ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Эксплуатация транспортных систем и логистика»

Монография

«Развитие транспортной инфраструктуры крупных городов и территорий на основе технологии канатного метро»

по дисциплинам

«Теоретические основы рисколо-гии», «Канатный транспорт (ка-натные дороги и лифты)», «Транспортные мультимодаль-ные комплексы»

Авторы

Месхи Б. Ч.,

Короткий А. А., Лагерев А. В.,

Лагерев И. А., Панфилов А. В.

Ростов-на-Дону, 2018

Аннотация

Представлены результаты исследований по развитию и реформированию системы общественного городского пассажирского транспорта крупных городов-мегаполисов и городских агломераций, а также природно-ландшафтных территорий на основе инновационной технологии канатного метро.

Предназначена для научных работников и аспирантов, занимающихся вопросами совершенствования транспортной инфраструктуры урбанизированной среды, создания новых транспортных конструкций и систем, а также для инженерно-технических работников сферы машиностроения и транспорта.

Авторы

д.т.н., профессор, ректор ДГТУ
Месхи Б.Ч.,
д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Эксплуатация транспортных систем и логистика»
Короткий А.А.,
к.т.н., к.с.н., доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика»
Панфилов А.В.,
Лагерев А.В.,
Лагерев И.А.

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ 3

ВВЕДЕНИЕ.....7

Глава 1. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ КАНАТНОГО МЕТРО ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА В МЕГАПОЛИСАХ И ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЯХ 10

1.1. История эволюционного развития городского общественного транспорта как элемента городской транспортной инфраструктуры 11

1.2. Опыт использования пассажирских подвесных канатных дорог как элемента городской и территориальной транспортной инфраструктуры 18

1.3. Развитие транспортной инфраструктуры крупных городов и территорий на основе применения 53

инновационной технологии канатного метро.....53

1.4. Сравнительные характеристики канатного метро и традиционных видов городского пассажирского общественного транспорта.....124

Глава 2. КОНЦЕПЦИИ РАЗВИТИЯ ПАССАЖИРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОТДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ КАНАТНОГО МЕТРО 141

2.1. Концепция создания сети канатного метро в г. Ростове-на-Дону.....142

2.2. Концепция создания сети канатного метро в г. Брянске.....151

2.3. Концепция создания сети канатного метро в г. Екатеринбурге.....162

2.4. Концепция создания сети канатного метро в крупном приморском городе 169
2.5. Концепция создания транспортно-переправочного комплекса через широкую водную преграду типа морского пролива 173
2.6. Концепция развития пассажирской транспортной инфраструктуры горного кластера Сочи 179
2.7. Концепция развития пассажирской транспортной инфраструктуры туристического кластера Геленджика 188
Глава 3. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИНИЙ КАНАТНОГО МЕТРО 190
3.1. Общая постановка задачи оптимального проектирования 192
3.2. Полная оптимизация линии канатного метро 212
3.3. Параметрическая оптимизация шага установки промежуточных опор 222
3.4. Параметрическая оптимизация линии канатного метро с унифицированными промежуточными опорами 260
Глава 4. ОСНОВЫ ПРОВЕДЕНИЯ РИСК-АНАЛИЗА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАНАТНОГО МЕТРО 273
4.1. Анализ аварийности при эксплуатации пассажирских подвесных канатных дорог 274
4.2. Методология проведения риск-анализа пассажирских канатных дорог на стадии проектирования 282
4.3. Оценка профессионального риска персонала при устранении критических отказов и мероприятия по снижению травмоопасности 296
4.4. Обоснование безопасных условий труда персонала канатного метро за счет мероприятий технического, технологического и организационного характера 305
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 321

ПРЕДИСЛОВИЕ

Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года [100] определяет активную позицию государства по созданию условий для социально-экономического развития, прежде всего в целях повышения качества транспортных услуг, снижения совокупных издержек общества, зависящих от транспорта, повышения конкурентоспособности отечественной транспортной системы, усиления инновационной, социальной и экологической направленности развития транспортной отрасли.

Отдельным направлением в стратегии обозначено развитие и реформирование городского пассажирского транспорта.

Городской пассажирский транспорт общего пользования является важнейшим элементом транспортной системы, который обеспечивает ежедневную транспортную подвижность двух третей населения России [100]. В настоящее время внутригородские перевозки осуществляются различными видами наземного транспорта – трамваем, троллейбусом, автобусом, метрополитеном, маршрутными и легковыми таксомоторами, а также электропоездами. При достаточно высокой потенциально возможной скорости движения этих средств, которая может быть обеспечена применяемыми двигателями, средняя скорость перемещения пассажиров, тем не менее, оказывается значительно ниже вследствие характерных для урбанизированной среды недостатков формирования транспортного потока – наличия светофоров, перекрестков, транспортных «пробок», случаев дорожно-транспортных происшествий, ремонта дорожного полотна, прокладки подземных коммуникаций и др. [37, 40, 41, 99]. Эти обстоятельства не только замедляют перемещение пассажиров, но и делают практически невозможным планирование ими времени нахождения в пути.

Для современной городской транспортной системы характерно, во-первых, комплексное использование различных видов транспорта с преимуществом автомобильного; во-вторых, развитие скоростных внеуличных видов транспорта, эффективных для больших расстояний; в-третьих, обостряющийся конфликт между массовым и индивидуальным транспортом.

Сказанное определяет актуальность научных и прикладных

исследований перспектив и условий внедрения современной инновационной технологии надземных пассажирских перевозок на основе подвесных пассажирских канатных дорог. Это также обусловлено тем обстоятельством, что пассажирский канатный транспорт в последнее время начали активно использовать как общественный транспорт для урбанизированной среды.

Для решения имеющихся транспортных проблем целесообразно ориентироваться на наиболее молодой, но обладающий неоспоримыми перспективами для модернизации общегородских систем общественного транспорта, вид пассажирского канатного транспорта – канатное метро. Канатное метро является инновационным видом канатного транспорта (разновидностью пассажирской подвесной канатной дороги) и предназначено для перевозки пассажиров в урбанизированной среде, между населенными пунктами и непосредственно в мегаполисах, расположенных на пересеченной местности, в том числе с наличием водных преград (рек и их пойм, озер, проливов, каналов, заливных и болотистых участков и т.д.) [44].

Основным отличием канатного метро является наличие промежуточных станций с возможностью пересадки пассажиров на другие маршруты и переадресация подвижного состава на другие пути, а также практически бесконечная длина транспортирования подвижного состава одним тяговым канатом.

Принципиальная структура канатного метро определена в работах [78, 81, 92]. Оно представляет собой автоматизировано управляемую многоканатную систему с мехатронными модулями движения, установленными на промежуточных линейных опорах по трассе. В качестве движителя тягового каната выступает распределенный привод («активная роликовая батарея»), установленный дискретно на промежуточных станциях или на промежуточных (линейных) опорах. Управление мехатронными модулями движения осуществляется системой управления, использующей RFID-метки (транспондеры), интегрированные в структуру стальных канатов, образующих путевую структуру.

Канатное метро, формирующееся как объединение двух технологий – транспортной технологии на основе подвесных пассажирских канатных дорог и мехатронной технологии на основе

интеллектуального управления механической транспортной системой и приводным электроприводом, в силу синергетического эффекта нельзя рассматривать как модернизированную разновидность традиционной канатной дороги. Следует говорить о качественно новом, инновационном для начала XXI века виде городского общественного пассажирского транспорта, принципиально ориентированного на применение в условиях высоко урбанизированной и ландшафтно неоднородной среды крупных городов, городских агломераций, мегаполисов и территорий [40, 41, 46, 60, 78].

В настоящее время вопросы, связанные с проектированием и строительством канатного метро, решены в той мере, в какой это необходимо для начала его практической реализации. Имеется ряд предпроектных решений для Москвы, Ростова-на-Дону, Брянска, Новочеркасска, Санкт-Петербурга, Екатеринбурга, Ставрополя, Севастополя, Сочи, Геленджика, Красноярска, Сколково, Одессы, морского перехода через Керченский пролив и др. [49, 53, 71, 78, 81, 88, 90, 92].

Основным ограничением применения этого инновационного вида транспорта, по мнению авторов, является стереотип инженерного мышления, который связан с возможными критическими отказами и последующей эвакуацией пассажиров с подвижного состава, перемещаемого на значительной высоте над уровнем земли.

В монографии рассмотрены актуальные вопросы, связанные с начальным этапом разработки проектов внедрения инновационного вида городского общественного транспорта – канатного метро – в существующую транспортную инфраструктуру городов-мегаполисов, городских агломераций и природных территорий.

В первой главе рассматриваются исторический и современный опыт использования, а также конструкции существующих пассажирских подвесных канатных дорог применительно к условиям функционирования городской транспортной инфраструктуры. Также подробно представлена инновационная разновидность канатных дорог – канатное метро на основе мехатронных технологий и показана перспективность его внедрения на основе сравнительного анализа технико-экономических и социальных пре-

имуществ по отношению к традиционным видам городского транспорта.

Вторая глава посвящена формированию концепции развития пассажирской транспортной инфраструктуры крупных городов и отдельных территорий на основе внедрения технологии канатного метро. Применительно к градостроительным и ландшафтным условиям ряда крупных российских городов (Ростов-на-Дону, Брянск, Екатеринбург) и природных территорий (Сочи, Геленджик, Керченский пролив) представлены пилотные проекты прокладки транспортных линий канатного метро, приведены их основные технико-экономические характеристики.

В третьей главе представлены технико-экономические основы оптимального проектирования линий канатного метро. Задача определения основных конструктивных параметров линий канатного метро с учетом рельефа поверхности, высотной застройки и расположения объектов городской инфраструктуры формулируется как задача минимизации стоимости строительства с учетом комплекса конструкционных, прочностных и компоновочных ограничений. Представлены результаты оптимизационных расчетов, на основании которых выполнен качественный и количественный анализ влияния широкого спектра конструктивных, ландшафтных и стоимостных параметров на оптимальные характеристики линий канатного метро.

В четвертой главе содержится анализ причин аварийности при эксплуатации пассажирских подвесных канатных дорог, а также разработаны основы проведения риск-анализа и обеспечения безопасности эксплуатации на стадии проектирования канатного метро. Представлена методология расчетной оценки количественных показателей риска.

В основу монографии легли результаты оригинальных научных исследований, выполненных коллективом авторов в Донском государственном техническом университете и Брянском государственном университете имени академика И.Г. Петровского. Отдельные результаты также были получены в содружестве со специалистами Москвы, Новочеркасска, Екатеринбурга и ряда других городов.

Публикуемый материал будет интересен и полезен научным

работникам, аспирантам и докторантам, а также инженерно-техническим работникам, занимающимся вопросами проектирования и исследования подвесных канатных дорог.

Главы 1 (п. 1.1), 2 (пп. 2.1, 2.3–2.7) и 4 написаны в соавторстве А.А. Коротким, Б.Ч. Месхи и А.В. Панфиловым, главы 2 (п. 2.2) и 3 – А.В. Лагеревым и И.А. Лагеревым. Совместно всем коллективом авторов написаны пп. 1.2–1.4. Общее редактирование монографии выполнено А.В. Лагеревым.

ВВЕДЕНИЕ

Канатные дороги как системы подвесного транспорта достаточно активно применяются в Канаде, США, Германии, Австрии, Франции и ряде других стран для перемещения пассажиров как в пределах крупных городов-мегаполисов, так и в пределах туристических, рекреационных и природных территорий [36, 37, 39, 45, 46, 68].

Отцепляемые вагоны с пассажирами передвигаются по стальным несущим канатам, поддерживающихся системой легких металлических промежуточных опор различной высоты. Конструкция такой дороги оказывается достаточно дешевой (1,5…2 млн долл./км), надежной и обеспечивающей движение подвижного состава со скоростью до 50 км/ч. Инвестиционные расходы на строительство канатной дороги равны стоимости покупки количества автобусов, необходимых для обеспечения такого же пассажиропотока, а эксплуатационные расходы на перевозку 1 пассажира по канатной дороге в два раза меньше, чем при использовании автомобильного транспорта. Канатные дороги не зависят от сложности рельефа и позволяют соединять пассажирские или грузопассажирские терминалы по кратчайшему расстоянию, легко проходя над густонаселенными районами, над водными и другими преградами, позволяют разгрузить городские автомагистрали и обеспечивают высокий уровень комфорта и регулярность перевозок независимо от дорожных пробок.

Стоит отметить, что транспортировка пассажиров канатной дорогой гораздо безопаснее, чем поездка на автомобиле. По ко-

личеству несчастных случаев пассажирские подвесные канатные дороги являются одним из самых безопасных видов транспорта. Можно констатировать, что хотя пассажирский подвесной канатный транспорт относится к одному из самых безопасных видов транспортного оборудования, однако его широкое применение в качестве элемента общественной урбанизированной транспортной инфраструктуры в значительной мере ограничивается сложившимся стереотипом человеческого мышления о возможном критическом отказе оборудования и последующей эвакуацией пассажиров с подвижного состава, расположенного на значительном расстоянии от земли. Применяемая в городских канатных дорогах интегральная система безопасности, обеспечивает доставку вагонов с пассажирами на станции при любых возможных аварийных ситуациях.

Использование подвесных пассажирских канатных дорог в качестве городского транспорта позволяет решить транспортные проблемы, недоступные традиционным видам транспорта, особенно в условиях сложного рельефа или наличия водных преград [44]. Пассажирские транспортные канатные дороги, построенные в различных регионах мира, позволили эффективно решить транспортные проблемы городов и способствовали развитию новых кварталов города и улучшения социальной составляющей. Это связано с тем, что в условиях плотной городской застройки наземный ярус не справляется с возрастающим потоком транспорта, при этом возможность расширения наземных магистралей ограничена или просто отсутствует. Решение об освоении подземного пространства с помощью традиционного метрополитена, которое оказывается непосильным бременем для значительного числа даже достаточно крупных городов, является дополнительно и слишком времязатратным.

Поэтому можно говорить, что подвесные пассажирские городские канатные дороги – это не только социально-привлекательный, но и экономически эффективный тип транспорта. Расчетный ресурс подвесной канатной дороги позволяет эксплуатировать ее в течение не менее тридцати лет при ежесуточном 18…20-часовом режиме.

Однако в настоящее время использование пассажирского

канатного транспорта не ограничивается применением его лишь в качестве канатной дороги, т.е. для доставки пассажиров от одной точки к другой. Канатные технологии сделали огромный рывок вперед, став в один ряд с другими видами общественного пассажирского транспорта в урбанизированной среде. Целый ряд новаторских идей, закрепленных патентами РФ [80–93], открывают новые перспективы канатного транспорта в части применения его в качестве городского пассажирского транспорта – канатного метро.

По виду экономической деятельности пассажирские подвесные канатные дороги относятся к транспортным системам, которые используются как городской или пригородный общественный пассажирский транспорт, а также для перевозки людей на рекреационно-туристических территориях. В табл. 1 приведено назначение пассажирских подвесных канатных дорог в зависимости от вида экономической деятельности (кода ОКВЭД).

Таблица 1

Назначение пассажирских подвесных канатных дорог в зависимости от вида экономической деятельности

Код ОКВЭД	Вид экономической деятельности
49.31.25	Перевозка пассажиров фуникулерами, подвесными канатными дорогами и подъемниками, являющимися частью городской или пригородной транспортной системы
49.39.2	Перевозка пассажиров фуникулерами, подвесными канатными дорогами и лыжными подъемниками, не являющимися частью внутригородской, пригородной или городской и пригородной транспортных систем

Авторы надеются, что в XXI веке канатный транспорт прочно займет свое место в ряду транспортных решений для инфраструктуры российских городов.

ГЛАВА 1. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ КАНАТНОГО МЕТРО ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА В МЕГАПОЛИСАХ И ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЯХ

Сегодня инженерная мысль может предложить человеку для передвижения в условиях урбанизированной окружающей среды: железнодорожный, автомобильный, водный, авиационный транспорт, высокоскоростные железные дороги, поезда на магнитном подвесе, монорельс, троллейбус, скоростной трамвай, рельсовый автобус, струнный транспорт, канатные дороги. Всего 13 конструктивно различных видов. Вместе с различными конструктивными разновидностями наберется около 200 идей. У каждой имеются свои достоинства и свои недостатки.

К сожалению, ни один вид транспорта не удовлетворяет сегодняшним требованиям к созданию эффективных средств общественного транспорта для условий крупных городов, мегаполисов и городских агломераций, в которых должны сочетаться экологичность эксплуатации, безопасность и скорость перемещения пассажиров, низкие экономические характеристики транспортирования пассажиров и грузов. Постоянные пробки на дорогах, загазованность улиц и прочие неудобства городского наземного передвижения – объективный инициатор развития новых видов городского транспорта.

Логическим направлением принципиального преодоления проблем, связанных с использованием наземного общественного транспорта, является переход на другой высотный уровень – либо вниз, под поверхность земли, либо вверх, в надземное пространство. Это естественным образом позволяет избежать пересечения транспортных потоков в черте города. Перенос транспортных потоков под поверхность земли успешно реализуется в течение многих десятилетий на основе ставшего уже привычным метрополитена. Перенос транспортных потоков в городское надземное пространство пока остается перспективным, но мало разработан-

ным направлением совершенствования транспортной инфраструктуры современных городов. Технически это можно реализовать с помощью технологий канатного транспорта.

1.1. История эволюционного развития городского общественного транспорта как элемента городской транспортной инфраструктуры

Впервые идея создания общественного городского транспорта была высказана французским ученым-физиком Б. Паскалем (1623–1662) в 1661 г.

Однако только в XVIII в., когда города достигли значительных размеров и дальнейшее их развитие стало сдерживаться отсутствием средств передвижения, возникла настоятельная потребность в массовом транспортном обслуживании населения.

Всю историю развития массового городского транспорта можно разделить на четыре периода по характеру применявшейся тяги и типу путевых устройств [37].

Последняя четверть XVIII в. – первая половина XIX в. Для этого периода для городов небольших размеров характерно использование конной тяги («линейки»). В Санкт-Петербурге она стала применяться с 1854 г., став первой в России и второй в мире. Двухэтажный возок-вагончик с открытым верхом достигал скорости 10 км/ч (для сравнения скорость пешехода 4…5 км/ч).

Вторая половина XIX в. Наметился бурный рост промышленного производства, приведший к расширению городов, диаметр которых вырос до 30 км, а пассажиропоток – до 5…10 чел./ч в одном направлении. Появились конно-железные дороги – конки, вмещавшие до 40 человек и имевшие большие скорости, чем у «линейки».

В этот период появляется паровой трамвай, который, однако, дальнейшего развития не получил. Однако в Лондоне в 1863 г. создается первый в мире метрополитен на паровой тяге. В России первый проект метрополитена был разработан в 1902 г. инженером П.И. Балинским.

Конец XIX в. – первая четверть XX в. Этот период характеризуется значительными темпами роста городов, что обу-

словило активное внедрение рельсового электрического транспорта: трамвая, метрополитена, монорельсов. Для единичных перевозок стали использовать автомобильный транспорт на основе двигателей внутреннего сгорания.

Первая четверть XX в. – по настоящее время. Для этого периода характерными чертами является бурный рост городов и их транспортной инфраструктуры, широкое распространение автомобильного транспорта, появление новых видов скоростного внеуличного транспорта. Возникла необходимость связи городов с пригородами, что привело к формированию новых типов городских образований – мегаполисов и городских агломераций. Отставание России в начале XX в. в строительстве новых видов транспорта, в первую очередь, метрополитена было вызвано, среди прочих причин, нежеланием Бельгийского общества конок, являвшегося монопольным владельцем пассажирского городского транспорта в России, терять доходы и вложенные в строительство конок капитальные затраты. В связи с этим Бельгийское общество привлекло духовенство для убеждения домовладельцев во вреде подземного строительства. Автобус, который является наиболее широко распространенным маневренным видом наземного транспорта, в России впервые появился лишь в 1924 г. в условиях интенсивной индустриализации всех сторон народного хозяйства и социальной инфраструктуры молодого Советского государства. Транспортный кризис, развившийся в этот период во многих странах мира, был вызван пренебрежением к общественному городскому транспорту, вплоть до частичной или полной его ликвидации, и бурной, не лимитированной автомобилизацией. Ставка делалась на индивидуальный транспорт, обеспечивавший наибольший личный комфорт. Особенно это характерно для провинциальных городов США. Однако высокие темпы автомобилизации создали огромную угрозу городам, заняв значительную часть его территории транспортной инфраструктурой, уменьшив скорость передвижения, ухудшив экологическую обстановку.

История развития современных видов городского транспорта началась с рельсового электротранспорта.

Опытная эксплуатация первого электрического трамвая конструкции российского инженера Ф.А. Пироцкого началась в

Санкт-Петербурге в 1874 г. Промышленная эксплуатация электрического трамвая началась чуть позже: в Германии – с 1881 г., Москве – с 1903 г., Санкт-Петербурге – с 1909 г. Однако до 1917 г. трамваи использовались уже в 41 городе России. До 1924 г. в России трамвай был единственным массовым видом транспорта. Промышленная эксплуатация троллейбусов в России началась с 1933 г.

В России первый метрополитен появился в 1935 г. в Москве. К 1990 г. число городов мира с метрополитеном достигло 73, причем треть их была построена после 1970 г.

Движущийся тротуар – траволатор впервые был продемонстрирован на Всемирной выставке в Чикаго в 1893 г. (рис. 1). Началом его эксплуатации можно считать 1964 г. (Париж).

Рис. 1. Траволаторный туннель
в метро Санкт-Петербурга

Первая грузовая монорельсовая дорога России с конной тягой построена под Москвой механиком И.К. Эльмановым. Под Петербургом инженер Русского технического общества И.В. Романов в 1889 г. продемонстрировал электрифицированную дорогу на монорельсе. В первых моделях в качестве подвижного состава использовался кузов трамвая.

В Вуппертале (Германия) с 1 марта 1901 г. начала действовать городская монорельсовая дорога системы О. Лангена длиной 13,3 км, которая эксплуатируется до сих пор, причем 10 км проходит над руслом реки Вуппер на высоте 12 м, остальная часть – над улицами города [10]. Интервал движения поездов составляет 3,5 мин; на дороге расположены 20 пассажирских станций; средняя скорость – 28 км/ч; максимальная скорость – 60 км/ч; расстояние между станциями – в среднем 780 м. Годовой пассажиропоток составляет свыше 19 млн человек. Современный вид дороги показан на рис. 2.

Рис. 2. Первая в мире городская монорельсовая дорога системы О. Лангена (современный вид)

В середине 30-х гг. XX в. на подмосковной станции Северянин была построена опытная монорельсовая эстакада длиной 474 м и уклонами до 15° с аэропоездом в 1/10 натуральной величины, который двигался со скоростью до 120 км/ч с помощью толкающего пропеллерного электропривода с двумя двигателями мощностью 2,5 кВт. Однако до 1950 г. монорельс был распространен

мало, затем появилось несколько проектов.

Рис. 3. Фуникулер

Фуникулер, т.е. рельсовая дорога с канатной тягой, обеспечивающая перемещение людей и грузов на короткое расстояние вдоль крутонаклонных поверхностей, был предложен в качестве пассажирского транспорта в 1825 г., а внедрен в 1854 г. в Италии и Австрии (рис. 3). В Германии первые фуникулеры начали применяться в 1834 г. как промышленный транспорт. Эти рельсовые дороги с канатной тягой при эксплуатации получили положительные отзывы у горняков и нашли свое применение у промышленников. Рельсы, на которых были установлены кабины или платформы, давали хорошую устойчивость перемещаемому подвижному составу и защищенность от бокового ветрового воздействия.

В 2001 г. в подмосковном г. Озеры была построена первая экспериментальная линия малой протяженности струнного транспорта, предложенного российским инженером А.Э. Юницким

[110]. Транспортный комплекс SkyWay представляет собой автомобиль на стальных колёсах специальной конструкции, размещённый на струнных рельсах, которые крепятся на промежуточных опорах (рис. 4). В комплекс входит также сопутствующая инфраструктура – пассажирские станции и вокзалы, терминалы, ремонтные мастерские, стрелочные переводы, автоматизированная система управления и безопасности, энергообеспечения и связи. Предложены различные варианты использования струнного транспорта применительно к условиям пассажирских перевозок в крупных городах и мегаполисах (рис. 5).

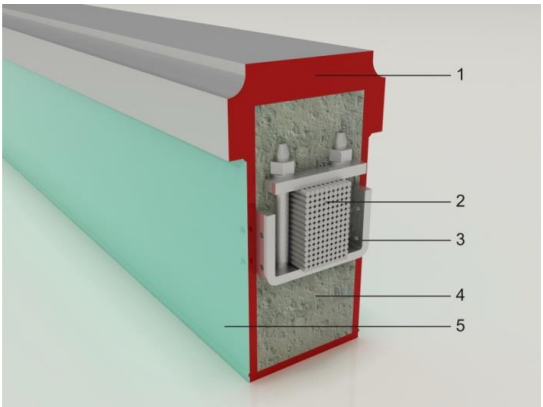


Рис. 4. Поперечное сечение рельса-струны [110]:
1 – головка рельса; *2* – струна (пучок стальных проволок);
3 – элемент крепления струны к корпусу рельса;
4 – бетонный наполнитель; *5* – корпус рельса

а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 5. Возможные варианты использования технологии струнного транспорта в качестве городского: *а* – подвесной пассажирский вагон; *б* – пассажирский вагон высотной линии; *в* – пассажирский вагон на надземном рельсо-струнном пути; *г* – пассажирский вагон на рельсо-струнном пути, вмонтированном в асфальт

1.2. Опыт использования пассажирских подвесных канатных дорог как элемента городской и территориальной транспортной инфраструктуры

Строительство подвесных канатных дорог для транспортирования людей и различных грузов имеет многовековую историю. С давних пор перед людьми стояла задача эффективного перемещения людей и грузов через пересеченную местность (горные ущелья, глубокие овраги, крутые склоны холмов, водные преграды и т.д.).

Еще до нашей эры в Китае подвесные канатные дороги использовались для поднятия необходимых грузов на стены крепостей. В Средние века жители горных местностей переправлялись через ущелья с помощью корзин, которые крепились на одном или нескольких несущих канатах и приводились в движение вручную с помощью специального тягового каната.

Первые стальные канаты появились в Германии в 1834 году. Переплетенные стальные проволоки оказались эффективным изобретением и дали новый толчок к развитию канатного транспорта. В это же время начинают применяться первые фуникулеры, обеспечивающие подъем людей и грузов вдоль крутонаклонных поверхностей.

В 1866 г. на севере Швейцарии была построена первая пассажирская канатная дорога, которая доставляла туристов на смотровую площадку, откуда открывался прекрасный вид на водопад.

Первая канатная дорога в России была построена в 1871 г. для перевозки леса через заболоченную местность около железнодорожной станции Покров. Эта девятикилометровая канатная дорога работала за счет парового двигателя. Подвесные вагонетки, подвешенные на стальном канате диаметром 16 мм, достигали скорости 7 км/ч, а производительность такой дороги составляла 50 т/ч.

В 1873 г. на Москворецкой ситцепечатной фабрике в эксплуатацию была введена одноканатная подвесная дорога протяженностью 427 м. Дорога соединяла фабричную котельную с топ-

ливным складом, находящемся на противоположном берегу реки Москвы.

Перед Первой мировой войной с помощью подвесных грузовых канатных дорог велось строительство береговой инфраструктуры Тихоокеанского военно-морского флота во Владивостоке. К 1914 г. суммарная протяженность всех канатно-подвесных дорог России составляла 1/10 от общемировой протяженности подобных дорог.

Канатные дороги оказались оптимальным видом транспорта для болотистой и горной местности при минимальных эксплуатационных затратах. Поэтому, начиная с первых пятилеток, в связи с реализацией стратегического курса ускоренной индустриализации народного хозяйства, проводимого в СССР, грузовые подвесные канатные дороги начали активно использоваться на рудниках, перерабатывающих предприятиях, при строительстве гидроэлектростанций и других промышленных объектов.

С 1917 по 1991 гг. в СССР было построено около 110 канатных подвесных дорог. Большинство из них эксплуатировались горняками и шахтерами. Рельсовые канатные дороги в Москве обслуживали цементные и химические заводы.

После Второй мировой войны в Европе, США и Японии начал набирать все большую популярность горнолыжный спорт и, соответственно, начали строиться подъемники для спортсменов и посетителей горнолыжных центров. Это дало толчок развитию такой разновидности подвесных канатных дорог, как пассажирские подвесные канатные дороги.

Мировой опыт свидетельствует, что экономическое развитие горноклиматических территорий напрямую связано со строительством и эксплуатацией многофункциональных высокоэффективных пассажирских канатных дорог [45, 46]. Строительство канатных дорог дает толчок экономическому развитию горноклиматических территорий и, как цепная реакция, влечет за собой развитие остальных отраслей экономики – начинается бурное развитие гражданского и дорожного строительства, транспорта, легкой и пищевой промышленности, соответственно, появляются новые рабочие места, увеличивается поступление налогов в бюджет и, конечно же, решаются многие социальные проблемы.

Производство пассажирских канатных дорог в СССР началось с 50-х гг. XX в. Первую подвесную кресельную дорогу для лыжников построили в районе Приэльбрусья в 1963 г. Уже в 70-х гг. по отечественным проектам на отечественных заводах изготавливались одноканатные дороги с одно- и двуместными креслами, а также с двухместными кабинами, маятниковые дороги с вагонами на 30…40 чел. Эти дороги строились на черноморском побережье Кавказа и Крыма, на склонах Домбая, Эльбруса и Чегета, в Казахстане и Узбекистане, в Грузии и Армении. По параметрам, конструкции и по техническим решениям они отставали от европейских фирм (POMA, Leitner, Doppelmayr). После 1990 г. в России проектирование и выпуск отечественных дорог полностью прекратился [39], было приобретено несколько кресельных канатных бывших в эксплуатации («Сафари-Парк» Геленджик, «Альпика-Сервис», г. Сочи, пос. Красная Поляна).

Начало XXI в. ознаменовалось значительным ростом интереса к горному туризму и горнолыжному спорту, для развития которого вначале приобретались и устанавливались буксировочные и кресельные дороги, бывшие в эксплуатации за рубежом. И только с конца 90-х гг. российские заказчики стали подробно знакомиться с европейскими фирмами, их производством и приобретать новые канатные дороги. В последнее годы на горнолыжных курортах Северного Кавказа (Красная Поляна, Домбай, Архыз, Приэльбрусье) введено в эксплуатацию большое количество, в основном, одноканатных кольцевых канатных дорог с подвижным составом в виде двух-, четырех-, шестиместных кресел, восьмиместных кабин, одно- и двухместных буксировочных устройств [68].

В России большинство эксплуатируемых канатных дорог сооружены до 2000 г. Это канатные дороги российского производства и импортные, бывшие в эксплуатации, подвергшиеся капитально-восстановительному ремонту. Последние 15 лет темпы сооружения канатных дорог значительно возросли, что обусловлено популяризацией зимнего отдыха на горных курортах и спортивно-оздоровительных базах.

Актуальность и социальная значимость вопросов строительства канатных дорог в России особенно возросла после проведе-

ния зимних Олимпийских игр 2014 года, что связано с развитием отдыха россиян в зимний период и применением канатного транспорта в виде городского. В связи с Олимпиадой 2014 г. во многих регионах Российской Федерации велось и продолжается активное сооружение канатных дорог. Только в районе Красной Поляны пущено в эксплуатацию более 50 подвесных и буксировочных канатных дорог. В европейских странах, где горнолыжный отдых имеет массовый характер, эксплуатируемого канатного транспорта на порядок больше, например, в Австрии их более 2500, во Франции – более 4000, в Италии – более 3000, в Швейцарии – более 2000 [68]. При этом технический уровень приводов, тормозных систем, систем управления, качество стальных канатов, применение новых полимерных материалов, дизайн, комфортность и безопасность канатного транспорта находятся на высоком уровне и соответствуют всем требованиям безопасности по перевозке пассажиров [39].

В настоящее время в мире насчитывается более 10 тысяч единиц пассажирского канатного транспорта. По состоянию на 2015 г. в государственном реестре опасных производственных объектов Российской Федерации зарегистрировано 213 подвесных канатных дорог и 542 буксировочные канатные дороги [79]. За последние 20 лет введено в эксплуатацию более 200 пассажирских канатных дорог в Красной Поляне, Домбае, Архызе, Приэльбрусье, Кольском полуострове, Нижнем Новгороде, Подмосковье, на Урале, Алтае и в Сибири [68].

Последнее десятилетие пассажирские канатные дороги привлекают значительное внимание в качестве городского транспорта. Это обусловлено урбанизацией городских застроек, что вызвало серьезные транспортные проблемы.

Рост экономического благосостояния населения, современные технические решения механического оборудования и систем управления канатных дорог позволяют решать транспортные задачи массового туризма и горнолыжного спорта, а также глобальную проблему городского транспорта – «пробки» на дорогах. Самое большое преимущество подвесных канатных дорог в качестве городского транспорта обусловлено их конструкцией – это независимость от наземного транспорта. Это связано с тем, что дви-

жение подвижного состава канатного транспорта происходит на втором ярусе, т.е. траектория движения находится на надземном горизонте. В основе такого движения лежит электрическая тяга, не оказывающая негативного влияния на окружающую среду. Энергоэффективные инновационные технологии в совокупности с отсутствием зависимости от нефтепродуктов дают ощутимую экономию затрат на перемещение. Значение также имеет отсутствие потерь на простои и вынужденное ожидание в пробках.

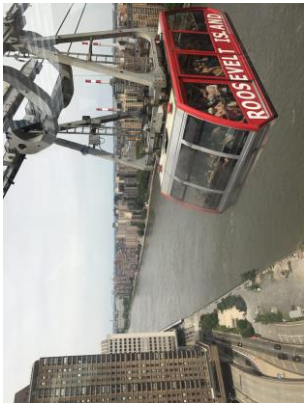
Примером решения транспорта в урбанизированной среде за рубежом являются канатные дороги в таких крупных городах как Нью-Йорк, Лондон, Милан, Каир [39].

Самой старой из действующих на сегодняшний день пассажирских канатных дорог считается Пражский фуникулер, эксплуатирующийся на протяжении уже почти 120 лет.

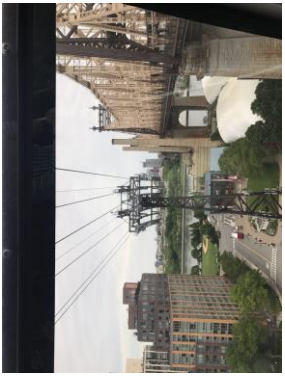
Самой протяженной из действующих на сегодняшний день пассажирских канатных дорог является канатная дорога на гору Бана вблизи г. Дананг во Вьетнаме, эксплуатирующаяся с 2009 г. (рис. 6). Дорога имеет длину 5042 м (официальный рекорд Книги рекордов Гиннеса) высотой 1300 м. Она состоит из 22 промежуточных опор и 94 пассажирских кабин, движущихся со средней скоростью 6 м/с.

Рис. 6. Канатная дорога вблизи г. Дананг

Первая в Северной Америке пассажирская подвесная канатная дорога была построена в г. Нью-Йорк в 1976 г. (рис. 7) [24]. Она соединила остров Рузвельта с Манхэттеном через русло реки Ист-Ривер. Высшая точка траектории движения находится над Ист-Ривер и достигает 76 м. Подвижной состав движется со скоростью 28,8 км/ч и вмещает до 110 человек. С начала работы дороги ею воспользовались свыше 26 млн пассажиров. На сегодняшний день в Северной Америке построены и другие канатные дороги: через реку Миссисипи (1984 г.) и в г. Портленд (2006 г.).



б)



г)

Рис. 7. Канатная дорога в Нью-Йорке (США): *а* – пассажирская станция на о. Рузвельта;
б, *в* – пассажирская кабина; *г* – промежуточная опора

а)

в)

Наибольшее число действующих на сегодняшний день пассажирских подвесных канатных дорог находится в Европе – в Российской Федерации, Австрии, Англии, Германии, Испании, Италии, Латвии, Португалии, Франции, Украине, Швейцарии. Именно в европейских странах канатные транспортные системы получили наибольшее распространение: в Австрии их более 2500, во Франции – более 4000, в Италии – более 3000, в Швейцарии – более 2000. Ежегодно канатные дороги Европы перевозят около миллиарда пассажиров.

Пассажирская подвесная канатная дорога Emirates Air Line, построенная в Лондоне (Англия) к летним Олимпийским играм 2012 года, соединяет район Королевских доков и полуостров Гринвич через реку Темзу (рис. 8). Протяженность дороги составляет 1100 м с двумя конечными посадочными станциями. Высота движения кабин достигает 57 м над уровнем реки. Вдоль линии дороги курсируют 34 пассажирских кабин вместимостью 10 чело-

век, что обеспечивает часовую пропускную способность 2,5 тыс. пассажиров в каждом направлении.

Рис. 8. Канатная дорога в Лондоне

В Германии пассажирские подвесные канатные дороги построены в таких городах, как Бад-Райхенхалле, Боппард, Гамбург, Гармиш-Партенкирхен, Кельн, Кобленц, Линц-на-Рейне и др. Канатная дорога в Кельне, открывшаяся в 1957 г., в тот момент была первой и единственной пассажирской подвесной канатной дорогой в Германии [115]. На линии общей протяженностью 930 м курсируют со скоростью 10 км/ч 44 пассажирские кабины вместимостью 4 человека (рис. 9). Пропускная способность дороги составляет 1600 пасс./ч, а всего за время ее функционирования было перевезено более 17 млн пассажиров. Ставшая второй в Германии канатная дорога Кобленца, начавшая эксплуатироваться с 2010 г., представляет собой полноценный городской транспорт, соединяющий левую и правую части города через реку Рейн (набережную реки с подножием крепости Эренбрейтштейн) [114]. На линии курсируют 18 панорамных кабин, в одной из которых имеется стеклянное дно, причем максимальная высотная отметка

трассы достигает 850 м (рис. 10).

