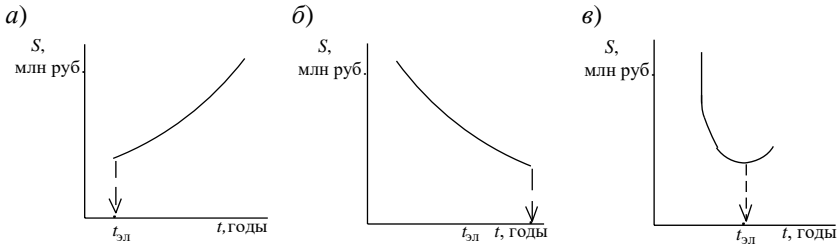


Рисунок 7.10 – Кривые  $S = f(t_{эл})$

Экономически рациональный срок перехода к электрической тяге  $t_{эл}$  определяется минимальными приведенными расходами. Случай, представленный на рисунке 7.10, а, – электрификация с первых лет эксплуатации – имеет место:

– при сложных топографических условиях (большой удельный вес напряженных ходов); преимущество электрической тяги проявляется в большей степени в этом случае (рисунок 7.11);

– при больших размерах перевозок

$$C = C_{зав} + C_{нез},$$

где  $C_{зав}$  – эксплуатационные расходы, зависящие от размеров движения, на один поезд (меньше при электрической тяге за счет рекуперации и большей скорости движения);

$C_{нез}$  – эксплуатационные расходы по содержанию постоянных устройств при электрической тяге (несколько больше за счет содержания контактной сети и тяговых подстанций).

При большом количестве поездов  $C_{зав}$  меньше при электрической тяге. Некоторое увеличение  $C_{нез}$  погашается уменьшением  $C_{зав}$ , и, таким образом, общие расходы при электрической тяге меньше, чем при тепловозной тяге;

– при дешевой электрической энергии и дорогом топливе.

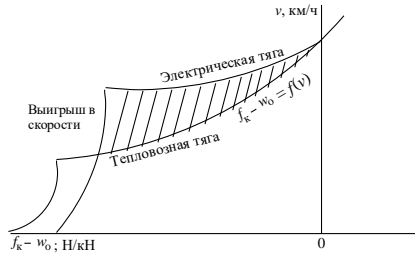


Рисунок 7.11 – Иллюстрация выигрыша в скорости при электрической тяге на диаграмме равнодействующих сил

Случай, представленный на рисунке 7.10, б) имеет место при легких профильных условиях, небольших размерах перевозок и дорогостоящем топливе. Случай, приведенный на рисунке 7.10, в – промежуточные условия.

**Анализ факторов, влияющих на электрификацию участков Белорусской железной дороги.** Железнодорожный транспорт обеспечивает связи между промышленными, сельскохозяйственными и другими отраслями народного хозяйства, способствует ускорению доставки грузов и пассажиров. Электрификация железной дороги направлена на повышение качества обслуживания пассажиров и конкурентоспособности перевозок грузов на внутреннем и международном рынках транспортных услуг.

Протяженность железных дорог в мире составляет около 1 млн км, из них 30 % электрифицировано. В Беларуси электрифицированные участки составляют 23 %. При меньшей длине электрифицированные железные дороги выполняют гораздо больший объем грузовых перевозок, чем на дорогах с тепловозной тягой.

Начало электрификации Белорусской железной дороги – 1963 год. В настоящее время работает с полной загрузкой электрифицированный участок II Общеευропейского транспортного коридора Брест – Минск – Орша – Госграница с Российской федерацией, а также часть IX Общеευропейского транспортного коридора Гудогай – Молодечно – Минск – Осиповичи-Бобруйск – Жлобин – Гомель.

В связи со строительством в Беларуси атомной станции, где будет вырабатываться электроэнергия на собственные нужды, преимущества электрификации железной дороги проявятся в полной мере. Появится возможность электрификации других участков Белорусской железной дороги и в первую очередь наиболее загруженных. Поскольку сразу это сделать невозможно, то следует установить этапность проведения электрификации Белорусской железной дороги. Кроме того, Беларусь находится в полигоне электрифицированных железных дорог России, Украины и Польши, поэтому электрификация приграничных участков имеет важное значение.

Перевод железной дороги на электрическую тягу ускоряет и облегчает электрификацию промышленности, сельскохозяйственных районов, где проходит электрифицированная железная дорога. Электрификация повышает эффективность и качество работы железной дороги, уменьшает ее эксплуатационные расходы.

На электрификацию железных дорог оказывают влияние многие факторы: рельеф местности, наличие источников электроснабжения, стоимость дизельного топлива и электроэнергии, размеры перевозок и темпы их роста, наличия электрифицированных дорог в регионе и другие факторы. При электрификации необходимо определить вид тока (постоянный или переменный), разместить тяговые подстанции, выявить влияние размеров пере-

возок на участки электрификации, определить массу состава грузового поезда, типы локомотивов и другие показатели [18].

Рельеф местности влияет на целесообразность использования электрической тяги. Она целесообразна в сложных топографических условиях, так как электровоз имеет расчетную скорость, в два раза большую, чем тепловоз при движении по руководящему уклону (подъему). В Беларуси рельеф равнинный, поэтому данное преимущество электрической тяги при небольших скоростях движения существенного влияния на электрификацию не оказывает.

Развитие всех отраслей народного хозяйства приводит к необходимости постоянного совершенствования транспортных связей страны. Особое внимание уделяется техническому перевооружению железнодорожного транспорта. Увеличение размеров перевозок приводит к необходимости повышения пропускной и провозной способностей дороги. Увеличение провозной способности может быть осуществлено за счет роста пропускной способности или массы поезда. Это увеличение может быть достигнуто без изменения существующего технического оснащения за счет более полного использования внутренних резервов (проведение организационно-технических мероприятий [2].

Реконструктивные мероприятия (электрификация железных дорог, введение более мощных локомотивов, новых устройств сигнализации и связи, реконструкция трассы, введение безостановочного скрещения поездов, укладка вторых и третьих путей и др.) позволяют существенно увеличить провозную способность железной дороги. Проведение реконструктивных мероприятий требует значительных капитальных вложений.

Увеличение провозной способности железной дороги во времени предполагает этапное увеличение массы состава грузового поезда, изменение структуры путевого развития и вида тяги (рост скорости движения поездов происходит в связи с введением электрической тяги).

Поэтапное наращивание провозной способности дороги прослеживается на графике овладения перевозками. Потребность в перевозках на каждой дороге с течением времени возрастает. Увеличить ее можно за счет совершенствования технического оснащения при минимальных средствах на ее периодическое этапное усиление. Принимаемые проектные решения при реконструкции железных дорог должны быть экономически обоснованными такими, чтобы не мешали движению поездов на существующих линиях и помехи были бы минимальными [5, 10].

Распределение электрифицированных линий по системам электрической тяги в Европе следующее: переменный ток – 55,6 %, постоянный ток 41,8 %, другие системы – 2,6 % (2,8 тыс. км).

Среди стран мира по протяженности электрифицированных линий лидирует Россия (40,3 тыс. км, или 9 % от общей протяженности железных дорог мира).

Новые Российские железные дороги (РЖД) будут строиться сразу под электрическую тягу преимущественно на переменном токе 25 кВ 50 Гц. Однако в отдаленной перспективе, по мере прогрессирующего развития силовой управляемой полупроводниковой техники, возможна постановка задачи применения для электрической тяги постоянного тока повышенного напряжения 24 кВ, для которого энергетическая эффективность в сопоставлении с тягой переменного тока может оказаться более высокой (по экономии энергии, КПД, электромагнитной совместимости) [25].

В Республике Беларусь в настоящее время железная дорога работает на переменном токе напряжением 27,5 кВ, 2×25 кВ и на постоянном токе напряжением 3,3 кВ. Развернутая длина имеющейся контактной сети – 3449,5 км [17].

Так как Беларусь расположена в полигоне использования электрической тяги на переменном токе (Россия, Украина, Польша), то этот вид тока целесообразно использовать и на Белорусской железной дороге.

Тяговые подстанции располагаются на расстоянии 40–50 км одна от другой при переменном токе, при постоянном токе – на расстоянии 20–25 км.

Тяговые подстанции размещаются на отдельных пунктах с путевым развитием. Так как Республика Беларусь характеризуется относительно равнинной местностью и большой плотностью размещения отдельных пунктов, то условия размещения тяговых подстанций соблюдаются и не составляют трудности.

Электрификация Белорусской железной дороги предусматривает использование современного, надежного и безопасного оборудования. Например, внедрение современных систем управления, диагностики и мониторинга состояния оборудования в ближайшем будущем позволит обеспечить работу тяговых подстанций без обслуживающего персонала.

Одним из условий увеличения скорости движения поездов до 160 км/ч является использование современной контактной подвески. Применение новых технологий снижает эксплуатационные затраты и продлевает срок службы контактной сети.

Исходя из грузонапряженности участки Орша – Витебск – Полоцк – Бигосово (включая участок Полоцк – Новополоцк), Барановичи – Лунинец – Калинковичи и Орша – Могилев – Жлобин определены в качестве полигона перспективной электрификации.