Рис. 9. Канатная дорога в Кельне

Рис. 10. Канатная дорога в Кобленце

Значительная доля пассажирских подвесных канатных до-

рог во Франции построены в горных местностях для обслуживания отдыхающих на горнолыжных курортах страны. В частности, канатные дороги имеются в Бресте, Гренобле, Тулоне [117], Шамони и др. Первая в мире городская канатная дорога была построена в Гренобле в 1934 г. (рис. 11) [116]. Канатная дорога в Шамони – характерный пример подвесных канатных дорог для горных рекреационных территорий (рис. 12). Она была построена в 1955 г. из Шамони на вершину горы Эгюий-дю-Миди и до середины 70-х гг. XX в. являлась самой высоко расположенной канатной дорогой в мире. До сих пор она занимает первое место по перепаду высот между нижней (1035 м) и верхней станциями (3777 м). Пропускная способность дороги – 550 пасс./ч. Пассажирская канатная дорога в Бресте (телефирик), построенная в 2016 г. швейцарской фирмой Bartholet за 19 млн евро, рассматривается как канатная дорога нового поколения и предназначена исключительна для реализации общественных городских перевозок (рис. 13). Она связывает напрямую центр города с районом, расположенном на другом берегу реки Сены, ее общая протяженность составляет 460 м, движение кабин осуществляется на высоте 70 м над землей.

Рис. 11. Канатная дорога в Гренобле

Рис. 12. Канатная дорога в Шамони
(верхняя посадочная станция)

Рис. 13. Канатная дорога (телефирик) в Бресте

В Италии также построены и эксплуатируются пассажирские подвесные канатные дороги. Преимущественно они расположены в Альпах и обеспечивают проезд пассажиров на горных курортах,

а также обеспечивают доступность смотровых площадок на вершинах гор и вблизи исторических мест и достопримечательностей (как правило, старинных монастырей или замков). В частности, известны канатные дороги в окрестностях Больцано, Кавалезе, Курмайоре, Мальчезини, Мерано, Рапалло, Стрезе (рис. 14), Турина, у вулкана Этна и др. Из городских подвесных канатных дорог известен проект, разработанный для Милана [37], который предусматривал постройку дороги в виде замкнутого кольца общей длиной 9 км с пролетами между промежуточными опорами 650 м. В качестве опор были предложены башни-гаражи высотой 70…75 м. На дороге должны курсировать со скоростью 7 м/с 136 пассажирских вагонов вместимостью 50 человек, что позволяло обеспечить пропускную способность транспортной системы в объеме 16 тыс. пасс./ч [37].

Рис. 14. Канатная дорога на вершину горы Моттароне (Стреза)

Пассажирские подвесные канатные дороги эксплуатируются в Испании. Одной из наиболее известных является канатная до-

рога в Барселоне, спроектированная для дополнительного пассажирского сообщения во время проведения Всемирной выставки 1929 г., но введенная в эксплуатацию из-за финансовых трудностей лишь в 1931 г. [23]. Дорога общей протяженностью 1292 м соединяет морской порт Барселоны с горой Монтжуик. Она состоит из двух встречных стальных несущих канатов, к которым крепятся две кабины вместимостью до 19 человек, приводимые в движение со скоростью 17,3 км/ч с помощью электропривода на станции горы Монтжуик (рис. 15). Пропускная способность канатной дороги составляет 2,0 тыс. пасс./день. Конечные посадочные станции и промежуточная опора представляют собой крупногабаритные башенные конструкции высотой 56, 78 и 107 м объявлены историко-художественным наследием Барселоны, в их верхней части помимо собственно посадочной платформы располагаются рестораны и смотровые площадки.

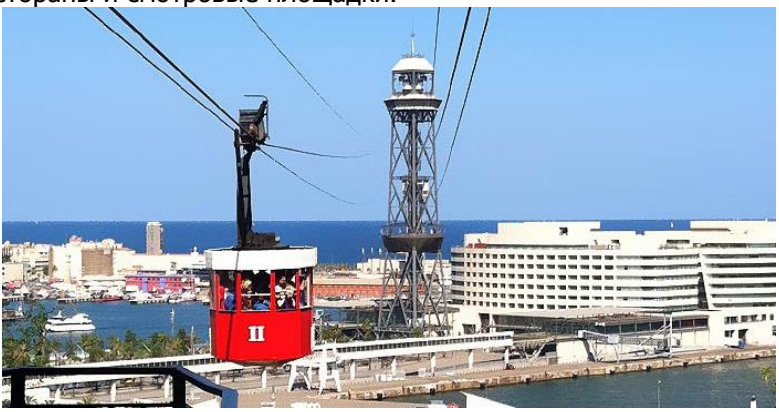


Рис. 15. Канатная дорога в Барселоне

Рис. 16. Канатная дорога Нгонг-Пинг 360 в Гонконге

На Азиатском континенте пассажирские подвесные канатные дороги функционируют в Азербайджане, Армении, Вьетнаме, Израиле, Индии, Казахстане, Китае, Малайзии, Сингапуре, Туркмении, Турции, Узбекистане. Крупнейшей в Азии является канатная дорога Нгонг-Пинг 360 (Гонконг, Китай) протяженностью 5,7 км, эксплуатирующаяся с 2006 г. Она соединяет собой станцию метро «Тунг-Чунг» с одноименной деревней на острове Лантау (рис. 16). Конструктивной особенностью линии канатной дороги является то, что она дважды меняет свое направление под углом более 60^0.

В Армении находится самая длинная на сегодняшний день пассажирская подвесная канатная дорога мятникового типа, получившая название Татевская канатная дорога или «Крылья Татева» (рис. 17) [21]. Эксплуатация дороги начата в 2010 г. Она соединяет через Воротанское ущелье села Алидзор и Татев (вблизи одноименного монастыря). Общая протяженность дороги составляет 5,7 км, а наибольшая высота над ущельем – 320 м. Вмещающая 25 пассажиров кабина движется с максимальной скоростью 37 км/ч, она поддерживается шестью канатами (по три на каждую кабину – два несущих и один тяговый). Канаты рассчитаны на 10…15-й запас прочности. Основной привод дороги состоит из двух электродвигателей, один из которых является резервным, также имеется резервный дизельный двигатель. Работоспособ-

ность канатной дороги обеспечивается при ветре до 70 м/с. Сооружение канатной дороги обошлось в 18 млн долл., её строительство финансировали в основном частные фонды.

Рис. 17. Посадочная станция Татевской канатной дороги

В Латинской Америке пассажирские подвесные канатные дороги в настоящее время эксплуатируются в ряде стран, таких как Аргентина, Боливия, Бразилия, Венесуэла, Колумбия, Коста-Рика, Эквадор. В Боливии действует самая высокая в мире на сегодняшний день канатная дорога, открытая в 2014 г. (рис. 18). Она соединила столицу страны Ла-Пас с пригородом Эль-Альто, расположенным на высоте 4150 м над уровнем моря. Канатная дорога протяженностью 2,6 км (I очередь) имеет пропускную способность более 1,0 тыс. чел./ч, а II очередь дороги протяженностью около 7,3 км – порядка 18 тыс. чел./ч.

Рис. 18. Канатная дорога в Боливии

В качестве городского пассажирского транспорта подвесные канатные дороги используются в нескольких городах континента. В г. Медельин (Колумбия) имеются две последовательно расположенные линии канатного метро, действующие с 2006 г. Одна, являющаяся собственно городским видом транспорта, соединяет центр города, расположенный в низине, с окраинами, расположенными на отрогах гор, а вторая, туристическая, доходит до национального парка «Арви» (рис. 19). На городской линии, кроме концевых станций, расположены еще две промежуточные посадочные станции, при прохождении которых восьмиместные пассажирские кабины притормаживают для удобства выхода-посадки. Канатная дорога Warairarepano в г. Каракас (Венесуэла), построенная в 1956 г. и имеющая протяженность почти 2 км, соединяет центр столицы со смотровой площадкой на вершине горы Авила, расположенной на высоте 2000 м над уровнем океана (рис. 20). На линии курсируют пассажирские кабины вместимостью 8 человек.

Рис. 19. Канатная дорога в Колумбии

На Африканском континенте пассажирские подвесные канатные дороги эксплуатируются лишь в нескольких странах – Алжире, Египте, ЮАР. В Южно-Африканской республике канатная дорога построена в Кейптауне и соединяет центр города с самой известной местной достопримечательностью – вершиной Столовой горы, расположенной на высоте 1086 м над уровнем океана (рис. 21). В Египте канатная дорога действует в столице страны Каире, а также имеется несколько небольших по длине подвесных дорог на курортах Красного моря, предназначенных для перемещения отдыхающих из отеля непосредственно на пляж (рис. 22).

Рис. 20. Канатная дорога в Каракасе

Рис. 21. Канатная дорога в Кейптауне

Рис. 22. Канатная дорога в отеле (Египет)

В Алжире пассажирские подвесные канатные дороги построены и функционируют в таких городах, как столица – г. Алжир, Оран, Константина, Тлемсен, Скикда [13]. Канатная дорога в г. Константина протяженностью около 1,6 км, построенная в 2007 г. фирмой «Doppelmayr/Garaventa», используется для внутригородских пассажирских перевозок (рис. 23). На линии курсируют 40 пассажирских вагонов-гондол со скоростью 6 м/с, что позволяет обеспечить пропускную способность на уровне 2,4 тыс. пасс./ч. [13].

Пассажирские подвесные канатные дороги также имеются в Австралии (дорога Skyrail Rainforest Cableway, Taronga Zoo Sky Safari) и Новой Зеландии (дорога Skyline) (рис. 24, 25).

Рис. 23. Канатная дорога в Константине

Рис. 24. Канатная дорога Skyrail Rainforest Cableway в Австралии

Рис. 25. Канатная дорога Skyline в Новой Зеландии

В России примером городского транспорта может служить первая междугородная пассажирская одноканатная дорога «Нижний Новгород – Бор» через реку Волгу, эксплуатирующаяся с 2010 г. (рис. 26) [74]. Ее длина составляет 3661 м, причем величина пролета над водной поверхностью – 861 м (самый длинный пролет в Европе и России), а высота опор – до 82 м. Проезд пассажиров осуществляется в 56 восьмиместных кабинах со скоростью 5 м/с, что обеспечивает пропускную способность 500 чел./ч. Максимальная скорость ветра, при которой разрешается работа дороги, составляет 15 м/с, а минимальная температура воздуха – -30°С. На начало 2017 г. было перевезено 8,8 млн пассажиров.

С 2006 г. пассажирская канатная дорога действует в Оренбурге [22]. Её длина составляет 233 м и соединяет Зауральскую рощу и городскую набережную реки Урал по так называемому маршруту «Европа-Азия» (рис. 27). Дорога возводилась на средства местных предпринимателей и ее стоимость составила 54 млн руб. Скорость движущихся навстречу друг другу пассажирских кабин составляет 3 м/с.

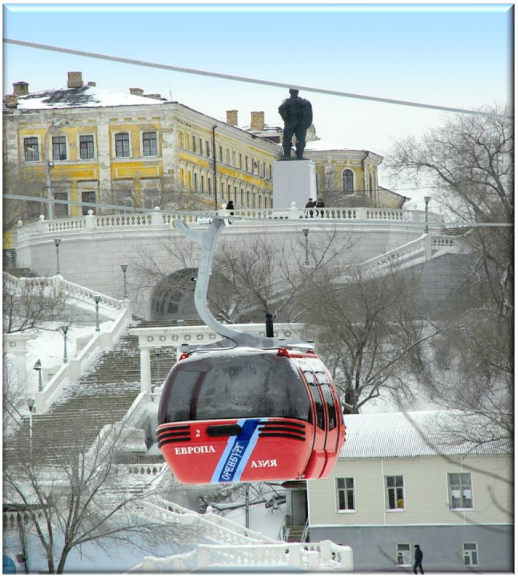
б)

г)

Рис. 26. Пассажирская канатная дорога «Нижний Новгород – Бор»:
а – общий вид; *б* – станция «Нижний Новгород»; *в* – посадка в кабину;

а)

в)



а)

б)

Рис. 27. Пассажирская канатная дорога в Оренбурге

Кольцевая пассажирская канатная дорога «3S» (пос. Красная Поляна, г. Сочи) представляет собой сочетание маятниковой и одноканатной кольцевой канатной дороги (рис. 28). Вагоны вместимостью 30 пассажиров перемещаются на трассе по двум несущим канатам диаметром 58 мм с помощью тягового каната диаметром 55 мм со скоростью 8,5 м/с. На станциях вагоны отцепляются от тягового каната и движутся со скоростью 0,28 м/с.

а)

б)

Рис. 28. Кольцевая пассажирская канатная дорога «3S» в пос. Красная Поляна:

а – посадочная станция; *б* – канатная система

Впервые в Российской Федерации в горном кластере г. Сочи в окрестностях пос. Красная Поляна в кратчайшие сроки (чуть более года) были построены две пассажирские канатные дороги типа 3S (см. рис. 28). По техническим характеристикам пассажирские подвесные трёхканатные дороги с кольцевым движением тягового каната и отцепляемого на станциях подвижного состава типа 3S идентичны. Они представляют собой сочетание маятниковой и одноканатной кольцевой канатной дороги. Условно их можно считать канатными дорогами нового, третьего поколения, так как ранее использовавшиеся конструкции канатных дорог с неотцепляемыми зажимами пассажирских кабин следует рассматривать как канатные дороги первого поколения, а конструкции одно- и двухканатных дорог с отцепляемыми зажимами – второго поколения [29]. С помощью канатной дороги типа 3S возможно перевозить не только пассажиров, но и крупные грузы, например, автомобили до трех тонн.

Одна из канатных дорог (рис. 29, номер III) соединяет железнодорожную станцию «Красная Поляна» (отметка над уровнем моря 550 м) и Приют №2 (высотная отметка 1646 м). Сегодня это самая длинная в мире канатная дорога с кольцевым движением, её длина составляет 5370 м. Дорога оснащена пассажирскими кабинами вместимостью 30 человек, перемещаемыми со скоростью 8,5 м/с. Весь путь между концевыми станциями занимает 12 мин. На станциях посадки-высадки каждая последующая кабина подходит под загрузку пассажирами через 36 с (расстояние между кабинами 306 м). Всего на трассе может находиться 41 кабина. Пропускная способность составляет 3000 пасс./ч в каждом направлении. Вторая канатная дорога общей протяженностью 3148 м и пропускной способностью 4500 пасс./ч (рис. 29, номер VIIа и VIIв) соединяет транспортно-пересадочный узел «Роза Хутор» в районе реки Мзымта и «Горнолыжный центр» через промежуточную станцию «Горная деревня».

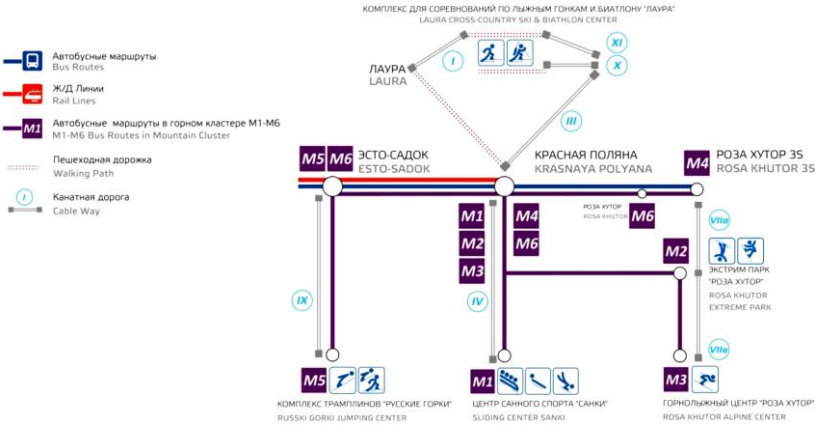


Рис. 29. Схема пассажирских маршрутов общественного железнодорожного, автобусного и канатного транспорта на транспортно-пересадочных узлах
горного кластера Красная Поляна

Увеличенная скорость движения пассажирских кабин достигнута благодаря конструктивным решениям башмаков на опорах для несущих канатов, изготовленных с радиусом кривизны (плавное профилирование) 50 м, увеличенной длиной подвеса кабин до 3,4 м и длиной тормозного и разгонного конвейеров на станциях до 31 м.

Максимальная скорость ветра, при которой допускается работа дороги, составляет 28 м/с. Устойчивость кабины обеспечивается опорой каретки посредством восьми колес на два несущих каната, наличием промежуточных поддерживающих подвесных опор, закрепляемых на несущих канатах, и предотвращающих возможность захлестывания последних тяговым канатом.

Канатная дорога типа 3S имеет возможность эксплуатироваться при больших пролетах между промежуточными (линейными) опорами. В частности, при длине трассы 5370 м она оборудована всего пятью основными и одной пристанционной опорами. Высота опор составляет от 39 до 78,5 метров. На рис. 30 представлен общий вид одной из промежуточных (линейных) опор. В

качестве тягового каната используется стальной оцинкованный канат диаметром 55 мм конструкции Warrington по EN 12385-8. Канат состоит из двух кусков по 5700 м каждый, соединенных в единое кольцо двумя счалками. В качестве несущих используются четыре стальных каната закрытой конструкции 58 FLAR-1x151 1770/1960 UZ (EN 12385-9) диаметром 58 мм длиной 5900 м каждый.

Рис. 30. Общий вид
одной из промежуточных (линейных) опор

Для перевозки пассажиров использованы 30-местные пассажирские кабины (22 места для сидения, 8 мест для стоящих

пассажиров) с зажимами, отцепляемыми от тягового каната на станциях. Каретка, на которой подвешена кабина, имеет восемь колес, с помощью которых она передвигается по двум несущим канатам, выполняющим роль гибких рельсов. Соединение кабины с тяговым канатом осуществляется с помощью двух зажимов. На рис. 31 представлен общий вид зажима подвески кабины, расположенной на каретке. Интервал между кабинами контролируется антиколлизионной системой.

Рис. 31. Общий вид зажима подвески кабины, расположенной на каретке

Привод пассажирский подвесных канатных дорог оборудован шестью рабочими и шестью аварийными тормозами, имеет

четыре основных двигателя, два резервных привода, содержит четыре гидромотора и две маслостанции с двигателями внутреннего сгорания, обеспечивающими заданные мощности в аварийных ситуациях. Суммарная мощность потребляемой электроэнергии при пуске канатной дороги составляет около 1,0 МВт.

Надежность и безопасность работы механизмов основана на многократном резервировании узлов и агрегатов:

– основного привода, содержащего четыре основных двигателя и шесть рабочих дисковых тормозов, с возможностью осуществлять движение подвижного состава при одном не работающем двигателе;

– двух независимых резервных приводов с дизельными агрегатами каждый;

– резервированием подшипниковых узлов приводного, натяжного и отклоняющих шкивов;

– двойного резервирования привода колесного конвейера разгона-торможения на станциях.

Спасательные работы на канатных дорогах третьего поколения не предусматривают эвакуацию пассажиров из кабин на землю с использованием специальных средств. При любых сценариях аварийной остановки проведение спасательных работ осуществляется путем перемещения кабин с пассажирами на станции. Учитывая эту особенность конструкции канатной дороги типа 3S можно использовать в качестве городского транспорта в урбанизированной среде.

Технические характеристики ряда эксплуатирующихся отечественных пассажирских подвесных канатных дорог приведены в табл. 2 [68]. Более подробная информация о пассажирских канатных дорогах России содержится в [21].

Таблица 2

Техническая характеристика эксплуатируемых пассажирских подвесных и буксировочных канатных дорог

Место установки, тип, изготовитель	*П*, чел./ч	$L_{укл}$, м	*H*, м	*υ*, м/с	*n*, шт.	$d_к$, мм	*N*, кВт

1	2	3	4	5	6	7	8
«3S» ОАО «Газпром», пос. Красная Поляна, г. Сочи, с 30-местными отцепляемыми вагонами, Doppelmayr (Австрия)	3000	5369	1092	8,5	41	58	1570
«Нижний Новгород – Бор», с 8-местными отцепляемыми кабинами, POMA (Франция)	1000	3661	62	5,0	56	54	850
«Олимпия», Роза Хутор, г. Сочи, с 8-местными отцепляемыми кабинами, Doppelmayr (Австрия)	2800	2341	606	6,0	87	56	970
«Кавказский экспресс», Роза Хутор, г. Сочи, с 8-местными отцепляемыми кабинами, Doppelmayr	2400	2370	979	6,0	80	56	1020
«Домбай-2», Карачаево-Черкессия, с 6-местными отцепляемыми креслами, Doppelmayr (Австрия)	2000	2182	731	5,0	84	52	684
«Волчья скала», Роза Хутор, г. Сочи, с 6-местны-ми отцепляемыми креслами, Doppelmayr (Австрия)	3000	1378	420	5,0	82	45	474
«Тургояк», г. Миасс, с 4-местными фиксированными креслами, Leitner	2000	972	220	2,6	106	38	150

«Экстрим», Роза Хутор, г.Сочи, с 4-местными фиксированными креслами, Doppelmayr (Австрия)	1781	954	219	2,6	92	36	160
«Домбай-3», Карачаево-Черкессия, с 4-местными фиксированными креслами, Doppelmayr (Австрия)	1479	661	143	2,2	63	36	105
«Могул», Роза Хутор, г. Сочи, с 2-местными фиксированными креслами, Leitner (Италия)	800	639	212	2,5	59	26	110
«Домбай-4»(старая), Карачаево-Черкессия, с 2-мест-ными креслами, ГПКИ «Союзпроммеханизация» (РФ)	800	625	229	2,3	58	32,5	75
«Чегет-1», п. Терскол, Кабардино-Балкария, с 1-местными фиксированными креслами, Завод им. Котлякова (РФ)	240	1477	613	2,2	89	28	75
БКД №4, «ГЛК Л. Тягачева», с 2-местными буксировочными устройствами, Leitner (Италия)	1000	324	51	3,2	34	16	30
«Псехако-Е1», г.Сочи, с 1-местными букси-	700	638	66	2,0	105	14,5	30

ровочными устройствами, Doppelmayr (Австрия)							
БКД №1, «ГЛК Л. Тягачева», с 1-местными буксировочными устройствами, Leitner (Италия)	600	237	44	2,5	24	16	18,5

Примечание: *П* – пропускная способность; $L_{укл}$ – длина по уклону; *H* – перепад высот между станциями; *υ* – скорость движения каната; *n* – общее число кабин (кресел); $d_к$ – диаметр каната; *N* – мощность привода.

Несмотря на достаточно большое число действующих на сегодняшний день в России пассажирских подвесных канатных дорог, их доля в общей совокупности канатных дорог Европы оказывается скромной (рис. 32) [45]. Особенно мало канатных дорог, используемых в качестве городского общественного транспорта. Следует считать, что ежегодная потребность в канатных дорогах в Российской Федерации составляет порядка 50…100 единиц, причем 2…5 единицы – для городского транспорта.

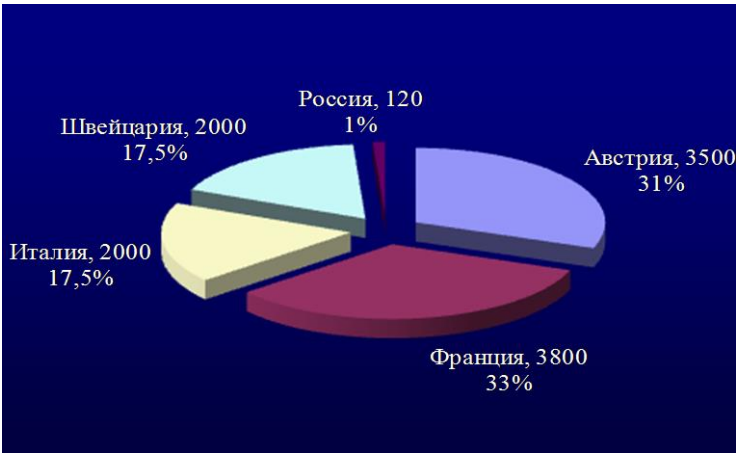


Рис. 32. Сравнительная диаграмма числа канатных дорог в странах Европы

В настоящее время вопросами проектирования и строительства канатных дорог в Российской Федерации занимается ряд промышленных предприятий и организаций, в первую очередь, СКАДО (Самара), ПромтрансНИИпроект (Москва), Проект (Краснодар), ИКЦ «Мысль» (Новочеркасск) и др. На долю фирмы СКАДО, входящей в группу компаний «Доппельмайер» (Австрия) приходится до 80 % построенных в России пассажирских канатных дорог.

Производителями основного оборудования канатных дорог являются преимущественно иностранные фирмы Doppelmayr (Австрия), POMA (Франция), Leitner (Италия). Металлоконструкции опор и станций изготовляют российские предприятия, расположенные в Белгороде, Краснодаре, Самаре и др.

Монтаж пассажирских подвесных канатных дорог производят СКАДО (Самара), Гортехмонтаж (Сочи), Трест «Ай Би Си» Промстрой (Нальчик), Росинжиниринг (Санкт-Петербург) и др.

1.3. Развитие транспортной инфраструктуры крупных городов и территорий на основе применения инновационной технологии канатного метро

Канатное метро является инновационным видом канатного транспорта (разновидностью пассажирской подвесной канатной дороги) и предназначено для перевозки пассажиров в урбанизированной среде, между населенными пунктами и непосредственно в мегаполисах, расположенных на пересеченной местности, в том числе с наличием водных преград (река, озеро, болото, залив и др.), а также магистральных трасс, транспортных и водных путей, высоковольтных линий электропередач, нефте-, газо-, водопроводов, высотных зданий и сооружений с учетом безопасных габаритов приближения.

Основным отличием канатного метро от традиционных пассажирских подвесных канатных дорог, рассмотренных в п. 1.2, является наличие промежуточных станций, предназначенных не только для посадки-высадки пассажиров в подвижной состав, но и, что является принципиальным отличием, для пересадки пассажиров на другие маршруты и переадресации подвижного состава на другие маршруты, а также практически бесконечная длина транспортирования подвижного состава одним тяговым канатом. В качестве движителя тягового каната выступает мехатронный распределенный привод («активная роликовая батарея»), установленный дискретно на промежуточных станциях либо линейных опорах.

Конструкция подвесного канатного транспорта применительно к возможности его использования в качестве общественного пассажирского транспорта в крупных городах-мегаполисах, городских агломерациях и в пределах природных территорий была защищена рядом патентов [81, 84, 88, 90–93].

Собственно термин «канатное метро» был введен в употребление в работах [81, 92] в процессе решения авторами следующей инженерно-технической задачи: создание универсальной пассажирской общественной транспортной системы для урбанизированной среды на основе мехатронного модульного принципа

проектирования и строительства с возможностью неограниченной достройки без ограничения формы профиля транспортных линий в плане и по высоте, без ограничения длины пути в пространстве, без ограничения количества и конфигурации стыкующихся на специальных узловых станциях транспортных линий.

Поставленная задача решена следующим образом [81, 92]. Транспортная система, общая структурная схема которой показана на рис. 33, включает путь, опирающийся на промежуточные опоры, и транспортное средство в виде пассажирских вагонов, является мехатронной системой. Она содержит мехатронные модули движения, увязанные между собой механической связью в виде пути, состоящего из одной и более нитей кольцевого тягового каната, и систему управления на базе иерархической децентрализованной сети с единым протоколом обмена информацией между мехатронными модулями. В их число входят:

– мехатронный модуль кольцевого тягового каната;
– мехатронный модуль транспортного средства;
– мехатронный модуль станции.

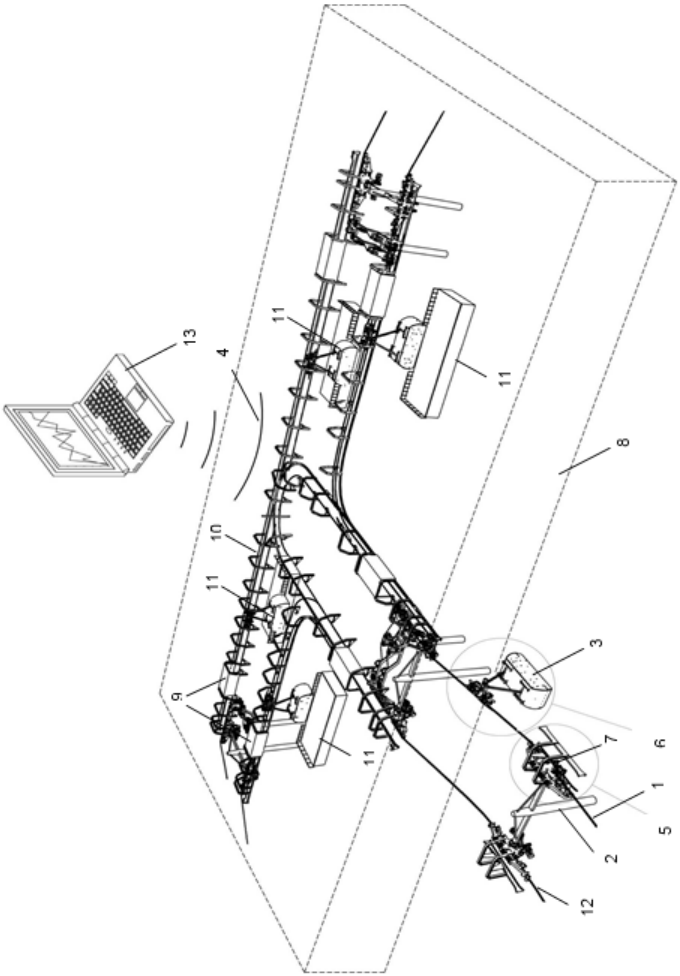


Рис. 33. Общая схема транспортной системы канатного метро: *1 (12)* – путь (несущие канаты); *2* – промежуточная опора; *3* – транспортное средство (пассажирский вагон); *4* – информационная сеть; *5* – модуль кольцевого тягового каната; *6* – модуль транспортного средства; *7* – устройство срабатывания захватов; *8* – модуль станции; *9* – конвейер; *10* – жесткий путь; *11* – посадочная площадка; *13* – система управления

Мехатронный модуль кольцевого тягового каната распола-

гается на промежуточных опорах в конструкции балансиров (рис. 34). Он содержит два и более двигателя, оснащенных рабочими и аварийными тормозами. Они создают тяговое усилие или силу торможения торможение на одной из нитей кольцевого тягового каната посредством шкива трения с натяжным устройством. Балансиры, на которые опираются нити кольцевого тягового каната, представляют собой демпферную шарнирно-сочлененную систему поддерживающих роликов.

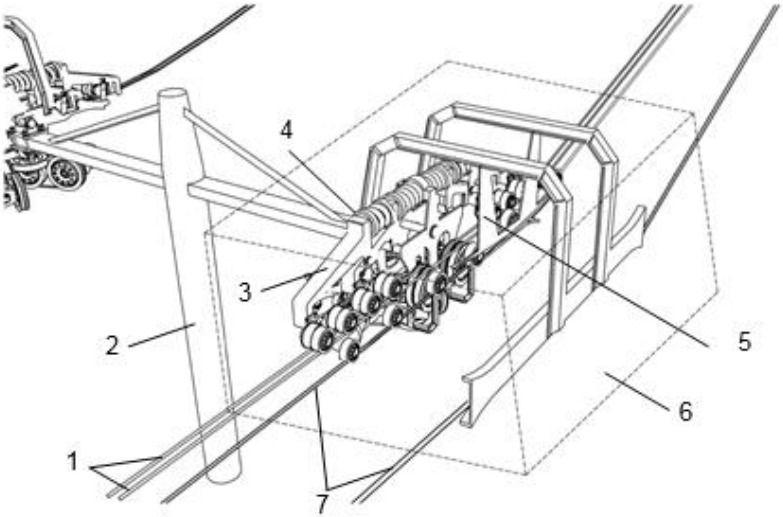


Рис. 34. Модуль кольцевого тягового каната (на примере пути из двух несущих канатов и двух нитей тягового каната): *1* – нити кольцевого тягового каната; *2* – промежуточная опора; *3* – каретка; *4* – демпферная шарнирно-сочлененная система роликов; *5* – устройство срабатывания захватов; *6* – модуль кольцевого тягового каната; *7* – несущие канаты

Мехатронный модуль транспортного средства оснащен двигателем разгона-торможения и автоматическими захватами (рис. 35). Они установлены на каретке, причем по их количеству и размеру соответствуют нитям кольцевого тягового каната с подвешенными к ним транспортными средствами в виде пассажирских

вагонов. Автоматические захваты взаимодействуют с устройством срабатывания захватов, установленным на промежуточных опорах.

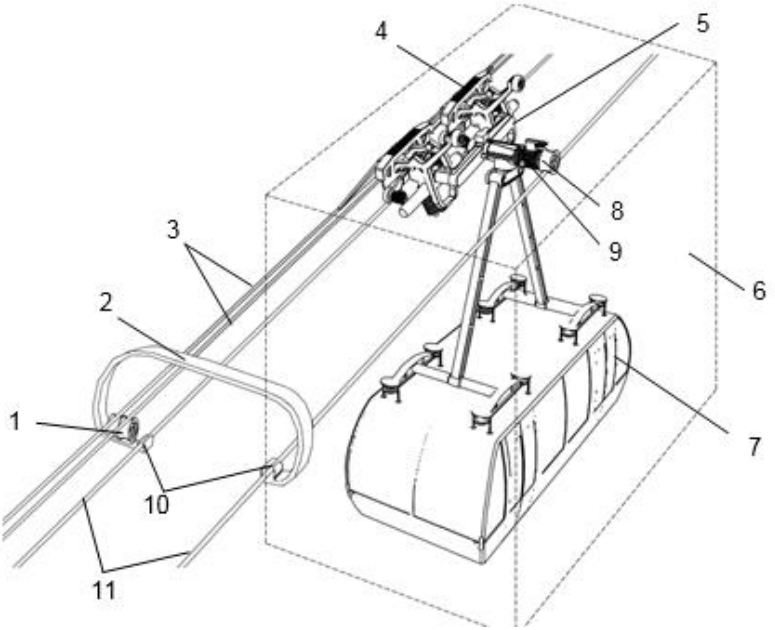


Рис. 35. Модуль подвижного состава (на примере пути из двух несущих канатов и двух нитей тягового каната): *1* – поддерживающие блоки; *2* – подвесная опора; *3* – нити кольцевого тягового каната; *4* – автоматический захват; *5* – каретка; *6* – модуль транспортного средства; *7* – транспортное средство (пассажирский вагон); *8* – колеса; *9* – двигатель разгона торможения; *10* – жесткие зажимы; *11* – несущие канаты

Мехатронный модуль станции включает последовательно установленные на въезде-выезде устройства срабатывания захватов, конвейеры контроля скорости каретки при разгоне-торможении, автоматические устройства изменения направления движения подвижного состава («стрелки»), сопряженные с одним

из жестких путей соответствующего маршрута, и посадочные площадки для загрузки-выгрузки пассажиров из пассажирских вагонов. При этом путь проходит над трассами, транспортными и водными путями, электрическими проводами, нефте-, газо-, водопроводами, естественными препятствиями и инженерными сооружениями по территории урбанизированной среды с учетом габаритов приближения, в том числе и опирается на них.

Путь транспортной системы дополнительно содержит один и более несущих канатов, соединенных подвесными опорами в пролетах с нитями кольцевого тягового каната. Нити имеют поддерживающие блоки, причем количество и размер этих блоков соответствуют количеству и диаметру кольцевого тягового каната. Кроме того, имеются жесткие зажимы, количество и размер которых соответствуют количеству и диаметру несущих канатов. Каретка дополнительно оснащена колесами, опирающимися на несущие канаты. Количество колес и их размер соответствуют количеству и размеру несущих канатов.

Рассматриваемая транспортная система канатного метро работает следующим образом. Пути, по которому движется транспортное средство в виде пассажирского вагона, выполнены из нитей кольцевого тягового каната, проходящего над наземной урбанизированной инфраструктурой с учетом допустимых габаритов приближения к инфраструктурным объектам различного типа, в том числе могут и опираться на них. Нити кольцевого тягового каната соединены с транспортным средством посредством каретки и установленных на ней автоматических захватов. Тяговое усилие или усилие торможения на нитях кольцевого тягового каната создается мехатронными модулями кольцевого тягового каната, расположенными на промежуточных опорах. Кинематическая схема модуля кольцевого тягового каната (на примере пути из одной нити тягового каната) показана на рис. 36.

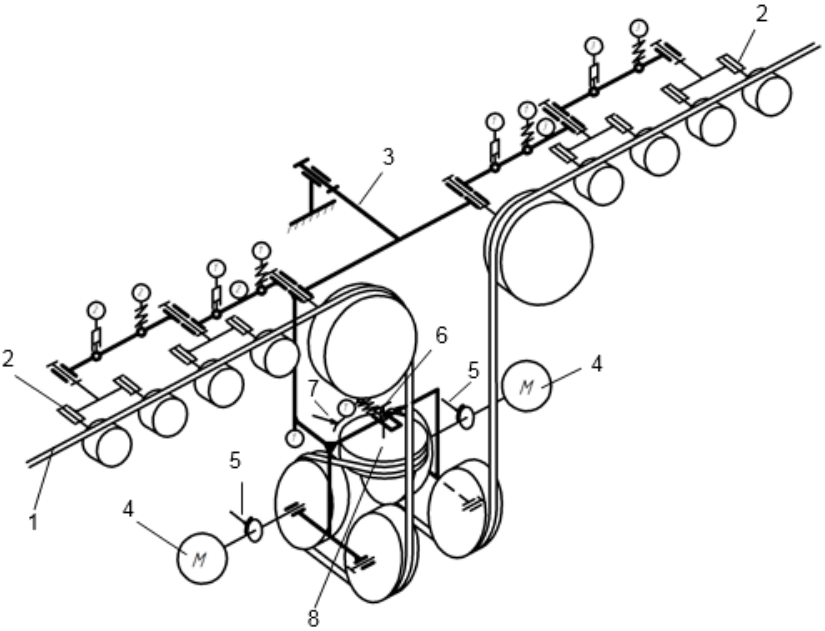


Рис. 36. Кинематическая схема модуля кольцевого тягового каната (на примере пути из одной нити тягового каната): *1* – нити кольцевого тягового каната; *2* – демпферная шарнирно-сочлененная система роликов; *3* – балансир; *4* – двигатель; *5* – рабочий тормоз; *6* – натяжное устройство; *7* – аварийный тормоз; *8* – шкив трения

Каждый мехатронный модуль кольцевого тягового каната интегрирован в конструкцию балансиров и содержит два и более двигателя, оснащенных рабочим и аварийным тормозами. В момент, когда мехатронный модуль транспортного средства приближается к промежуточной опоре, один из автоматических захватов, установленный на каретке, взаимодействует с устройством срабатывания захватов и отцепляется от одной из нитей кольцевого тягового каната. Транспортное средство в это время остается подвешенным к другой из нитей кольцевого тягового

каната другим захватов. Свободная от захвата нить кольцевого тягового каната отклоняется на демпферной шарнирно-сочлененной системе поддерживающих роликов и огибает шкив трения. Натяжение нити кольцевого тягового каната на шкиве трения осуществляется натяжным устройством. Шкив трения приводится в движение двумя и более двигателями, оснащенными рабочим и аварийным тормозами. Наличие двух и более двигателей, оснащенных рабочим и аварийным тормозами, является необходимым условием резервирования при обеспечении безопасности по транспортировке пассажиров, в том числе при проведении спасательной операции. Таким образом, каждым мехатронным модулем кольцевого тягового каната создается тяговое усилие на нитях кольцевого тягового каната, что и позволяет перемещать транспортные средства вдоль пути.

Расположение мехатронных модулей кольцевого тягового каната на промежуточных опорах позволяет создать транспортную систему с канатной тягой без ограничения длины пути. При этом диаметр нитей кольцевого тягового каната зависит от их количества, длины пролета между промежуточными опорами и максимальным количеством транспортных средств в пролете. Количество транспортных средств на трассе варьируется в зависимости от интенсивности пассажиропотока.

Транспортное средство для перемещения пассажиров оборудовано мехатронным модулем транспортного средства, которое содержит двигатель разгона-торможения и установленные на каретке автоматические захваты. Кинематическая схема модуля подвижного состава (на примере пути из двух несущих канатов и двух нитей тягового каната) приведена на рис. 37. При подходе транспортного средства к модулю станции автоматические захваты взаимодействуют с устройством срабатывания захватов и отсоединяют модуль транспортного средства от нитей кольцевого тягового каната. В этом момент каретка попадает на конвейер контроля ее скорости, включается двигатель разгона-торможения, приводящий в движение колеса, которые в свою очередь соприкасаются с жесткими путями. Пройдя конвейер, транспортное средство с помощью модуля транспортного средства продолжает двигаться по жестким путям и менять маршрут движения с помо-

щью автоматической стрелки по программе системы управления, передаваемой по сети. Двигаясь далее в модуле станции по заданному программой маршруту с заданной скоростью, транспортное средство подходит к посадочной площадке и останавливается. Здесь происходит посадка-высадка пассажиров. После посадки-высадки пассажиров по программе системы управления, передаваемой по сети, транспортное средство начинает движение и переходит с помощью автоматической стрелки на необходимый маршрут. Каретка попадает на конвейер контроля ее скорости, где достигается равенство скорости модуля транспортного средства и нитей кольцевого тягового каната. В этот момент происходит взаимодействие автоматических захватов с устройством срабатывания захватов и модуль транспортного средства соединяется с нитями кольцевого тягового каната. Транспортное средство попадает на путь и продолжает двигаться до следующего модуля станции.

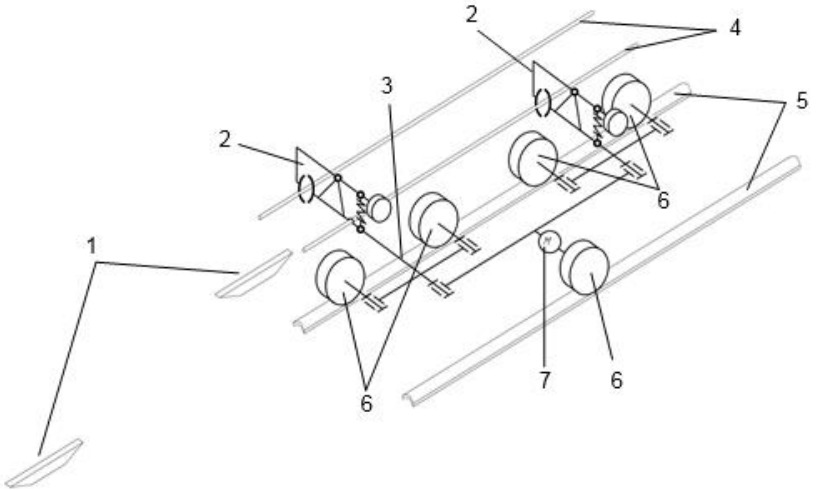


Рис. 37. Кинематическая схема модуля подвижного состава (на примере пути из двух несущих канатов и двух нитей тягового каната): *1* – устройство срабатывания захватов; *2* – автоматический захват; *3* – каретка; *4* – нити кольцевого тягового каната; *5* – несущие канаты; *6* – колеса; *7* – двигатель разгона торможе-

ния

Путь может быть выполнен из нитей кольцевого тягового каната и одного и более несущих канатов. Для устранения перехлестывания нитей кольцевого тягового каната и несущих канатов в пролете путь оснащен подвесными опорами. Подвесные опоры имеют поддерживающие блоки. Их количество и размер соответствуют количеству и диаметру нитей кольцевого тягового каната. Жесткие зажимы по своему количеству и размеру соответствуют количеству и диаметру несущих канатов. При этом каретка, дополнительно оснащенная колесами, опирается на несущие канаты. Количество и их размер колес соответствуют количеству и диаметру несущих канатов.

Конструкция такого пути позволяет распределить нагрузку от транспортного средства между канатами и, как следствие, увеличить расстояние между промежуточными опорами, уменьшить диаметр нитей кольцевого тягового каната. В конечном итоге это приводит к снижению действующих на несущие канаты динамических нагрузок вследствие уменьшения подвижной массы и габаритов вращающихся частей, на которые происходит опирание или изгиб нитей кольцевого тягового каната. Также улучшаются условия перевозки, монтажа и проведения пусконаладочных работ за счет уменьшения габаритов и массы комплектующих.

При таком конструктивном исполнении проектирование и строительство любой канатной системы канатного метро состоит из механической компоновки определенных модулей в определенной последовательности. Количество модулей, увязанных между собой общими параметрами, может варьироваться в зависимости от заданной цели или наращиваться в случае необходимости. Модули кольцевого тягового каната, расположенные на промежуточных опорах, позволяют увеличить эффективность тягового усилия за счет распределения его на каждой промежуточной опоре.

Движение транспортных средств по путям между модулями станций происходит путем создания тягового усилия или торможения на одной нити кольцевого тягового каната посредством шкива трения с натяжным устройством. При этом за счет многократного дублирования модулей кольцевого тягового каната

транспортное средство сможет достичь модуля станции даже при выходе из строя одного или нескольких модулей кольцевого тягового каната, тем самым повышается безопасность и комфорт пассажиров транспортной системы. При установке двух и более модулей кольцевого тягового каната вдоль пути транспортирования (например, на промежуточных опорах) получается многоприводный механизм, обладающий рядом преимуществ. Основное из них заключается в уменьшении тягового усилия в нитях кольцевого тягового каната, и, как следствие, в уменьшение его диаметра.

Связующим звеном между модулями кольцевого тягового каната является гибкий тяговый орган (стальной канат), характеризующийся в предложенной конструкции количеством нитей кольцевого тягового каната и его диаметром. При использовании многоканатной системы повышается безопасность транспортной системы.

Для системы управления используется децентрализованная сеть с единым протоколом обмена информацией (например, PROFIBUS). Она обладает экономическим преимуществом в части снижения цены за счет сокращения кабельного соединения и уменьшения занимаемой площади, а также технологическим преимуществом в части уменьшения времени отладки и ввода в эксплуатацию, гибкости к подключению дополнительных устройств к системе управления, возможности развития интеллектуальности системы при реализации задач автоматики вне блока центрального процессора с помощью многофункциональных контроллеров.

Наличие мехатронного модуля станции позволяет изменять маршрут движения пассажирских вагонов на другие пути движения за счет автоматических «стрелок» въезда-выезда, сопряженных с одним из жестких путей соответствующего маршрута. Данная функция позволяет пассажирам минимизировать время нахождения в пути между точками начала и конца маршрута.

Пассажирские вагоны разгоняются и тормозятся мехатронными модулями станции, включающими конвейеры контроля скорости каретки при разгоне-торможении и посадочные площадки для загрузки-выгрузки пассажиров из вагонов. Конвейеры контроля скорости позволяют варьировать ускорением пассажирских вагонов в широких пределах и за счет этого позволяют регулиро-

вать мгновенную пропускную способность в зависимости от интенсивности пассажирских потоков. Кроме того, они позволяют повысить комфорт пассажиров за счет наличия возможности пассажирского вагона полностью остановиться на посадочной площадке и плавно набрать скорость для перехода в движение между станциями.

Каждый мехатронный модуль движения транспортного средства с функцией разгона-торможения содержит каретку, опирающуюся на путь посредством ходовых колес. Количество и размер колес соответствует количеству несущих канатов. Модуль также содержит автоматические захваты, установленные на его каретке, которые взаимодействуют с профилем тягового каната. Захваты по количеству и размеру соответствуют нитям кольцевого тягового каната с подвешенными к ним транспортными средствами в виде пассажирских вагонов. Такая конструкция мехатронного модуля позволяет изменять количество пассажирских вагонов в зависимости от интенсивности пассажиропотока и резервировать подвижной состав на станциях, что минимизирует время ожидания свободного посадочного места.

Длина пути между станциями практически не ограничена вследствие применения одного или нескольких несущих канатов, жестко соединенных между собой подвесными опорами. Многоканатная тяга, приводящая в движение пассажирские вагоны через автоматические захваты, установленные на каретке, создает практически неограниченное тяговое усилие и снимает ограничения по количеству вагонов в пролете и пассажиров в вагоне.

Следует отметить, что предложенная транспортная система канатного метро отвечает всем определяющим признакам метрополитена по квалификации Р. Швандля [124], а именно:

– используется в урбанизированной местности (в крупных городах-мегаполисах, городских агломерациях и конурбациях);

– работает на электрической тяге;

– полностью отделена от любого другого движения, будь то железнодорожное, улично-дорожное или пешее;

– работает часто (с рабочим интервалом в дневное время не более 10 минут);

– уровни пола вагона и перрона совпадают.

В настоящее время известно несколько технических решений, направленных на разработку и совершенствование отдельных сторон канатного транспорта для условий урбанизированной среды, которые следует рассматривать как непосредственно связанные с понятием «канатное метро».

Наиболее ранним из технических решений, относящихся к названной категории, является городская канатная дорога [83]. При разработке данного технического решения ставилась цель по созданию нового комфортабельного, социально ориентированного, дешевого при строительстве и эксплуатации, доступного, легко адаптированного к урбанизированной среде, надежного и безопасного в эксплуатации, экологически чистого, не создающего шумы и вибрации на станциях, с канатной тягой вагонов, не имеющих ограничения по длине транспортирования и пересечений в одном уровне с любыми другими маршрутами движения, проложенного над проезжими частями улиц и городской застройкой вида общественного транспорта – городской канатной дороги.

Предложенное конструктивное исполнение городской канатной дороги для урбанизированной среды характеризуется тем, что городская канатная дорога, не имеющая пересечений в одном уровне с любыми другими маршрутами движения, содержит концевые, промежуточные и пересадочные пассажирские станции с галереями, оборудованными лестницами, эскалаторами, лифтами и пропускными посадочными системами (рис. 38) [38].

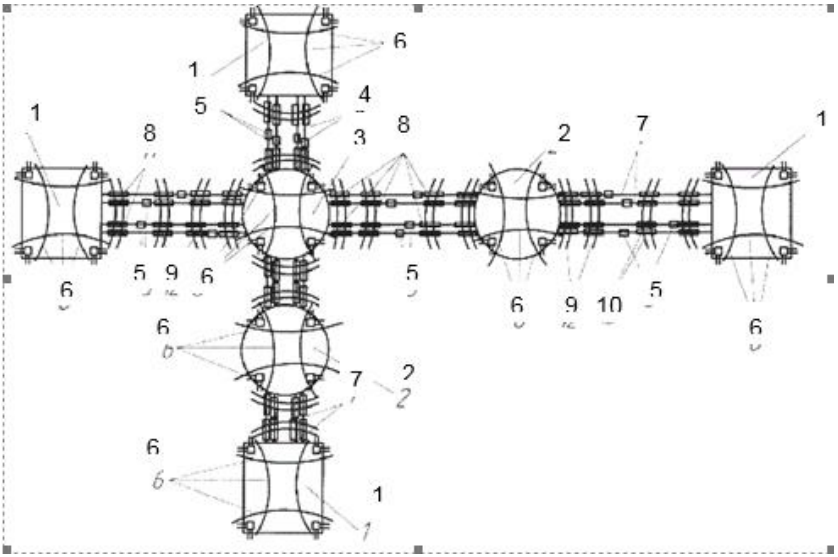


Рис. 38. Общая структурная схема городской канатной дороги *1* – концевая пассажирская станция; *2* – промежуточная пассажирская станция; *3* – пересадочная пассажирская станция; *4* – путь; *5* – пассажирский вагон; *6* – арочная опора; *7* – независимый путь; *8* – балансир; *9* – дискретный привод; *10* – промежуточная арочная опора

Все пассажирские станции между собой соединены путями, по которым перемещаются пассажирские вагоны на канатной тяге, оборудованные дверьми для посадки и высадки людей. Пассажирские станции установлены на арочных опорах над проезжими частями улиц, сохраняя под собой габариты для движения городского автотранспорта. Станции соединены между собой в каждом направлении двумя независимыми путями, выполненными из трех стальных канатов, два из которых несущие и один тяговый. На двух

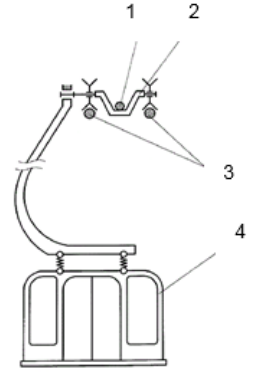


Рис. 39. Путь движения городской канатной дороги, состоящий из двух несущих и тягового канатов: *1* – несущие канаты; *2* – каретка; *3* – тяговый канат; *4* – пассажирский вагон

несущих и одном тяговом стальных канатах посредством специальных тележек с захватом подвешены отцепляемые на станциях пассажирские вагоны (рис. 39). Тележки приводятся в движение тяговым канатом. Тяговые канаты опираются на ролики балансиров, часть которых используется в кинематике дискретных приводов (рис. 40), расположенных на промежуточных арочных опорах. Несущие стальные канаты между станциями опираются на балансиры. Высота их закрепления на арочных опорах варьируется в зависимости от рельефа местности и высоты строений, расположенных под путями движения.

Отцепляемые пассажирские вагоны на пассажирских станциях располагаются на конвейерах, позволяющих изменять их скорость движения, производить с помощью системы переадресацию на другие пути, а также останавливать или снимать их с пути движения в специальные гаражи (рис. 41).

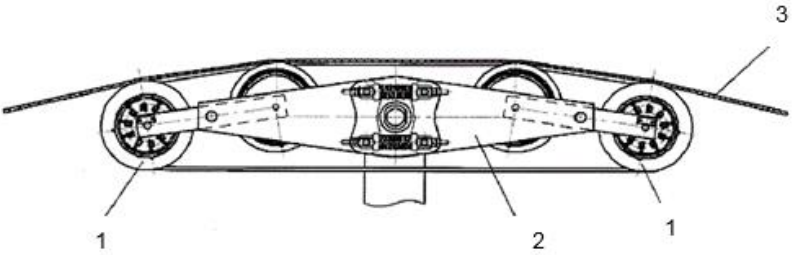


Рис. 40. Тяговый канат, опирающийся на ролики балансира, часть которых входит в кинематику дискретного привода:

1 – дискретный привод (мотор-колесо); *2* – балансир; *3* – тяговый канат

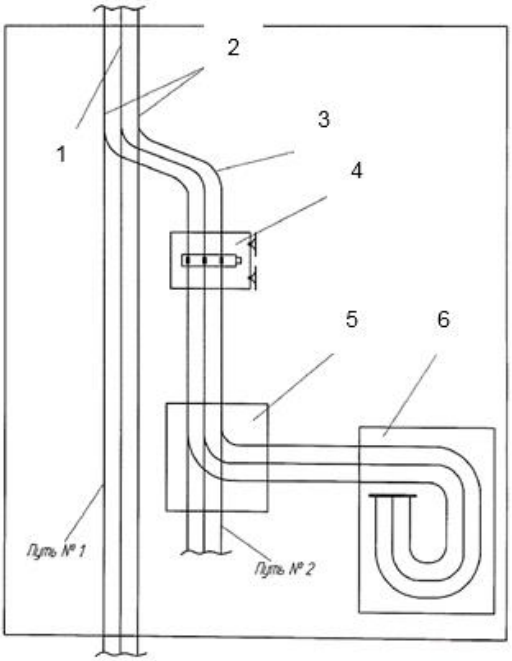


Рис. 41. План пересадочной станции канатной дороги для города с системой переадресации и гаражом: *1* – тяговый канат; *2* – несущий канат; *3* – конвейер; *4* – пассажирский вагон; *5* – система переадресации; *6* – специальный гараж

Городская канатная дорога работает следующим образом. Пассажиры приходят к концевой, промежуточной или пересадочной станциям и с помощью галерей, оборудованных лестницами, эскалаторами, лифтами и пропускными посадочными системами, попадают на посадочную платформу, где стоят или медленно движутся пассажирские вагоны. Пассажиры входят в вагоны и усаживаются на сидячие места. Пассажирские вагоны подхватываются конвейерами, разгоняются до скорости движения тягового каната и с помощью захвата, расположенного на тележке, попадают на несущие канаты. Далее они движутся по путям между станциями. Тележки с захватом приводятся в движение тяговым

канатом с помощью дискретных приводов. Тяговые канаты опираются на ролики балансиров, часть которых используется в кинематике дискретных приводов, расположенных на промежуточных арочных опорах. Несущие стальные канаты между станциями опираются на балансиры. Отцепляемые пассажирские вагоны на пассажирских станциях подхватываются конвейерами, позволяющими изменять их скорость движения, производить с помощью системы переадресацию на другие пути, а также останавливать или снимать их с пути движения в гаражи.

Техническая сущность и достигаемый результат предлагаемого устройства состоит в том, что городская канатная дорога, содержащая концевые и промежуточные пассажирские станции, дополнительно снабжена пересадочными станциями, позволяющими создавать комфорт пассажирам при следовании по различным маршрутам, в том числе детям и инвалидам, т.е. создать доступный вид общественного транспорта. На станциях имеется возможность разместить коммерческие и социально ориентированные инфраструктуры для пассажиров в виде кафе, магазинов, аптек, пунктов приема оплат, отделений банков, туалетов и пр.

Пассажирские станции с галереями, оборудованными лестницами, эскалаторами, лифтами и пропускными посадочными системами и установленные на арочные, Т-, Г-, П-образные опоры над проезжими частями улиц, легко могут быть адаптированы в урбанизированную среду, в том числе при строительстве, не нарушая существующие маршруты движения городского транспорта и архитектурный облик соседних территорий.

Применение дискретного привода, состоящего из мехатронных движителей для передачи тяговой способности от тягового каната к пассажирским вагонам, позволяет:

– освободить станции от приводов, имеющих значительные габариты и массу;

– создать комфорт на станциях за счет снижения шума и вибрации;

– распределять тяговое усилие по всей длине тягового каната, что сокращает нагрузки и дает возможность применять стальной канат меньшего диаметра;

– создать канатный привод пассажирских вагонов, не име-

ющий ограничения по длине транспортирования;

– повысить безопасность, продолжая движение вагонов по маршруту, даже при выходе из строя части дискретных приводов, реализовывая принципы резервирования.

Наличие на пересадочных станциях системы переадресации позволяет людям производить пересадку на другие пути (маршруты) без высадки из пассажирских вагонов, а также в случае нестандартной ситуации оперативно убирать неисправный вагон с маршрута в гараж, заменив его другим.

Из ранних технических решений следует назвать городскую канатную дорогу [84]. Предложенное конструктивное исполнение городской канатной дороги для урбанизированной среды характеризуется тем, что она не имеет пересечений в одном уровне с любыми другими маршрутами движения и содержит концевые, промежуточные и пересадочные пассажирские станции (рис. 42–44).

Пассажирские станции располагаются на арочных опорах над проезжими частями улиц с сохранением под ними габаритов для движения городского автотранспорта. Станции соединены между собой не менее чем двумя независимыми путями, состоящими из одного и более тяговых и несущих канатов. На них посредством каретки, колес и отцепляемого зажима подвешены пассажирские вагоны, приводимые в движение тяговым канатом. Станции оборудованы конвейерами с системой механической переадресации пассажирских вагонов на другие пути движения, а также, при необходимости, для остановки пассажирских вагонов. Между станциями установлены промежуточные опоры с системой балансиров, оборудованными ловителями и блокировочными устройствами, высота закрепления которых варьируется с учетом подвеса пассажирских вагонов в зависимости от рельефа местности и высоты строений, расположенных под путями движения.

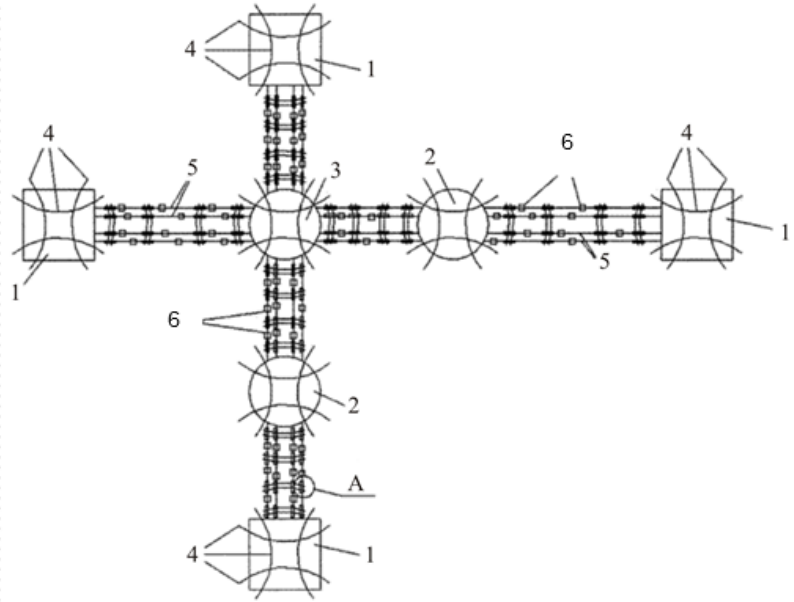


Рис. 42. Общая структурная схема городской канатной дороги:
1 – концевая пассажирская станция; *2* – промежуточная пассажирская станция;
3 – пересадочная пассажирская станция; *4* – арочная опора; *5* – путь;
6 – пассажирский вагон

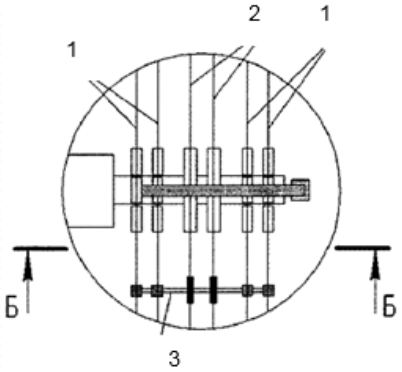


Рис. 43. Общая структурная схема городской канатной дороги (рис. 42, вид А): *1* – несущий канат; *2* – тяговый канат; *3* – подвесная опора

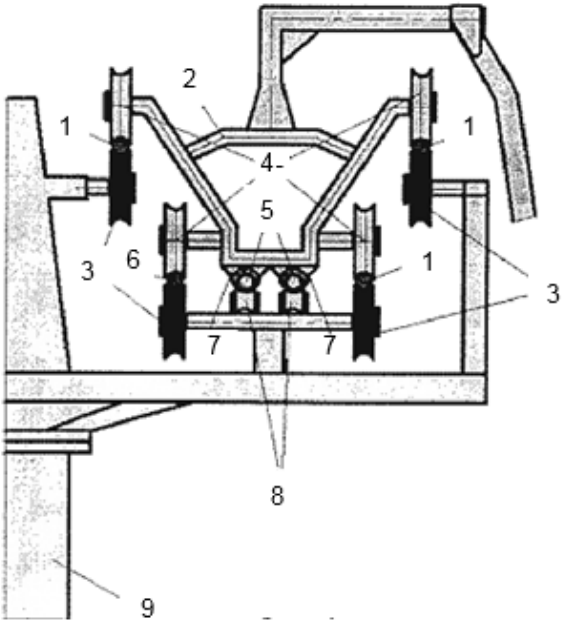


Рис. 44. Путь движения городской канатной дороги с двумя тяговыми и четырьмя несущими канатами: *1* (*б*) – несущий канат (путь); *2* – каретка; *3* – балансир; *4* – колесо; *5* – тяговый канат; *7* – отцепляемый зажим; *8* – тяговый орган; *9* – промежуточная опора

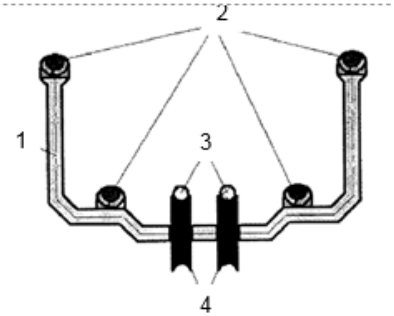


Рис. 45. Подвесная опора городской канатной дороги для двух тяговых и четырех несущих канатов: *1* – рама; *2* – несущий канат; *3* – тяговый канат; *4* – канатный блок

На путях между промежуточными опорами установлены подвесные опоры (рис. 45). Они содержат раму, а также один или более зажимов, охватывающих с двух сторон несущие канаты, и один или более поддерживающих канатных блоков, на которые опираются тяговые канаты.

Привод пассажирских кабин выполнен дискретным, содержащим мехатронные движители, у которых все двигатели имеют один блок управления и соединены между собой по принципу электрического вала (рис. 46).

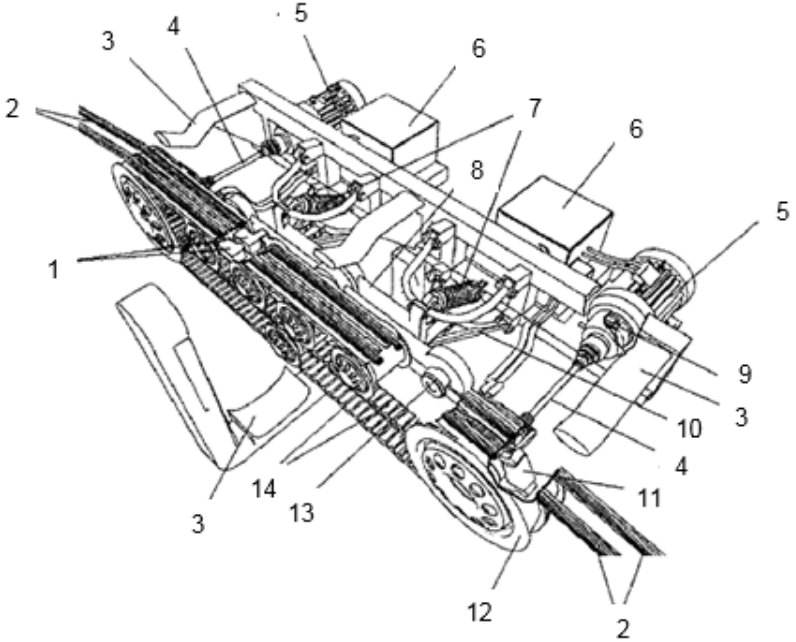


Рис. 46. Конструкция мехатронного движителя: *1* – блокировочное устройство; *2* – тяговый канат; *3* – ловитель; *4* – шарнир равных угловых скоростей; *5* – двигатель; *6* – блок управления; *7* – демпферная система; *8* – балансир; *9* – рабочий тормоз; *10* – шарнирно-сочлененная конструкция; *11* – аварийный тормоз; *12* – ролик балансира; *13* – ось балансира; 14 – тяговый орган (зубчатая лента)

Тяговые канаты 6 опираются на эластичные замкнутые тяговые органы мехатронных движителей дискретного привода, установленные на промежуточных опорах. Кинематическая цепь мехатронного движителя содержит один или более двигатель, рабочий тормоз, шарниры равных угловых скоростей, систему роликовых балансиров. В системе роликовых балансиров хотя бы один из роликов одного из балансиров снабжен аварийным тормозом. В кинематическую цепь мехатронного движителя входит эластичный замкнутый тяговый орган, который огибает все роли-

ки системы балансиров, подвешенной к промежуточным опорам посредством шарнирно-сочлененной конструкции, оснащенной демпферной системой.

Данная городская канатная дорога работает следующим образом. Пассажиры приходят на концевую, промежуточную или пересадочную станции, установленные на арочные опоры над проезжими частями улиц, к посадочным платформам, где стоят или медленно движутся пассажирские вагоны. Арочные опоры могут быть конструктивно выполненными Т-, Г-, П-образными. Люди входят в пассажирские вагоны и усаживаются на сидячие места. Станции оборудованы конвейерами с системой механической переадресации пассажирских вагонов на другие пути движения (согласно перечню маршрутов, установленных на канатной дороге), а также, при необходимости, для остановки пассажирских вагонов (рис. 47).

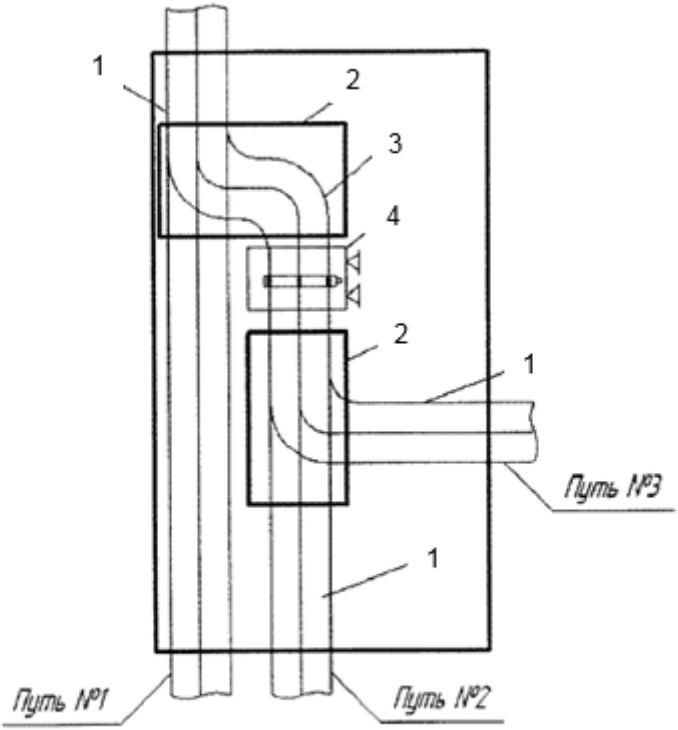


Рис. 47. План пересадочной станции городской канатной дороги с механической системой переадресации: *1* – путь; *2* – система механической переадресации; *3* – конвейер; *4* – пассажирский вагон

Пассажирские вагоны посредством конвейера разгоняются до скорости движения тягового каната и при помощи отцепляемого зажима, расположенного на каретке, происходит ее зацепление за тяговые канаты. Таким образом, колеса устанавливаются на несущие канаты. Пассажирские вагоны движутся по путям между концевыми станциями, через промежуточные и пересадочные станции. Они соединены между собой не менее чем двумя независимыми путями, состоящими из одного и более тяговых и несущих канатов. На них посредством каретки, колес и отцепляемого зажима подвешены пассажирские вагоны, приводимые в

движение тяговым канатом. Между станциями установлены промежуточные опоры с системой балансиров, оборудованной ловителями и блокировочными устройствами. Высота закрепления этих устройств варьируется с учетом подвеса пассажирских вагонов, в зависимости от рельефа местности и высоты строений, расположенных под путями движения. На путях между промежуточными опорами установлены также подвесные опоры, содержащие раму, один или более зажимов, охватывающие с двух сторон несущие канаты и один или более поддерживающих канатных блоков, на которые опираются тяговые канаты. Каретка через отцепляемый зажим приводится в движение тяговыми канатами с помощью мехатронных движителей дискретного привода. Привод выполнен дискретным, содержащим мехатронные движители, у которых все двигатели имеют один блок управления и соединены между собой по принципу электрического вала.

Тяговое усилие на тяговые канаты передается за счет сил трения через эластичный замкнутый тяговый орган. Эластичные замкнутые тяговые органы мехатронных движителей дискретного привода установлены на промежуточных опорах. Кинематическая цепь мехатронного движителя содержит один или более двигатель, рабочий тормоз, шарниры равных угловых скоростей, систему роликовых балансиров, в которой хотя бы один из роликов одного из балансира снабжен аварийным тормозом. В кинематическую цепь мехатронного движителя входит эластичный замкнутый тяговый орган, который огибает все ролики системы балансиров, подвешенной к промежуточным опорам посредством шарнирно-сочлененной конструкции, оснащенной демпферной системой. Использование двух тормозов (аварийного и рабочего) позволяет повысить надежность и безопасность за счет резервирования. Шарнирно-сочлененная конструкция, оснащенная демпферной системой, снижает динамические нагрузки при прохождении вагонов над опорами и повышает уровень комфортности транспортировки пассажиров.

У пассажирских вагонов при проходе через систему балансиров сглаживаются динамические нагрузки, улучшается плавность хода и появляется возможность увеличения скорости их движения. Отцепляемые пассажирские вагоны на пассажирских

станциях посредством конвейера могут изменять скорость движения, перемещаться с помощью системы механической переадресации на другие независимые пути, а также, при необходимости, производить остановку.

Конструктивное исполнение городской канатной дороги [84] имеет ряд недостатков [86]:

– наличие в конструкции всего одного тягового каната, приводящего в движение пассажирский вагон, и одного удерживающего зажима не достаточно с точки зрения резервирования и безопасности;

– работа городской канатной дороги лимитируется недостаточной надежностью эластичного тяговою органа и ограниченной по величине удельной нагрузкой между канатом и эластичным тяговым органом, а также изменяющимся коэффициентом трения эластичного замкнутого тягового органа, зависящего от состояния окружающей среды;

– эластичный замкнутый тяговый орган, входящий в состав мехатронного движителя, имеет недостаточную износостойкость, испытывая большие нагрузки при фрикционном движении каната, что требует постоянного контроля и своевременных замен;

– на концевых и промежуточных станциях установлены громоздкие механические конвейерные системы остановки, разгона и торможения, что не позволяет быстро изменять скорость и ускорение, а также гибко производить переадресацию на другие маршруты движения пассажирских вагонов на пересадочных станциях.

Для преодоления отмеченных недостатков в [86] было произведено конструктивное улучшение городской канатной дороги. Разработка модернизированного варианта была направлена на решение следующей технической задачи: повышение эффективности городской канатной дороги путем дополнительного резервирования несуще-тягового каната, комфортности и пропускной способности, а также расширение функциональной способности станций по управлению движением (разгон, торможение, остановка пассажирских вагонов, в том числе, по выбору маршрутов движения, выбор платформ, переадресация на другие пути на пересадочных станциях).

Поставленная задача решается благодаря тому, что городская канатная дорога содержит концевые, промежуточные, пересадочные станции, соединенные между собой путями, установленными на опорах над проезжими частями улиц с сохранением под ними габаритов для движения городского автотранспорта и проходящие над городской застройкой (рис. 48). Каждый путь выполнен в виде двух и более нитей одного кольцевого несуще-тягового каната. Кольцевой несуще-тяговый канат представляет собой *n*-е количество петель замкнутого несуще-тягового каната. Пассажирские вагоны, подвешенные к нитям одного кольцевого несуще-тягового каната через каретки посредством отцепляемых зажимов, приводятся в движение нитями одного кольцевого несуще-тягового каната от дискретных приводов.

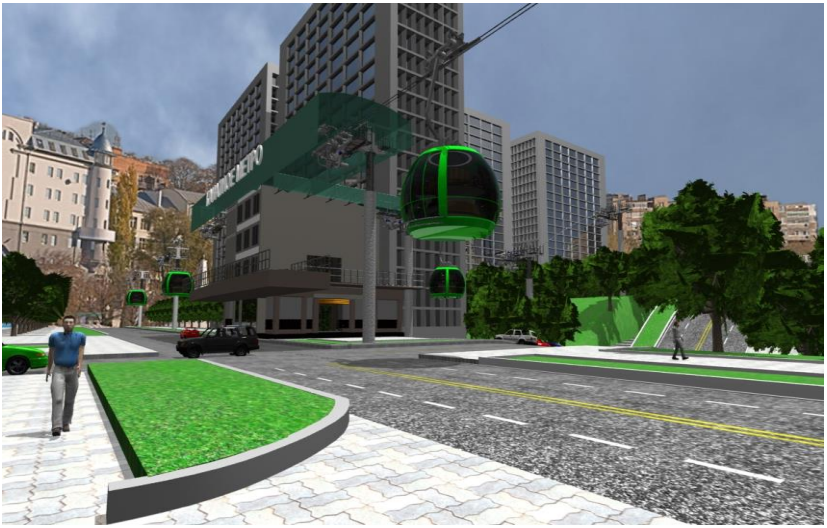


Рис. 48. Компьютерная модель городской канатной дороги

Каждый дискретный привод содержит один или более мехатронных движителей в виде модуля движения (рис. 49), входящих в кинематическую цепь демпферной шарнирно-сочлененной системы роликовых балансиров, установленных на промежуточ-

ных опорах. Система переадресации пассажирских вагонов, установленная на промежуточных и пересадочных станциях, оснащена иерархической системой управления.