Республику Беларусь затронули условия развития и углубления международного сотрудничества (формирование международных транспортных коридоров), обеспечивающего возможность унификации параметров транспортной инфраструктуры и применения единой технологии перевозок.

На оптимальный срок электрификации железной дороги существенное влияние оказывает стоимость электроэнергии и дизельного топлива. В настоящее время интервал в стоимости дизельного топлива и электро-

энергии увеличивается, что ведет к сокращению размеров перевозок, определяющих переход на электрическую тягу. После выполнения расчетов по разработанной автором методике, определения экономически целесообразного грузооборота перехода на электрическую тягу установлено, что экономически целесообразный интервал для перехода к электрической тяге на Белорусской железной дороге составляет 20 млн т/год [15]. Дальнейшее увеличение стоимости дизельного топлива повлечет за собой уменьшение размеров перевозок, при которых целесообразна электрическая тяга.

**Сферы использования тепловозной, электрической и совместной тяги в перспективе на Белорусской железной дороге.** Железные дороги выполняют большой объем перевозок, тем самым обеспечивают надежные транспортные связи главных экономических районов страны. Белорусская железная дорога развивается в направлении увеличения провозной и пропускной способности, электрификации наиболее загруженных участков, повышения скоростей движения поездов, приобретения нового электроподвижного состава [14, 15].

Проходящие по территории Беларуси два транспортных коридора способствуют интеграции национальных железных дорог в мировую транспортную систему. Сроки доставки грузов из Китая и Юго-Восточной Азии до Западной Европы железнодорожными и автомобильными транспортными коридорами через государства – члены ЕврАзЭС в 2–2,5 раза дешевле, чем морским транспортом.

Электрифицированные линии стран СНГ, протяженность которых составляет 41 % общей протяженности сети железных дорог, выполняют 71,6 % всех перевозок. В основном это соотношение определяется Российскими железными дорогами, доля которых составляет 70 % сети электрифицированных железных дорог СНГ (15,4 % – Украина, 6,3 % – Казахстан, 8,5 % – остальные страны). В СНГ, как и в Европе, по системе переменного тока (25 КВ, 50 Гц) электрифицировано 53 % линий, на постоянном токе – 47 % (3КВ). Железные дороги Армении и Грузии электрифицированы полностью, а в Азербайджане электрическая тяга применена на 60 % линий (по протяженности и выполняет 84 % объема перевозок).

В 1961 году была электрифицирована самая длинная магистраль Москва – Байкал (15,5 тыс. км). Были переведены на электрическую тягу такие железнодорожные линии: Ленинград – Москва – Кавказ, Москва – Горький – Свердловск, Донбасс – Кузбасс – Чан, Москва – Брест и др. Протяженность электрифицированных железных дорог в 1986 году превысила 50 тыс. км, из 144,9 тыс. км их общей длины.

Основой реконструкции железнодорожного транспорта является электрификация главных направлений сети. Россия по-прежнему занимает первое место в мире по протяженности электрифицированных железных дорог – 44 тыс. км (50 % их общей длины).

Пропускная способность в грузовом направлении при электрической тяге на 10–20 % выше, чем при тепловозной, себестоимость перевозок ниже на 15–20 %. Затраты цветного металла при электрификации составляют от 5 до 10 т/км. Электрическая тяга неавтономна. Введение электрической тяги эффективно на двухпутных магистралях большой грузонапряженности, на участках с большим пассажирским и пригородным движением на грузонапряженных однопутных линиях с трудными условиями рельефа местности.

Анализ показывает, что при сохранении существующих темпов реконструкции полигон электрифицированных железных дорог к 2030 году будет составлять 85 тыс. км (73 %).

Интересная деталь прогнозов деятельности РЖД на 2030 год – цифры, характеризующие грузопотоки Байкало-Амурской магистрали. К 2030 году интенсивность перевозок на БАМе увеличится практически в десять раз, что в цифровом эквиваленте будет соответствовать 70 млн т/км. Причина такого существенного увеличения – разработка и освоение новых месторождений полезных ископаемых на территории Якутии, а также на других территориях Дальнего Востока [25].

Интересен опыт электрификации железных дорог Южно-Африканской республики (ЮАР), которая имеет протяженность электрифицированной сети до 80 % (четвертое место в мире по абсолютной протяженности электрифицированных линий). На железных дорогах ЮАР применяются три системы электротяги: 25 КВ, 50 Гц переменного тока, 3 КВ постоянного тока и 50 КВ, 50 Гц переменного тока. Последняя система тока – единственная в мире на линиях такой протяженности. Она обеспечивает угольные перевозки по замкнутому маршруту Сайшен – Салданья от угольного и рудного месторождений до побережья океана. Это одна из наиболее реальных систем, которая может быть использована при создании в перспективе супермощных электрифицированных магистралей для грузонапряженных железнодорожных участков.

Протяженность электрифицированных дорог мира составляет около 50 % длины, а выполняемый грузооборот достигает 80 % от всего объема перевозок. На Белорусской железной дороге электрифицированные участки 20,5 % выполняют 36 % грузооборота и 30 % пассажирооборота, а по прогнозу при электрификации 50 % железнодорожной сети дороги к 2030 году объем перевозок на таких линиях достигнет 80–84 %.

Электрификация направлена на уменьшение издержек за счет перехода с тепловозной тяги на электрическую (себестоимость перевозок снижается примерно на 10–15 %), на увеличение производительности локомотива, так как скорость электровозов на руководящем подъеме может вдвое превышать скорость тепловозов (например, расчетная скорость тепловоза 2ТЭ10Л 23,4 км/ч, а электровоза ВЛ80<sup>к</sup> 46,7 км/ч, т. е. вдвое больше). Экономический эффект от электрификации будет получен также за счет пропуска тяжеловесных грузовых поездов.



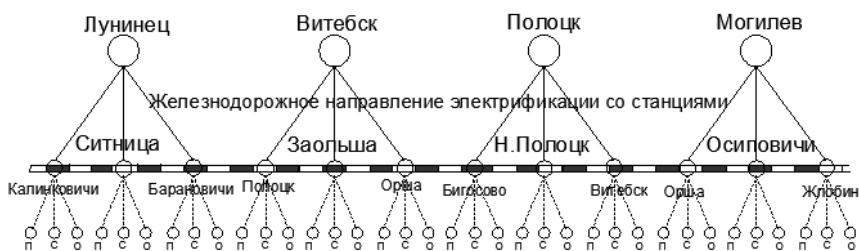
В связи со строительством горно-обогатительного комбината на базе месторождения «Ситницкое» нагрузка на станцию Ситница будет увеличиваться. Поэтому будет целесообразным для снижения себестоимости перевозок электрифицировать участок Барановичи – Лунинец – Ситница – Калинковичи (с учетом реализации проекта строительства второго пути на перегоне Ситница – Лахва) [17].

При определении направлений перспективной электрификации необходимо учесть участки, после электрификации которых создается электрифицированное направление. Например, электрификация участков Жлобин – Калинковичи – Барбаров и Молодечно – Гудогай, с обходом Колодищи – Шабаны, Гатово – Михановичи, позволила электрифицировать полностью транспортный коридор IXВ в пределах Беларуси. Осталось электрифицировать приграничные участки Украины и России.

Одним из основных факторов комплексного решения об электрификации является грузонапряженность участков, которую необходимо прогнозировать на перспективу.

В плане развития электрифицированной сети Белорусской железной дороги к 2030 году должны быть электрифицированы основные грузонапряженные участки, чтобы максимально использовать экономическую эффективность электровозной тяги. Схема электрификации к 2030 году наиболее загруженных участков направлений приведена на рисунке 7.12.

#### Станции, переходящие на работу с электрической тягой



#### Прогноз развития размеров перевозок:

о – оптимистический; п – пессимистический; с – размеры перевозок в настоящее время

Рисунок 7.12 – Схема электрификации участков железной дороги к 2030 году

Приоритетом для развития дороги является повышение скоростей движения поездов. Уже сегодня на отдельных участках маршрута Минск – Брест электропоезда могут разгоняться до 160 км/ч, на некоторых перегонах между Минском и Гомелем – до 140 км/ч. Одним из ключевых направлений деятельности дороги по-прежнему является увеличение объемов перевозок грузов ускоренными контейнерными поездами [16].

Требуется детальная проработка полигона перспективной сети электрификации Белорусской железной дороги с учетом выполнения технико-экономического обоснования, информации от железнодорожных администраций России, Латвии, Украины по прогнозам объемов и структуре перевозок, а также о решении этих стран по вопросам электрификации приграничных с Беларусью участков. В период с 2021 по 2025 год основная часть финансирования направлена на развитие железнодорожной инфраструктуры.

Планируется внедрение электрификации на ряде железнодорожных участков, развитие систем автоматики, телемеханики и связи, приобретение тягового подвижного состава, вагонов грузового и пассажирского парков. Финансирование предусматривается за счет собственных средств Белорусской железной дороги, заемных средств, средств республиканского бюджета.

Одной из важнейших задач развития железнодорожного транспорта является обоснование оптимальных пропорций электрической и тепловозной тяги и поддержка их в течение длительного времени. Для ее решения необходимо согласовать цели и критерии оценки работы дороги с электрической тягой и связанных с ней других отраслей народного хозяйства. Иногда цели системы не согласованы с целями подсистем. Например, для транспортной системы целью является максимальная загрузка и сдача максимального количества маршрутов. Для предприятия целью является максимальная погрузка своей продукции. В результате этого возможна ситуация, когда предприятие не желает передавать вагоны своего парка на другие подъездные пути.

С целью развития железнодорожной транспортной сети разработана методика определения сфер экономической целесообразности использования тепловозной и электрической тяги. Для этого предлагается воспользоваться оптимизационными методами для определения оптимального решения применения электрической и тепловозной тяги на железной дороге. При разработке методики учитываются неопределенность и неполнота исходной информации о перспективном грузообороте, которая может изменяться в широких пределах и при различном сочетании исходных данных приводит к появлению нескольких оптимальных решений, каждое из которых может оказаться оптимальным.

В работах [14, 15] приводятся основы разработки методики определения сфер экономической целесообразности использования тепловозной и электрической тяги на железной дороге. Была разработана схема получения сфер целесообразного использования электрической и тепловозной тяги в зависимости от грузонапряженности и установлено, что если грузонапряженность участка  $\Gamma$  меньше критической грузонапряженности  $\Gamma_{кр}$ , то целесообразно использовать тепловозную тягу, а если больше – то электрическую.

Неопределенность исходных данных приводит к появлению зоны равно-экономических решений целесообразного использования электрической и тепловозной тяги ( $\Gamma_{min} - \Gamma_{max}$ ). Нижняя граница зоны получается при пере-

сечении нижней кривой  $E_{\text{пр}} = f(\Gamma)$  и верхней кривой  $E_{\text{пр}} = f(\Gamma)$ . Дальняя граница определяется точкой пересечения нижней кривой  $E_{\text{пр}} = f(\Gamma)$  и верхней  $E_{\text{пр}} = f(\Gamma)$  [14].

В связи с появлением зоны равноэкономических решений авторами вводится понятие критической грузонапряженности. Под критической грузонапряженностью  $\Gamma_{\text{кр}}$  понимается грузонапряженность участка железной дороги с существующими в настоящее время основными техническими параметрами и средствами технического оснащения дороги, действующим графиком движения поездов, ценами на дизельное топливо и электроэнергию на тягу поездов.

Особенность задачи выбора участков железной дороги для введения на них электрической тяги состоит в том, что железнодорожная сеть в республике Беларусь уже практически сформирована и поэтому направление перевозок по участкам можно считать заданным. Сеть электрифицированных участков железной дороги находится пока еще в стадии развития. Поэтому возможна следующая постановка задачи.

Имеется  $k$  железнодорожных участков ( $k = 1, 2, 3, \dots, n$ ), на каждом из которых возможна электрификация. Задан ориентированный граф транспортной сети, вершинами которого являются станции начала электрификации ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) и конца ( $j = 1, 2, \dots, n$ ), каждое ребро графа представляется в виде совокупности дуг, соответствующих либо тепловозной, либо электрической тяге, взаимодействующим в пункте изменения вида тяги (обычно на станциях,  $p = 1, 2, 3$ , где 1 – тепловозная тяга, 2 – электрическая тяга, 3 – тепловозная или электрическая вместе), а также грузонапряженность каждого звена графа (участка железной дороги): потребная  $\Gamma_{\text{п}}$  и наличная  $\Gamma_{\text{в}}$ .

Электрификация участка железной дороги, а следовательно, изменение (технических параметров) транспортной инфраструктуры будет производиться один раз. Таким образом, исходными величинами служат векторы параметров линии и сроков изменения параметров. Изменение параметров требует единовременных капиталовложений, которые зависят от вектора параметров:

$$K_{ij} = K_{ij}(L).$$

Приведенные к годовым эксплуатационные расходы, изменяющиеся в результате роста перевозок, зависят от величины параметров, характеризующих техническое оснащение линии и ее провозную способность

$$C_{ij} = C_{ij}(\Gamma, L).$$

Суммарные затраты за весь период эксплуатации должны быть минимальными.

Требуется определить оптимальное число участков электрификации из условия обеспечения минимума приведенных расходов при этапном освоении выделенных инвестиций в условиях неопределенности исходных дан-

ных (грузонапряженности на перспективу, цен на дизельное топливо и электроэнергию и др.)

Экономико-математическая модель развития транспортной инфраструктуры электрифицируемой железнодорожной линии и возрастающих в перспективе размеров перевозок сводится к нахождению минимума функции

$$E_{ij} = L, \Gamma \left[ \sum_{i=1}^n k_{ij}(L) \cdot E_n + \sum_{i=1}^n C_{ij}(L) X_{ij}(\Gamma) \right].$$

При следующих ограничениях

$$K_{ij} \leq S_{ij}; X_{ij} > 0; X_{ij} \leq N_{ij};$$

$$\Gamma_{\Pi}(t_i) \leq \Gamma_{\text{В}}(L, t_i); t = 1, 2, \dots, n,$$

где  $E_n$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

$K_{ij}$  – капитальные вложения в инфраструктуру электрификации участка железной дороги (контактная сеть, опоры, тяговые подстанции, устройства связи и СЦБ и др.);

$C_{ij}$  – удельные эксплуатационные расходы;

$X_{ij}$  – количество грузовых поездов, следующих по направлению от начальной станции электрификации до конечной;

$S_{ij}$  – капиталовложения, выделенные на электрификацию железнодорожного участка;

$\Gamma_{\Pi}, \Gamma_{\text{В}}$  – потребная и наличная провозные способности участка дороги;

$N_{ij}$  – возможная пропускная способность;

$t_i$  – год эксплуатации.

Обязательно выполнение условия на любом этапе  $\Gamma_{\text{В}} > \Gamma_{\Pi}(L, t_i; i=1, 2, > 3, \dots, n)$ , т. е. наличная провозная способность должна быть всегда больше потребной. Для превращения представленной математической модели в общем виде в расчетную установлена зависимость провозной способности от показателей транспортной инфраструктуры линии и влияние их на эффективность принятых решений.

Для решения поставленной задачи разрабатывается комплекс вариантов перехода на электрическую тягу, различающихся между собой размещением участков тепловозной и электрической тяги на рассматриваемом направлении. Возможны варианты функционирования с одно-временным использованием тепловозной и электрической тяги (зона равноэкономических решений) [14].

При существующей грузонапряженности распределение железнодорожных участков по зонам с тепловозной и электрической тягой, а также зоной равноэкономических решений приведено на рисунке 7.13.

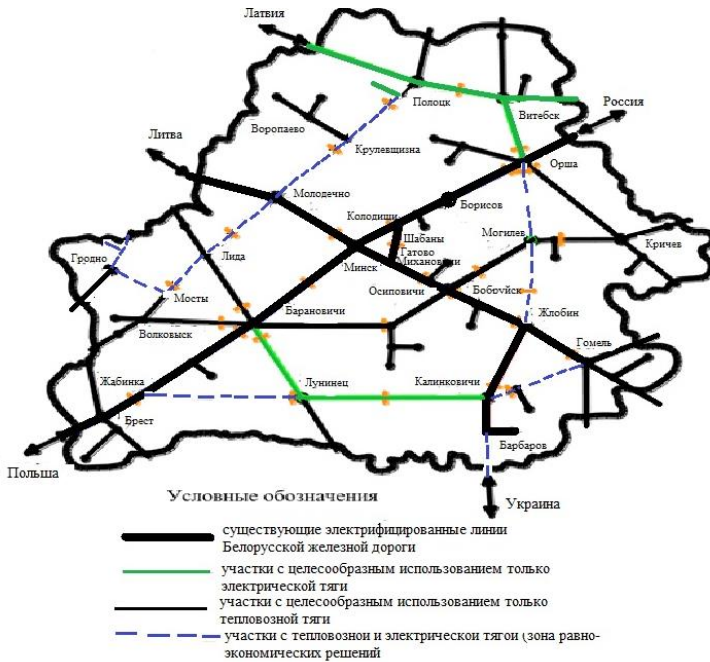


Рисунок 7.13 – Распределение участков Белорусской железной дороги с электрической, тепловозной тягой и зоной равноэкономических решений

Введение показателя регулярности перевозок в систему расчетов по установлению зон использования тепловозной и электрической тяги позволяет оценить потери от нарушения технологии производства, затраты на строительство складов у производителей и потребителей продукции.

Разработанная методика определения сфер экономической целесообразности использования тепловозной и электрической тяги позволила составить план развития электрификации Белорусской железной дороги как на ближайшую, так и на отдаленную перспективу.

**Анализ влияния основного сопротивления движению на массу состава грузового поезда при различных руководящих уклонах с целью их уположения при увеличении весовой нормы поезда.** Требуется установить зависимости относительного изменения массы состава грузового поезда от степени увеличения или уменьшения относительных значений основного удельного сопротивления состава при различных руководящих уклонах. При повышении весовой нормы поезда некоторые подъемы становятся участками, ограничивающими провозную способность. В этом случае рекомендуется разгонное толкание поезда дополнительным локомотивом на затяжном подъеме или уменьшение (уположение) расчетного подъема.