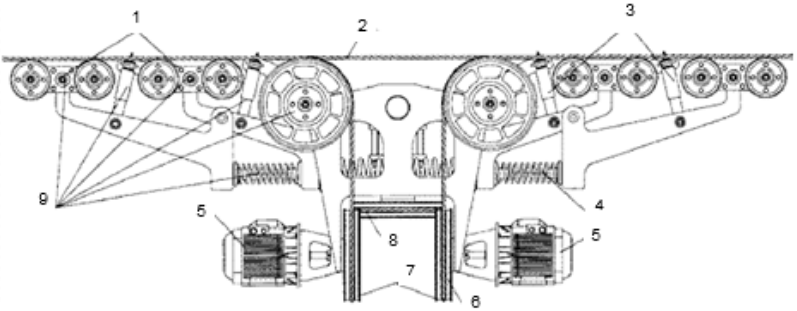


Рис. 49. Схема мехатронного модуля движения несуще-тягового каната: *1* – роликовый балансир; *2* – нить несуще-тягового каната; *3* – демпфер; *4* – пружина; *5* – электрический двигатель; *6* – рабочий тормоз; *7* – приводной шкив трения; *8* – аварийный тормоз; *9* – шарнирно-сочлененная система роликовых балансиров

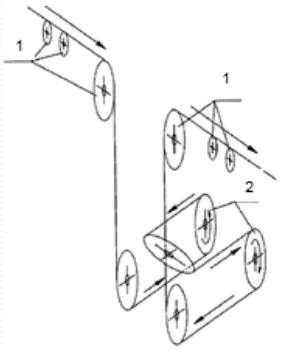


Рис. 50. Схема запасовки нити несуще-тягового каната на мехатронный модуль движения: *1* – роликовый балансир; *2* – приводной шкив трения

Кинематическая цепь каждого модуля движения содержит один или более электрических двигателей, каждый из которых соединен с приводным шкивом трения, рабочего и аварийного тормозов. Демпферная шарнирно-сочлененная система роликовых балансиров содержит два и более последовательно установленные через пружины и демпферы разной жесткости роликовые балансиры, расположенные в одной плоскости вдоль нитей одного кольцевого несуще-тягового каната. Одна из нитей одного кольцевого несуще-тягового каната поочередно в шахматном порядке огибает приводные шкивы трения каждого модуля движения, расположенные вне зоны движения каретки пассажирского вагона. Количество приводных шкивов трения в каждом

модуле движения зависит от требуемой тяговой способности конкретной канатной дороги. За счет количества приводных шкивов трения и схемы запасовки нитей одного кольцевого несуще-тягового каната в каждом модуле движения возможно практически не ограничено увеличить угол охвата нитью одного кольцевого несуще-тягового каната футерованных приводных шкивов трения одного модуля движения (рис. 50). Диаметр приводных шкивов трения и тяговая способность определяются расчетным путем и зависят от диаметра и конструкции применяемого несуще-тягового каната, пропускной способности городской канатной дороги (количества и вместимости пассажирских вагонов) и профиля ее трассы. Каждая каретка дополнительно оснащена мехатронным модулем движения привода колес и отцепляемыми зажимами по количеству, не менее чем число нитей одного кольцевого несуще-тягового каната (рис. 51).

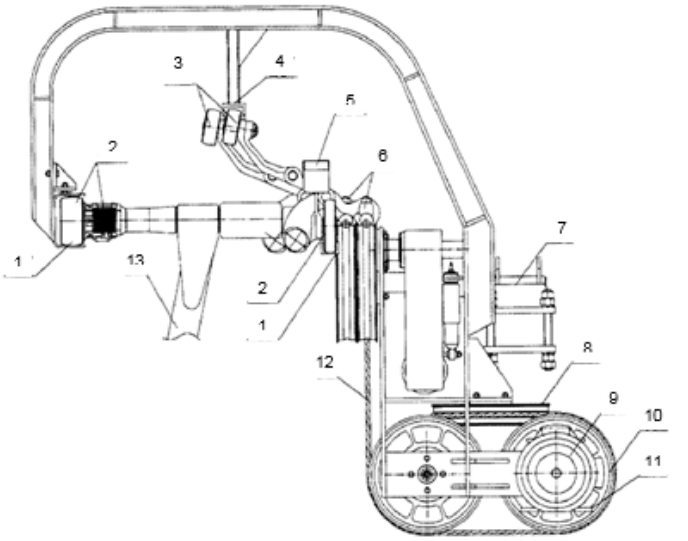


Рис. 51. Схема мехатронного модуля движения пассажирского вагона: *1* – жесткий путь; *2* – мехатронный модуль движения привода колес; *3* – подвижное звено; *4* – направляющая; *5* – троллея; *6* – отцепляемый зажим; *7* – промежуточная опора; *8* – аварийный тормоз; *9* – модуль движения; *10* – приводной шкив трения; *11* – рабочий тормоз; *12* – нить несуще-тягового каната; *13* – каретка

Отцепляемые зажимы выполнены в виде шарнирно сочлененных звеньев, подвижное звено каждого из которых взаимодействует на промежуточных опорах с направляющими, задающими траекторию и время срабатывания отцепляемого зажима. В пассажирских вагонах расположены источники питания. Система переадресации пассажирских вагонов содержит один и более жестких путей с троллеями и автоматическими стрелками, взаимодействующими на станциях с мехатронными модулями движения привода колес каретки.

Процесс работы городской канатной дороги можно разбить на четыре этапа:

1) выезд пассажирского вагона со станций на путь;

2) движение пассажирского вагона через промежуточную опору, где установлен дискретный привод;

3) въезд пассажирского вагона на станцию с пути;

4) движение пассажирского вагона по станции.

Первый этап. Пассажиры на станциях движутся на соответствующую платформу, где рассаживаются в пассажирские вагоны. Пассажирские вагоны с помощью мехатронного модуля движения привода колес каретки под управлением частотного преобразователя, получающего питание по троллеи, плавно разгоняются по жестким путям до скорости движения нитей одного кольцевого несуще-тягового каната. В этот момент подвижные звенья отцепляемых зажимов взаимодействуют с направляющей, происходит жесткое зацепление отцепляемых зажимов с нитями одного кольцевого несуще-тягового каната. Троллеи размыкаются, и, пройдя проверку, что отцепляемые зажимы закрылись, пассажирский вагон выдвигается на путь. В противном случае, по жестким путям с использованием автоматических стрелок пассажирский вагон снимается с пути.

Второй этап. Движение нитей одного кольцевого несуще-тягового каната по путям создается мехатронными движителями в виде модуля движения, установленными на промежуточных опорах. Нити, опираясь на демпферную шарнирно-сочлененную систему роликовых балансиров, придают ей выпуклую (вогнутую) форму, зависящую от профиля пути. При подходе пассажирского вагона к демпферной шарнирно-сочлененной системе роликовых балансиров последовательно установленные пружины разной жесткости роликовых балансиров принимают форму волны впереди идущей нити одного кольцевого несуще-тягового каната. Демпферы гасят автоколебания нити одного кольцевого несуще-тягового каната в процессе его движения. Одна из нитей одного кольцевого несуще-тягового каната в движении поочередно в шахматном порядке огибает приводные шкивы трения каждого модуля движения. Приводные шкивы трения приводятся во вращение от одного или более электрических двигателей, управляемых частотным преобразователем, установленным на промежуточной опоре. Каждый частотный преобразователь модуля движения функционально встроен в иерархическую систему управления (рис. 52) [86]. Кинематическая цепь модуля движения содержит рабочий и аварийный тормоза.

Рис. 52. Схема функциональной связи иерархической системы управления

При аварийной остановке канатной дороги торможение и остановка нитей одного кольцевого несуще-тягового каната осуществляется приводными шкивами трения за счет рекуперации электрическими двигателями мехатронного модуля движения рабочими и аварийными тормозами.

Пассажирский вагон, подвешенный к нитям одного кольцевого несуще-тягового каната, через каретки посредством отцепляемых зажимов плавно затягивается на демпферную шарнирно-сочлененную систему роликовых балансиров. Подвижное звено одного из отцепляемых зажимов взаимодействует на промежуточных опорах с направляющей, задающей траекторию и время его раскрытия (происходит раскрытие отцепляемого зажима относительно нити одного кольцевого несуще-тягового каната). В момент раскрытия отцепляемого зажима нить одного кольцевого несуще-тягового каната отклоняется на блоке и попадает на приводной шкив трения. В зависимости от запасовки нити одного кольцевого несуще-тягового каната количество приводных шкивов трения может быть не ограничено. Проходя через приводные шкивы трения и другой отклоняющий блок, нить одного кольцевого несуще-тягового каната возвращается в исходное прямоли-

нейное положение. При выходе этой же нити с приводных шкивов трения и другой отклоняющий блок того же подвижного звена, съезжая с направляющей, захватывает жестко нить (происходит захват отцепляемым зажимом нити одного кольцевого несуще-тягового каната). Расстояние между процессом «раскрытие-захват» нити одного кольцевого несуще-тягового каната равна не более 10…15 диаметров нити. При этой операции на одной из нитей одного кольцевого несуще-тягового каната создается тяговое усилие, способствующее перемещению пассажирских вагонов. При прохождении промежуточной опоры тяговое усилие создается только от одной нити кольцевого несуще-тягового каната, которая огибает приводные шкивы трения. Другие нити кольцевого несуще-тягового каната проходят демпферную шарнирно-сочлененную систему роликовых балансиров без отклонения с жестко зажатыми отцепляемыми зажимами. Дальнейшее устойчивое движение пассажирского вагона осуществляется с помощью этих нитей кольцевого несуще-тягового каната, оставшегося в зацеплении, вторым отцепляемым зажимом продолжающего движение в плоскости движения пассажирского вагона. На другой промежуточной опоре вдоль пути процесс передачи тягового усилия на нить одного кольцевого несуще-тягового каната повторяется, но с другой нитью. Один из отцепляемых зажимов, на которых висит пассажирский вагон, в шахматном порядке устраняет жесткую связь с одной из нитей одного кольцевого несуще-тягового каната на дискретном приводе (на незначительный промежуток времени), установленном на промежуточной опоре, в момент отклонения его на приводном шкиве трения. Отцепляемые зажимы пассажирских вагонов в пролетах между промежуточными опорами постоянно связаны с параллельными нитями одного кольцевого несуще-тягового каната. На самих же промежуточных опорах один из отцепляемых зажимов устраняет жесткую связь с одной из нитей одного кольцевого несуще-тягового каната на дискретном приводе на незначительный промежуток времени.

Третий этап. При подходе пассажирского вагона, где установлен источник питания, к станциям подается автоматический сигнал на управление частотного преобразователя, который при-

водит в движение мехатронный модуль движения привода колес каретки. Колеса приводятся в движение в холостом режиме до скорости, равной линейной скорости движения пассажирского вагона. В момент захода на станцию колеса соприкасаются с жесткими путями и питание преобразователя, а также подзарядка источника питания начинает подаваться через троллеи. В этот момент происходит открытие всех отцепляемых зажимов, движение пассажирского вагона продолжается по жестким путям, а управление и питание мехатронным модулем движения привода колес каретки на станциях осуществляется через троллеи. Дальнейшее движение вагонов до места посадки высадки пассажиров на станциях происходит за счет мехатронного модуля движения привода колес каретки.

Четвертый этап. Движение вагонов до платформ к местам посадки высадки пассажиров на станциях происходит по жестким путям через автоматические стрелки за счет мехатронного модуля движения привода колес каретки под управлением частотного преобразователя, получающего питание по троллеи. Частотный преобразователь функционально встроен в иерархическую систему управления канатной дороги.

Между совокупностью конструктивных особенностей данной городской канатной дороги и достигаемым техническим результатом существует причинно-следственная связь. Анализ этой связи показывает следующее.

Каждый путь выполнен в виде двух и более нитей одного кольцевого несуще-тягового каната, на котором через каретки и отцепляемые зажимы с количеством не менее чем число нитей несуще-тягового каната, подвешены пассажирские вагоны. Такое исполнение позволяет создать резервирование системы «несуще-тяговый канат – пассажирские вагоны». Параллельные нити несуще-тягового каната постоянно связаны между собой отцепляемыми зажимами в пролетах между опорами. Один из отцепляемых зажимов, на которых висит пассажирский вагон, в шахматном порядке теряет жесткую связь с одной из нитей несуще-тягового каната на дискретном приводе (на незначительный промежуток времени) в момент отклонения его на приводной шкив трения. При выходе этой же нити несуще-тягового каната со шкива тре-

ния свободный отцепляемый зажим жестко захватывает нить. Расстояние между процессом «раскрытие-захват» нити несуще-тягового каната составляет не более 10…15 диаметров нити. Отцепляемые зажимы выполнены в виде шарнирно сочлененных звеньев. Подвижное звено каждого отцепляемого зажима взаимодействует на промежуточных опорах с направляющими, задающими траекторию и время его срабатывания. Благодаря такой конструкции в случае обрыва одной из нитей несуще-тягового каната пассажирские вагоны всей городской канатной дороги останутся в висячем положении, чем и достигается резервирование, а, следовательно, повышается безопасность пассажирских транспортных перевозок.

Шарнирно-сочлененная система, расположенная в одной плоскости вдоль нитей несуще-тягового каната, оснащенная двумя и более последовательно установленными через пружины разной жесткости и демпфера роликовые балансиры, позволяет подобрать требуемые динамические характеристики, обеспечивающие плавность движения пассажирских вагонов при заходе (выходе) на промежуточные опоры и станции. Система роликовых балансиров в виде шарнирных соединений различной жесткости в одной плоскости позволяет оптимизировать (управлять) динамические нагрузки при относительном движении вагонов. В конечном итоге, повышается комфортность для пассажиров, возможность увеличить скорость движения вагонов и, как следствие, повысить пропускную способность канатной дороги в целом.

Дискретный привод, содержащий один или более мехатронных движителей в виде модуля движения, у которого кинематическая цепь каждого модуля движения содержит один или более электрических двигателей, каждый из которых соединен с приводным шкивом трения, позволяет практически неограниченно увеличить тяговую способность за счет количества приводных шкивов трения. Кинематическая цепь модуля движения содержит рабочий и аварийный тормоза, при этом одна из нитей несуще-тягового каната поочередно, в шахматном порядке огибает приводные шкивы трения каждого модуля движения, расположенные вне зоны движения каретки пассажирского вагона. За счет количества приводных шкивов и схемы запасовки нитей несуще-

тягового каната в каждом модуле движения возможно практически неограниченно увеличить угол охвата нитью футерованных приводных шкивов трения одного модуля движения, а следовательно, и его тяговую способность. Диаметр приводных шкивов и тяговая способность определяются расчетным путем и зависят от диаметра и конструкции применяемого несуще-тягового каната, производительности городской канатной дороги (количества и вместимости пассажирских вагонов) и профиля ее трассы.

Иерархическая система управления модулями движения несуще-тягового каната позволяет синхронизировать работу мехатронных движителей, а также обеспечивать взаимодействие их (по скорости) с мехатронными модулями движения привода колес пассажирского вагона при входе (выходе) с пассажирских станций. При подходе (выходе) к станции подается автоматический сигнал на пассажирский вагон, где установлен источник питания, который приводит в движение мехатронный модуль движения привода колес. Колеса приводятся в движение в холостом режиме до скорости, равной линейной скорости движения пассажирского вагона. В момент захода на станцию колеса соприкасаются с жесткими путями и контактируют с троллеями. В этот момент происходит открытие всех отцепляемых зажимов, движение пассажирского вагона продолжается по жестким путям, а управление и питание мехатронным модулем движения привода колес на станции осуществляется через троллеи.

Система переадресации пассажирских вагонов, содержащая один и более жестких путей с троллеями и автоматическими стрелками, взаимодействующими на станциях с мехатронными модулями движения привода колес каретки, позволяет совместно с иерархической системой управления расширить функциональные возможности станции по управлению движением (разгон, торможение, остановка) пассажирских вагонов, в том числе и по выбору маршрутов движения (выбор платформ, переадресация на другие пути).

Дальнейшим развитием идеологии создания городских канатных дорог для пассажирских транспортных перевозок в урбанизированной среде, основанной на инновационной технологии канатного метро, является подвесная канатная дорога с ме-

хатронными движителями [93]. Предложенное техническое решение направлено на повышение надежности, безопасности и эффективности управления механизмами движения канатной дороги и обеспечение равномерного распределения нагрузки между приводами, устранение чрезмерного провисания и натяжения тягового каната.

Для решения поставленной технической задачи подвесная канатная дорога с мехатронными движителями, установленными на промежуточных опорах, содержит регулируемые электроприводы и управляющие модули (рис. 53) [93].

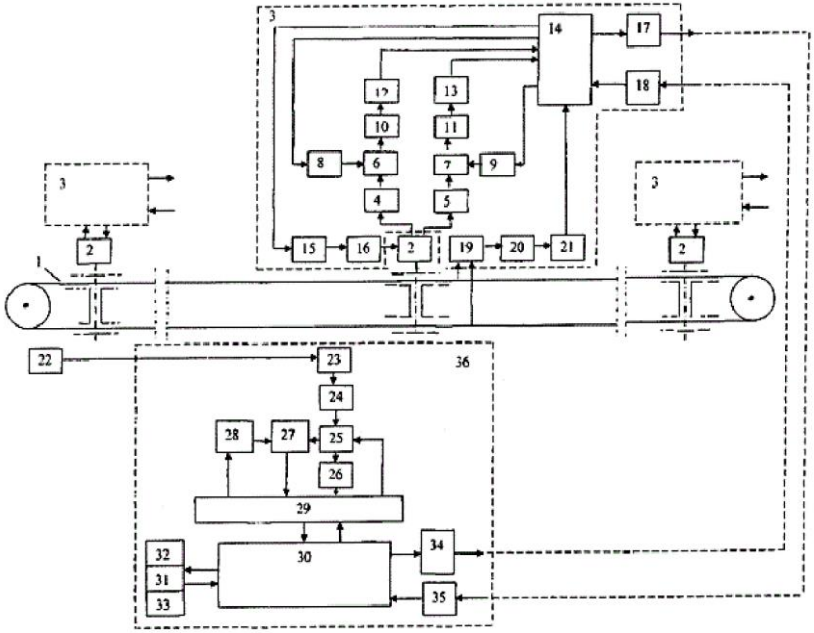


Рис. 53. Схема подвесной канатной дороги с мехатронными движителями: *1* – канатная дорога; *2* – регулируемый электропривод; *3* – управляющий модуль; *4* – датчик нагрузки; *5* – датчик скорости; *6* – элемент сравнения нагрузки; *7* – элемент сравнения скорости; *8* – задающий элемент нагрузки (размещен на натяжной станции канатной дороги – условно не показан); *9* –

задающий элемент скорости; *10* – усилитель нагрузки; *11* – усилитель скорости; *12* – аналого-цифровой преобразователь нагрузки; *13* – аналого-цифровой преобразователь скорости; *14* – микроконтроллер; *15* – управляющий модуль; *16* – исполнительный элемент; *17* – передающее устройство; *18* – приемное устройство; *19* – датчик контроля магнитной информации; *20* – усилительно-преобразовательный блок; *21* – дискретно-цифровой преобразователь; *22* – датчик считывания магнитной информации; *23* – усилительно-преобразовательный блок; *24* – дискретно-цифровой преобразователь; *25* – двоичный счетчик; 26 – блок определения пути каната; *27* – блок определения скорости каната; *28* – таймер; *29* – интерфейс; *30* – управляющий микроконтроллер; *31* – пульт оператора; *32* – блок ввода-вывода информации; *33* – индикатор; *34* – передающее устройство; *35* – приемное устройство; *36* – головной управляющий модуль

Указанные модули состоят из датчиков нагрузки *4* и датчиков скорости *5*, входы которых связаны с электродвигателями привода *2.* Их выходы подключены к одному из входов элементов сравнения нагрузки *6* и скорости *7*, вторые входы которых соединены с выходами задающих элементов нагрузки *8* и скорости *9*. Выходы элементов сравнения нагрузки *6* и скорости *7* соответственно через усилители *10* и *11*, аналого-цифровые преобразователи *12* и *13* связаны с модульным микроконтроллером *14*. Выходы микроконтроллера соединены с задающими элементами *8* и 9, а через управляющие модули 15 и исполнительные элементы *16* подключены к электродвигателям привода *2*. Также один из выходов микроконтроллера *14* связан с входом передающего устройства *17*. Другой вход модульного микроконтроллера *14* соединен с выходом приемного устройства *18*. Датчик контроля магнитной информации *19*, содержащий два чувствительных элемента, посредством двухканального усилительно-преобразовательного блока 20 и дискретно-цифрового преобразователя *21* электрически соединен с входом модульного микроконтроллера *14*. Датчик считывания магнитной информации *22* через усилительно-преобразовательный блок *23* и дискретно-цифровой преобразователь *24* подключен к входу суммирующего двоичного счетчика *25*, выходы которого электрически соединены с входами

блока определения пути каната *26* и блока определения скорости каната *27*. Другой вход блока определения скорости каната *27* подключен к выходу таймера *28*. Выходы блоков пути каната *26* и определения скорости каната *27* через интерфейс *29* подключены к входу управляющего микроконтроллера *30*. Выход управляющего микроконтроллера *30* посредством интерфейса *29* связан с входом двоичного счетчика *25* и таймера *28*. Кроме этого, управляющий микроконтроллер *30* электрически соединен с пультом оператора *31*, содержащим блок ввода-вывода информации *32* и индикатор *33*. А также он соединен с передающим устройством *34*, связанным с входом приемного устройства *18*, и с приемным устройством *35*, связанным с передающим устройством *17*. Связь может осуществляться по проводной или беспроводной линии. Элементы *23–35* объединены в головной управляющий модуль *36*.

Подвесная канатная дорога с мехатронными движителями работает следующим образом [93].

После пуска канатной дороги *1* датчики *4* измеряют нагрузку электродвигателей приводов *2*, а датчики *5* определяют скорость вращения ротора электродвигателей или ведущих шкивов приводов *2*. Электрические сигналы от датчиков *4* и *5* поступают на входы элементов сравнения нагрузки 6 и скорости 7. В них происходит сравнение измеренных значений нагрузки и скорости с заданными значениями, поступающими от задающих элементов *8* и *9*. На их входы поступают электрические сигналы от модульного микроконтроллера *14*. Результаты сравнения элементов *6* и 7 через усилители 10 и 11 и аналого-цифровые преобразователи 12 и *13* поступают на входы микроконтроллера 1*4*. В нем производится обработки информации, выдача установок нагрузки и скорости на задающие элементы *8* и *9* и управляющих сигналов через управляющие модули *15* и усилительные элементы 16 на электродвигатели приводов *2*, а также передача информации о нагрузке и скорости посредством передающего устройства *17* и приемного устройства *35* на вход управляющего микроконтроллера *30*. Схемы управления всех приводов *2* аналогичны.

Датчик контроля магнитной информации *19*, осуществляющий контроль количества магнитных меток на двух ветвях каната между опорами, выдает информацию через усилительно-

преобразовательный блок *20* и дискретно-цифровой преобразователь *21* на вход модульного микроконтроллера *14*. Информация о количестве меток используется для определения провисания каната между опорами. Считывание магнитных меток каната осуществляет датчик *22*, который через усилительно-преобразовательный блок *23* и дискретно-цифровой преобразователь *24* подключен к входу суммирующего двоичного счетчика *25*, хранящего информацию о пройденном пути тягового каната в течение одного никла работы. Данная информация используется для определения пройденного пути в блоке *26* и скорости движения каната в блоке *27*, связанным с таймером *28*. Информация о пути и скорости через интерфейс *29* передастся в память управляющего микроконтроллера *30*, который обрабатывает полученную информацию и выдаст управляющие сигналы посредством передающего устройства *34* в приемное устройство *18* и далее на вход модульного микроконтроллера *14*, где используется для корректировки управляющих сигналов управляющих модулей электродвигателей приводов *2*. В результате корректировки управляющих сигналов происходит изменение скорости вращения ведущих роликов *2*, что приводит к равномерному распределению нагрузки между приводами, устранению чрезмерного провисания и натяжения тягового каната. Кроме того, отказ одного или нескольких мехатронных движителей не вызывает отказа всей канатной дороги. Поэтому повышается надежность, безопасность и эффективность функционирования канатной дороги.

В каждом цикле осуществляется обнуление суммирующего двоичного счетчика *25* с помощью сигнала, поступающего от управляющего микроконтроллера *30*. Управление системой производится оператором с пульта *31*, который имеет блок ввода-вывода информации и индикатор. Блок ввода-вывода информации позволяет осуществлять ввод-вывод программы и данных в память управляющего микроконтроллера *30*. Информацию, хранящуюся в памяти управляющего микроконтроллера, можно посмотреть на индикаторе пульта оператора.

Перспективность транспортной технологии, основанной на концепции канатного метро, проявляется также и в том, что рассмотренные конструкции подвесных канатных дорог могут быть

адаптированы и для решения других, смежных задач по пассажирским перевозкам в условиях урбанизированной окружающей среды в пределах локальных объектов городской инфраструктуры. Пример такого подхода содержится в [91], где рассматривается конструкция и особенности функционирования канатной транспортной системы высотных зданий.

Высотные здания в силу своей специфики имеют большую степень потенциальной пожарной опасности в сравнении со зданиями нормальной этажности. Пожарная опасность для людей, находящихся в высотных зданиях, усиливается тем, что в отличие от малоэтажных домов сильно затрудняется эвакуация, а также возрастает сложность борьбы с пожарами [96]. Основные причины трагических последствий при пожарах в высотных зданиях – блокирование путей эвакуации продуктами горения и огнем. Для высотных зданий характерны быстрое развитие пожара по вертикали и большая сложность обеспечения эвакуации и спасательных работ. Важным фактором, способствующим трагическому развитию событий при авариях и пожарах, является отсутствие технических средств для эвакуации.

Технология канатного метро позволяет решить несколько социально-технических задач, направленных на повышение безопасности эксплуатации высотных зданий с большим числом присутствующих в них людей. Предложенная в [91] конструкция позволяет повысить эффективность и комфортность пассажирской транспортной системы высотных зданий и одновременно повысить эффективность мероприятий по спасению и обеспечения безопасности людей в чрезвычайных ситуациях. Кроме того, конструкция удобна в эксплуатации, минимизирует логистические маршруты в пространстве и времени для высотного строительства. Она может применяться как для нового строительства, так и при реконструкции уже существующих строений.

Поставленная задача достигается за счет того, что транспортная система для высотных зданий (рис. 54) содержит основание, прикрепленное к зданию на уровне верхних этажей; автономные источники питания; пульты управления, установленные в каждой кабине; кабины, движущиеся с помощью тяговых канатов по наружной (внешней) стороне здания в канатных направляю-

щих; верхние остановочные площадки (рис. 55), смонтированные на основании (в части здания, сквозь которое проходит канат, или в верхней части здания); нижние остановочные площадки (рис. 56), установленные на нулевом уровне с противоположных сторон здания (условное обозначение); остановочные площадки оборудованы системой фиксации каретки и кабин при их остановке; кабины подвешены к нитям тягового каната посредством каретки.

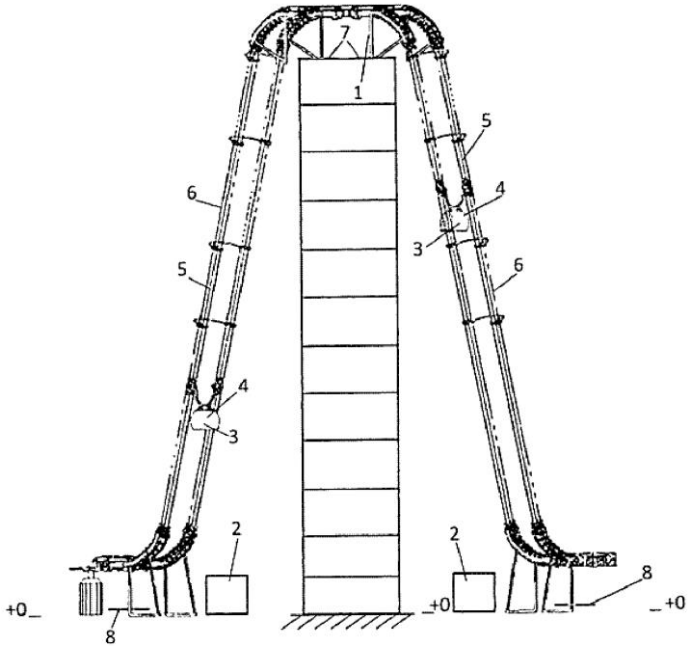


Рис. 54. Схема транспортной системы высотных зданий:

1 – основание; 2 – автономный источник питания; 3 – пульт управления;

4 – кабина; 5 – тяговый канат; 6 – канатная направляющая;

7 – верхняя остановочная площадка; 8 – нижняя остановочная площадка

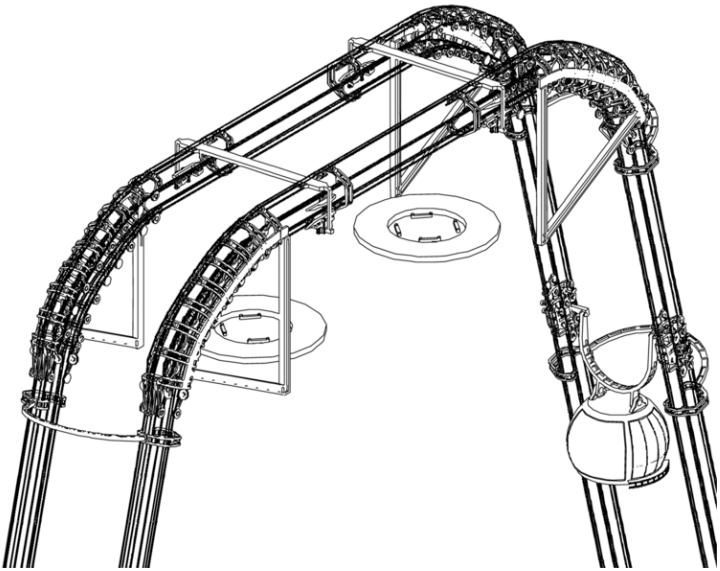
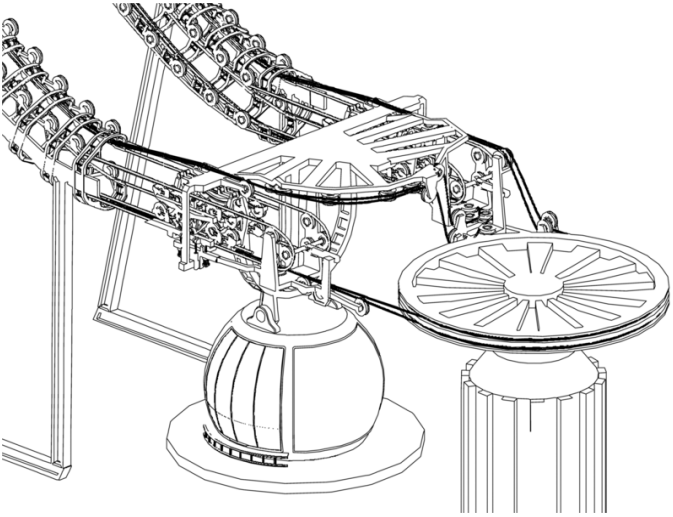
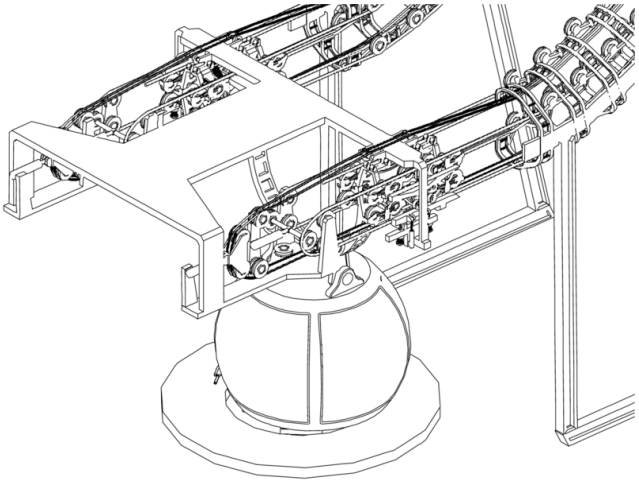


Рис. 55. Верхняя остановочная площадка

Кабины имеют реверсивный характер движения с остановкой одной из кабин на верхней остановочной площадке, а другой – на нижней остановочной площадке с нулевой отметкой. Кабины удерживаются в стабильном состоянии при движении посредством каретки с колесами, причем количество и размер колес соответствуют канатным направляющим. Кабины соединяются (разъединяются) с нитями тягового каната отцепляемыми зажимами, установленными на каретке, причем их количество и диаметр соответствуют. Кабины имеют автоматические двери, открывающиеся при фиксации каретки и кабин на остановочных площадках. Каждая кабина внутри имеет дополнительный пульт управления. Канатный привод выполнен в виде кольцевого тягового каната. Он образует две и более петли, охватывающие приводной многоручьевой шкив трения, установленный на нижней остановочной площадке с нулевой отметкой.



а)



б)

Рис. 56. Нижняя остановочная площадка:
а – с приводным шкивом; *б* – с натяжной системой

Канатный привод также включает натяжную систему, установленную на нижней остановочной площадке с нулевой отметкой, но на противоположной стороне здания. Нити тягового каната проходят сквозь здание или опираются на него посредством роликовых балансиров, смонтированных на основании. Канатные направляющие, соединяющие остановочные площадки между собой, выполнены из двух и более неподвижных канатов. Канаты огибают по роликовым балансирам/башмакам, закрепленных на основании, здание. Неподвижные канаты соединены между собой подвесными опорами в виде подковообразной балки, установленными по длине пути транспортирования (рис. 57). Количество поддерживающих блоков этих канатов соответствует количеству нитей тягового каната. Неотцепляемые зажимы жестко соединены с неподвижными канатами канатных направляющих.

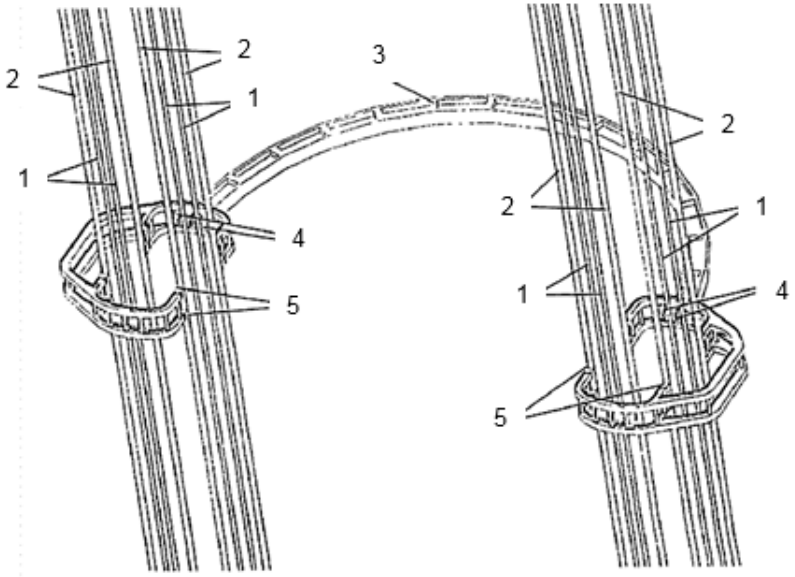


Рис. 57. Конструкция подвесной опоры:
1 – нить подвижного каната; *2* – канатная направляющая;
3 – подвесная опора; *4* – поддерживающий блок;
5 – неотцепляемый зажим

Канатная транспортная система высотных зданий работает следующим образом. В исходном положении одна кабина находится на верхней остановочной площадке, а другая кабина находится на нижней остановочной площадке с нулевой отметкой. Кабины отсоединены от тягового каната и удерживаются системой фиксации каретки и кабин. Автоматические двери кабин открыты.

Так как высотное здание имеет определенную амплитуду собственных колебаний, т.е. верхняя часть здания перемещается относительно основания и, соответственно, верхняя остановочная площадка перемещается относительно нижней остановочной площадки, расположенной на нулевой отметке, то нити тягового каната и неподвижные канаты канатных направляющих обкатываются (скользят) по роликовым балансирам и роликовым балансирам/башмакам, закрепленным на основании. Транспортная система не оказывает влияние на естественные процессы, происходящие с высотными зданиями.

Пассажиры садятся в кабины и нажимают пульт управления. Автоматические двери закрываются, система фиксации каретки и кабин на остановочных площадках разблокируется. Включается натяжная система, создающая необходимое натяжение в нитях тягового каната. Кабины оказываются в висячем положении, закрепленные к каретке. Отцепляемые зажимы, установленные на каретке, соединяются с нитями тягового каната. Включается канатный привод, вращающий приводной многоручьевой шкив трения, который передает тяговое усилие на нити тягового каната. Кабины начинают реверсивное движение от верхней остановочной площадки к нижней остановочной площадке. При окончании реверсивного движения весь процесс автоматически повторяется в обратном порядке. Кабины останавливаются, автоматические двери открываются и пассажиры выходят, оказываясь на нужном уровне (верхнем либо нижнем).

Для устранения перехлестывания нитей тягового каната и неподвижных канатов канатных направляющих в процессе эксплуатации предусмотрены подвесные опоры. Они имеют вид подковообразной балки и установлены по длине пути движения кабин, с количеством поддерживающих блоков, соответствующих количеству нитей тягового каната и неотцепляемых зажимов,

жестко соединенных с неподвижными канатами канатных направляющих.

Еще один характерный пример целесообразности применения технологии канатного метро в пределах локальных объектов городской инфраструктуры – общественных сооружений с большим числом находящихся в них людей. В [85] предложена конструкция подвесной канатной дороги для стадионов. Следует отметить, что оборудование системы «входа-выхода» стадионов дополнительно пассажирскими подвесными канатными дорогами не является альтернативой существующих систем доступа зрителей, а только расширяет его функциональные возможности в части повышения производительности (пропускной способности) при «входе-выходе», комфортности и безопасности, в том числе для трибун, расположенных на верхних ярусах.

Предложенное в [85] техническое решение на основе технологии канатного метро направлено на решение социальной и технической задачи, заключающейся в расширении функциональных возможностей стадиона за счет повышения пропускной способности, комфортности и безопасности при заполнении стадиона перед началом и, особенно важно, при выходе зрителей (болельщиков) после окончания соревнований путем оснащения системы «входа-выхода» канатным транспортом, учитывающим урбанистический и природный ландшафт, генеральный план и схему территориального планирования, в том числе возможность преодоления водных преград.

Поставленная задача решается за счет того, что стадион содержит спортивно-зрелищную площадку (как правило, футбольное поле, преимущественно размером 120 × 80 м), пропускные системы «входа-выхода» для зрителей, модульные сборно-разбор-ные конструкции трибун в виде ярусного амфитеатра (рис. 58, 59).

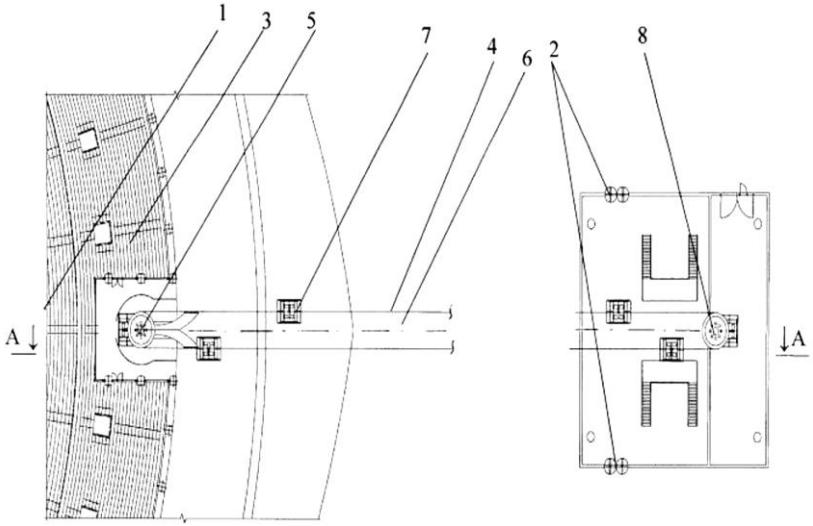


Рис. 58. План-схема стадиона, оснащенного дополнительно стационарными пассажирскими подвесными канатными дорогами: *1* – спортивно-зрелищная площадка; *2* – пропускная система; *3* – амфитеатр; *4* – канатная дорога; *5* – концевая станция; *6* – ось движения; *7* – подвижной состав; *8* – концевая станция

Стадион дополнительно оснащен одной и более мобильными или стационарными пассажирскими подвесными канатными дорогами. Одна из концевых станций каждой дороги установлена по периметру на верхних ярусах амфитеатра и ориентирована вдоль оси движения подвижного состава (кресла, вагоны, кабины, гондолы) к другой концевой станции, которая архитектурно интегрирована в урбанистический и природный ландшафт вокруг местоположения самого стадиона. Концевая станция, которая архитектурно интегрирована в урбанистический и природный ландшафт, совмещена с пропускной системой «входа-выхода» для зрителей.