В программах развития железнодорожного транспорта Республики Беларусь на 2021–2025 годы и на перспективу до 2030 года одной из задач является повышение пропускной и провозной способностей отдельных участков Белорусской железной дороги [3, 16]. Провозная способность участков железной дороги зависит от числа поездов и средней массы состава грузового поезда. Постоянно ставшаяся задача повышения массы состава привела к вождению поездов повышенной массы и длины. Возможно вождение длинносоставных поездов с несколькими локомотивами, расположенными в разных местах состава. Освоена система телеуправления всеми локомотивами в поезде с головного локомотива.

Для пропуска длинносоставных поездов необходимо удлинение приемоотправочных путей на некоторых раздельных пунктах для возможности остановки поезда при необходимости. Обращение поездов повышенной массы и длины дает ощутимый народнохозяйственный эффект за счет уменьшения количества поездов, пропускаемых участком железной дороги.

Повышение массы состава возможно за счет использования внутренних резервов имеющегося технического оснащения, что не требует значительных капитальных вложений (повышение массы состава за счет более полного использования кинетической энергии поезда) [8]. Реконструктивные же мероприятия требуют изменения основных технических параметров дороги и значительных капитальных вложений: обращение более мощных локомотивов и более совершенных устройств связи и СЦБ; удлинение приемоотправочных путей; введение безостановочного скрещения поездов; улучшение трассы (уположение (уменьшение) расчетного подъема, спрямление трассы, улучшение плана линии); электрификация железнодорожных направлений.

При начале работы первой очереди Белорусской АЭС электроэнергия подешевеет и электрификация особо грузонапряженных участков станет целесообразной. Этому посвящены работы [7, 8, 14, 15].

В связи с этим исследуется повышение весовой нормы состава грузового поезда на участке железной дороги и возможность его проезда при этом по руководящему или близким к нему по крутизне подъемам при электрической тяге за счет организационно-технических (разгонное толкание) и реконструктивных (уположение расчетного подъема) мероприятий.

**Зависимость массы состава от основного удельного средневзвешенного сопротивления состава при различных руководящих уклонах.** Определяется величина  $w_0$  при расчетной скорости движения поезда с локомотивом ВЛ80<sup>к</sup> и БКГ2 при скорости длительного режима по железнодорожному пути для состава, сформированного из четырех- и восьмиосных вагонов на роликовых подшипниках с целью определения расчетной массы этих составов при движении на различных руководящих уклонах для исследования дальнейшей возможности повышения весовой нормы поезда. Весовые характеристики вагонов и их соотношение в составе по количеству приведены в таблице 5.2.

В качестве исходного значения основного удельного средневзвешенного сопротивления состава принимается то, которое соответствует структуре и весовым характеристикам вагонов, приведенным в таблице 5.2.

На основании исходных данных о каждой группе вагонов в составе и формул, приведенных в разделе 5 определяются масса вагонов и средняя нагрузка от оси вагона на рельсы

$$\begin{aligned} q_8 &= 60,0 + 1 \cdot 125,5 = 185,5 \text{ т}; & q_{0(8)} &= 185,5 / 8 = 23,2 \text{ т}; \\ q_4 &= 21,0 + 0,97 \cdot 61,0 = 79,0 \text{ т}; & q_{0(4)} &= 78,4 / 4 = 19,7 \text{ т}. \end{aligned}$$

Основное удельное сопротивление восьмиосных и четырехосных вагонов определяется по формулам ПТР [18]:

$$\begin{aligned} w''_{(8)} &= 0,7 + (6 + 0,038v + 0,0021v^2) / 23,2 = 0,96 + 0,0016v + 0,000091v^2; \\ w''_{(4)} &= 0,7 + (3 + 0,1v + 0,0025v^2) / 19,7 = 0,85 + 0,0051v + 0,000127v^2. \end{aligned}$$

Соотношение вагонов в составе по весу:

$$\begin{aligned} \beta_8 &= 50 \cdot 185,5 / (50 \cdot 185,5 + 50 \cdot 79,0) = 0,70; \\ \beta_4 &= 50 \cdot 79,0 / (50 \cdot 185,5 + 50 \cdot 79,0) = 0,30. \end{aligned}$$

Проверка:  $\beta_8 + \beta_4 = 0,70 + 0,30 = 1$ .

Основное удельное сопротивление состава, сформированного из четырехосных и восьмиосных вагонов соотношением по количеству по 50 % (таблица 5.2),

$$w''_0 = (0,96 + 0,0016v + 0,000095v^2) \cdot 0,70 + (0,85 + 0,0051v + 0,000127v^2) \cdot 0,30 = 0,93 + 0,0027v + 0,00010v^2.$$

При расчетной скорости электровоза ВЛ80<sup>к</sup> ( $v = 44,2$  км/ч)

$$\begin{aligned} w'_0 &= 0,93 + 0,0027 \cdot 44,2 + 0,00010 \cdot 44,2^2 = 1,27 \text{ Н/кН}; \\ w''_{(8)} &= 0,96 + 0,0016 \cdot 44,2 + 0,000095 \cdot 44,2^2 = 1,23 \text{ Н/кН}; \\ w''_{(4)} &= 0,85 + 0,0051 \cdot 44,2 + 0,000127 \cdot 44,2^2 = 1,37 \text{ Н/кН}, \end{aligned}$$

при скорости длительного режима движения 65 км/ч электровоза БКГ2

$$w''_0 = 1,64 \text{ Н/кН}, \quad w''_{(8)} = 1,45 \text{ Н/кН}, \quad w''_{(4)} = 1,72 \text{ Н/кН}.$$

Масса состава грузового поезда с учетом увеличения (уменьшения) основного удельного сопротивления на коэффициент  $\alpha$  определяется по формуле

$$Q = [F_p - (w'_0 + i_p) P g] / (\alpha w''_0 + i_p), \quad (7.18)$$

где  $F_p$  – сила тяги локомотива при расчетной скорости, Н;

$P$  – масса локомотива, т;

$w'_0$  – основное удельное сопротивление локомотива при движении под тягой Н/кН;

$i_p$  – расчетный (руководящий) подъем, ‰, или дополнительное сопротивление от подъема, Н/кН;

$w''_0$  – средневзвешенное основное удельное сопротивление состава, Н/кН;

$\alpha$  – коэффициент изменения основного сопротивления.

При коэффициенте  $\alpha = 1$ , руководящих уклонах равных 6, 9, 12 ‰ для локомотивов ВЛ80<sup>к</sup> ( $v = 44,2$  км/ч,  $F_p = 460000$  Н,  $P = 184$  т) и БКГ2 ( $v = 65$  км/ч,  $F_p = 514000$  Н,  $P = 184$  т), определенная по формуле (7.8) масса вагонного состава приведена в таблицах 7.5 и 7.6.

Таблица 7.5 – Масса состава грузового поезда с локомотивом ВЛ80<sup>к</sup>

В тоннах

Q, т	$w''_0 = 1,27$ Н/кН			$w''_{(8)} = 1,23$ Н/кН			$w''_{(4)} = 1,37$ Н/кН		
	$i_p = 6 ‰$	$i_p = 9 ‰$	$i_p = 12 ‰$	$i_p = 6 ‰$	$i_p = 9 ‰$	$i_p = 12 ‰$	$i_p = 6 ‰$	$i_p = 9 ‰$	$i_p = 12 ‰$
	6100	4265	3260	6133	4280	3270	6014	4221	3233

Таблица 7.6 – Масса состава грузового поезда с локомотивом БКГ2

В тоннах

Q, т	$w''_0 = 1,64$ Н/кН			$w''_{(8)} = 1,45$ Н/кН			$w''_{(4)} = 1,72$ Н/кН		
	$i_p = 6 ‰$	$i_p = 9 ‰$	$i_p = 12 ‰$	$i_p = 6 ‰$	$i_p = 9 ‰$	$i_p = 12 ‰$	$i_p = 6 ‰$	$i_p = 9 ‰$	$i_p = 12 ‰$
	6500	4620	3565	6675	4700	3615	6440	4580	3545

Результаты расчетов по всем вариантам при различных коэффициентах  $\alpha$ , руководящих уклонах 6,9,12 ‰ для поезда с четырехосными вагонами, ведомого локомотивом ВЛ80<sup>к</sup> ( $F_{кр} = 460000$  Н,  $P = 184$  т) представлены в таблице 7.7. Помимо значений массы состава  $Q$  определяются абсолютное ( $\Delta Q$ ) и относительное ( $\Delta Q / Q_{(i)}$ , %) изменения массы состава в зависимости от изменения (увеличения или уменьшения) основного сопротивления. По данным таблицы 7.7 строятся кривые  $\Delta Q / Q_{(i)} = f(w''_0 / w''_{oi})$  при различных руководящих уклонах (рисунок 7.14). Аналогичные расчеты выполнены для поезда с восьмиосными вагонами и смешанного состава с локомотивом БКГ2.

Таблица 7.7 – Характеристики изменения массы состава при изменении основного сопротивления

A	$\alpha \cdot w''_0$	$i_p = 6 ‰$			$i_p = 9 ‰$			$i_p = 12 ‰$		
		Q, т	$\pm \Delta Q$ , т	$\pm \Delta Q / Q_{(i)}$ , %	Q, т	$\pm \Delta Q$ , т	$\pm \Delta Q / Q_{(i)}$ , %	Q, т	$\pm \Delta Q$ , т	$\pm \Delta Q / Q_{(i)}$ , %
1,5	2,06	5500	-514	-8,5	3958	-263	-6,2	3074	-159	-4,9
1,4	1,92	5597	-417	-6,9	4009	-217	-5,1	3105	-128	-4,0
1,3	1,78	5723	-291	-4,8	4061	-160	-3,8	3137	-96	-3,0
1,2	1,64	5802	-212	-3,5	4114	-107	-2,5	3169	-64	-2,0
1,1	1,51	5902	-112	-1,9	4165	-56	-1,3	3199	-34	-1,1
1,0	1,23	6014	-	-	4221	-	-	3233	-	-
0,9	1,10	6131	+17	+1,9	4279	+58	+1,3	3267	+34	+1,1
0,8	0,96	6243	+229	+3,8	4334	+113	+2,6	3300	+37	+2,1
0,7	0,82	6369	+355	+5,9	4395	+174	+4,1	3335	+102	+3,2
0,6	0,69	6500	+486	+8,1	4458	+237	+5,6	3371	+138	+4,3
0,5	0,62	6626	+612	+10,2	4517	+296	+7,0	3406	+173	+5,4



На основании данных таблицы 7.7 и анализа очертания кривых (рисунок 7.14) при увеличении основного сопротивления движению состава на 50 % масса состава уменьшается на 514 т (8,5 %), а при уменьшении сопротивления на 50 % – увеличивается на 612 т (10,2 %) при руководящем уклоне 6 ‰; при руководящем уклоне 9 ‰ соответственно уменьшается на 263 т (6,2 %) и увеличивается на 296 т (7 %). Таким образом, уменьшение основного сопротивления состава приводит к увеличению его массы и длины [9], которые следует учесть при преодолении расчетного подъема, причем они больше на более пологих руководящих уклонах.

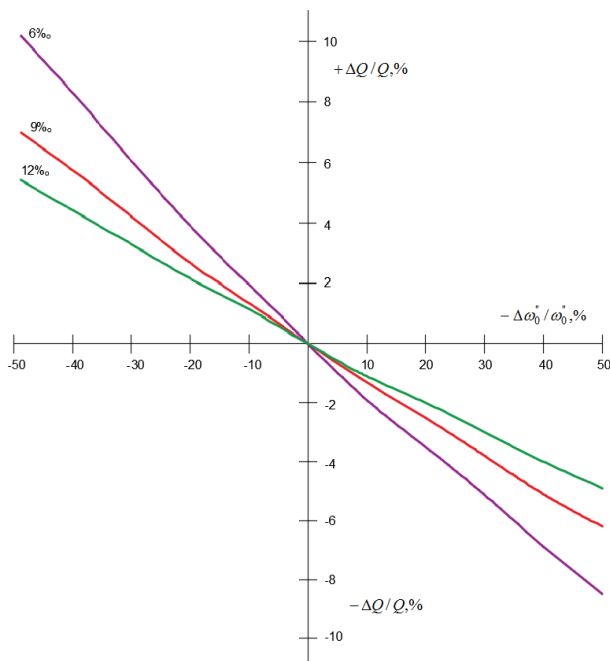


Рисунок 7.14 – Относительное изменение массы состава при изменении основного сопротивления

**Повышение провозной способности железной дороги за счет использования внутренних резервов.** Для того чтобы повысить вес состава, необходимо для существующей на дороге весовой нормы построить кривую скорости движения поезда и выявить перегоны, на которых возможно повышение весовой нормы за счет внутренних резервов (использования накопленной кинетической энергии поезда).

Допустим, на 1, 3, 4-м перегонах возможно повышение весовой нормы состава, так как на подъемах не достигается расчетная скорость. На 2-м пе-

регоне поезд движется с расчетной скоростью на участке определенной длины, зависящей от скорости подхода. В этом случае возможно одно из организационно-технических мероприятий, таких как:

- отмена остановки на раздельном пункте, предшествующем ограничивающему перегону;
- движение с расчетной скоростью не более 500 м.

Если указанных мероприятий недостаточно, то может быть осуществлено одно из следующих мероприятий, требующих некоторых капитальных вложений.

1 Разгонное толкание. Вспомогательный локомотив-толкач ставится в конце поезда без прицепки и осуществляет толкание в пределах раздельного пункта без выхода на перегон.

2 Толкание на части перегона. Если расчетный подъем находится в середине перегона, то локомотив-толкач используется без прицепки и разгонное толкание применяется в середине перегона. Затем локомотив-толкач возвращается на раздельный пункт раньше, чем поезд прибудет на следующий раздельный пункт.

3 Применение двойной тяги на всём перегоне. Если ограничивающий подъем носит затяжной характер или расположен в конце перегона, то целесообразно второй локомотив использовать на всей длине перегона.

**Уположение (смягчение) или уменьшение расчетного подъёма с целью увеличения массы состава поезда.** Масса состава грузового поезда определяется по формуле (7.18). Каждой весовой норме на дороге соответствует расчетный или эквивалентный по массе подъем, величина которого определяется из выражения

$$i_p = i_{\text{эКВ}} = \frac{F_k - (Pg w'_0 + Q_{\text{сущ}} g w''_0)}{Pg + Q_{\text{сущ}} g}, \quad (7.19)$$

где  $P$  – вес локомотива, Н;

$Q_{\text{сущ}}$  – существующая весовая норма состава, т;

$i_p$  – руководящий уклон, ‰.

На некоторых перегонах железной дороги имеются подъемы круче расчетного, которые носят, как правило, не затяжной характер, преодолеваются за счет накопленной кинетической энергии поезда. Если на дороге повышается весовая норма поезда  $Q_{\text{пов}}$ , то некоторые из них становятся ограничивающими. Чтобы не допустить снижения скорости ниже расчетной, часть таких подъемов смягчается (рисунок 7.15). Величина смягченного (эквивалентного) уклона определяется по формуле (7.20)

$$i = [F_p - (Pg w'_0 + Q_{\text{пов}} g \alpha w''_0)] / (Pg + Q_{\text{пов}} g), \quad (7.20)$$

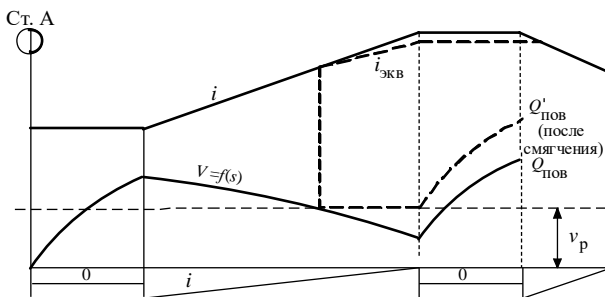


Рисунок 7.15 – Уменьшение (смягчение) величины расчетного подъема

Величина эквивалентных уклонов после повышения весовой нормы состава приведена в таблице 7.8. Эквивалентные уклоны соответствуют движению поезда расчетной массы 4221 т при расчетной скорости 44,2 км/ч с локомотивом ВЛ80<sup>к</sup> и 4580 т при скорости длительного режима 65 км/ч с локомотивом БКГ2 при руководящем уклоне 9‰. Если повышать эти весовые нормы, то, чтобы поезд проехал подъем (см. рисунок 7.15) со скоростями не ниже указанных, следует уменьшить руководящий уклон до величины эквивалентного уклона, указанной в таблице 7.8.

Необходимость определения массы состава с учетом использования кинетической энергии поезда возникает в тех случаях, когда на рассматриваемом перегоне наибольшие по крутизне подъемы не являются затяжными. Если подъем не затяжной, то он может быть преодолен за счет разгона. При этом чем выше начальная скорость перед подъемом, тем больший по протяжению или крутизне подъем может быть преодолен с использованием кинетической энергии поезда. Повышенная масса состава будет принята правильно, если при преодолении труднейшего затяжного подъема скорость в конце его будет равна расчетной скорости  $v_p$  для данной серии локомотива (рисунок 7.15). Если расчетный подъем носит затяжной характер, то, учитывая трудности производства работ по смягчению уклона на существующей дороге, следует рассмотреть вариант смягчения уклона с выносом на новую трассу на этом участке.

**Выводы.** 1 При увеличении основного сопротивления движению состава на 50 % масса состава уменьшается на 514 т (8,5 %), а при уменьшении сопротивления на 50 % увеличивается на 612 т (10,2 %) при руководящем уклоне 6 ‰; при руководящем уклоне 9 ‰ уменьшается на 263 т (6,2 %) и увеличивается на 296 т (7 %) соответственно. Уменьшение основного удельного сопротивления состава приводит к увеличению его массы, которая создает трудности при преодолении расчетного подъема (скорость в конце подъема меньше расчетной. Поэтому необходимо разгонное толкание или уположение подъема). Изменение массы состава больше на более пологих руководящих уклонах. Повышение массы состава приводит к увеличению длины поезда (например, поезда из четырехосных вагонов до 130 м), что приведет к увеличению полезной длины приемоотправочных путей.