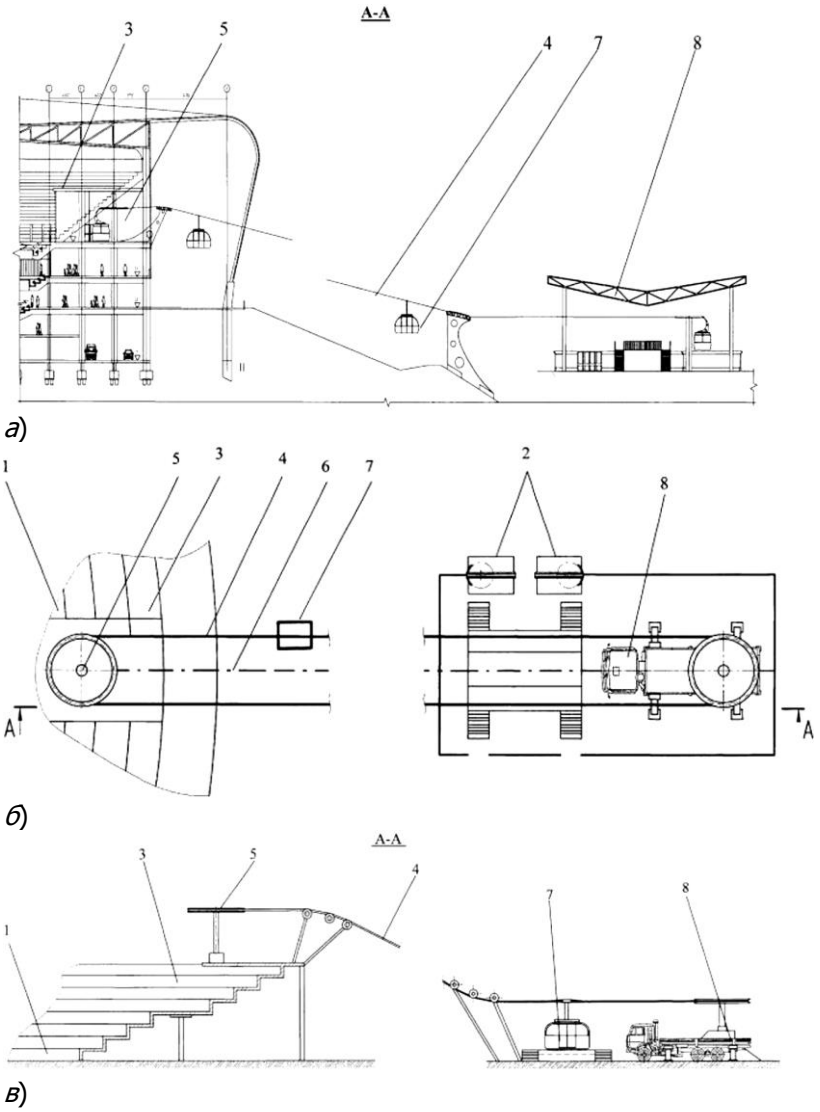


Рис. 59. Элементы конструкции стадиона: *а* – продольный разрез вдоль трассы стационарной канатной дороги; *б* – вид

сверху на мобильную канатную дорогу; *в* – продольный разрез вдоль трассы мобильной канатной дороги

(обозначения см. на рис. 58)

Концевая станция может располагаться на местности с учетом сложившегося архитектурно-урбанистического и природного ландшафта, имеющегося генерального плана и схемы территориального планирования, в том числе с возможностью ее размещения и за водной преградой относительно стадиона.

Конструкция стадиона, оборудованная дополнительно одной и более количеством мобильных или стационарных пассажирских подвесных канатных дорог, работает следующим образом. Зрители (болельщики), купив билеты с указанием номера сектора на верхних ярусах, приезжают на соревнование на определенные (указанные в билете) автостоянки, станции общественного транспорта, расположенные вокруг стадиона, рядом с которыми установлены концевые станции пассажирских подвесных канатных дорог. Концевые станции оборудованы пропускной системой «входа-выхода» для зрителей. Концевые станции могут быть выполнены в стационарном или мобильном исполнении. Зрители, выйдя из автомобилей, оставленных на автостоянке, либо из общественного транспорта, пройдя через пропускную систему, садятся в подвижный состав пассажирской подвесной канатной дороги.

Подвижный состав по своему конструктивному исполнению может быть выполнен в виде отцепляемых или не отцепляемых на станциях кресел, кабин, гондол либо вагонов. Подвижный состав доставляет зрителей (пассажиров) к концевой станции, установленной в районе трибун по периметру верхнего яруса амфитеатра к секторам, указанным в билетах.

Выход зрителей со стадиона происходит в обратном порядке. Зрители из нижних ярусов стадиона выходят пешим ходом через нижние существующие проходы. Зрители верхних ярусов подходят к концевым станциям, установленным по периметру стадиона, и садятся в подвижной состав, который доставляет их к концевым станциям, расположенным в непосредственной близости от автостоянок, станций общественного транспорта, метро и т.д.

Трехмерная модель стадиона по [85] представлена на рис.

60.

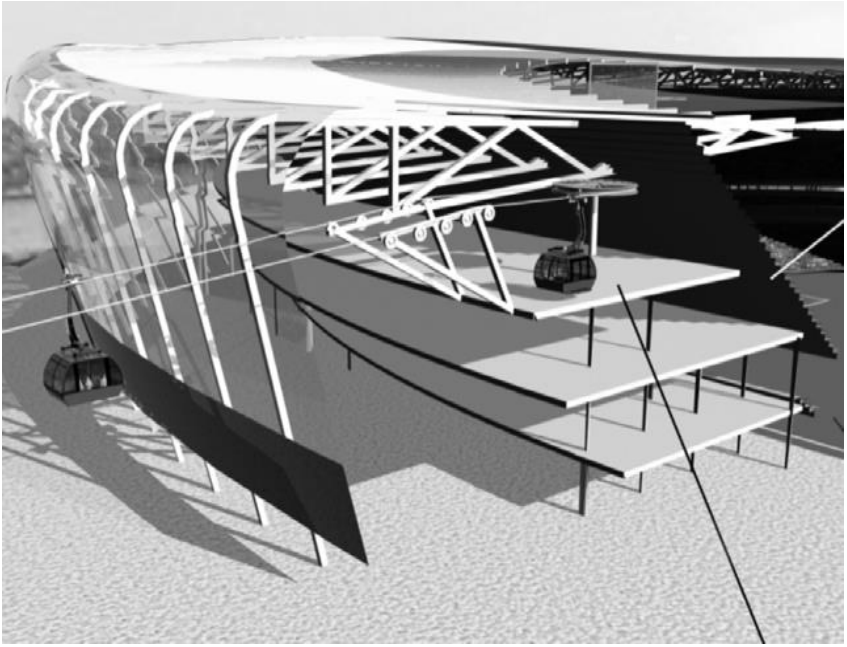


Рис. 60. Трехмерная модель стадиона,
оснащенного подвесными канатными дорогами

Важным достоинством инновационной технологии канатного метро, способствующим дальнейшему развитию и повышению эффективности общественных пассажирских перевозок в урбанизированной среде, является возможность органичного встраивания подвесного канатного транспорта в уже существующую или проектируемую транспортную инфраструктуру крупного города-мегаполиса или городской агломерации. Примерами такого подхода служат технические предложения [87, 88].

В [87] предложено расширение функциональных возможностей транспортно-логистического комплекса крупного города в целом путем логистической оптимизации пассажирских потоков в пространстве и во времени в рамках транспортного мультимо-

дального комплекса, объединяющего наземный, надземный и водный горизонты, с преодолением препятствий природного и техногенного ландшафта, а также повышение производительности комплекса, благодаря использованию логистических связующих участков, позволяющих минимизировать временные потери пассажиров.

Рис. 61. Транспортный мультимодальный комплекс

Решение поставленной задачи достигается за счет того, что транспортный мультимодальный комплекс (рис. 61, 62), включающий железнодорожную трассу с рельсовым путем для железнодорожного транспорта и автомобильную эстакаду, смонтированную на опорах, парковки для автомобилей с полосой разгона-торможения, дополнительно оснащен городскими канатными дорогами с площадками посадки-высадки пассажиров и морскими причалами местных пассажирских линий, соединенными надземными переходными галереями, установленными в разных уровнях на опорах с сохранением под ними габаритов для движения раз личного вида транспорта. Уровни надземных переходных

а)

б)

Рис. 62. Элементы транспортного мультимодального ком-

плекса

галерей соединены как с логистическими связующими участками, оборудованными лифтами и эскалаторами, так и с морскими причалами, расположенными параллельно друг другу вдоль береговой линии, стоянками для автобусного сообщения, платформами для пассажиров железнодорожного транспорта, парковками для автомобилей и площадками посадки-высадки пассажиров городских канатных дорог. Все входы и выходы комплекса оснащены автоматическими турникетами, имеющими единую пропускную систему. Работает транспортный мультимодальный комплекс следующим образом. Пассажир попадает в транспортный мультимодальный комплекс несколькими путями:

1) приезжая по железнодорожной трассе с рельсовым путем для железнодорожного транспорта;

2) прибывая к посадочным платформам для пассажиров железнодорожного транспорта;

3) используя автомобильный транспорт, проезжая по автомобильной эстакаде, смонтированной на опорах, и заезжая на парковки для автомобилей с полосой разгона-торможения;

4) приплывая на морском транспорте, используя морские причалы местных пассажирских линий.

Кроме того, предусмотрены входы и выходы для пеших пассажиров.

Пассажиры, использующие городскую канатную дорогу, попадают в транспортный мультимодальный комплекс, выйдя на площадки посадки-высадки пассажиров городских канатных дорог.

Пассажир может поменять транспорт для передвижения. Для этого ему необходимо пройти по надземным переходным галереям, установленным в разных уровнях на опорах с сохранением под ними габаритов для движения различного вида транспорта. Проходя по одному уровню надземной переходной галереи, пассажир попадает в логистический связующий участок, а затем, используя лифт и/или эскалатор, пассажир может переместиться на другой уровень надземной переходной галереи или попасть на морской причал, расположенный параллельно береговой линии, или на стоянку для автобусного сообщения, или на платформу

для пассажиров железнодорожного транспорта, или на парковку для автомобилей, или на площадку посадки-высадки пассажиров городских канатных дорог. Таким образом, пассажир с комфортом меняет транспорт для передвижения и покидает на нем транспортный мультимодальный комплекс.

Как вариант исполнения, пассажир может попасть в мультимодальный комплекс через входы и выходы, проходя через автоматические турникеты, имеющие единую пропускную систему.

В качестве примера реализации предложенного транспортного мультимодального комплекса было рассмотрено его интегрирование в существующую городскую транспортную систему города Сочи в районе побережья Черного моря Мацестенской долины [31, 32, 34, 87]. Предложено, что одна из городских канатных дорог 6 является направленной вдоль побережья Черного моря, а другая городская канатная дорога 6 имеет направление в горную часть к Орлиным скалам, и далее через ущелье на гору Ахун.

Технический результат предложенного транспортно-логистического комплекса заключается в том, что транспортный мультимодальный комплекс, объединивший автомобильный, железнодорожный, водный и канатный транспорт, логистически связанный в единое целое средствами механизации в виде лифтов, эскалаторов, движущихся дорожек, с единой автоматической пропускной системой, позволяет оптимизировать логистику пассажирского транспортного сообщения в условиях урбанизированной среды с использованием наземного, надземного и водного горизонтов, одновременно решив проблему преодоления препятствий природного и техногенного ландшафта, а также проблему зависимости от погодных условий путем многократного резервирования пассажирских потоков различными видами транспорта.

С проектно-конструкторской точки зрения городская подвесная канатная дорога, реализующая инновационную технологию канатного метро, является сложнейшей технической системой, требующей для своего создания решения значительного числа научно-технических проблем на уровне отдельных подсистем, модулей, механизмов и узлов.

Примером подобной конструкторской задачи является раз-

работка конструкции и принципа действия одного из наиболее ответственных механизмов – канатного зажимного устройства для отцепляемого подвижного состава канатного метро [89]. Решаемая техническая задача заключается в снижении динамических нагрузок и опрокидывающего момента при заходе подвижного состава на станцию за счет устранения механического взаимодействия подвижного состава с конструкциями станции при разгоне и торможении путем, а также гибкого управления процессом сцепки-расцепки канатного зажима и тягового (тягово-несущего) каната.

Поставленная техническая задача решается в [89] за счет того, что канатное зажимное устройство с электромагнитным приводом для отцепляемого подвижного состава подвесной канатной дороги состоит из неподвижной зажимной щеки, которая имеет выступы, на которых установлены опорные колеса и упругие устройства (рис. 63). Неподвижная зажимная щека соединена с осью подвеса, на одном из концов которой установлено опорное колесо. Подвижная зажимная щека шарнирно соединена с неподвижной зажимной щекой в точке, упругим устройством через тягу и проушиной линейного шагового электродвигателя в точке. Неподвижная зажимная щека имеет вилку, к которой шарнирно крепится шток линейного шагового электродвигателя.

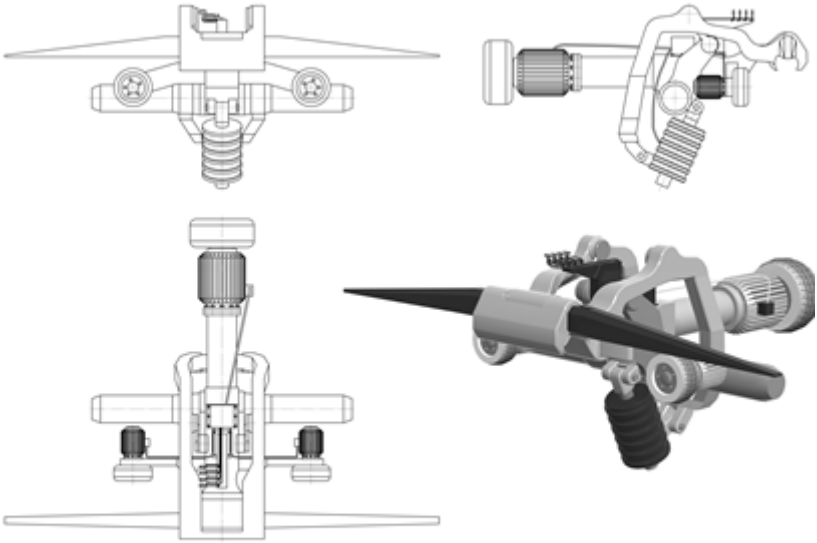


Рис. 63. Конструкция автоматического канатного зажимного устройства для отцепляемого подвижного состава канатного метро

Устройство для зажатия и автоматического зацепления вагона на тяговом канате вблизи станций работает следующим образом. Подвижной состав зажимается посредством канатного зажимного устройства на тяговом канате. Опорные колеса совмещаются с дорожками катания и вилка взаимодействует с комплектом колес для торможения подвижного состава. Одновременно система управления подает команду на открытие линейному шаговому электродвигателю, подключенному к источнику питания. Линейный шаговый электродвигатель открывает канатное зажимное устройство посредством подъема подвижной зажимной щеки, для чего корпус линейного шагового электродвигателя смещает подвижную зажимную щеку, отпуская канат. Канатное зажимное устройство остается открытым за счет силы, создаваемой упругим устройством. Зажимание каната происходит аналогичным образом.

В рассмотренной конструкции зажимного устройства с элек-

тромагнитным приводом для отцепляемого подвижного состава канатного метро снижение динамической нагрузки на детали канатного зажимного устройства при заходе на станцию или выходе из нее происходит за счет специфической конструкции кинематической связи подвижной и неподвижной зажимных щек, выполненной в виде линейного шагового электродвигателя. Снижение опрокидывающего момента достигается за счет отсутствия внешнего воздействия на подвижные части канатного зажима и незначительной массы подвижных частей. Гибкое управление процессом сцепки-расцепки канатного зажима и тягового (тягово-несущего) каната реализуется вследствие использования линейного шагового электродвигателя.

В научном и инженерном планах подвесные канатные дороги и, особенно, канатное метро следует отнести к уникальным сооружениям. Их создание требует высоких теоретических знаний в таких областях, как инженерные изыскания, расчеты устойчивости склона и защиты от оползневых и лавинных явлений, расчеты мачтовых и высотных металлоконструкций линейных опор, специальные расчеты статики и динамики многопролетных канатных систем, а также глубоких знаний механики, гидравлики, электроники для разработки эффективных и надежных приводных устройств и механизмов.

Поэтому параллельно с конструкторской работой, направленной на разработку новых схемных технических решений и конструкций отдельных конструктивных элементов, систем и транспортной системы канатного метро в целом, в настоящее время весьма актуальными являются фундаментальные и прикладные научные исследования и разработки, направленные на создание методов проектирования и расчета, включая оптимизационное проектирование и компьютерное моделирование как приоритетные направления, отдельных конструктивных элементов, систем и транспортной системы канатного метро в целом.

Учитывая определенное конструктивное сходство традиционных подвесных канатных дорог и канатной системы канатного метро, в первом приближении возможно использование того значительного объема научно-инженерных разработок, который был наработан ранее применительно к пассажирским и грузовым ка-

натным дорогам. Теория подвесных пассажирских и грузовых канатных дорог начала активно разрабатываться в середине XX в. В Советском Союзе над этой проблемой работал проф. А.И. Дукельский, который создал отечественную школу проектирования и конструирования канатных дорог. Его четыре монографии, включая последнюю [18], были основным научно-методическим материалом для создателей канатных дорог [103]. Параллельно за рубежом такие исследования выполнялись в Англии, Австрии, Германии, Италии, Швейцарии, Румынии и других странах [120, 122]. Однако в 90-х годах прошлого века научные исследования в области канатных дорог в России заметно сократились в связи с закрытием профильных научно-исследовательских и проектных организаций, прекращением подготовки специалистов в высших учебных заведениях [5]. В частности, в [94] рассмотрены основы теории статики и динамики канатных систем подвесных канатных дорог, включая анализ переходных процессов, а также различные аспекты использования дискретной модели каната и метода выравнивания усилий; в [111] – продольная динамика подвижного состава; в [3] – вопросы проектирования и расчета механической системы подвесных дорог; в [107–109] – несущая способность и напряженное состояние канатов подвесных дорог; в [26, 39] – риск-анализ и принципы обеспечения надежности и безопасности, а в [20] – экономические аспекты применения канатных пассажирских дорог как элемент инфраструктуры единого транспортного кластера.

Однако канатное метро, формирующееся как объединение двух технологий – транспортной технологии на основе подвесных пассажирских канатных дорог и мехатронной технологии на основе интеллектуального управления механической транспортной системой и приводным электроприводом, в силу хорошо известного в науке синергетического эффекта нельзя рассматривать как модернизированную разновидность канатной дороги [60]. По-сути, следует говорить о качественно новом, инновационном для начала XXI века виде городского общественного пассажирского транспорта, принципиально ориентированного на применение в условиях высоко урбанизированной и ландшафтно неоднородной среды городских агломераций, мегаполисов и крупных городов.

Как следствие, имеющиеся теоретические разработки по исследованию канатных дорог, в частности, отмеченные работы [3, 18, 20, 26, 39, 94, 103, 107–109, 111, 120, 122] и аналогичные могут быть использованы при построении теории канатного метро на основе мехатронных технологий лишь ограниченно – только при рассмотрении канатной системы. В то же время, для решения таких приоритетных именно для канатного метро вопросов, как синтез и анализ конструкций мехатронных модулей движения, моделирование их взаимодействия с канатной системой, синтез автоматизированной системы управления, разработка аппаратного, программного и информационного обеспечения ее функционирования требуется проведение принципиально новых научных исследований и разработок.

К настоящему времени выполнено незначительное число научных фундаментальных исследований, которые могли бы рассматриваться в качестве теоретического базиса для создания теории данного нового вида транспорта. В России этими исследованиями наиболее активно занимаются ученые Новочеркасска и Ростова-на-Дону (ИКЦ «Мысль», Донской и Южно-Российский государственные технические университеты) [25], Брянска (Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского) [106] и Москвы (Московский автомобильно-дорожный институт государственный технический университет). За рубежом – в Австрии (Doppelmayr/Garaventa) [112], Франции (Poma) [113] и Италии (Leitner) [123] – исследования имеют преимущественно прикладную направленность, направленную на разработку и модернизацию новых видов продукции в рамках производства традиционных подвесных канатных дорог.

При построении единой теории канатного метро и анализе протекающих в нем рабочих процессов целесообразно использовать системный подход. Особенности использования системного подхода применительно к подъемным сооружениям показаны в [2, 64]. Структурная схема канатного метро как сложной системы, учитывающая ее техническое устройство согласно [81, 92], показана на рис. 64. Система состоит из мехатронных модулей, управляемых единой системой автоматического управления. В рамках данного подхода каждому элементу системы (рис. 64) сопоставля-

ется математическая подмодель, входящая в состав комплексной математической модели. Отдельные подмодели связаны между собой через совместные параметры (перемещения, скорости, ускорения, деформации, усилия и т.д.). Получаемые с использованием математических подмоделей уравнения движения численно и совместно интегрируются в программном комплексе собственной разработки [64]. В настоящее время происходит формирование комплексной математической модели исследуемой транспортной системы и входящих в ее состав отдельных математических подмоделей.

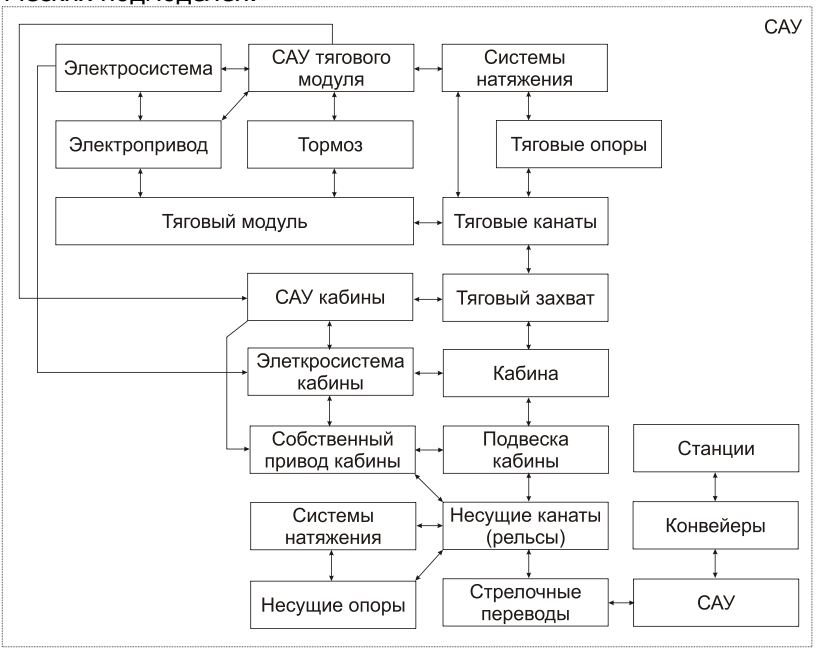


Рис. 64. Структурная схема канатного метро

Имеются отдельные разработки, направленные на создание отвечающих критериям надежности и безопасности конструкций опор, канатно-блочной системы и подвижного состава. В числе таких работ можно назвать [12, 33, 50, 57, 58, 67, 101]. При этом первостепенное значение приобретает динамико-прочностное

моделирование конструкций, их основных узлов и механизмов в процессе эксплуатации, для чего возможно использование численных методов, хорошо зарекомендовавших себя при проектировании подъемно-транспортной техники, например, [8, 9, 51, 52, 61, 65, 118].

Примером реализации системного подхода при построении комплексной математической модели канатного метро является построение динамической математической модели мехатронного модуля гибкого тягового органа канатной системы канатного метро [101].

Общий вид конструкции мехатронного модуля гибкого тягового (приводного) каната представлен на рис. 65 [84]. Тяговый канат *5* направляющими роликами *2* подается на приводное колесо *1*. Вращающиеся элементы привода (колесо и катки) соединены между собой шарнирно-сочлененными балансирами *3*. Для повышения плавности хода в конструкцию введены упруго-диссипативные элементы (пружины) *4*. Приводное колесо через трансмиссию соединено с электродвигателем.

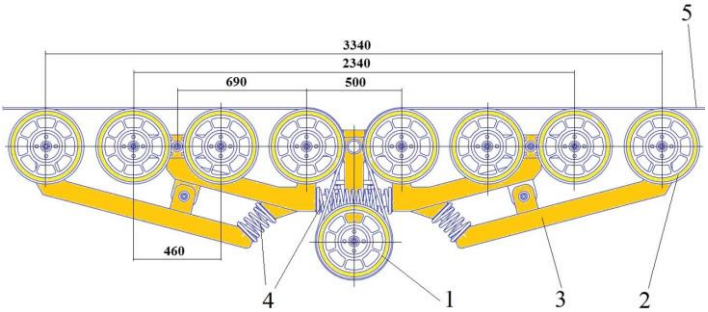


Рис. 65. Конструкция мехатронного модуля гибкого тягового (приводного) каната: *1* – приводное колесо; *2* – направляющий ролик;
3 – балансир; *4* – демпфер; *5* – тяговый канат

Расчетная схема исследования колебаний элементов конструкции в стационарном режиме работы дана на рис. 66 [101].

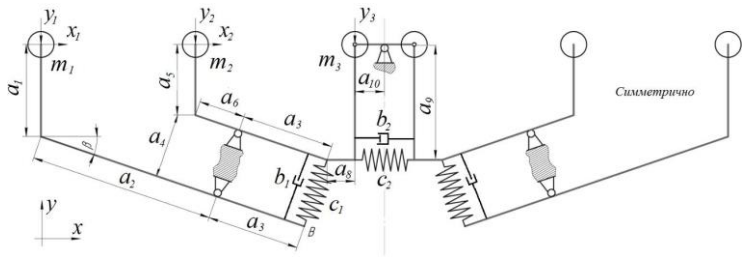


Рис. 66. Расчетная схема мехатронного модуля гибкого тягового (приводного) каната: m_i – приведенные к центрам катков массы катков и балансиров;

$\tilde{n}_i$ – жесткости элементов; b_i – вязкости элементов; a_i – линейные размеры

Дифференциальные уравнения движения исследуемой системы сформируем в следующем виде [62, 63]:

$$\{q\} = [\delta] \cdot \left([M]\{\ddot{q}\} + [B]\{\dot{q}\} \right),$$

где $[\delta]$ – матрица податливости; $[M]$ – матрица масс; $[B]$ – матрица вязкости [62]; $\{\dot{q}\}$ – вектор скоростей; $\{\ddot{q}\}$ – вектор ускорений.

Компоненты матрицы масс определяются из выражения

$$m_{ij} = \frac{\partial^2 T}{\partial \dot{q}_i \partial \dot{q}_j},$$

где T – кинетическая энергия системы (сумма кинетических энергий отдельных масс).

Компоненты матрицы податливости $[\delta]$ определены в [101]. В силу симметричности объекта исследования рассмотрим только половину системы. При определении податливости учитывается податливость пружин и стержней.

Первый диагональный элемент матрицы

$$\delta_{11} = \delta_{11\tilde{n}} + \delta_{11\ddot{i}},$$

где $\delta_{11\tilde{n}}$, $\delta_{11\ddot{i}}$ – компонента, связанная с податливостью стержней и пружин соответственно.

Алгоритм нахождения компонентов матрицы податливости на примере податливости δ_{11} рассмотрен в [101]. Для определения составляющей $\delta_{11\tilde{n}}$ приложим в районе массы m_1 по направлению координаты y_1 единичную силу. Затем находим силы реакций опор, строим эпюру действующих на стержни изгибающих моментов, перемножаем эпюру саму на себя для нахождения податливости.

В исследуемой конструкции (см. рис. 65) поперечные сечения всех балансиров одинаковы, вследствие чего жесткости всех стержней расчетной схемы (см. рис. 66) равны. В этом случае

$$\delta_{11c} = \frac{1}{EJ}\left\langle \left[\frac{1}{3}a_2^3 + \frac{1}{3}a_2^2 a_3 + \frac{1}{3}a_3(a_2+a_3)^2\right]\cos^2\beta + \right.$$

$$+\frac{1}{6}a_8\left\{2(a_2+a_3)\left[(a_2+a_3)\cos\beta + a_8\right]\cos\beta\right\} +$$

$$\left. +2\left[(a_2+a_3)\cos\beta\right]^2 + \left(1+\frac{1}{6}a_9\right)\left[(a_2+a_3)\cos\beta + a_8\right]^2 + \frac{1}{6}a_{10}^3\right\rangle,$$

где E – модуль упругости материала; J – момент инерции поперечного сечения стержня.

Вторую компоненту матрицы податливости $\delta_{11\ddot{i}}$ можно найти из соотношений, связывающих поворот стержневой системы и деформации пружин:

$$\delta_{11\ddot{i}} = \frac{1}{c_1}\left(\frac{a_2}{a_3}\right)^2 \cos\left[\beta - \arcsin\left(\frac{a_2}{2a_3^2 c_1}\cos\beta\right)\right] +$$

$$+\frac{a_1 a_2}{a_3^2 c_1}\cos\beta\sin\left[\arcsin\left(\frac{a_2}{2a_3^2 c_1}\cos\beta\right)\right] +$$

$$+\frac{L_0}{2a_9c_2}\cdot\frac{(a_2+a_3)\cos\beta+a_8}{a_2}\cos\left[\arcsin\left(\frac{(a_2+a_3)\cos\beta+a_8}{2a_9^2c_2}\right)\right],$$

где L_0 – расстояние между осями крайних направляющих катков.

Проделав аналогичные вычисления для других степеней свободы, можно получить все компоненты матрицы податливости.

В расчетах приняты следующие параметры динамической модели исследуемой конструкции мехатронного модуля: $a_1=0{,}2$ м; $a_2=0{,}8$ м; $a_3=0{,}4$ м; $a_4=0{,}2$ м; $a_5=0{,}15$ м; $a_6=0{,}225$ м; $a_8=0{,}1$ м; $a_9=0{,}465$ м; $a_{10}=0{,}4$ м; $L_0=3{,}34$ м; $\beta=30^{\hat{}}$; $E=2{,}1\cdot10^{11}$ Н/м; $J=7\cdot10^{-7}$ м^4; $\tilde{n}_1=800$ кН/м; $\tilde{n}_1=9000$ кН/м; масса катка $m_0=10$ кг; материал балансиров (стержней) – сталь.

На рис. 67 показан график колебания груза m_1 (крайнего левого катка на рис. 65) вдоль вертикальной координаты y_1 при воздействии на каждый каток внешнего гармонического возмущения [101]

$$P=\frac{S_t}{N_k}\cos 5t,$$

где S_t – натяжение тягового каната; N_k – количество катков.

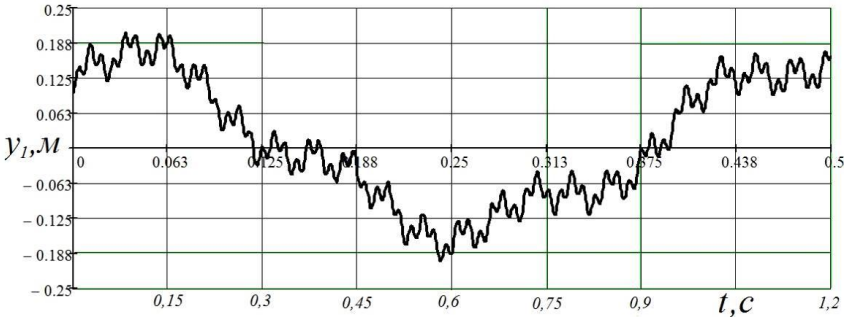


Рис. 67. Вынужденные колебания груза m_1 вдоль координаты y_1

Для определения собственных частот без учета сил трения необходимо решить матричное уравнение

$$\left\{k^2\right\} = \left[M\right]^{-1}\left[\delta\right]^{-1}.$$

Пять низших собственных частот исследуемой системы составили: 1,23; 12,36; 52,2; 257,0; 830,5 Гц.

Еще одним примером реализации системного подхода при построении комплексной математической модели канатного метро является построение динамической математической модели движения пассажирской кабины, удерживаемой несущими канатами.

Расчетная схема движения кабины канатного метро представлена на рис. 68. При движении кабины вдоль пролета в нормальном эксплуатационном режиме движущее усилие создается тяговым канатом, к которому кабина крепится с помощью автоматического захвата [92]. Со стороны тягового каната на кабину действуют усилия T_1 и T_2. Приводной модуль оснащается электроприводом, который создает движущее усилие $T_{пр}$. В нормальном режиме $T_{пр} = 0$.

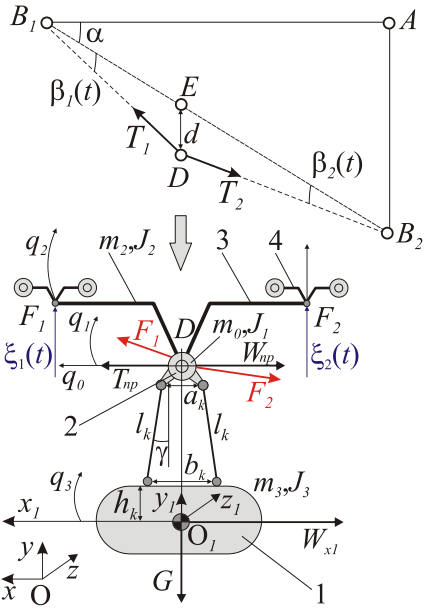


Рис. 68. Расчетная схема движения пассажирской кабины:
1 – пассажирская кабина; *2* – приводной модуль;
3 – большой балансир; *4* – малый балансир

Для осуществления движения кабины в заданном направлении (вдоль положительного направления координаты q_0) должно выполняться условие

$$T_1 \cos\beta_1 + T_{ïð} > T_2 \cos\beta_2 + W,$$

где W – равнодействующая сил сопротивления движению. Сила сопротивления движению включает ряд компонентов:

$$W = W_x + W_y + W_{x1} + W_{ïð},$$

где W_x – сила сопротивления вдоль оси x глобальной системы координат (например, вес, ветровая нагрузка); W_y – силы, связанные с обобщенными скоростями (кориолисовы и центро-

бежные силы); W_{x1} – приведенные к оси x силы сопротивления, действующие вдоль осей системы координат, связанной с пассажирской кабиной; $W_{ïð}$ – тормозное усилие, развиваемой тормозом и электроприводом в тормозном режиме.

При анализе динамики одиночной пассажирской кабины приняты следующие допущения.

1. Несмотря на то, что прогиб d – это прогиб несущего каната, будем считать, что тяговый канат также занимает соответствующее положение, поэтому усилия в тяговом канате можно считать направленными вдоль упругой линии несущего каната с углами наклона β_1 (t) и β_2 (t), установленными с помощью математической модели несущего каната, входящей в состав комплексной математической модели системы [64].

2. Будем считать, что тяговый канат гарантированно создает положительное движущее усилие, т.е. можно считать $T_2 = 0$, а величина T_1 установлена с использованием модели тягового каната, входящей в состав комплексной математической модели системы [64, 101].

3. Балансиры и элементы подвески пассажирской кабины являются абсолютно жесткими телами. Из этого следует, что координата пассажирской кабины вдоль трассы канатного метро полностью определяется координатой приводного модуля q_0. Следует отметить, что силы сопротивления зависят от текущего положения пассажирской кабины q_0 и балансира q_2.

4. Движение малых балансиров подробно не рассматривается.

Таким образом, рассматриваемая динамическая система имеет следующие обобщенные координаты: q_0, q_1, q_2, q_3. Последние три координаты полностью определяют пространственную конфигурацию пассажирской кабины и ее подвески.

Местоположение кабины в пределах участка линии канатного метро q_0 можно определить, проинтегрировав уравнение движения кабины:

$$m_k \ddot{q}_0 = T_1 cos(\beta_1) + T_{i\partial} - T_2 cos(\beta_2) - W, \quad (1)$$

где $m_k = m_0 + m_2 + m_3$ – полная масса кабины; m_0 – масса приводного модуля; m_2 – масса системы балансиров; m_3 – масса кабины.

Кабина подвешена на рычагах длиной l_k. Естественный угол отклонения этих рычагов от вертикали (при горизонтальном положении подвески) равен γ. Таким образом, геометрическая схема подвески кабины представляет собой трапецию с основаниями a_k и b_k. При движении кабины происходит изменение положения элементов ее подвески. При этом крепление подвески к приводному модулю поворачивается на угол q_1, а пассажирская кабина – на угол q_3.

Начальный перекос системы балансиров пассажирской кабины определяется в зависимости от вертикальных положений точек F_1 и F_2. Изменение их положений задается законами $\xi_1(t)$ и $\xi_2(t)$, установленными с помощью математической модели несущего каната, входящей в состав комплексной математической модели системы [64].

Итоговое перемещение точки D составляет

$$\Delta D = \left[\xi_1(t) + \xi_2(t)\right] / 2.$$

Угол наклона большого балансира к горизонту, вызванный различным положением точек F_1 и F_2, определяется соотношением:

$$q_{2\xi}(t) = arctg\left[\frac{\xi_1(t) - \xi_2(t)}{L_1}\right],$$

где L_1 – размер большого балансира.

Уравнение поворота приводного модуля

$$J_1 \ddot{q}_1 = M_1 - M_{w1} =$$

$$= \frac{Ga_k}{4} cos(\gamma + q_3) - W_{x1}\left(l_k cos(\gamma) + h_k\right) sin(q_3) - W_x\left(l_k cos(\gamma) + h_k\right) - k_{w1} M_1, \quad (2)$$

где M_1 – момент сил, вызывающих поворот приводного мо-

дуля; M_{w1} – момент сил сопротивления повороту балансира; k_{w1} – коэффициент трения в шарнире *D*.