Таблица 7.8. – Эквивалентные уклоны при существующей весовой норме поездов при  $i_p = 9 \%$

Масса состава	Тип локомотива							
	ВЛ80 <sup>к</sup>		2ВЛ80 <sup>к</sup>		БКГ2		2БКГ2	
	$v_p = 44,2$ км/ч	$F_p = 460$ кН	$v_p = 44,2$ км/ч	$F_p = 920$ кН	$v_g = 65$ км/ч	$F_g = 514$ кН	$v_g = 65$ км/ч	$F_g = 1028$ кН
4200	9,0 / 9,0		–		9,9 / 10,2		–	
4700	7,9 / 8,0		–		8,9 / 9,0		–	
5000	7,4 / 7,5		15,6 / 15,8		8,1 / 8,4		17,3 / 17,5	
5500	6,6 / 6,8		14,1 / 14,3		7,2 / 7,5		15,7 / 16,0	
6000	6,0 / 6,1		12,9 / 13,1		6,5 / 6,8		14,3 / 14,6	
6500	5,4 / 5,6		12,0 / 12,1		5,9 / 6,2		13,1 / 13,4	
7000	–		11,0 / 11,1		–		12,1 / 12,4	
7500	–		10,2 / 10,3		–		11,2 / 11,5	
8000	–		9,5 / 9,6		–		10,5 / 10,8	
8600	–		8,9 / 9,0		–		9,9 / 10,2	
9000	–		8,4 / 8,5		–		9,1 / 9,4	
9500	–		7,8 / 7,9		–		8,6 / 8,9	
10000	–		7,4 / 7,5		–		8,1 / 8,4	
10500	–		7,0 / 7,1		–		7,6 / 7,9	
11000	–		6,6 / 6,7		–		7,2 / 7,5	
11500	–		6,3 / 6,4		–		6,8 / 7,1	
12000	–		6,0 / 6,1		–		6,5 / 6,8	
<p><i>Примечание</i> – В числителе – для поезда, сформированного из 4-осных вагонов при <math>w''_{(8)} = 1,23</math> Н/кН; <math>w''_{(4)} = 1,37</math> Н/кН, локомотив ВЛ80<sup>к</sup>; в знаменателе – для поезда из 8-осных вагонов при <math>w''_{(8)} = 1,45</math> Н/кН; <math>w''_{(4)} = 1,72</math> Н/кН, локомотив БКГ2.</p>								

2 Каждой массе состава соответствует свой эквивалентный подъем, величина которого определена по приведенной методике для локомотивов ВЛ80<sup>к</sup> и БКГ2, обращающихся на Белорусской железной дороге при электрической тяге. Например, на направлении Молодечно – Гудогай обращаются грузовые поезда весом 9000 т, которые проходят определенные участки с использованием разгонного толкания. Возможен вариант уположения расчетного подъёма. Это можно сделать в процессе проведения капитального ремонта при небольшом уположении (сохранив или увеличив проектную балластную призму или осуществив подрезку земляного полотна, что связано с перерывами в движении поездов).

ПРИЛОЖЕНИЕ А  
(справочное)

**Определение группы коэффициентов,  
стоимости и количества подвижного состава**

Таблица А.1 – Коэффициенты приведения затрат к соизмеримому виду (при  $E_{ин} = 0,08$ )

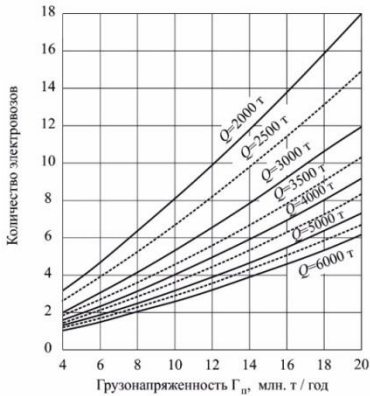
Год	$n_i$	Год	$n_i$	Год	$n_i$	Год	$n_i$
1-й	0,926	6-й	0,630	11-й	0,429	16-й	0,292
2-й	0,857	7-й	0,584	12-й	0,397	17-й	0,270
3-й	0,794	8-й	0,540	13-й	0,368	18-й	0,250
4-й	0,735	9-й	0,500	14-й	0,341	19-й	0,232
5-й	0,681	10-й	0,463	15-й	0,315	20-й	0,215

Таблица А.2 – Стоимость подвижного состава

В тысячах условных единиц

Тип подвижного состава	Стоимость, тыс. у. е.	Тип подвижного состава	Стоимость
Тепловозы:		Электровозы:	
ТЭЗ (2 секции)	226,0	ВЛ60 <sup>к</sup>	164,0
2ТЭ10Л	318,0	ВЛ80 <sup>к</sup>	278,0
ТЭП60	252,0	ЧС2	179,0
Электровозы:		ЧС4	203,0
ВЛ23	129,3	Грузовой вагон (в среднем)	6,12
ВЛ8	157,6	Пассажирский вагон	46,60
ВЛ10	220,0		

а)



б)

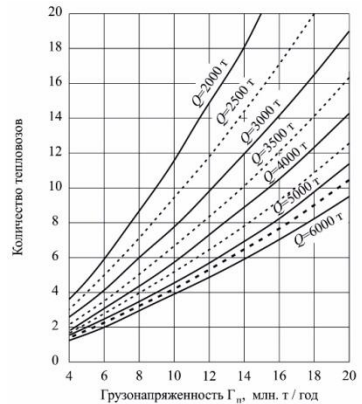


Рисунок А.1 – Графики для определения количества электровозов (а) и тепловозов (б) инвентарного парка при длине тягового плеча 200 км

**Таблица А.3 – Коэффициенты для определения расходов, вызванных остановками поездов на промежуточных раздельных пунктах**

Число грузовых поездов в сутки	К <sub>р.з</sub>	К <sub>п.р</sub>		Число грузовых поездов в сутки	К <sub>р.з</sub>	К <sub>п.р</sub>	
		тепловозная тяга	электрическая тяга			тепловозная тяга	электрическая тяга
До 10	0,08	0,10	0,10	До 40	0,13	0,15	0,14
15	0,09	0,13	0,12	60	0,14	0,16	0,15
20	0,11	0,14	0,13	80	0,06	0,10	0,10
25	0,13	0,15	0,14	100	0,08	0,12	0,11
30	0,12	0,14	0,13				

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
(справочное)

**Определение стоимостей переходов из одних технических состояний в другие при сравнении вариантов овладения перевозками существующих железных дорог**

**Б.1 Стоимость удлинения приемо-отправочных путей**

Стоимость удлинения приемо-отправочных путей, тыс. руб.,

$$K_y = k_y + n_o, \quad (\text{Б.1})$$

где  $k_y$  – средняя стоимость удлинения одного приемо-отправочного пути (таблица Б.1);

$n_o$  – общее число удлиняемых приемо-отправочных путей на рассматриваемом участке.

*Таблица Б.1 – Средняя стоимость удлинения одного приемо-отправочного пути*

Диапазон увеличения $l_{по}$ , м	650–850	720–850	720–1050	850–1050	850–1250	1050–1250
Стоимость удлинения одного приемо-отправочного пути $l_{по}$ , тыс. руб.	80	45	145	80	200	80

В курсовом проекте условно можно принять, что половина отдельных пунктов эксплуатируемой линии являются промежуточными станциями, остальные – разъездами. На каждой станции имеются 3 приемо-отправочных пути, на каждом разъезде – 2.

Таким образом,

$$n_{по} = 3N_{ст} + 2N_{р}.$$

**Б.2 Стоимость замены устройств связи и СЦБ**

При замене полуавтоблокировки на автоблокировку и введении диспетчерской централизации стоимость замены устройств связи и СЦБ, тыс. руб.,

$$K_{сцб} = K_{суб}L, \quad (\text{Б.2})$$

где  $K_{суб}$  – стоимость введения автоблокировки или диспетчерской централизации, отнесенная на 1 км длины линии, принимается по таблице Б.2.

$L$  – длина участка, км;

*Таблица Б.2 – Стоимость введения автоблокировки или диспетчерской централизации*

Число главных путей	Тепловозная тяга	Электрическая тяга	
		переменный ток	постоянный ток
Один	54,9	80,5	64,4
Два	52,6	69,8	55,8

### Б.3 Стоимость введения частично пакетного графика движения поездов

Для организации частично пакетного графика движения поездов необходимо соорудить дополнительные приемо-отправочные пути на части отдельных пунктов, как правило – через один (при  $\alpha_{\text{пак}} = 0,67$ ). В условиях курсового проектирования можно исходить из того, что на каждой станции следует построить по одному приемо-отправочному пути. Стоимость строительства дополнительных станционных путей, тыс. руб.,

$$K_{\text{д.п}} = N_{\text{р.п}} [(l_{\text{по}} + 0,2) K_{\text{д.п}} + 2K_{\text{стр}}], \quad (\text{Б.3})$$

где  $N_{\text{р.п}}$  – количество отдельных пунктов, на которых сооружаются дополнительные пути;

$l_{\text{по}}$  – полезная длина приемо-отправочных путей, км;

$K_{\text{д.п}}$  – стоимость пристройки 1 км дополнительного приемоотправочного пути, которую можно принимать: в легких условиях – 200 тыс. руб.; в трудных условиях – 300 тыс. руб.;

$K_{\text{стр}}$  – стоимость сооружения одного стрелочного перевода и его централизация, можно принимать в размере 20 тыс. руб.

### Б.4 Стоимость строительства двухпутных вставок и вторых путей

Стоимость строительства двухпутных вставок, тыс. руб.,

$$K_{\text{в}} = k_{\text{в}} L_{\text{в}}, \quad (\text{Б.4})$$

где  $k_{\text{в}}$  – средняя стоимость сооружения 1 км двухпутной вставки;

$L_{\text{в}}$  – общая протяженность двухпутных вставок на рассматриваемом участке, км, если двухпутные вставки сооружаются только у отдельных пунктов, то  $L_{\text{в}} = (0,10 \dots 0,15)L$ .

$L$  – полная длина рассматриваемого участка, км.

Стоимость строительства вторых путей, тыс. руб.,

$$K_{\text{в.п}} = k_{\text{в.п}} L_{\text{в.п}}, \quad (\text{Б.5})$$

где  $k_{\text{в.п}}$  – средняя стоимость сооружения 1 км второго главного пути;

$L_{\text{в.п}}$  – общая протяженность второго главного пути на рассматриваемом участке, км. Если сплошной второй путь сооружается после построенных на предыдущем этапе двухпутных вставок, то  $L_{\text{в.п}} = L - L_{\text{в}}$ , если строительство сплошного второго пути производится в один этап, минуя двухпутные вставки, то  $L_{\text{в.п}} = L$ .

Значения  $k_{\text{в}}$  и  $k_{\text{в.п}}$  принимаются по таблице Б.3.

Таблица Б.3 – Стоимость сооружения

Вид тяги	Средняя стоимость, тыс. руб./км	
	двухпутные вставки	вторые пути
Тепловозная	570	520
Электрическая	630	580



### Б.5 Стоимость введения электрической тяги

Стоимость введения электрической тяги, тыс. руб., определяется по формулам:

– однопутной линии –

$$K_{\text{эл(л)}} = k_{\text{эл(л)}} L; \quad (\text{Б.6})$$

– однопутной линии с двухпутными вставками –

$$K_{\text{эл(в)}} = k_{\text{эл(в)}} L_{\text{в}} + k_{\text{эл(л)}} L; \quad (\text{Б.7})$$

– двухпутных вставок –

$$K_{\text{эл(в)}} = k_{\text{эл(в)}} L_{\text{в}}; \quad (\text{Б.8})$$

– второго пути, пристроенного к электрифицированной однопутной линии –

$$K_{\text{эл(в.п)}} = k_{\text{эл(в.п)}} L_{\text{в.п}}; \quad (\text{Б.9})$$

– двухпутной линии –

$$K_{\text{эл(л)}} = k_{\text{эл(л)}} L, \quad (\text{Б.10})$$

где  $k_{\text{эл(л)}}$  – средняя стоимость электрификации соответственно 1 км однопутной линии;  $k_{\text{эл(в)}}$  – 1 км двухпутной вставки;  $k_{\text{эл(в.п)}}$  – второго пути;  $k_{\text{эл(л)}}$  – 1 км двухпутной линии.

Значения  $k_{\text{эл(л)}}$ ,  $k_{\text{эл(в)}}$ ,  $k_{\text{эл(в.п)}}$ ,  $k_{\text{эл(л)}}$  принимаются по таблице Б.4.

Таблица Б.4 – Средние стоимости

Род тока	Средняя стоимость 1 км, тыс. руб.		
	$k_{\text{эл(л)}}$	$k_{\text{эл(л)}}$	$k_{\text{эл(в)}}$ , $k_{\text{эл(в.п)}}$
Постоянный	201,0	271,0	98,0
Переменный	164,0	221,4	80,0

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
(справочное)

**Расчет ежегодных эксплуатационных расходов для сравнения вариантов  
овладения перевозками при проектировании реконструкции  
существующих линий**

Эксплуатационные расходы для  $t$  года, тыс. руб./год,

$$C_t = [(I + \alpha) N_t c + \kappa_{\Pi}] L, \quad (B.1)$$

где  $\alpha$  – удельный вес грузопотока обратного направления, принимается по заданию или равным 0,7–0,8 от грузового направления;

$N_t$  – число поездов грузового направления, поездов/год,

$$N_t = \frac{\Gamma_t \cdot 10^6}{\kappa Q_p}, \quad (B.2)$$

$\Gamma_t$  – заданная грузонапряженность линии на год  $t$  (млн т·км/км);

$\kappa$  – коэффициент, показывающий отношение массы состава нетто к массе брутто принимается по расчету или  $\kappa = 0,7$ ;

$c$  – стоимость одного поездо-километра, руб./поездо-км (здесь «с» с учетом затрат на остановки поездов) (таблица В.2).

$\kappa_{\Pi}$  – стоимость содержания постоянных устройств железной дороги, тыс. руб./км в год (таблица В.1);

$L$  – длина участка реконструкции линии, км;

*Таблица В.1 – Стоимость содержания постоянных устройств железной дороги*

В тысячах рублей на 1 км в год

Вид тяги	График		Двухпутные вставки	Вторые пути
	Непакетный обыкновенный	Частично пакетный		
Тепловозная	9,0	10,0	12,2	12,6
	10,4	11,4	–	14,2
Электрическая: постоянного тока	13,8	14,8	18,1	19,8
	15,5	16,4	–	21,6
переменного тока	12,7	13,7	17,0	18,2
	14,4	15,4	–	20,3

*Примечание* – В числителе показаны данные для размеров движения на однопутной линии менее 24 пар поездов в сутки, двухпутной – менее 96 пар поездов в сутки; в знаменателе – соответственно более 24 и 96 пар поездов в сутки.

Таблица В.2 – Стоимость одного поездо-километра

В рублях

Локо- мотив	График								Двухпутные вставки	Вторые пути						
	Непакетный обыкновенный				Частично пакетный											
	Масса средства, т															
	2500	3000	4000	5000	2500	3000	4000	5000	2500	3000	4000	5000	2500	3000	4000	5000
ТЭЗ	3,0	3,2	3,6	5,3	2,8	3,1	3,5	3,8	2,4	2,8	3,1	3,5	2,3	2,5	2,9	3,2
	3,8	4,1	4,4	4,9	3,6	4,0	4,3	4,7	3,1	3,5	4,0	4,3	3,0	3,2	3,6	4,1
2ТЭ10	3,2	3,5	3,8	4,3	3,0	3,4	3,7	4,0	2,5	2,9	3,2	3,7	2,4	2,6	3,0	3,5
	4,3	4,4	4,8	5,2	4,1	4,3	4,7	4,9	3,4	3,8	4,2	4,6	3,2	3,5	3,8	4,2
ВЛ23	2,5	2,6	3,1	3,6	2,3	2,5	2,9	3,4	1,9	2,2	2,6	3,0	1,8	1,9	2,4	2,7
	3,0	3,4	3,8	4,2	2,8	3,2	3,6	4,0	2,3	2,9	3,2	3,5	2,2	2,6	3,0	4,1
ВЛ8	2,6	2,8	3,2	3,7	2,4	2,6	3,0	3,5	2,2	2,4	2,8	3,0	2,0	2,2	2,5	2,8
	3,0	3,3	3,5	3,8	2,8	3,0	3,2	3,6	2,5	2,6	3,0	3,1	2,4	2,4	2,8	2,9
ВЛ60 <sup>к</sup>	2,6	2,9	3,2	3,7	2,5	2,8	3,1	3,6	2,0	2,4	2,9	3,2	1,9	2,2	2,6	3,0
	3,0	3,5	3,8	4,2	2,9	3,4	3,7	4,0	2,4	2,9	3,4	3,7	2,3	2,6	3,1	3,5
ВЛ80 <sup>к</sup>	–	3,0	3,5	4,0	–	2,9	3,2	3,7	–	2,5	2,9	3,4	–	2,3	2,6	3,1
	–	3,6	4,1	4,6	–	3,5	4,0	4,3	–	3,1	3,5	4,0	–	2,9	3,2	3,6

*Примечание* – В числителе приведена стоимость 1 поездо-километра руб., для легких профильных условий, в знаменателе – для сложных.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г**  
(справочное)

**Нормы проектирования железных дорог**

*Таблица Г.1 – Нормы проектирования продольного профиля*

В метрах

Категория железнодорожной линии, подъездного пути	Наибольшая алгебраическая разность уклонов смежных элементов профиля (числитель) и наименьшая длина разделительных площадок и элементов переходной крутизны (знаменатель) при полезной длине приемо-отправочных путей			
	850	1050	$2 \cdot 850 = 1700$	$2 \cdot 1050 = 2100$
<i>Рекомендуемые нормы</i>				
Скоростная	6/250	4/300	–	–
Особогрузонапряженная	–	3/250	3/250	3/300
I	6/200	4/250	3/250	3/300
II	8/200	5/250	4/250	3/300
III	13/200	7/200	7/250	4/250
IV	13/200	8/200	8/250	–
<i>Допускаемые нормы</i>				
Скоростная	10/250	9/300	–	–
Особогрузонапряженная	–	10/200	5/250	4/300
I	13/200	10/200	5/250	4/300
II	13/200	10/200	6/250	4/250
III	13/200	10/200	8/250	6/250
IV	20/200	10/200	10/200	–