Уравнение движения большого балансира имеет вид

$$q_2(t) = q_{2\xi}(t), \qquad (3)$$

а уравнение движения пассажирской кабины –

$$J_3\ddot{q}_3 = -M_1. \qquad (4)$$

Уравнения (1) – (4) представляют собой математическую модель для исследования динамики (маятниковых колебаний) пассажирской кабины канатного метро. Интегрирование данных уравнений выполняется методом Рунге-Кутта 4-го порядка.

Как пример использования представленной динамической математической модели движения пассажирской кабины канатного метро, на рис. 69 представлены результаты моделирования динамики кабины массой 1 т при движении по горизонтальному участку трассы. Видно, что амплитуды колебаний пассажирской кабины достигают 2…3 градуса, что недопустимо с точки зрения обеспечения плавности хода и безопасности эксплуатации. Поэтому при проектировании подвески кабины в ее конструкцию необходимо дополнительно ввести демпфирующие устройства, например, гидравлические демпферы. Влияние демпфирующих устройств учитывается добавлением в уравнение (4) момента вязких сил $\alpha\dot{q}_3$ (где α – коэффициент вязкости демпфера подвески). Таким образом, демпфирующее устройство снижает амплитуду колебаний, которые после окончания переходного процесса стабилизируются на более низких значениях 0,3…0,5 градуса.

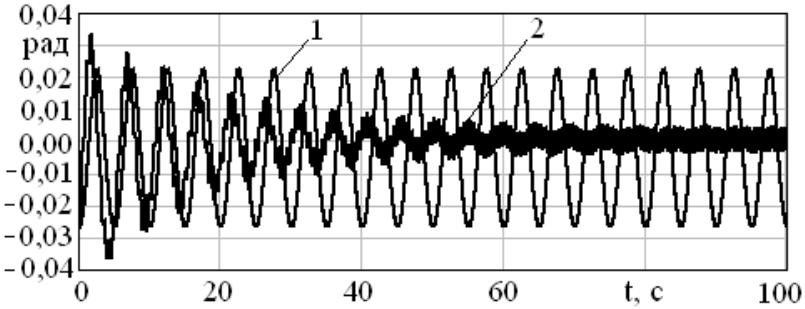


Рис. 69. Угловые колебания кабины транспортной системы: *1* – без учета демпфирования; *2* – с учетом демпфирования (при коэффициенте вязкости демпфера подвески α=10 Н·с)

При построении единой теории канатного метро наряду с разработкой его комплексной математической модели также приоритетным направлением является решение проблемы снижения достаточно высокой стоимости строительства канатного метро. Ее решение должно базироваться на широкомасштабных научно-исследователь-ских и опытно-конструкторских исследованиях и разработках, направленных на создание оптимальных и автоматизированных методов проектирования при решении следующих важных инженерно-технических задач [60]:

– прокладка трассы транспортной линии с учетом имеющейся городской застройки (высотности зданий и сооружений, расположения пригодных площадок для возведения линейных и узловых станций, расположения непереносимых объектов городской инфраструктуры и др.) и ландшафтной неоднородности (оврагов, возвышенностей, рек, озер и др.);

– создание отвечающих критериям надежности и безопасности конструкций опор, канатно-блочной системы и подвижного состава;

– создание аппаратного и программного обеспечения автоматизированной системы управления движением подвижного состава в рамках единой городской транспортной системы канатного метро.

В настоящее время имеются подобные разработки примени-

тельно к решению задачи оптимальной прокладки трассы канатного метро [50, 55, 57, 58]. На стоимость строительства линии значительное влияние оказывает величина шага установки соседних промежуточных опор, вследствие чего задача их расположения вдоль трассы является задачей технико-экономической оптимизации [57]. Оптимизация позволяет обеспечить минимальную величину затрат на возведение опорных конструкций, приобретение тягового и несущих канатов, а также комплекта устанавливаемого на опору необходимого технологического оборудования. На стоимость строительства линии также значительное влияние оказывает рельеф местности и высотность застройки вдоль трассы [55, 57]. Как показано в этих работах на примере модельных расчетов, при достаточно неоднородном рельефе местности оптимизация по расстановке промежуточных опорных металлоконструкций и их высоте позволяет уменьшить стоимость строительства в 1,5…2 раза по сравнению с вариантом равномерной расстановки опор равной высоты. Разработанные авторами математические модели и методы оптимизационных расчетов, формирующие научно обоснованные технико-экономические основы оптимального проектирования линий канатного метро для широкого спектра возможных требований заказчика и проектировщика, представлены в гл. 3.

1.4. Сравнительные характеристики канатного метро и традиционных видов городского пассажирского общественного транспорта

В настоящее время для реализации внутригородских перевозок пассажиров и грузов используется в той или иной мере до 13 различных видов городского пассажирского общественного транспорта [37]:

– железнодорожный транспорт;
– высокоскоростной железнодорожный транспорт;
– автомобильный транспорт;
– авиационный транспорт;
– речной транспорт;

– транспорт на основе поездов на магнитном подвесе;
– монорельсовый транспорт;
– метрополитен;
– троллейбус;
– скоростной трамвай;
– рельсовый автобус;
– струнный транспорт;
– канатный транспорт на основе подвесных канатных дорог.

Основная доля грузо-пассажирских перевозок железнодорожным транспортом приходится на межгородские перевозки. На сегодняшний день более 1 млн км железных дорог опоясывают планету. Тем не менее, железнодорожный транспорт, как вид наземного транспорта, используется также и для внутригородских транспортных перевозок. В современных условиях 1 км двухпутной железной дороги с необходимой инфраструктурой стоит 3…5 млн долл., пассажирский вагон – до 1 млн долл., электровоз – 10 млн долл. Объем земляных работ при строительстве железной дороги составляет около 50 тыс. $м^3$/км, при этом землеотвод вдоль железнодорожной линии составляет около 5 га/км (а с учетом инфраструктуры – до 10 га/км). Средняя скорость поездов в межгородском сообщении, как правило, не превышает 100 км/ч, а во внутригородском она оказывается в несколько раз меньше. Себестоимость железнодорожных перевозок и нагрузку на природу повышает строительство мостов, эстакад, тоннелей и прочих элементов дорожно-транспортной инфраструктуры. К экологическим проблемам, порождаемым железнодорожным транспортом, кроме загрязнений различной природы следует добавить интенсивные шум и вибрации, а также тепловые и электромагнитные излучения. За год на 1 км железнодорожного полотна выбрасывается до 12 т мусора и 250 кг фекалий. Только в Российской Федерации за год под колесами поездов гибнут около 1 тыс. человек и десятки тысяч домашних и диких животных.

Высокоскоростные железные дороги появились сравнительно недавно – в конце XX в. К 2000 г. в Европе построено 3100 км высокоскоростных железных дорог. Максимальная скорость движения составляет до 400 км/ч, средняя – до 200 км/ч. Высокоско-

ростные железные дороги в общем виде принципиально сходны по конструкции с традиционными железными дорогами, однако имеют улучшенную и усиленную путевую структуру (рельсошпальную решетку) и земляное основание (специальную насыпь, балластное основание), а также специально сконструированный подвижной состав повышенной комфортности и безопасности (рис. 70). Стоимость 1 км такой высокоскоростной дороги достигает 10…20 млн долл., пассажирского вагона – 2…3 млн долл. Негативное экологическое воздействие на окружающую природную среду значительно выше, чем у обычной железной дороги. Высокоскоростная железная дорога, особенно как элемент внутригородской транспортной инфраструктуры, требует обязательного использования шумозащитных экранов, специальных заграждений, защищающих от выхода на пути людей и животных, так как столкновение с ними непременно приводит к аварии. Автомобильный транспорт на основе двигателей внутреннего сгорания активно применяется как в качестве внутригородского, так и межгородского транспорта. К настоящему времени построено свыше 10 млн км дорог, потребовавших исключения из оборота свыше 50 млн га земли, выпущено около 1 млрд автомобилей. Строительство современной скоростной автотрассы обходится в 3…10 млн долл./км. При этом объем земляных работ превышает 50 тыс. м^3/км, а из землепользования изымается около 5 га/км (с учетом инфраструктуры – до 10 га/км). Сегодня автомобиль – основной источник шума и загрязнения воздуха в городах. Выхлопные газы двигателей внутреннего сгорания содержат около 20 канцерогенных веществ и более 120 токсичных соединений. Источником повышенной опасности для окружающей среды стал не только сам автомобиль, но и трасса (полоса загрязнения вдоль автодорог составляет до 300 м), обслуживающие системы (нефтехранилища, склады горюче-смазочных веществ, станции технического обслуживания, мойки, утилизационные площадки и т.д.). Ежегодно в дорожно-транспортных происшествиях гибнут около 1 млн человек, а свыше 10 млн получают травмы различной степени тяжести. Для сравнения: в военных конфликтах по всему миру погибает в среднем менее 500 тыс. человек.

Рис. 70. Подвижной состав высокоскоростной железной дороги – вагон электропоезда «Сапсан»

Авиационный транспорт в настоящее время, как правило, является межгородским транспортом. Однако в последние годы в связи с развитием малой авиации, в первую очередь, с созданием вертолетов достаточно миниатюрной конструкции этот вид транспорта становится внутригородским в условиях мегаполисов, городских агломераций и территориальных кластеров (туристических, рекреационных и др.). Это наиболее экологически опасный и энергоемкий вид транспорта. Землеотвод (под аэропорты) сопоставим с железнодорожным и автомобильным транспортом. Суммарный выброс в атмосферу вредных веществ достигает 30…40 кг/км (на 100 пассажиров). Продолжительность пребывания вредных веществ в стратосфере, где авиация является основным загрязнителем, – около года. По своей токсичности авиалайнер эквивалентен 5…8 тыс. легковых автомобилей, он сжигает кислорода столько, сколько необходимо для дыхания более 200 тыс. человек, а чтобы восстановить это количество кислорода, необходимо посадить тысячи гектаров леса. Каждый пассажир в полете за счет естественного космического гамма-излучения дополнительно получает 300…400 мкР/ч при норме 20 мкР/ч. Цена современного самолета составляет 100…200 млн долл., а по-

стройка аэропорта со всей необходимой инфраструктурой – до 10 млрд долл.

Городской речной транспорт осуществляет перевозки грузов и пассажиров судами различной конструкции и вместимости по внутренним водным путям городских и природных территорий (как по естественным – рекам, озёрам и заливам, так и искусственным – каналам и водохранилищам (рис. 71). Главным преимуществом речного транспорта является низкая себестоимость перевозок; благодаря чему он продолжает занимать важное место в транспортной системе, несмотря на низкие скорости и сезонность. Тем не менее, доля перевозок пассажиров речным транспортом очень низка. Связано это с тем, что, будучи очень дешевым при низких скоростях (20…30 км/ч), себестоимость перевозок речным транспортом значительно увеличивается при перевозках со скоростями в 50…60 км/ч, которые позволяют ему конкурировать с другими видами транспорта (автомобильным и железнодорожным). Речной транспорт в качестве городского общественного транспорта наибольшее распространение получил в приморских городах, например, во Владивостоке, Нью-Йорке, Бостоне, Венеции, Париже, Стокгольме, Гданьске, а также в городах, расположенных на крупных реках, в частности, в Москве, Санкт-Петербурге, Волгограде, Самаре, Хабаровске, Лондоне, Варшаве.

а)

б)

Рис. 71. Городской речной транспорт:
а – классический речной трамвай – теплоход «Москвич»;
б – «водная маршрутка» в Нью-Йорке

а)

б)

Рис. 72. Поезда на магнитном подвесе:
а – JR-Maglev (Шанхай, Китай);
б – M-Bahn (Берлин, Германия)

Транспорт на основе поездов на магнитном подвесе (магнитопланы, маглевы) в настоящее время является достаточно редким видом межгородского общественного транспорта (рис. 72). Стоимость его трассы достигает 20…50 млн долл./км, стоимость вагона – 6…10 млн долл. Скорость движения достигает до 500 км/ч, сопровождаясь при этом сильным уровнем шума. Существенным недостатком данного вида транспорта является низкий коэффициент полезного действия, равный 13,6% и сравнимый с коэффициентом полезного действия такого энергозатратного транспортного средства, как паровоз. Примером возможного использования транспорта на основе поездов на магнитном подвесе для городских перевозок в пределах московского мегаполиса может служить проект немецкой компании «Сименс» по строительству трассы «Аэропорт Шереметьево – Центр» общей протяженностью 29 км за 1,5 млрд долл. (без учета стоимости земли, затрат на снос строений и компенсацию их собственникам).

Рис. 73. Пассажирский вагон
городского монорельсового транспорта

Монорельсовый транспорт также достаточно редкий вид внутригородского общественного транспорта. Наиболее развит он в США, Канаде, Франции и ряде других государств Европы, Америки и Азии (рис. 73). Характеризуется достаточно низкой скоростью движения при стоимости строительства линии до 4…10 млн долл./км. Для обеспечения безопасного уровня поперечной устойчивости движения пассажирской кабины вдоль несущей балки последняя должна иметь достаточно большое поперечное сечение, что влечет за собой повышенный расход конструкционных строительных материалов. В настоящее время в качестве перспективных достаточно широко рассматриваются проекты так называемого «легкого метро». Принципиально, это тот же монорельсовый транспорт, представляющий собой пассажирский состав, движущийся по балке-монорельсу, которая устанавливается на опорах или на эстакаде над землей. Основным его преимуществом по сравнению с традиционным подземным метрополитеном является относительно невысокая стоимость, экологическая безопасность, бесшумность (что не бесспорно), а также специальная конструкция путевых устройств, которые располагаются обособленно от проезжей части и не мешают другим видам грузового и пассажирского транспорта. Стоимость прокладки 1 км «легкого

метро» ориентировочно в два раза дешевле прокладки 1 км традиционного подземного метрополитена.

Метрополитен является наиболее дорогостоящим видом городского общественного транспорта. В то же время, это единственный в настоящее время широко и эффективно используемый вид внеуличного транспорта, у которого транспортные линии проходят, как правило, под землей. Стоимость 1 км традиционного подземного метрополитена достигает 1,5 млрд руб. Даже для такого города как Москва этот вид транспорта является убыточным и не окупающим вложений, затраченных на его строительство.

Троллейбус – один из самых экологически чистых видов городского общественного транспорта. Из-за необходимости строительства специальной инфраструктуры (контактной сети, электрических подстанций, депо и др.) троллейбусные трассы дороже обычных автомобильных дорог как при строительстве, так и при эксплуатации. Стоимость одного троллейбуса составляет около 500 тыс. долл.

Скоростной трамвай в последние годы получил развитие во многих странах. Скорость его движения составляет до 120 км/ч, стоимость строительства линий – 6…12 млн долл./км, а самого трамвая – около 1 млн долл.

Рельсовый автобус является разновидностью трамвая, однако вместо электродвигателя оснащен дизелем. В Германии этот вид общественного транспорта используется с 1995 г. Стоимость одного экипажа составляет порядка 2 млн долл.

Струнный транспорт SkyWay, предложенный А.Э. Юницким, можно рассматривать в качестве перспективного, но еще не опробованного в реальных городских условиях вида транспорта [110]. В настоящее время идея и возможные конструктивные решения струнного транспорта проходят апробацию в экспериментальных условиях, в частности, в Подмосковье построен первый участок такой дороги длиной 100 м. По данным компании «SkyWay», разработчика технологии струнного транспорта, предполагается, что средняя скорость движения пассажирских кабин составит до 500 км/ч, стоимость линии (без учета стоимости подвижного состава, пассажирских вокзалов, станций и сопутству-

ющей инфраструктуры) – от 3 млн долл., себестоимость перевозок будет в 5…10 ниже стоимости перевозок высокоскоростным железнодорожным транспортом, транспортом на основе поездов на магнитном подвесе или авиационном транспортом. Вариант струнного транспорта применительно к условиям внутригородских пассажирских перевозок предположительно характеризуется такими показателями: скорость движения – до 150 км/ч, стоимость проезда – в 2 раза ниже стоимости проезда метрополитеном. Экономические показатели струнного транспорта пока не подтверждены результатами его строительства и эксплуатации и потому носят теоретический характер.

Суммируя вышесказанное, количественные технико-экономические характеристики канатного метро в сравнении с аналогичными характеристиками других видов городского общественного транспорта приведены в табл. 3 [71].

Таблица 3

Сравнительные технико-экономические характеристики городского общественного транспорта

Характеристика	Метрополитен	Монорельс	Скоростной трамвай	Трамвай	Троллейбус	Автобус	Канатное метро
Стоимость строительства 1 км пути, млн руб.	7500	1800	2100	800	600	500	300
Стоимость 1 пасс./км, руб.	5,3	3,9	2,8	3,5	2,9	3,8	2,0
Приведенная стоимость организации движения при максимальном пассажиропотоке, тыс. руб./пасс.	28,9	100,0	2,68	3,12	2,0	1,2	1,8

Приведенная стоимость подвижного состава, тыс. руб./пасс./г	2,0	20,0	3,2	3,2	3,2	4,8	0,4
Максимальный пассажиропоток, тыс. пасс./ч	30	6	30	18	7	7	3
Максимальная скорость движения, км/ч	90	45	60	60	60	60	40
Средняя скорость движения, км/ч	40	15	30	24	20	20	34
Площадь, занимаемая 1 пассажиром на улице, $м^2$	0	0	4,0	3,1	2,4	3,1	0
Коэффициент полезного использования энергии	0,2	0,15	0,3	0,19	0,17	0,14	0,42
Удельный расход энергии, Вт·ч/т·ч	50	100	60	70	90	120	25
Удельный расход энергоресурсов, л/100 пасс./км	1,3…1,7	1,5…2,5	1,4…1,8	1,9…2,1	1,9…2,5	2,1…2,3	0,3…0,5

Сравнение канатного метро и традиционных видов городского транспорта по ряду основных технико-экономических показателей позволяет сформулировать следующие преимущества канатного метро [53, 60, 71]:

– социальные:

– стоимость проезда находится на уровне традиционных видов городского общественного транспорта;

– скорость (до 50…60 км/ч) и четкая прогнозируемость времени поездки в связи с отсутствием неопределенных по времени простоев в транспортных пробках, на светофорах и т.п.;

– отсутствие потерь времени на вынужденные простои и

ожидание в пробках;

– комфорт и безопасность перемещения, так как подвижной состав имеет плавный ход и отсутствует вероятность столкновения с другим автотранспортным средством;

– удобство посадки и высадки, в том числе, для людей с ограниченными возможностями;

– возможность перевозки ручной клади и крупногабаритных грузов;

– технические:

– движение над землей без пересечения с трассами других видов городского общественного, грузового и специального транспорта;

– отсутствие дорожно-транспортных происшествий;

– создание беспересадочных маршрутов любой конфигурации;

– относительные энергозатраты на перемещение (до 40 км/ч) в 5…10 раз ниже, чем у современного автомобиля;

– практически нечувствительно к рельефу местности, наземным и подземным объектам и коммуникациям;

– не нарушается сложившаяся в городе дорожно-уличная сеть и инженерная инфраструктура;

– хорошо вписывается в архитектурный облик города;

– не требуется строительство мостов, эстакад, путепроводов, насыпей и тоннелей;

– не требуется проведение объемных земляных работ, нарушающих ландшафт и требующих последующую рекультивацию;

– устойчивость к воздействию неблагоприятных климатических факторов и стихийных бедствий (землетрясений, наводнений, оползней, ураганного ветра, низких или высоких температур окружающей среды и др.);

– использование электрической тяги, не оказывающей негативного влияния на окружающую среду, низкий уровень шума и вибраций, отсутствие вредных выбросов;

– минимальная потребность в строительных материалах и конструкциях, сравнительно невысокий расход конструкционных сталей, цветных металлов, полуфабрикатов и строительных мате-

риалов;

– экономические:

– сравнительно невысокая стоимость проектирования и строительства (до 30 млн руб./ 1 км пути);

– стоимость строительства трассы с инфраструктурой в 2…5 раз дешевле современных железных и автомобильных дорог;

– наименьшие затраты на организацию движения и закупку подвижного состава;

– наименьший удельный расход и наибольший коэффициент использования энергии на перевозку 1 пассажира;

– экономия затрат на перемещение на основе внедрения энергоэффективных технологий и независимости от нефтепродуктов;

– минимальное землеотведение (в среднем 0,1 га земли на 1 км трассы);

– не требуется выкуп или отчуждение дорогостоящих земельных участков, снос имеющихся зданий и сооружений под прокладку наземной трассы;

– значительная часть площадей посадочных станций может быть передана в аренду и использована в коммерческих или иных целях.

Анализ условий наиболее целесообразного использования канатного метро в качестве инновационной транспортной системы для регулярных пассажирских перевозок, проведенный в ряде работ [37, 40, 41, 49, 53], показал, что канатное метро наиболее эффективно функционирует в тех случаях, когда другие виды городского транспорта малоэффективны, а именно:

– при наличии плотной городской застройки с наличием относительно узких улиц (2…4 полосы для движения транспорта);

– в условиях пространственной разбросанности городских районов при отсутствии или недостаточности альтернативных магистралей между ними;

– в случае трудности или невозможности прокладки новых транспортных магистралей в черте городской застройки или между удаленными от центральной части города отдельными городскими районами или городами-спутниками в черте городской агломерации;

– при наличии в пределах городской черты широких рек или речных пойм;

– при овражистом или холмистом рельефе местности;

– для эффективного решения проблемы обеспечения охраны окружающей среды от вредного воздействия транспортной инфраструктуры на условия жизнедеятельности человека и окружающую среду.

Таблица 4

Сравнительная характеристика канатного метро и пассажирской подвесной канатной дороги [60]

Пассажирская канатная дорога	Канатное метро
1	2
Недостаток: использование морально устаревшего оборудования	*Достоинство:* использование мехатронных технологий для создания управляемой многоканатной транспортной системы в урбанизированной среде

Недостаток: ограниченная длина трассы транспортирования. *Причина:* наличие одного сосредоточенного привода движения тягового каната. *Негативные последствия:* 1) с увеличением длины канатной дороги увеличивается мощность ее привода, а также габариты оборудования и опорных металлоконструкций и, как следствие, стоимостных показателей проекта; 2) для канатных дорог большой протяженности необходимы канаты большой агрегатной прочности, что ведет к возрастанию массы и стоимости каната, привода и металлоконструкций; 3) на длинных трассах устанавливают друг за другом несколько канатных дорог; 4) энергозатратно, дорого и трудоемко при строительстве, особенно в условиях городской среды	*Достоинство:* неограниченная длина трассы, возможность «достраивания» линии метро при расширении городской застройки. *Причина:* мехатронные модули движения реализуют идею линейно распределенного по трассе привода движения пассажирских кабин. *Положительные последствия:* 1) малая мощность одного мехатронного модуля, так как он обеспечивает движение тягового каната на ограниченном участке трассы; 2) более низкая суммарная мощность и энергопотребление мехатронных модулей по сравнению с традиционных одиночным приводом на трассах равной длины (до 30 %); 3) малые массогабаритные характеристики оборудования и опорных металлоконструкций; 4) возможность использования тяговых и несущих канатов меньшей агрегатной прочности и, соответственно, меньшего диаметра (в 3…5 раз), собственного веса (до 7 раз) и стоимости; 5) возможность увеличения расстояния между соседними опорными металлоконструкциями вдоль трассы до 3000 м; 6) улучшение динамических характеристик за счет снижения массы подвижных элементов

Продолжение табл. 4

1	2
Недостаток: преимущественно прямолинейная трасса движения пассажирских кабин.	*Достоинство:* возможность создания любых маршрутов в пределах всей системы канатных линий, включая кольцевые маршруты

Причина: возвратно-поступатель-ное движение тягового каната между двумя конечными пунктами трассы. *Негативные последствия:* 1) отсутствие возможности перехода с одной линии канатной дороги на другую без пересадки; 2) невозможность формирования произвольного или кольцевого транспортного маршрута.	(т.е. логистические возможности канатного метро эквивалентны традиционным видам транспорта). *Причина:* наличие устройств переориентации направления движения пассажирских кабин. *Положительные последствия:* 1) возможность перевода пассажирских кабин на другую линию канатного метро на узловых станциях без пересадки пассажиров; 2) возможность создания пунктов отстоя пассажирских кабин в течение времени пониженного пассажиропотока на линии; 3) возможность оперативной переброски кабин на линии повышенного пассажиропотока, в час пик и др.
Недостаток: полная остановка движения всех пассажирских кабин на линии при отказе привода движения тягового каната. *Причина:* наличие одного сосредоточенного привода движения тягового каната. *Негативные последствия:* 1) необходимость проведения в срочном порядке единовременных аварийно-спасательных и ремонтных работ по длине трассы; 2) достаточная длительность аварийно-спасательных работ, срыв планов пассажиров, опоздание и т.д.; 3) достаточно тяжелая психологическая ситуация	*Достоинство:* практически нулевая вероятность остановки кабин при отказе привода движения тягового каната. *Причина:* наличие линейно распределенного по трассе привода движения кабин на основе множества мехатронных модулей движения. *Положительные последствия:* 1) отсутствие необходимости в срочном ремонте отказавшего мехатронного модуля движения и проведения аварийно-спасательных работ; 2) возможность организации качественной системы технического обслуживания и ремонта мехатронных модулей движения, так как ее проведение возможно во

для пассажиров; 4) трудности в организации системы технического обслуживания и ремонта канатной дороги, так как проведение этих работ требует остановки движения кабин	время работы канатного метро без его остановки; 3) отсутствие психологических последствий и неудобств для пассажиров при отказе мехатронного модуля движения
Недостаток: невозможность остановки кабины на станции для посадки и выгрузки пассажиров. *Причина:* неразъемное присоединение пассажирской кабины к постоянно движущемуся тяговому канату. *Негативные последствия:* 1) небезопасно при посадке и высадке пассажиров на ходу; 2) невозможно организовать посадку инвалидов и лиц с ограниченными возможностями, детей, пассажиров с детскими колясками и крупногабаритной кладью и др.; 3) при посадке нескольких человек необходимо движение вдогонку за кабиной; 4) невозможно использование кабин рентабельной вместимости (по 30…40 человек)	*Достоинство:* возможность остановки кабины на станции для посадки и выгрузки пассажиров. *Причина:* наличие автоматизированной системы управления движением кабин, отслеживающей их расположение и автоматически выполняющей присоединение-отсоединение кабины от постоянно движущегося каната. *Положительные последствия:* 1) полная безопасность посадки и высадки пассажиров в остановившуюся кабину; 2) безопасная посадка инвалидов и лиц с ограниченными физическими возможностями, детей, пассажиров с детскими колясками и крупногабаритной кладью и др.; 3) возможно использование пассажирских кабин рентабельной вместимости (по 30…40 человек)
Недостаток: отсутствие автоматизированной системы управления движением кабин. *Причина:* «жесткая» схема работы канатной дороги, не предполагающая возмож-	*Достоинство:* наличие автоматизированной системы управления движением кабин. *Причина:* использование информационных технологий на основе RFID-меток (транспондеров), интегрированных в тяговый канат и

ность существенного регулирования параметров движения. *Негативные последствия:* 1) невозможность обеспечения требуемого уровня комфортности и безопасности перемещения пассажиров; 2) невозможность управления параметрами движения пассажирских кабин, включая время их остановки, скорость и др.	образующих цельную путевую структуру. *Положительные последствия:* 1) повышенная безопасность перемещения; 2) возможность слежения за движением и управления движением каждой пассажирской кабины, включая ее местоположение, скорость, необходимость остановки; 3) выявление случаев нарушения общественного порядка в кабинах, видеообнаружение и задержание нарушителей

ГЛАВА 2. КОНЦЕПЦИИ РАЗВИТИЯ ПАССАЖИРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОТДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ КАНАТНОГО МЕТРО

Представленные выше результаты сравнительного анализа использования пассажирского канатного подвесного транспорта на основе инновационной технологии канатного метро свидетельствуют о его достаточной перспективности перед другими традиционными видами городского общественного транспорта для модернизации пассажирских транспортных систем урбанизированных и особых природных территорий. Особенности природного ландшафта и городской застройки, направления и интенсивности сложившейся или прогнозируемой системы пассажиропотоков, имеющаяся или проектируемая транспортная система традиционных видов общественного транспорта и большое число других факторов оказываются влияние на разработку проектов строительства канатного метро применительно к конкретным условиям его дальнейшего функционирования.

Однако также имеются общие, концептуальные подходы к

разработке проектов строительства канатного метро независимо от конкретных условий его дальнейшего функционирования, что обусловлено общностью используемой транспортной технологии. В данной главе применительно к достаточно разнообразным по ландшафтным и логистическим особенностям городским и специфическим природным территориям разработаны концептуальные подходы к внедрению технологии канатного метро в имеющуюся транспортную инфраструктуру и показаны возможные технико-экономические и социальные результаты этих мероприятий.

2.1. Концепция создания сети канатного метро в г. Ростове-на-Дону

Пассажирский общественный транспорт является важной частью транспортной инфраструктуры Ростова-на-Дону и Ростовской области. Годовой объем перевозок составляет свыше 340 млн пассажиров [7]. На долю дорожно-транспортного комплекса приходится более 10 % валового регионального продукта, около 30 % занятых в транспортном комплексе Южного федерального округа, стоимость производственных фондов транспортной сферы Ростовской области превышает 100 млрд руб. [7]. Несмотря на существенные темпы автомобилизации в Ростове-на-Дону, городской пассажирский транспорт не теряет своей значимости и в связи с ростом численности населения имеет высокую оценку в общей системе транспортно-пассажирского комплекса [69].

Концепция инновационного городского транспорта по развитию сети канатного метро в Ростове-на-Дону была разработана в Донском государственном техническом университете [37, 71]. Она базируется на технических решениях [81, 83, 84, 86, 92, 93].

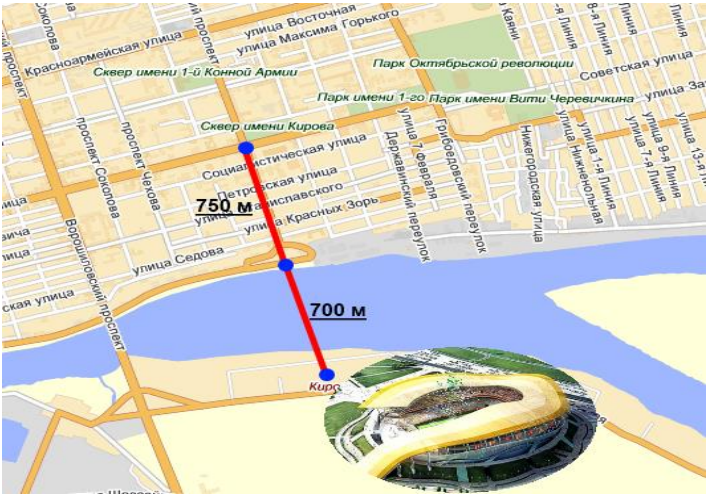
На рис. 74 представлены наиболее перспективные маршруты канатного метро в городе Ростове-на-Дону:

– маршрут № 1 – к аэропортовому комплексу «Южный» от линии метро «Север-Юг»;

– маршрут №2 – на левый берег Дона к строящемуся стадиону ЕВРО-2018 от линии метро «Запад-Северо-Восток».

В табл. 5 приведены основные технико-экономические характеристики указанных маршрутов.

а)



б)

Рис. 74. Сеть канатного метро в Ростове-на-Дону:
а – маршрут № 1; *б* – маршрут № 2

Таблица 5

Основные технико-экономические характеристики маршрутов канатного метро в г. Ростов-на-Дону

Технико-экономическая характеристика	Маршрут канатного метро	
	№ 1	№ 2
Количество посадочных станций, шт.	технически не ограничено	3
Протяженность маршрута, км	24,0	1,45
Ориентировочное время прохождения маршрута, мин.	40	5
Средняя скорость движения пассажирской кабины, км/ч	40	10…40
Количество опор, шт.	120	7
Количество пассажирских кабин, шт.	160	10
Вместимость кабины, пасс.	до 32	до 32
Пропускная способность, пасс./ч	до 6000	до 6000
Продолжительность строительства, год	3…4	2…3
Ориентировочная сметная стоимость, млн руб.	6 500	405

На рис. 75 представлен вид линии канатного метро через реку Дон в черте города [37], на рис. 76 – компьютерная модель промежуточных опор и подвижного состава канатного метро, интегрированных в уличную сеть г. Ростова-на-Дону [71].

Рис. 75. Вид линии канатного метро через реку Дон в г. Ростове-на-Дону

а)

б)

Рис. 76. Компьютерная модель промежуточных опор и подвижного состава
канатного метро, интегрированных в уличную сеть г. Ростова-на-Дону:
а – ул. Красноармейская; *б* – ул. Нагибина

Промежуточные опоры имеют арочную конструкцию, которая в наибольшей степени вписывается в архитектуру уличной сети и позволяет сохранить габаритные размеры над проезжими частями улиц для движения городского автотранспорта. Пассажирские вагоны приводятся в движение тяговым канатом посредством дискретного привода с мехатронными модулями движения (рис. 77). Тяговый канат опирается на ролики балансиров, часть которых входят в кинематическую цепь мехатронных модулей движения, а специальные конвейеры пересадочных станций оборудованы системой переадресации пассажирских вагонов на другие пути движения.

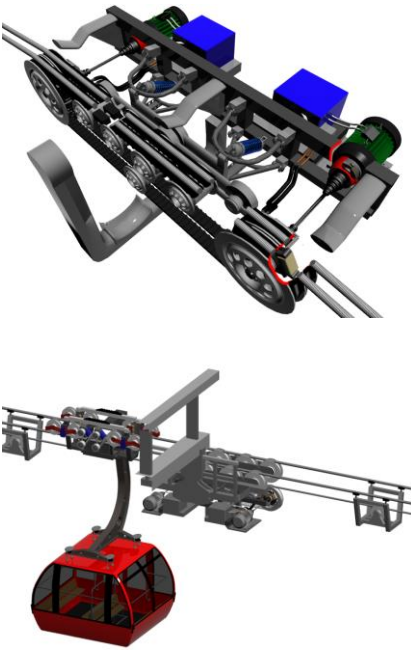


Рис. 77. 3D-модели мехатронных модулей движения дискретного привода канатного метро

Для разработанных маршрутов предложены типовые архитектурно-планировочные решения станций канатного метро (рис. 78), интегрированные в существующую уличную и транспортную инфраструктуру г. Ростова-на-Дону [71].

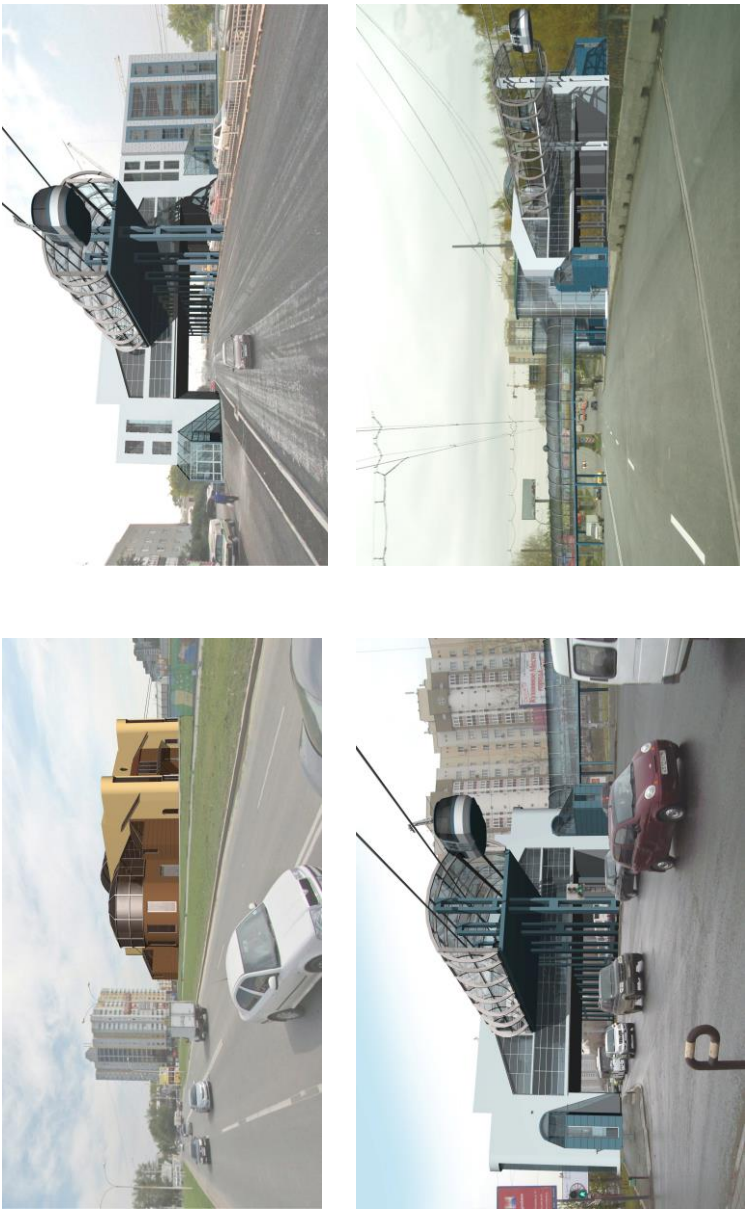


Рис. 78. Типовые архитектурно-планировочные решения пассажирских станций канатного метро в г. Ростове-на-Дону

На станциях канатного метро (рис. 79) имеется возможность разместить коммерческие и социально ориентированные объекты инфраструктуры для пассажиров в виде кафе, магазинов, аптек, пунктов приема оплат, отделений банков, туалетов и др. Станции соединены между собой в каждом направлении двумя независимыми путями, на которых, посредством тележек с захватом, подвешены отцепляемые на станциях пассажирские вагоны. Дублирование путей в одном направлении повышает надежность и безопасность: во время ремонта одного из путей; при проведении спасательной операции в случае аварийной остановки вагонов; возможности варьирования количеством вагонов на каждом пути в зависимости от пассажиропотока.

Рис. 79. Компьютерная 3D-модель внутреннего вида станций канатного метро

Экономический интерес к модернизации общественной транспортной инфраструктуры Ростова-на-Дону на основе канатного метро заключается в низкой себестоимости и времени строительства, инвестиционной привлекательности и эффективности

данного транспорта.

2.2. Концепция создания сети канатного метро в г. Брянске

В условиях плотной городской застройки г. Брянска внутригородские перевозки на основе традиционных видов наземного транспорта практически исчерпали свои возможности по развитию пассажиропотока. Согласно данным [53], рост объемов автомобильных перевозок сопровождается увеличением количества автомобилей на дорогах. В 2004 г. в Брянске было зарегистрировано 53 049 единиц автотранспортных средств, в 2007 г. – 66 819, в 2008 г. – 77 429, в 2009 г. – 83 609. По отношению к 2009 г. в 2016 г. ожидается увеличение численности легковых автомобилей на 34 %, грузовых автомобилей – на 38 %, автобусов – на 20 %. При этом общее число пассажиров, перевезенное автомобильным и троллейбусным общественным транспортом, сократится с 78 млн человек до 65,5 млн человек, что, очевидно, будет связано с развитием личного автомобильного транспорта жителей города, приводящего к дополнительному росту нагрузки на транспортную инфраструктуру города.

Согласно действующей в настоящее время «Стратегии социально-экономического развития города Брянска на период до 2025 года» [97] самой острой проблемой городского хозяйства, по мнению жителей города, является состояние городских дорог. Это же подтверждается данными SWOT-анализа социально-экономического положения г. Брянска: в числе слабых сторон отмечена перегруженность отдельных узлов уличной дорожной сети города. Поэтому в числе основных стратегических возможностей по активному развитию г. Брянска «Стратегия социально-экономического развития г. Брянска на период до 2025 года» рассматривает совершенствование транспортной инфраструктуры и ставит задачу развития скоростного общественного транспорта.

Брянск является идеальным городом для строительства канатного метро, так как применительно к его застройке и рельефу хорошо подходят те перечисленные выше условия (см. п. 1.4), которые необходимы для наиболее эффективного функциониро-

вания канатного метро. В то же время, эти же особенности застройки и рельефа города являются барьером развития его транспортной инфраструктуры на основе традиционных видов автомобильного и электрического транспорта. Сложившаяся транспортная инфраструктура Брянска осложняется тем, что территория города имеет значительную площадь, а четыре района отделены друг от друга реками Десной, Болвой и Снежетью с широкими заливными поймами, разветвленной сетью железнодорожных путей, через которые проложены мосты и путепроводы. Вследствие несовершенства планировочной структуры магистральная сеть центра Брянска сильно перегружена транзитными транспортными потоками. В часы пик скорость передвижения автомашин не превышает 20 км/ч [53].

С учетом сложившихся в Брянске пассажиропотоков в Брянском государственном университете имени академика И.Г. Петровского [49, 53, 60] была сделана предварительная оценка количества и возможного расположения линий канатного метро (рис. 80). Полный вариант транспортной системы «Канатное метро г. Брянска» включает 6 транспортных линий. Основные количественные характеристики этих линий приведены в табл. 6 [60].

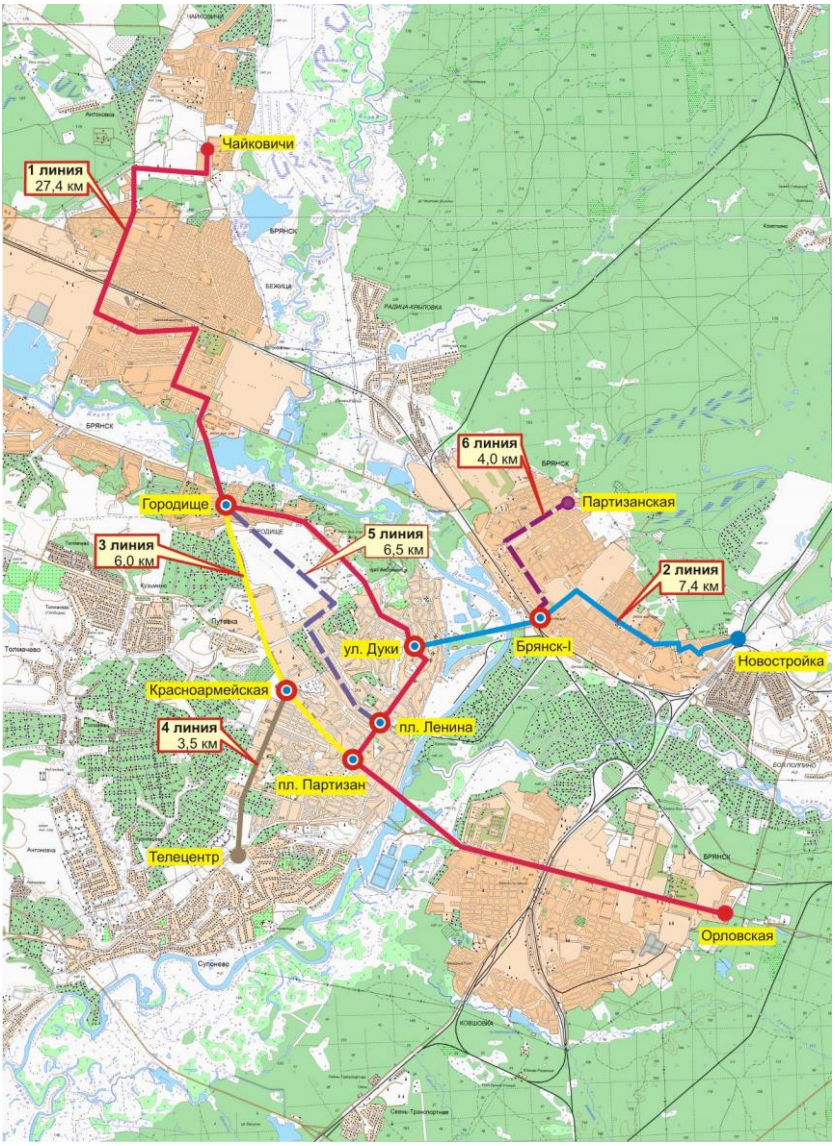


Рис. 80. Расположение линий канатного метро г. Брянска

Таблица 6

Основные характеристики линий канатного метро в г. Брянске

Линия	Длина линии, км	Количество станций на линии, шт.		Число опор, шт.	Ориентировочная стоимость строительства, млн руб.		
		линейных	узловых		линии	станций	общая
Линия 1 «Чайковичи – Орловская»	27,4	6	6	50	5480	780	6260
Линия 2 «ул. Дуки – Новостройка»	7,4	4	3	14	1480	320	1800
Линия 3 «Площадь Партизан – Городище»	7,0	5	3	13	1400	250	1650
Линия 4 «Улица Красноармейская – Телецентр»	3,5	4	2	7	700	220	920
Линия 5 «Площадь Ленина – Городище»	6,5	4	2	12	1300	120	1420
Линия 6 «Вокзал Брянск-I – Партизанская»	4,0	3	2	8	800	190	990
Итого	54,8	26	6	104	10580	1880	12460

Линия 1 «Чайковичи – Орловская» является самой протяженной и основной транзитной линией транспортной системы, обеспечивающей беспересадочный проезд через весь город. Она связывает три городских района – Бежицкий, Советский и Фокинский. Линия имеет привязку к главным пассажирским транспортным магистралям этих районов: в Бежицком районе она проходит вдоль улиц Литейная, Ульянова, III Интернационала и Бежицкой, в Советском районе – вдоль улиц Дуки, Красноармейской и проспекта Ленина, в Фокинском районе – вдоль Московского проспекта. Линия имеет два протяженных перехода через реку Десна

и речную пойму между Бежицким и Советским районами и Советским и Фокинским районами длиной ~0,8 и 1,7 км. Построение всей городской транспортной системы канатного метро целесообразно начинать с построения именно этой линии. Возможный внешний вид характерных участков линии 1 показан на рис. 81.

а)

б)

в)

г)

д)

Рис. 81. Вариант интеграции транспортной системы «Канат-

ное метро г. Брянска» в существующую дорожную сеть (линия 1): *а* – улица Бежицкая в районе Городищенской горки; *б* – проспект Ленина у Брянского областного драмтеатра; *в* – проспект Ленина в районе дамбы через Нижний Судок; *г* – улица Ульянова на въезде в Бежицкий район; *д* – улица III Интернационала у Бежицкого универмага

Линия 2 «Улица Дуки – Новостройка» также является важной составляющей городской транспортной системы канатного метро, так как связывает Советский, Бежицкий и Фокинский районы города с четвертым, Володарским районом и находящимися на его территории центральным железнодорожным вокзалом Брянск-I и крупным развивающимся микрорайоном. Она имеет привязку к основным транспортным магистралям Володарского района – улицам Никитина, Корнюшкина и Чернышевского. Линия имеет один переход через реку Десна и речную пойму длиной приблизительно 1,5 км.

Линия 3 «Площадь Партизан – Городище» имеет привязку к одной из основных транспортных магистралей Советского района города – улице Красноармейской. Она имеет важное логистическое значение с точки зрения обеспечения замкнутости городской транспортной системы канатного метро.

Ввод в эксплуатацию линий 1, 2 и 3 следует рассматривать как выполнение программы-минимума модернизации системы общественного транспорта г. Брянска на основе канатных дорог. Полная программа модернизации предусматривает построении еще трех дополнительных линий канатного метро.

Линия 4 «Улица Красноармейская – Телецентр» является самой короткой транспортной линией. Она привязана к важной транспортной магистрали Советского района города – проспекту Станке Димитрова и связывает с центральной частью города обширный микрорайон, расположенный вдоль проспекта, и областной больничный комплекс, а также обеспечивает доступность одного из главных туристических объектов Брянской области – Свенского Успенского монастыря.

Линия 5 «Площадь Ленина – Городище» имеет перспективное значение, так как она будет пересекать обширный жилой и

административный микрорайон в районе старого аэропорта, являющийся наиболее перспективной площадкой для дальнейшего развития застройки в городе Брянске.

Линия 6 «Вокзал Брянск-I – Партизанская» позволяет соединить с центральной частью города обширный удаленный микрорайон жилой застройки Володарского района. Она привязана к важной транспортной магистрали района – улице Пушкина.

Суммарная протяженность всех шести транспортных линий канатного метро составит приблизительно 54,8 км. Общее количество пассажирских посадочных станций может достигать 32 станции, причем в дальнейшем их число может увеличиваться с учетом объективных логистических изменений в структуре пассажирских транспортных потоков по мере развития городской инфраструктуры и застройки. Планируется, что из общего числа 6 станций будут узловыми (пересадочными), располагающимися в местах пересечения или примыкания линий канатного метро, а 26 станций – линейными, обеспечивающими лишь посадку-высадку пассажиров. Общее число промежуточных опорных металлоконструкций, поддерживающих тяговый и несущие канаты, по предварительным оценкам составит 100…110 штук, расположенных с пролетом 400…600 м. Отдельные пролеты через несколько широких преград (рек и речных пойм в черте города) могут достигать 1000…2000 м. В настоящее время такие пролеты являются технически возможными, исходя из агрегатной прочности и надежности несущих канатов, выпускаемых отечественной промышленностью [58, 75].

В системе из шести линий канатного метро целесообразно организовать до девяти маршрутов, исходя из сложившихся в настоящее время направлений наиболее интенсивных пассажиропотоков в пределах административной территории города Брянска. Предлагаемые маршруты и их основные характеристики приведены в табл. 7.

Таблица 7

Рекомендуемые маршруты канатного метро в г. Брянске и их основные характеристики

Маршрут	Протяженность, км	Количество станций	Количество кабин, шт.	Время прохождения маршрута, мин	Время ожидания кабины, мин	Пропускная способность, пасс./ч
№1 «Чайковичи – Городище – ул. Дуки – пл. Ленина – пл. Партизан – Орловская»	27,4	12	20	61	5	360
№2 «Чайковичи – Городище – ул. Дуки – Брянск I – Новостройка»	23,5	10	18	55	5	360
№3 «Чайковичи – Городище – Красноармейская – Телецентр»	18,4	7	10	42	5	360
№4 «Орловская – пл. Партизан – Красноармейская – Телецентр»	13,2	6	10	32	5	360
№5 «Орловская – пл. Партизан – пл. Ленина – ул. Дуки – Брянск-I – Новостройка»	19,0	9	12	46	5	360
№6 «Телецентр – Красноармейская – пл. Партизан – пл. Ленина – ул. Дуки – Брянск-I – Новостройка»	14,4	7	10	35	5	360
№7 (кольцевой) «Городище – уд. Дуки – пл. Ленина –	11,8	8	8	33	5	360

пл. Партизан – Красноармейская – Городище»						
№8 «Партизанская – Брянск-I – Новостройка»	7,5	5	6	21	10	220
№9 «Городище – пл. Ленина»	6,5	4	12	14	3	650

Ориентировочная оценка основных характеристик маршрутов, указанных в табл. 7, выполнялась расчетным путем с помощью следующих зависимостей:

– среднее ожидаемое время прохождения i-го маршрута, мин

$$T_i = 2L_i / \bar{v} + \Delta\tau_{st} N_{st,i};$$

– необходимое количество пассажирских кабин на маршруте

$$N_{cab,i} = 2(T_i + \Delta\tau_{st}) / \bar{\tau}_{cab};$$

– максимальная пропускная способность i-го маршрута, пасс./ч

$$C_p = \frac{60}{\bar{\tau}_{cab}} N_{p,cab},$$

где L_i – протяженность i-го маршрута; $\bar{v}$ – средняя скорость движения пассажирской кабины между соседними посадочными станциями (принято $\bar{v}$ = 40 км/ч); $\Delta\tau_{st}$ – среднее время остановки пассажирской кабины на станции (принято $\Delta\tau_{st}$ = 2 мин); $N_{st,i}$ – количество посадочных станций в пределах i-го маршрута; $\bar{\tau}_{cab}$ – среднее время ожидания пассажирской кабины на посадочной станции; $N_{p,cab}$ – проектная вместимость пассажирской кабины (принято $N_{p,cab}$ = 30 пасс.).

В связи с тем, что на отдельных участках общегородской

системы канатного метро будет наблюдаться перекрытие двух и более маршрутов, их пропускная способность и ориентировочное среднее время ожидания прибытия пассажирских кабин на посадочных станциях будет отличаться от названных характеристик отдельных маршрутов (табл. 8).

Таблица 8

Пропускная способность и ориентировочное среднее время ожидания пассажирских кабин на различных участках общегородской системы канатного метро

Номер п/п	Участок канатного метро	Номера маршрутов	Пропускная способность участка, пасс./ч	Среднее время ожидания кабины, мин
1	Чайковичи – Городище	1, 2, 3	540	1,7
2	Городище – ул. Дуки	1, 2, 7	540	1,7
3	Городище – Красноармейская	3, 7	360	2,5
4	Городище – пл. Ленина	9	360	2,5
5	Ул. Дуки – пл. Партизан	1, 5, 6, 7	720	1,3
6	Ул. Дуки – Брянск I	2, 5, 6	540	1,7
7	Красноармейская – пл. Партизан	6, 7	360	2,5
8	Красноармейская – Телецентр	3, 4	360	2,5
9	Орловская – пл. Партизан	1, 4, 5	540	1,7
10	Брянск I – Новостройка	2, 5, 6	540	1,7
11	Брянск I – Партизанская	8	120	8,0

Пропускная способность j-го участка системы канатного метро будет составлять

$$C_{p,j} = \sum_{k=1}^{k=n_{m,j}} C_{p,k},$$

а ориентировочное среднее время ожидания пассажирских кабин на посадочных станциях в пределах j-го участка –

$$\overline{\tau}_{cab,j} = \frac{60}{\sum_{k=1}^{k=n_{m,j}} \frac{60}{\overline{\tau}_{cab,k}}},$$

где $n_{m,j}$ – количество маршрутов, проходящих через j-й участок; $\overline{\tau}_{cab,k}$ – среднее время ожидания пассажирской кабины на посадочной станции k-го маршрута.

Стоимость строительства непосредственно линий и приобретение необходимого пассажирского и технологического оборудования составит по приближенным оценкам порядка 10,6 млрд руб., стоимость зданий пассажирских станций – 1,9 млрд руб. Учитывая темпы строительства линий в объеме 4…5 км/г., продолжительность строительства может составить 9…11 лет, а необходимо годовое финансирование (в среднем) – порядка 1,0…1,2 млрд руб./г. на строительство линий и порядка 0,2…0,25 млрд руб./г. – на строительство зданий пассажирских станций. При финансировании в большем объеме сроки строительства можно сократить до 5…6 лет.

В качестве принципа финансирования строительства транспортной системы «Канатное метро г. Брянска» целесообразно использовать возможности частно-государственного партнерства. Возможные источники финансирования в этом случае:

– финансовые средства частных инвесторов;

– федеральные финансовые средства, полученные в рамках профильных федеральных и государственных программ;

– муниципальные финансовые средства;

– заемные финансовые средства.

Интерес инвесторов очевиден: для посадки пассажиров на станциях канатного метро необходима только посадочная площадка, которая должна располагаться на достаточной высоте над землей – на высоте 15…20…25 м, т.е. на уровне пяти-, семи- или десятиэтажного здания. Поэтому архитектурно станцию канатного метро целесообразно совмещать с многоэтажным зданием, в ко-

тором размещаются различные коммерческие и социальные объекты: торговые, культурно-развлекательные и физкультурно-спортивные комплексы, библиотеки, офисные помещения, гостиницы, жилые помещения и др. Таким образом, с точки зрения инвестора пассажир совершает поездку не от одной станции до другой, а от одного торгово-развлекательного центра до другого, причем на станциях ему удобно будет максимально решить свои бытовые проблемы – совершить покупки и получить максимальное количество разнообразных услуг.

Только за счет сдачи в аренду внутренних помещений зданий пассажирских станций инвестор может получить годовую арендную плату в размере 48…50 млн руб./г. (для 5-этажной станции высотой 15 м) или 96…100 млн руб./г. (для 10-этажной станции высотой 30 м). Исходя из средней стоимости строительства 1 м^2 здания в размере 20 тыс. руб./м^2, только за счет аренды вложенные инвестором в строительство станции средства окупятся приблизительно за 2 года. Таким образом, финансирование строительства станций в размере 2,3 млрд руб. можно полностью передать инвесторам.

Следует также учитывать, что пассажирские станции канатного метро (особенно узловые) будут располагаться в местах концентрации пассажиропотока, на пересечениях линий наземного пассажирского транспорта. Как правило, эти места характеризуются повышенной плотностью застройки и наиболее высокой ценой земли. Разрешение инвестору построить станцию целесообразно обременить требованием дополнительного финансирования строительства самих линий метро.

Таким образом, на долю частных инвесторов, как минимум, может приходиться финансирование порядка 3…4 млрд руб. или 35…40 % от общей стоимости проекта.

2.3. Концепция создания сети канатного метро в г. Екатеринбурге

Проект строительства пассажирской канатной транспортной системы на основе технологии канатного метро для г. Екатерин-

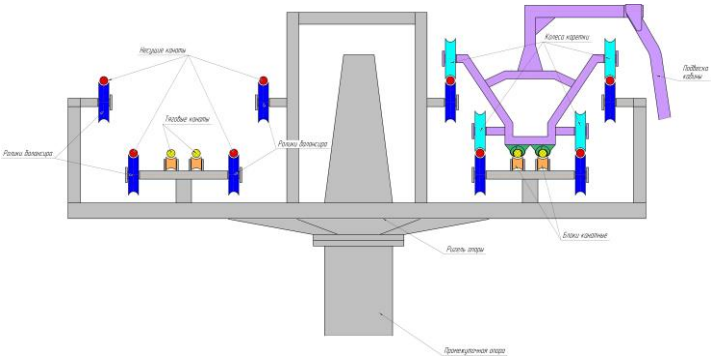
бург разработан в Новочеркасском ИТЦ «Мысль» и ООО «Скадо» совместно с ЗАО «Уральский экспертный центр» [28, 40, 41]. В его основу положено техническое решение [88].

Как предложено в [88] применительно к городской застройке г. Екатеринбурга, пассажирская подвесная канатная транспортная система включает путь, выполненный из одного и более несущих канатов, жестко соединенных между собой подвесными опорами (рис. 82, 83, *б*). К несущим канатам подвешены транспортными средствами в виде пассажирских кабин посредством каретки с колесами. Количество и размеры колес соответствуют количеству и диаметру несущих канатов.

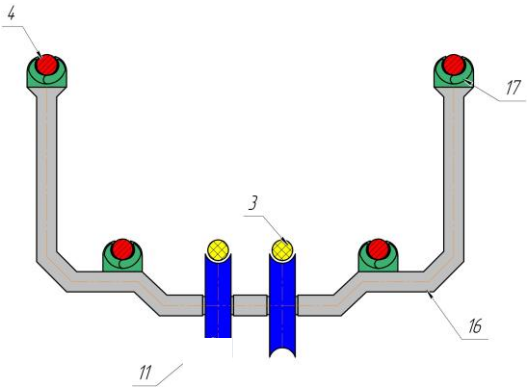
Рис. 82. Линия канатного метро в Екатеринбурге вдоль реки Исеть

Пассажирские кабины, опирающиеся на промежуточные опоры, могут проходить над существующими естественными и инженерными зданиями или сооружениями в надземном уровне урбанизированной среды с сохранением габаритов приближения, в том числе и опираются на них. Отцепляемые зажимы, установленные на каретке, по своему количеству и размеру соответствуют количеству и диаметру тяговых канатов. Тяговые канаты опираются на промежуточные опоры и проходят над проезжей частью уличной сети города с сохранением транспортных габаритов (рис. 83, *а*). Пассажирская транспортная система дополнительно снабжена двумя и более пассажирскими посадочными станциями с конвейерами разгона-торможения пассажирских вагонов и площадками посадки-высадки пассажиров. Станции установлены на

опорах над проезжими частями улиц. Конструктивно они состоят из двух и более модулей, интегрируемых в существующие городские транспортные узлы, образуя на станциях мультимодальные комплексы. При этом хотя бы один из модулей, оборудованный лифтами и эскалаторами, является логистическим звеном, а хотя бы один другой из модулей используется как депо для пассажирских вагонов. Подвесная опора, жестко соединяющая между собой несущие канаты, имеет поддерживающие блоки, по их количеству и размеру, соответствующие тяговым канатам.



а)



б)

Рис. 83. Конструкции опор канатного метро для случая пути из четырех несущих и двух тяговых канатов:

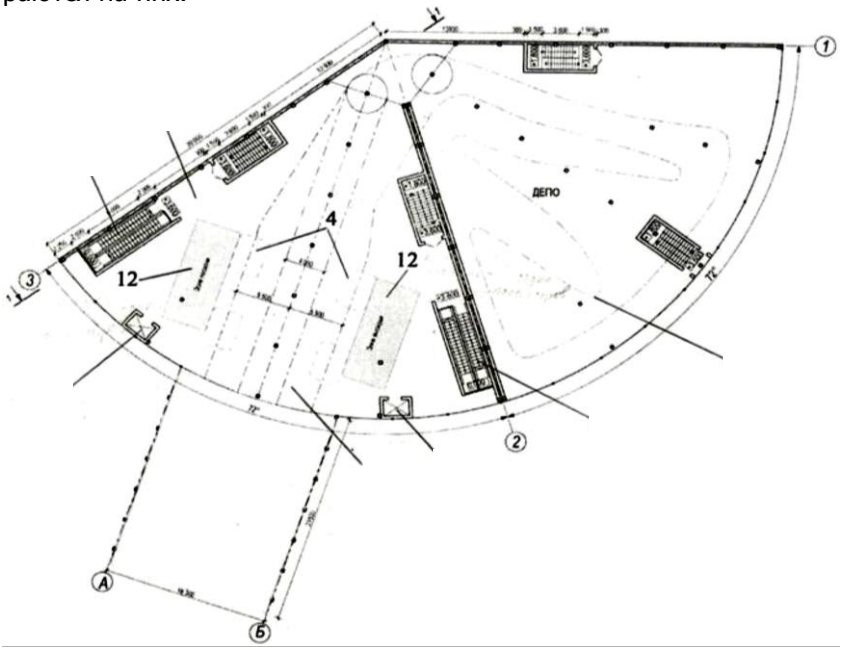
а – промежуточная опора; *б* – подвесная опора: 1 – несущий канат;

2 – подвесная опора; 3 – тяговый канат; 4 – поддерживающий блок

Модули пассажирских посадочных станций могут иметь различную геометрическую форму в плане и неограниченное количество уровней по высоте для их интеграции в сложившийся архитектурный облик урбанизированной среды. Модуль станции, оборудованный лифтами и эскалаторами используется для логистической связи с платформами пригородных электричек, многоэтажными парковками для автомобилей и торговыми центрами, образуя мультимодальные комплексы. На рис. 84 в качестве примера представлена планировка перспективной пассажирской посадочной станции с геометрической формой модуля в виде сегмента.

Применительно к условиям г. Екатеринбурга пассажирская подвесная канатная транспортная система на основе канатного метро работает следующим образом. Пассажиры приезжают подземным метро на станцию «Ботаническая» города Екатеринбурга, либо прибывают пригородными электричками, либо приезжают на личных автомобилях и размещают их в многоэтажных парковках, либо приходят в торговые центры. Все вышеперечисленные объекты связаны модулем транспортной системы, интегрированной в логистику пассажирских перевозок города Екатеринбурга. Транспортная система соединяет объекты, интегрированные со станциями, между собой путем, который выполнен из одного и более несущих канатов, жестко соединенных между собой подвесными опорами. Пассажирские кабины движутся между посадочными станциями с использованием многоканатной тяги из тяговых канатов. Между станциями установлены промежуточные опоры, на которые опираются несущие и тяговые канаты. К несущим и тяговым канатам подвешены пассажирские кабины, проходящие над проезжей частью с сохранением транспортных габаритов, в том числе могут проходить над существующими естественными и ин-

женерными зданиями или сооружениями в урбанизированной среде с сохранением габаритов приближения, в том числе и опираются на них.



а)

ъ

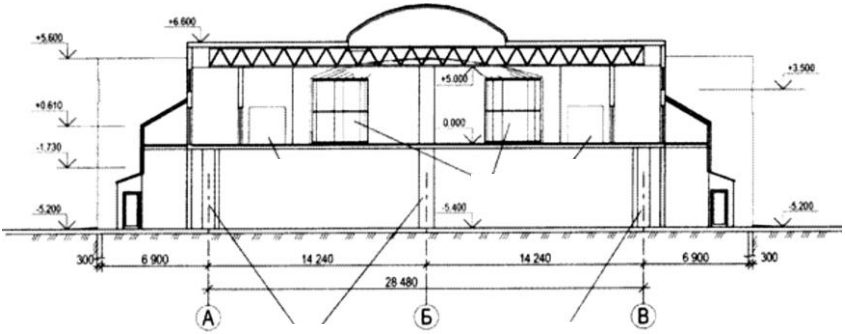


Рис. 84. Планировка перспективной пассажирской посадоч-

ной станции с геометрической формой модуля в виде сегмента: *а* – план здания станции на отметке +3,600; *б* – разрез 1-1 на плане здания станции; *1* – лифт; *2* – эскалатор; *3* – модуль пассажирской посадочной станции; *4* – депо; *5* – конвейер; *6* – площадка посадки-высадки пассажиров; *7* – пассажирская кабина; *8* – опора пассажирской посадочной станции

б)

Пассажирские посадочные станции канатного метро установлены на опорах над проезжими частями улиц с сохранением под ними габаритов для движения городского транспорта. Конструктивно станции состоят из двух и более модулей, интегрируемых в существующие объекты, часть из которых являются городскими транспортными узлами. Модули станций имеют различную геометрическую форму в плане и неограниченное количество уровней по высоте для их интеграции в сложившийся архитектурный облик урбанизированной среды, образуя в совокупности мультимодальные комплексы, что позволяет пассажирам комфортно производить пересадки и минимизировать маршруты при изменении вида транспорта.

Для пользования канатным метро пассажиры из вышеперечисленных объектов, используя модули, оборудованные лифтами и эскалаторами, являющиеся логистическим звеном, перемещаются на станции, где попадают на площадки посадки-высадки пассажиров. Пассажирские кабины вдоль этих площадок движутся с остановкой. Торможение и ускорение, изменение маршрута движения, а также полная остановка пассажирских кабин на посадочных станциях осуществляются конвейерами разгона-торможения. На станциях существует модуль, который используется как депо для пассажирских кабин. Из депо пассажирские кабины либо подаются на посадку, либо снимаются с маршрута в случае отсутствия достаточного числа пассажиров. Модуль депо используется как буферная зона для сглаживания пульсации пассажиропотока во времени. Пассажиры загружаются в неподвижно стоящие у площадки кабины, которые с помощью конвейера попадают на путь канатного метро, по которому и перемещаются с помощью тягового каната между пассажирскими посадочными станциями. Изменение маршрута движения пассажирских кабин

на другие пути движения там, где есть разветвление линий канатного метро, осуществляется на посадочных станциях с помощью конвейера разгона-торможения, совмещенного с модулем депо. Выгрузка пассажиров из кабин и их выход в мультимодальные комплексы, соединенные логистически с подземным метро станции «Ботаническая» г. Екатеринбурга, либо на платформу к пригородным электричкам, либо в многоэтажную парковку, либо в торговые центры происходит в обратном порядке.

Проект строительства пассажирской канатной транспортной системы на основе технологии канатного метро для г. Екатеринбург интегрирован в логистику пассажирских транспортных перевозок города Екатеринбурга. Он предусматривает, что один из мультимодальных комплексов транспортной системы канатного метро должен быть совмещен со станцией подземного метро «Ботаническая», а путь должен проходить вдоль улицы Щербакова до улицы Зимняя с последующим продолжением до Химмаша и лыжно-спортивного комплекса «Уткус» [28]. В пределах городской территории предусмотрен переход линии канатного метро через водную преграду – пойму реки Исеть. На рис. 85 показан возможный внешний вид мультимодального комплекса – пассажирской посадочной станции канатного метро «Ботаническая».

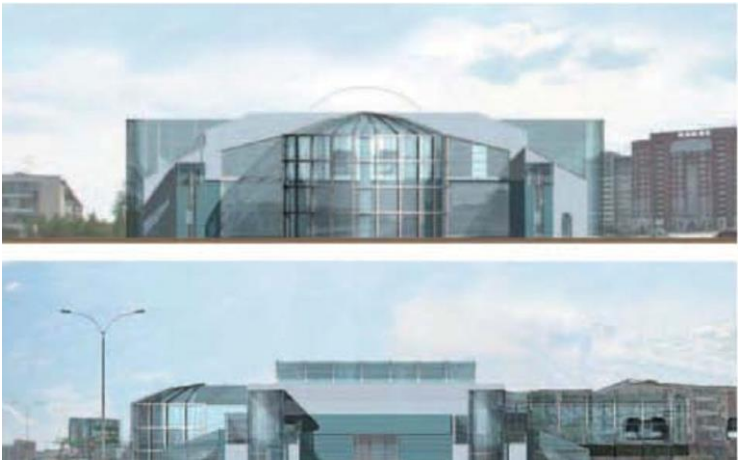


Рис. 85. Возможный внешний вид
пассажирской посадочной станции «Ботаническая»

Кроме выполнения своей основной функции – общественного пассажирского транспорта, канатное метро в Екатеринбурге позволит расширить сферу туристических услуг [28] как за счет проведения обзорных экскурсий, так и за счет большей доступности лыжно-спортивного комплекса «Уткус».

Сроки строительства канатного метро в Екатеринбурге могут быть существенно сокращены за счет использования модульных конструктивных элементов с оптимальной технологией их сборки и монтажа. Ожидаемый срок окупаемости строительства может достигать порядка 15 лет при использовании линии в качестве общественного транспорта при стоимости проезда 1 пассажира 18…20 руб. и 5…7 лет – при использовании линии в качестве туристическо-экскурсионного транспорта при стоимости 1 экскурсии 500…1000 руб. [28].

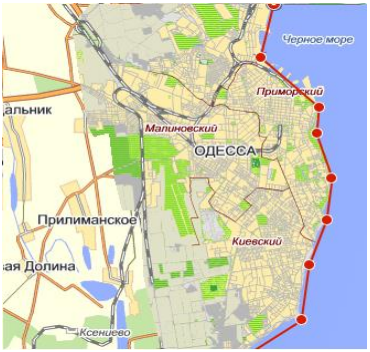
2.4. Концепция создания сети канатного метро в крупном приморском городе

Пассажирские системы общественного транспорта крупных приморских городов, которые зачастую являются известными историческими и туристическими центрами, сочетают в себе как функцию перевозки жителей, так и функцию транспортного обеспечения туристических маршрутов. Поэтому при разработке проекта создания сети канатного метро в приморском городе необходимо обеспечить логистическую увязку направлений пассажиропотоков с расположением максимально большого числа городских достопримечательностей и территорий пляжного отдыха как в пределах, так и непосредственно за пределами городской черты. При этом расположение городской застройки характеризуется, как правило, более значительной протяженностью вдоль морского побережья, чем вглубь материка.

Характерным примером может служить проект сети канатного метро в г. Одесса, разработанный в ИТЦ «Мысль» (г. Новочеркасск) в 2011 г. [30].

Анализ урбанистической среды Одессы, на территории которой проживает более 1 млн человек, показал, что особенностью городской, туристической и экскурсионной логистики является протяженная застройка на 25 км вдоль побережья Одесского залива Черного моря. В 2010 г. Одессу посетили более одного миллиона туристов, причем количество отдыхающих с проживанием в городе составило около 500 тыс. человек, а количество туристов с однодневным пребыванием, дающих максимальный доход в муниципальный бюджет, – более 500 тыс. человек [30]. Важной составляющей туристической индустрии города является обслуживание морских круизов, представляющих собой один из наиболее востребованных направлений отдыха в Одессе. Например, в 2011 г. в порт Одессы зашло свыше 70 морских круизных лайнеров. Особенность туристических маршрутов в Одессе – посещение исторической части города, парка им. Шевченко, пляжей от Лузановки до Аркадии и далее в сторону Фонтана.

На рис. 86 представлены маршрут туристического и городского канатного метро в Одессе, а в табл. 9 – основные его технико-экономические характеристики.



а)

б)

Рис. 86. Маршрут канатного метро в г. Одесса:
а – туристическая логистика; *б* – городская логистика

Таблица 9

Основные технико-экономические характеристики сети канатного метро в г. Одесса

Наименование характеристики	Значение характеристики для логистики	
	туристической	городской
Протяженность маршрута, км	25,0	13,2
Среднее время перемещения по маршруту, мин	40	25
Средняя скорость движения, км/ч	до 40	до 40
Количество посадочный станций, шт.	технически не ограничено	11
Количество пассажирских кабин, шт.	160	70
Вместимость 1 кабины, пасс.	до 32	до 32
Пропускная способность, пасс./ч	6000	6000
Количество опор, шт.	120	70
Продолжительность строительства, г.	3…4	3…4
Стоимость строительства, млн евро	150…250	109
Ожидаемый срок окупаемости, г.	5…7	7…10

Реализация сети канатного метро позволит кардинально изменить городское, туристическое и экскурсионное транспортное обслуживание городских жителей, отдыхающих и гостей во вновь

созданной среде обитания путем логистического объединения спальных районов и достопримечательностей города с его центральной частью в цельный органический комплекс.

Таким образом, реализация предложенной концепции пассажирской транспортной системы с использованием канатного метро позволит жителям самых отдаленных спальных районов добраться до центра города на экологически чистом транспорте в течение 30 мин. Туристическое и экскурсионное обслуживание позволит однодневным туристам в рамках одного светового дня (4…8 ч) посетить основные достопримечательности города. Мировой опыт свидетельствует об экономической целесообразности организации такого туризма. Для реализации предложенной концепции к туристическим и экскурсионным услугам предъявляются определенные требования, а именно:

– максимальный охват достопримечательностей в течение одного светового дня;

– необычность, оригинальность и привлекательность туристических маршрутов с новыми видами транспорта;

– высокий уровень комфорта для пассажиров при перемещении между объектами, в том числе детей и людей с ограниченными физическими возможностями;

– функционирование туристической и экскурсионной системы в любых климатических условиях зимой и летом;

– доступность, экологичность и безопасность транспортирования;

– мобильность и гибкость туристических и экскурсионных маршрутов по времени в любых климатических условиях;

– доступность, экологичность, безопасность в чрезвычайных ситуациях;

– минимальное воздействие на сложившуюся урбанистику и природный ландшафт;

– минимизация стоимости при транспортировке туристов.

Рис. 87. Трасса пассажирской подвесной канатной дороги вдоль морского побережья в г. Сочи

Еще одним примером строительства пассажирской подвесной канатной дороги в крупном приморском городе является проект транспортной системы общей протяженностью 1,63 км, проходящей вдоль прибрежной полосы в г. Сочи от морского порта до пансионата «Жемчужина» (рис. 87) [37]. Ориентировочная стоимость строительства составляет 1,3 млн евро при длительности работ около 2 лет.

2.5. Концепция создания транспортно-переправочного комплекса через широкую водную преграду типа морского пролива

Использование подвесного канатного транспорта на основе технологии канатного метро оказывается достаточно эффективным в качестве грузопассажирского канатно-переправочного комплекса через широкие водные преграды типа морских проливов, рукавов крупных рек и т.д. [41, 44]. Актуальность возведения пе-

реправ через водные препятствия возрастает в связи с интенсификацией экономической жизни и мобильности граждан.

Отличительной особенностью прокладки линии канатного метро через широкую водную преграду типа морского пролива является необходимость совмещения транспортировки как пассажиров, так и автомобильного транспорта. В качестве одного из характерных примеров разработки грузопассажирского канатно-переправочного комплекса через широкие водные преграды может быть рассмотрен маршрут через Керченский пролив (рис. 88) [40, 41]. В его основу положено техническое решение [90], которое позволяет решить задачу расширения функциональных возможностей канатно-переправочного комплекса с использованием канатного транспорта для транспортировки автомобилей.

Рис. 88. Линия грузопассажирского канатно-переправочного комплекса

Грузопассажирский канатно-переправочный комплекс содержит два здания концевых станций, которые установлены на противоположных берегах водной преграды. Концевые станции соединены между собой двумя и более несущими и двумя и более тяговыми канатами с подвесными опорами (рис. 89). Несущие и тяговые канаты опираются на промежуточные опоры, причем высота их подвеса превышает транспортный габарит проходящих морских и речных судов. Шаг установки промежуточных опор, расположенных в устье водной преграды, превышает габарит прохода судов.

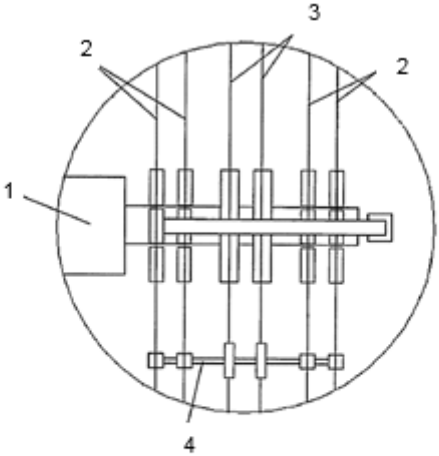


Рис. 89. Подвесная и промежуточная опоры для линии из четырех несущих и двух тяговых канатов: *1* – промежуточная опора; *2* – несущий канат; *3* – тяговый канат; *4* – подвесная опора

В зданиях концевых станций имеются площадки посадки-высадки пассажиров, конвейер разгона-торможения, накопительная зона для пассажирских кабин, вертикальная механизированная накопительная парковка для автомобилей с подвесными платформами. Подвесные платформы закреплены на каретках с опорными колесами, количество и размер которых соответствуют количеству и диаметру несущих канатов. Установленные на ка-

ретке отцепляемые зажимы также по своему количеству и размеру соответствуют количеству и диаметру тяговым канатам. Парковка по вертикали имеет два и более уровней для заезда-выезда автомобилей, соединенных с подъездной дорогой. Здание комплекса оснащено устройством загрузки циклического действия, автоматически подающего поочередно с парковки и накопительной зоны на конвейер разгона-торможения и далее на несущие и тяговые канаты загруженные подвесные платформы с автомобилями и пассажирские кабины с людьми.

Особенностью грузопассажирского канатно-переправочного комплекса является то, что промежуточные опоры (рис. 90, *а*) установлены в устье водной преграды, а подвесные платформы имеют колпаки, закрывающие автомобили при их перевозке.

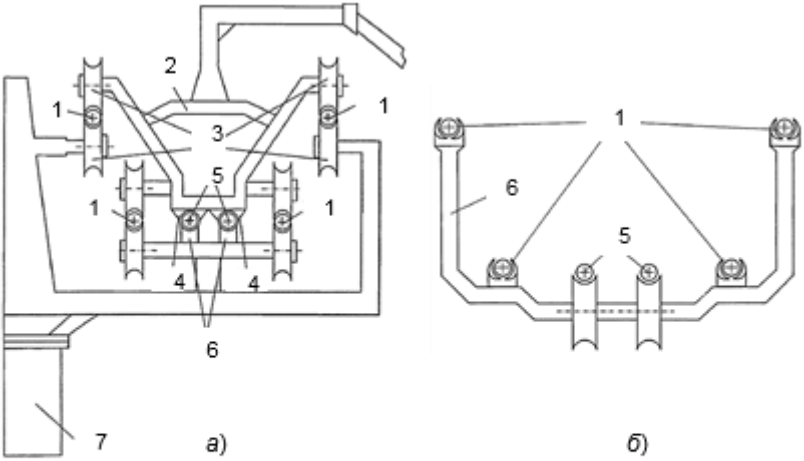


Рис. 90. Конструкции опор канатно-переправочного комплекса для линии из четырех несущих и двух тяговых канатов: *а* – промежуточная опора; *б* – подвесная опора; *1* – несущий канат; *2* – каретка; *3* – опорное колесо; *4* – отцепляемый зажим; *5* – тяговый канат; *6* – подвесная опора; *7* – промежуточная опора

Подвесные опоры (рис. 90, *б*), установленные с определенным шагом в пролетах, соединяющие жестко между собой несущие канаты, имеют поддерживающие блоки. Их количество и

размер соответствуют количеству и диаметру тяговых канатов.

Работу комплекса рассмотрим на примере грузопассажирского транспортирования через Керченский пролив. Пассажиры прибывают на грузопассажирский канатно-переправочный комплекс к Керченскому проливу на автомобилях по подъездной дороге. У здания концевых станций, установленных на противоположных берегах водной преграды, автомобили останавливаются и высаживают пассажиров. Возможный план здания концевой станции канатно-переправочного комплекса показан на рис. 91. Пассажиры двигаются в здание станции на площадку посадки-высадки пассажиров и садятся в пассажирские кабины, которые подаются устройством загрузки циклического действия из накопительной зоны.

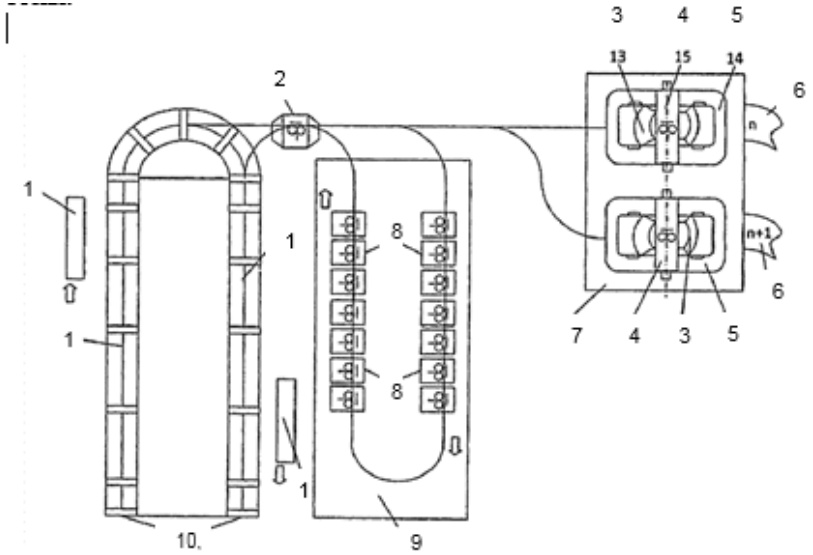


Рис. 91. План здания концевой станции канатно-переправочного комплекса: *1* – площадка посадки-высадки пассажиров; *2* – устройство загрузки; *3* – автомобиль; *4* – каретка; *5* – подвесная платформа; *6* – уровень парковки; *7* – механизированная накопительная парковка; *8* – пассажирская кабина; *9* – накопительная зона; *10, 11* – несущий и тяговый канаты; *12* – конвейер разгона-торможения

Водитель автомобиля, высадив пассажиров, продолжает движение по указанному маршруту на один из свободных уровней и заезжает на подвесную платформу вертикальной механизиро-

ванной накопительной парковки. Уровни соединены с подъездной дорогой уклонами. Водитель выходит из автомобиля и направляется на площадку посадки-высадки, где также садится в пассажирскую кабину. Автомобиль фиксируется на подвесной платформе и закрывается колпаком.

Платформа с автомобилем, подвешенная на каретках с опорными колесами и с отцепляемыми зажимами, перемещается внутри вертикальной механизированной накопительной парковки в зону установки устройства загрузки циклического действия. Устройство загрузки циклического действия при получении сигнала о загрузке пассажирских кабин или подходе подвесной платформы с автомобилем автоматически подает их поочередно с парковки и с зоны посадки-высадки пассажиров на несущие канаты. При этом происходит опирание колес на несущие канаты и пассажирские кабины (подвесные платформы) переходят в подвешенное положение. В этот момент пассажирские кабины и подвесные платформы подхватываются конвейером разгона-торможения и разгоняются до скорости движения тяговых канатов. В момент, когда скорость пассажирских кабин и подвесных платформ равна скорости тяговых канатов, происходит срабатывание отцепляемых зажимов, установленных на каретке. Отцепляемые зажимы жестко соединяются с тяговыми канатами, при этом тяговые канаты передают тяговое усилие каретке, на которой подвешены пассажирские кабины и подвесные платформы. В последующий момент пассажирские кабины и подвесные платформы, разогнавшись на конвейере, продолжают транспортироваться тяговыми канатами на противоположный берег водной преграды, опираясь через опорные колеса на несущие канаты.

При подходе к зданию концевой станции пассажирские кабины и подвесные платформы попадают на конвейер разгона-торможения, при этом отцепляемые зажимы отсоединяются от тяговых канатов. Пассажирские кабины и подвесные платформы, находясь на конвейере разгона-торможения, замедляют свой ход и, соответственно, попадают в зону посадки-высадки пассажиров, затем в зону циклического действия устройства загрузки. Устройство загрузки по программе направляет пассажирские кабины в накопительную зону, а подвесные платформы с автомобилями –

на вертикальную механизированную накопительную парковку. Пассажиры выходят из пассажирских кабин. Водитель также прибывает с пассажирской кабиной, высаживается и переходит на один из указанных уровней, где на подвесной платформе внутри вертикальной механизированной накопительной парковки находится его автомобиль. Водитель садится в свой автомобиль и с уровня выезжает на подъездную дорогу, где происходит посадка ждущих его пассажиров.

2.6. Концепция развития пассажирской транспортной инфраструктуры горного кластера Сочи

Как правило, в горных кластерах для доставки пассажиров к объектам туристической, спортивной или рекреационной инфраструктуры основным видом транспорта является автобусное или автомобильное сообщение, а подвесные канатные дороги используются в качестве дополнительного вида транспорта. Однако использование подвесного транспорта в качестве транспортной системы дает пассажирам целый ряд преимуществ [29]:

– комфорт перемещения (подвижной состав имеет плавный ход, удобство посадки и высадки, в том числе и детей и людей с ограниченными физическими возможностями);

– скорость, четкость и прогнозируемость времени поездки, обеспечивающиеся практически при любых погодных условиях.

Поэтому для горных территорий, являющихся туристическими, спортивными или рекреационными кластерами, подвесные канатные дороги представляют собой один из наиболее перспективных видов пассажирского транспорта, естественно вписывающего в окружающий скалистый горный ландшафт с глубокими ущельями и трещинами, зачастую покрытый труднопроходимой растительностью. Характерные примеры действующих в настоящее время пассажирских канатных дорог приведены в гл.1.

В Российской Федерации актуальность и социальная значимость вопроса развития пассажирского подвесного канатного транспорта особенно возросла в настоящее время, когда г. Сочи стал городом проведения зимних Олимпийских игр 2014 года. На

территории горного кластера Сочи планируется построить более 100 современных канатных дорог.

В дни Олимпиады транспортная инфраструктура обеспечила перевозку около 1 млн зрителей, представителей средств массовой информации, спортсменов, членов спортивных федераций, маркетинговых партнеров и персонала. Основная транспортная нагрузка легла на автобусный парк: им было перевезено более 800 тыс. пассажиров, которые совершили около 4 млн поездок [29]. Однако свой вклад внесли и построенные к моменту открытия Олимпиады–2014 пассажирские канатные дороги. Они позволили перевезти спортсменов и зрителей в горном кластере в максимально комфортных условиях с минимальным воздействием на окружающую среду, обеспечивая при этом высокий уровень надежности и безопасности.

Канатные дороги в районе горного кластера были объединены в единый логистический транспортный хаб (рис. 92). Для доставки зрителей к спортивным объектам в горном кластере были сформированы транспортно-пересадочные узлы «Эсто-Садок», «Красная Поляна» и «Роза Хутор», соединенные семью канатными дорогами со спортивными объектами: комплексом для соревнований по лыжным гонкам и биатлону «Лаура», Экстрим-парком, горнолыжным центром «Роза Хутор», комплексом для прыжков с трамплина «Русские горки» и центром санного спорта «Санки» (рис. 93, см. рис. 29). Зрители и гости Олимпийских игр смогли пользоваться системой канатных дорог путем логистического перехода по мере необходимости с одного спортивного объекта на другой через транспортно-пересадочные узлы. Всего было создано 8 таких узлов (см. рис. 29).

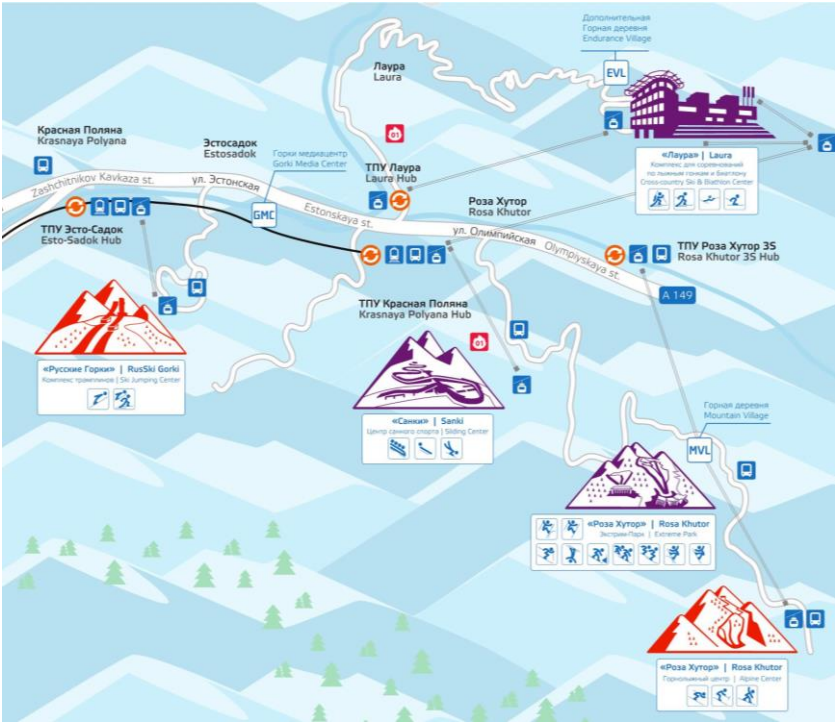


Рис. 92. Схема размещения подвесных пассажирских канатных дорог в горном кластере Красная Поляна

Таким образом, можно говорить о том, что в г. Сочи и прилегающей территории впервые в России была создана всепогодная дублирующая транспортная инфраструктура, логистически связывающая транспортно-пересадочные узлы с основными олимпийскими объектами прибрежного и горного кластера, в том числе с использованием подвесных пассажирских канатных дорог для доставки пассажиров к расположенных в горах местам проведения соревнований.

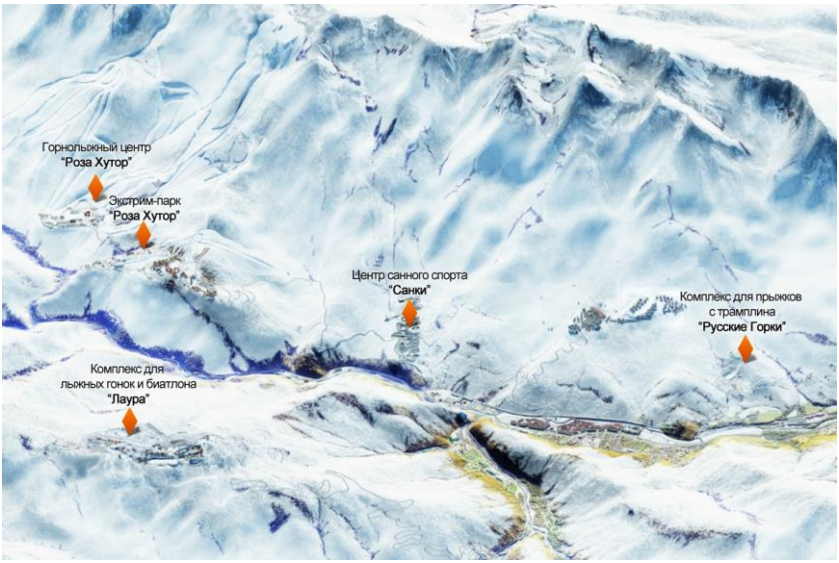


Рис. 93. Схема размещения спортивных объектов в горном кластере Красная Поляна

В рамках развития и модернизации сети пассажирских подвесных канатных дорог в горном кластере г. Сочи авторским коллективом, в который в качестве исполнителей вошли фирмы «Доппельмайер» (Австрия) и ООО «Скадо» (г. Самара), а также инженерно-консультационный центр «Мысль» НГТУ (г. Новочеркасск), был разработан проект строительства канатных дорог нового поколения на основе инновационной технологии канатного метро [29]. Ранее фирмой «Доппельмайер» на территории Красной Поляны уже было построено 9 подвесных канатных дорог.

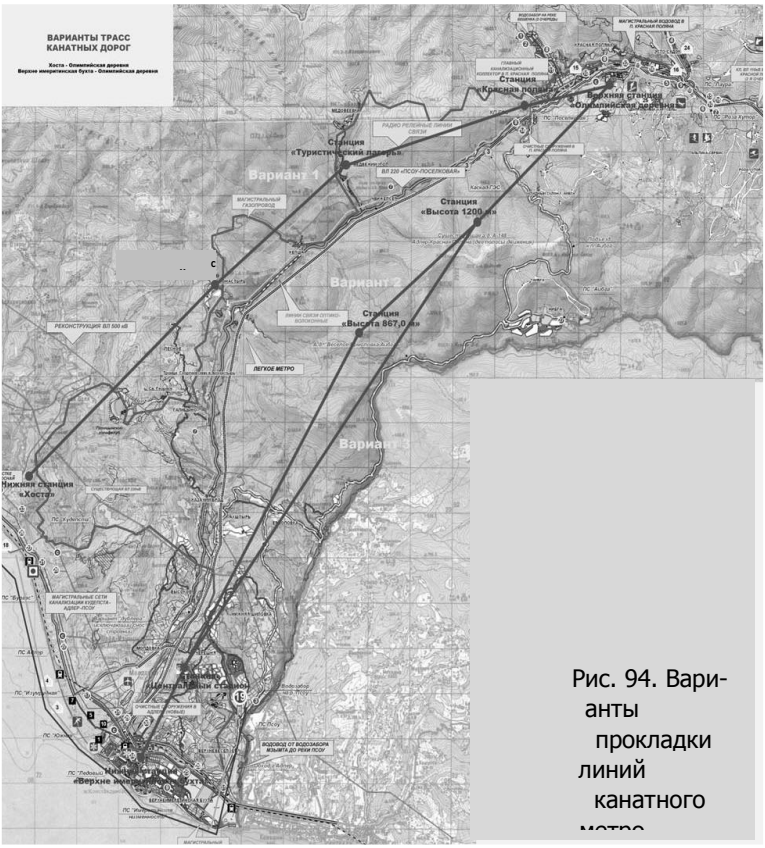


Рис. 94. Варианты прокладки линий канатного метро

Разработанная транспортно-логистическая концепция перевозки пассажиров позволяет связать два основных пункта расположения объектов спортивной инфраструктуры горного кластера – Олимпийский парк, расположенный на побережье Черного моря в Имеретинской низменности, и Красную Поляну (рис. 94) [29]. В Олимпийском парке расположены большая и малая ледовые арены на 12 и 7 тыс. зрителей соответственно, конькобежный центр на 8 тыс. зрителей, ледовый дворец спорта на 12 тыс. зрителей, арена для керлинга на 3 тыс. зрителей, олимпийский стадион, главная олимпийская деревня, медиацентр, гостиница. В Красной

Поляне расположены санно-бобслейная трасса на 11 тыс. зрителей, комплекс «Хребет Псехако» на 20 тыс. зрителей, комплекс «Роза Хутор» на 18 тыс. зрителей, курорт «Альпика-Сервис» на 13 тыс. зрителей, горнолыжный центр с трамплином на 15 тыс. зрителей, горная олимпийская деревня. Транспортный пассажиропоток в моменты наибольшей загрузки этих инфраструктурных объектов может достигать до 10…15 тыс. пасс./ч.

Линия канатного метро может начинаться либо от Олимпийского парка в Имеретинской низменности (концевая посадочная станция «Верхне-Имеретинская бухта»), либо от поселка Хоста на Черноморском побережье (концевая посадочная станция «Хоста») (см. рис. 94). Конечным пунктом во всех случаях является поселок Красная Поляна (концевая посадочная станция «Олимпийская деревня»). Возможны три варианта прокладки линии канатного транспорта.

Маршрут согласно варианта 1 имеет общую протяженность 33,7 км и перепад высот между конечными точками 377 м (максимальный перепад – 587 м). В пределах маршрута предусмотрено строительство следующих пяти посадочных пассажирских станций:

- «Хоста» (высота над уровнем моря 439 м, вблизи станции расположены достопримечательности: единственная в мире тисосамшитовая роща и уникальная роща пробкового дуба, развалины византийской крепости, каньон Навалишенский, всемирно известные Воронцовские пещеры со стоянкой первобытных людей, 30-метровая смотровая башня на прибрежной горе Ахун, Агурские водопады и Орлиные скалы, Назаровские пещеры с подземными реками, озерами и водопадами, дольмены и древние жертвенные камни);
- «Монастыри» (высота над уровнем моря 1026 м, вблизи станции расположены достопримечательности: скалы Серые Монастыри (Краснодарские столбы) высотой до 40 м);
- «Туристический лагерь» (высота над уровнем моря 800 м, расположена в живописном месте на берегу

горной реки вблизи минерального источника «Чвижепсе»);
- «Красная Поляна» (высота над уровнем моря 672 м);
- «Олимпийская деревня» (высота над уровнем моря 816 м).

Маршрут согласно варианта 2 (рис. 94) имеет общую протяженность 39,9 км и перепад высот между конечными точками 502 м (максимальный перепад – 1030 м). В пределах маршрута предусмотрено строительство следующих пяти посадочных пассажирских станций:

- «Верхне-Имеретинская бухта» (высота над уровнем моря 170 м);
- «Центральный стадион» (высота над уровнем моря 210 м);
- «Высота 867 м» (высота над уровнем моря 867 м);
- «Высота 1200 м» (высота над уровнем моря 1200 м);
- «Олимпийская деревня» (высота над уровнем моря 816 м).

Маршрут согласно варианта 3 (рис. 94) имеет общую протяженность 38,8 км и перепад высот между конечными точками 502 м (максимальный перепад – 1030 м). В пределах маршрута предусмотрено строительство следующих четырех посадочных пассажирских станций:

- «Верхне-Имеретинская бухта» (высота над уровнем моря 170 м);
- «Центральный стадион» (высота над уровнем моря 210 м);
- «Высота 1200 м» (высота над уровнем моря 1200 м);
- «Олимпийская деревня» (высота над уровнем моря 816 м).

В процессе разработки проекта канатного метро в горном класстере г. Сочи был проведен сравнительный анализ целесообразности использования разных типов канатных систем. Рассмотрению подлежали следующие варианты:

– монорельсовая система с канатным приводом над существующей автомобильной дорогой вдоль реки Мзымта;
– подвесная кабинная одноканатная дорога в соответствии с одним из трех возможных маршрутов;
– подвесная кабинная двухканатная дорога в соответствии с одним из трех возможных маршрутов;
– подвесная кабинная дорога типа «фунитель» в соответствии с одним из трех возможных маршрутов;
– подвесная кабинная трехканатная дорога в соответствии с одним из трех возможных маршрутов.

Недостатки монорельсовой системы связаны с тем, что:

– несмотря на гибкость трассы, требуется установка поддерживающих несущих конструкций через каждые 30…50 м;

– в портальном варианте над дорогой большое число промежуточных опор означает весьма значительный расход бетона под фундаменты и несущих металлоконструкций;

– время в пути может составить до двух часов;

– срок строительства в данный момент не предсказуем.

Для подвесной одноканатной дороги свойственны следующие недостатки:

– скорость движения пассажирских кабин ограничивается 6 м/с, что требует около двух часов пути;

– требуется частая установка промежуточных опор (в среднем каждые 70…130 м);

– требуется вырубка просеки на протяжении всей оси канатной дороги;

– функционирование дороги ограничивается ветровыми нагрузками до скорости ветра 70 км/ч;

– требуются относительно большие энергозатраты во время эксплуатации, а также затраты на регламентные работы и сервисное обслуживание;

– крайне сложная система эвакуации.

Применительно к рассматриваемому проекту подвесная двухканатная дорога, несмотря на присущий ей ряд существенных достоинств (допустимость относительно больших пролетов между промежуточными опорами и относительно малый расход потреб-

ляемой энергии), имеет следующие основные недостатки:

– невозможность применения больших пассажирских кабин, определяющих комфорт и устойчивость к ветровым нагрузкам;

– невозможность контроля тягового каната в больших пролетах, что в определенных условиях может создать дополнительные ограничения по ветровым нагрузкам;

– ограничение скорости движения кабин до 6…7 м/с.

Кабинная подвесная канатная дорога типа «фунитель» при всех достоинствах, сравнимых с вариантами двух- и трехканатных дорог, имеет главный недостаток: большое потребление электроэнергии и относительно высокая трудоемкость регламентных и сервисных работ.

На основании анализа имеющихся топографических данных местности и с учетом опыта работы авторского коллектива в Красной Поляне на протяжении семи лет был сделан вывод о том, что наиболее целесообразным и, возможно, единственно приемлемым является вариант строительства подвесной трехканатной кабинной дороги с применением системы посекционного сквозного проезда от начальной до конечной станции и возможностью посадки-высадки пассажиров на промежуточных станциях. Принцип трехканатной системы заключается в кольцевом движении кабин (вместимостью до 30 пассажиров с интервалом до 0,5 мин), которые движутся по двум несущим канатам и контролируются (третьим) тяговым канатом. Данная система успешно применяется в проектах, где требуется обеспечить большой пассажиропоток в условиях сложного рельефа при неблагоприятных погодных условиях (ветер, снег и др.).

В пользу этого варианта говорят следующие факты [29]:

– экологически чистый и максимально безопасный вид транспорта;

– трасса канатной дороги не зависит от ландшафта и может быть выбрана произвольно;

– возможная пропускная способность канатной дороги составляет 2…3 тыс. пасс./ч в прямом и обратном направлениях;

– относительно малое потребление электроэнергии;

– наиболее оправданные затраты на обслуживание и сервис оборудования;

– возможность реализации больших пролетов между промежуточными опорами (в зависимости от топографии трассы – до нескольких километров);

– высокая устойчивость к сильным ветрам и низким температурам окружающей среды, а также высокая степень безотказности в любых климатических условиях;

– отсутствие необходимости выполнения просеки вдоль оси трассы канатной дороги;

– время в пути в зависимости от выбранных мест установки начальной и конечной станций составит около одного часа;

– приемлемый срок строительства канатной дороги в пределах 2…3 лет.

Таким образом, приведенные результаты экономической оценки варианта трехканатной системы свидетельствуют о высокой степени его привлекательности с точки зрения потенциальных инвесторов и целесообразности дальнейшей реализации.

2.7. Концепция развития пассажирской транспортной инфраструктуры туристического кластера Геленджика

Использование пассажирских подвесных канатных дорог на основе технологии канатного метро представляет значительный интерес с точки зрения сохранения естественной природной среды в горно-рекреационных и горно-туристических комплексах при обеспечении наиболее удобного и безопасного наблюдения за поведением животных, находящихся в максимально приближенных условиях их естественного обитания [37].

С этой целью инженерно-консультационным центром «Мысль» НГТУ (г. Новочеркасск) была разработана не имеющая аналогов в мире концепция сафари-парк-технологий, основанная на использовании канатных дорог в природных сафари-парках для перемещения посетителей в пределах их территории с последовательным посещением наиболее интересных мест и знакомством с обитающими животными и птицами [37, 45]. Сафари-парк-технологии позволяют совместить спорт и экологический туризм, использовать естественный ландшафт местности, содержать животных в максимально естественных условиях,

обеспечить большую пропускную способность, удовлетворяя рекреативные потребности посетителей, растительного мира и животных. Эти технологии позволяют получить суммарно социальный, природоохранный, рекреационный и экономический эффект.

Рис. 95. Схема расположения подвесной канатной дороги в «Сафари Парк» в г. Геленджике

Рис. 96. Макет посадочной станции канатной дороги «Сафари-парка»
в г. Геленджике

Рис. 97. Вид линии канатной дороги «Сафари-парка» в г. Геленджике

Концепция сафари-парк-технологий была реализована в проекте «Сафари-Парк» в г. Геленджике (рис. 95). При посещении развлекательного комплекса «Сафари-Парк» туристы имеют возможность, поднимаясь на канатной дороге, наблюдать животных, обитающих на территории комплекса в среде, приближенной к естественной природе. На рис. 96 показана 3D-модель посадочной станции канатной дороги [45], а на рис. 97 – пассажирская кабина и конструкция промежуточных опор [37].

ГЛАВА 3. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИНИЙ КАНАТНОГО МЕТРО

Особое значение для научной проработки проблемы внедрения канатного метро в транспортную инфраструктуру крупных городов и территорий и ее реализации применительно к ландшафтно-неоднородным условиям имеет задача рационального проектирования транспортных линий. Она носит технико-экономический характер, так как их строительство в реальных

городских условиях с учетом значительного числа ограничений, связанных с особенностями уже имеющейся городской застройки как в плане, так и по высоте, является финансово затратным мероприятием. При этом стоимость строительства весьма чувствительна к выбору основных проектных параметров линий – расстояний между соседними промежуточными опорами, высоты промежуточных опор, диаметров несущих канатов и характеристик их натяжения [50, 58, 67].

Значительную составляющую в общую стоимость реализации этой задачи, включая расходы на проектно-конструкторские, проектно-изыскательские, строительно-монтажные работы, приобретение необходимого механического оборудования, создания автоматизированной системы управления движением и др., вносят затраты на изготовление и установку промежуточных опорных конструкций вдоль линии метро, а также приобретение тяговых и несущих стальных канатов. Величина указанных затрат непосредственно зависит от числа промежуточных опор, расположенных по длине линии, т.е. зависит от шага их установки. Учитывая необходимость обеспечения предельно допустимой минимальной высоты приближения пассажирских кабин к поверхности земли, понятно, что с уменьшением шага установки опор их суммарная стоимость будет возрастать вследствие увеличения количества опорных конструкций, хотя единичная стоимость опоры будет снижаться вследствие уменьшения ее высоты. С увеличением шага единичная стоимость опоры и стоимость канатов будут возрастать, обуславливая рост суммарных затрат, несмотря на снижение количества опорных конструкций по длине линии канатного метро.

При этом необходимо учитывать, что процессом изменения высоты опор, а, следовательно, и их единичной стоимости можно в определенных пределах управлять целенаправленным натяжением несущих канатов, что позволяет изменять стрелу их провисания. Таким образом возможно замедлить естественное увеличение высоты опорных конструкций с увеличением шага установки опор, хотя указанная мера и приведет к возникновению в канатах дополнительных осевых усилий и потребует применение канатов большего диаметра и большей стоимости.

Таким образом, постановка задачи проектирования линий канатного метро в целом как задачи технико-экономической оптимизации, предложенная в [55, 57], является наиболее перспективным подходом к решению практически важной проблемы максимального удешевления строительства канатного метро без ущерба надежности и энергоэффективности технической системы.

3.1. Общая постановка задачи оптимального проектирования

Задача расположения и выбора высоты промежуточных опор канатного метро является задачей технико-экономической оптимизации. Ее цель заключается в обеспечении минимальной величины затрат на возведение опорных конструкций, приобретение тягового и несущих канатов, а также комплекта устанавливаемого на опору необходимого технологического оборудования.

Расчетная схема оптимизируемого участка линии канатного метро между двумя соседними посадочными станциями (станции A и B) дана на рис. 98. Линия $v_0(u)$ характеризует профиль

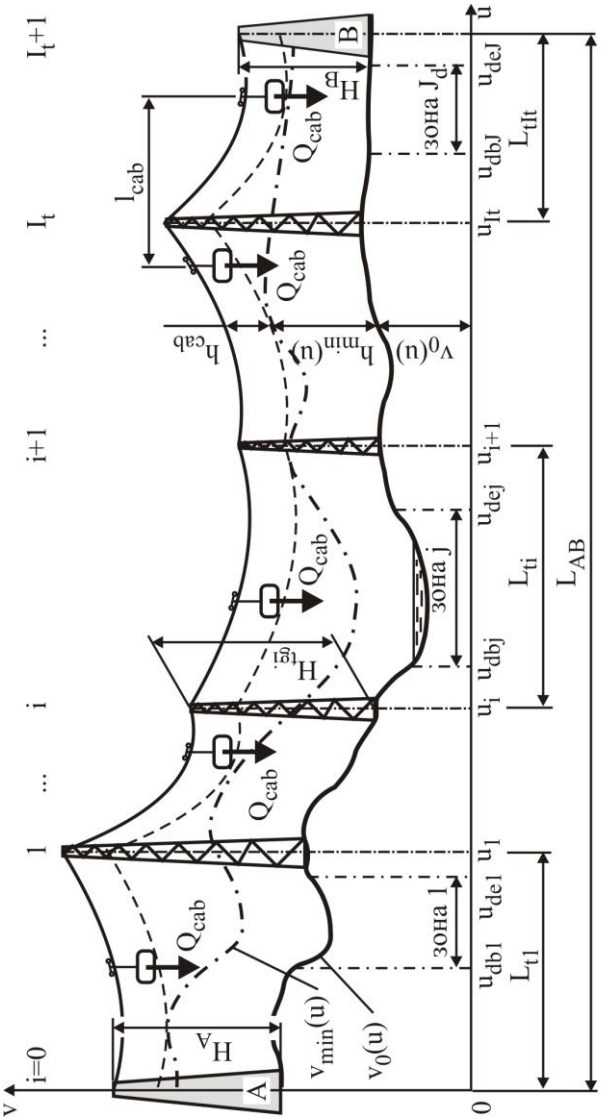


Рис. 98. Расчетная схема оптимизируемого участка линии канатного метро между соседними посадочными станциями *A* и *B*

рельефа местности между соседними посадочными станциями. Линия $v_{\min}(u)$ характеризует уровень минимально допусти-

мого приближения низшей точкой пассажирской кабины к поверхности земли в условиях максимально возможного провисания несущих канатов, а также с учетом требований безопасности движения и высотности жилой и производственной застройки вдоль трассы канатного метро, причем

$$v_{\min}(u) = v_0(u) + h_{\min}(u),$$

где $h_{\min}(u)$ – минимально допустимое приближение низшей точкой пассажирской кабины к поверхности земли.

Вдоль линии канатного метро также учитывается расположение возможных запретных зон, в пределах которых не допускается установка промежуточных опорных конструкций. В их число могут включаться реки, ручьи, озера, болотистая местность, овраги, автотрассы, стадионы, территории режимных объектов и др. Расположение j-й $(j \in [1; J])$ запретной зоны характеризуется координатой u начальной u_{dbj} и конечной u_{dej} точек.

Между соседними посадочными станциями A и B располагается I_t промежуточных опор. В общем случае они могут иметь различную геометрическую высоту H_{tgi} ($i \in [1; I_t]$) и устанавливаться с неодинаковым шагом L_{ti}, причем координата u расположения i-й опоры составляет u_i.

В стоимостном выражении величина затрат C на строительство участка между соседними посадочными станциями A и B складывается из нескольких слагаемых:

– стоимости зданий самих станций C_A и C_B;

– стоимости установленного внутри станций технологического оборудования C_{eA} и C_{eB};

– стоимости металлоконструкций промежуточных опор и фундамента под ними;

– стоимости установленного на опорах технологического оборудования;

– стоимости тягового и несущих стальных канатов.

Зависимость для расчета величины затрат C имеет вид:

$$C = C_A + C_B + C_{eA} + C_{eB} + \sum_{i=1}^{i=I_t}\left(C_{ti} + C_{fi} + C_{ei}\right) + \left(C_{kt} + n_{kn}C_{kn}\right)\sum_{m=1}^{m=I_t+1} l_{km}$$

, (5)

где C_{ti}, C_{fi}, C_{ei} – единичная стоимость металлоконструкции, фундамента и комплекта технологического оборудования для i-й промежуточной опоры; C_{kt}, C_{kn} – стоимость 1 погонного метра тягового и несущего каната соответственно; I_t – число промежуточных опор; n_{kn} – число несущих канатов; l_{km} – длина каната с учетом его провисания в m-м пролете между соседними промежуточными опорами ($m-1$ и m).

Стоимость строительства зданий посадочных станций может варьироваться в широких пределах, исходя не только из их архитектурного исполнения и этажности, но также из направленности дальнейшего использования помещений станций и необходимых объемов привлечения средств частных инвесторов. Именно посадочные станции представляют наибольший интерес для инвесторов, так как на этапе функционирования канатного метро они могут быть использованы для организации различной деловой деятельности, сдачи в аренду, размещения офисов и т.д. Поэтому на начальном этапе проектирования затраты на строительство зданий посадочных станций C_A и C_B можно определить по зависимости

$$C_{A(B)} = \left(C_{sA(B)} S_{fA(B)} / h_{fA(B)}\right) H_{A(B)},$$

где $C_{sA(B)}$ – стоимость 1 кв. м здания станции A (или B); $S_{fA(B)}, h_{fA(B)}$ – общая площадь и высота этажа здания станции A (или B); $H_{A(B)}$ – высота расположения посадочной площадки станции A (или B).

Единичная стоимость промежуточной опорной конструкции C_t зависит как от ее возможного конструктивного исполнения,

так и высоты H_t. Она может быть аппроксимирована степенной регрессионной зависимостью

$$C_t = C_{t0} H_t^{a_t}. \qquad (6)$$

Для определения эмпирических коэффициентов C_{t0} и a_t возможно использовать данные о стоимости опорных конструкций современных типов линий электропередач высокого напряжения. По своему конструктивному исполнению они достаточно близки к промежуточным опорным конструкциям канатного метро. В табл. 10 приведены значения указанных коэффициентов, полученные обработкой методом наименьших квадратов ценовых данных ряда отечественных фирм-производителей опор линий электропередач [73]. Высота указанных типов опор находится в диапазоне 20…45 м.

Таблица 10

Значения коэффициентов в регрессионной зависимости для определения C_t, руб.

Тип опорной металлоконструкции	Значения эмпирических коэффициентов	
	C_{t0}, руб./м	a_t
Многогранные стальные опоры типа ПГМ 500 МУ 330 ПМ 220 АМ 220 КМ 220	2319,00 716,40 2,84 14,32 28,61	1,74 2,37 3,60 3,44 3,30
Ферменные стальные опоры	5,68	3,60

Вследствие необходимости натяжения тягового и несущих канатов требуется усиление конструкции опор, что повышает их массу и, соответственно, стоимость изготовления и монтажа. Это обстоятельство при проведении дальнейших расчетов удобно учесть путем некоторого увеличения расчетной высоты опор по сравнению с их геометрической высотой H_{tg} пропорционально

принятому натяжению S_k. Поэтому в выражении для определения единичной стоимости опоры (6) необходимо использовать расчетную высоту:

$$H_t = H_{tg}\left(1+\psi\frac{[n]_k S_k}{R_{kn}}\right),$$

где ψ – коэффициент усиления конструкции опоры при действии максимально допустимого по условию прочности каната усилия натяжения $T_{k\max} = R_{kn}/[n]_k$; R_{kn} – агрегатная прочность несущего каната; $[n]_k$ – минимальный коэффициент запаса прочности каната, установленный требованиями Ростехнадзора согласно ПБ 10-559-