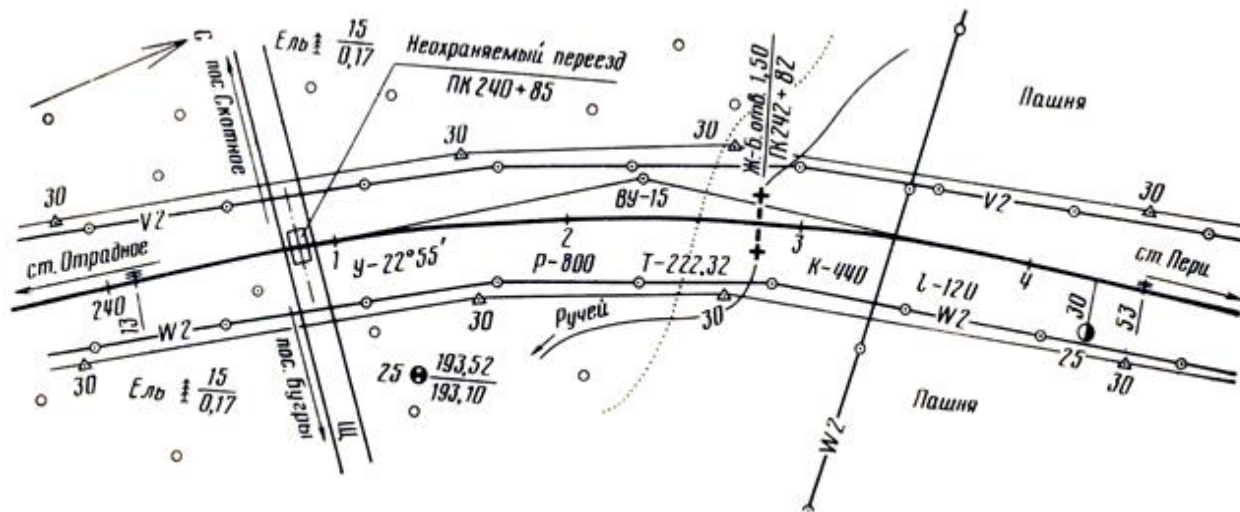
*Таблица Г.2 – Ширина земляного полотна*

В метрах

Категория железнодорожной линии	Число главных путей	Прямые участки пути при использовании грунтов	
		глинистых, крупнообломочных с глинистым заполнителем, скальных легковыветривающихся и выветривающихся, песков недренирующих, мелких и пылеватых	скальных слабовыветривающихся, крупнообломочных с песчаным заполнителем и песком дренирующим (кроме мелких и пылеватых)
Скоростные и особогрузонапряженные, I и II категории	2	11,7	10,7

ПРИЛОЖЕНИЕ Д  
(справочное)

Кривая в плане железной дороги



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Формирование транспортной политики РБ в едином экономическом пространстве / О. С. Булко [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2014. – 193 с.

2 Экономические изыскания и основы проектирования железных дорог / Б. А. Волков [и др.]. – М. : Маршрут, 2005. – 408 с.

3 Государственная программа «Транспортный комплекс на 2021–2025 годы : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь от 23.03.2021 № 165 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100165>. – Дата доступа : 15.09.2021.

4 Государственная программа развития транспортного комплекса Республики Беларусь на 2016–2020 годы : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь от 28.04.2016 № 345 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://mintrans.gov.by/ru/omministerstve/gosudarstvennye-programmy>. – Дата доступа : 15.12.2021.

5 **Гончарук, С. М.** Принятие решений при проектировании облика и мощности сети железных дорог (сетевой подход). Ч. 1. Методология формирования альтернатив облика и мощности сети железных дорог с учетом надежности ее функционирования : [монография] / С. М. Гончарук, А. В. Гавриленков, В. С. Шварцфельд. – Хабаровск : ДВГУПС, 2003. – 178 с.

6 **Довгелюк, Н. В.** Изыскания и проектирование железных дорог : учеб. пособие / Н. В. Довгелюк, Г. В. Ахраменко, И. М. Царенкова. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 333 с.

7 **Довгелюк, Н. В.** Особенности реконструкции железных дорог при электрической тяге / Н. В. Довгелюк, М. А. Масловская. – Гомель : БелГУТ, 2018. – 63 с.

8 **Довгелюк, Н. В.** Целесообразность использования большегрузных вагонов / Н. В. Довгелюк, М. А. Масловская. З. Ю. Толочко // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 4. – С. 60–66.

9 **Довгелюк, Н. В.** Реконструкция железных дорог : учеб. пособие / Н. В. Довгелюк, Г. В. Ахраменко, В. А. Вербило. – Гомель : БелГУТ, 2017. – 339 с.

10 **Дубров, А. М.** Многомерные статистические методы : учеб. / А. М. Дубров, В. С. Мхитарян, Д. И. Трошин. – М. : Финансы и статистика, 2003. – 352 с.

11 **Житенёв, Ю. А.** Высокоскоростное движение прыжок в будущее / Ю. А. Житенёв // Локомотив. – № 7 (679). – 2013. – С. 4–7.

12 **Кантор, И. И.** Изыскания и проектирование железных дорог : учеб. для вузов / И. И. Кантор. – М. : Академкнига, 2003. – 288 с.

13 **Киселев, И. П.** Китайское ускорение / И. П. Киселев // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 1 (32) – С. 16–19.

14 **Масловская, М. А.** Развитие электрифицированной сети Белорусской железной дороги / М. А. Масловская // Энергоэффективность. – 2019. – № 8. – С. 29–32.

15 **Негрей, В. Я.** Целесообразность электрификации участков железной дороги / В. Я. Негрей, М. А. Масловская // Вестник Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. – 2018. – № 62. – С. 96–104.

16 Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года [Электронный ресурс] / М-во экон. Респ. Беларусь : ГНУ НИЭИ, 2015. – Режим доступа : <http://www.minzchie.by/images/stories/doc/cur.pdf>. – Дата доступа : 15.11.2021.

17 Белорусская железная дорога [Электронный ресурс] : [официальный сайт]. – Режим доступа : <https://www.rw.by>. – Дата доступа : 01.09.2022.

18 Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М. : Транспорт, 1985. – 287 с.

19 Перспективы развития электрифицированной сети Белорусской железной дороги. М. А. Масловская, Н. В. Довгелок // Развитие экономической науки на транспорте: экономическая основа будущего транспортных систем : сб. науч. статей VII Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 19 дек. 2019 г. / под ред. д-ра экон. наук, проф. Н. А. Журавлевой. – СПб. : ИНСЭИ – оценка, 2019. – С. 509–515.

20 СП **237.1326000.2015**. Свод правил. Инфраструктура железнодорожного транспорта. Общие требования : утв. Приказом М-ва трансп. РФ 06.07.15 № 208. – 65 с.

21 СНБ 3.03.01-98. Железные дороги колеи 1520 мм. – Минск : М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 1998. – 38 с.

22 СП **119.13330.2017** Железные дороги колеи 1520 мм. – Взамен СНиП 32-01-95; введ. 2018-06-03. – М. : МАиС, 2018. – 48 с.

23 **Турбин, И. В.** Изыскания и проектирование железных дорог : учеб. для вузов / И. В. Турбин. – М. : Транспорт, 1989. – 479 с.

24 ТКП 45-1.02-214-2010. Технический кодекс установившейся практики Состав проектной документации в строительстве. Правила проектирования. – Минск : М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 55 с.

25 Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года : Сайт Федерального дорожного агентства М-ва трансп. РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://rosavtodor.gov.ru>. – Дата доступа : 06.09.2020.

26 Экономика железной дороги : учеб. для вузов ж-д трансп. / Н. П. Тершина [и др.]. – М. : УМЦ ЖДТ, 2006. – 536 с.

27 **Ивуть, Р. Б.** Современные тенденции развития Евразийских транспортных коридоров / Р. Б. Ивуть, Т. В. Пильгун // Новости науки и технологий. – 2019. – № 3. – С. 19–28.

Учебное издание

*ДОВГЕЛЮК Наталия Владимировна*  
*ЦАРЕНКОВА Ирина Михайловна*  
*ДУБРОВСКАЯ Татьяна Алексеевна*

**ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ  
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

Учебное пособие

Редактор *А. А. Павлюченкова*  
Технический редактор *В. Н. Кучерова*

Подписано в печать 29.11.2023 г. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать на ризографе.  
Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 14,94. Тираж 100 экз.  
Зак. № 2371. Изд. № 29.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Белорусский государственный университет транспорта.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий

№ 1/361 от 13.06.2014.

№ 2/104 от 01.04.2014.

№ 3/1583 от 14.11.2017.

Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель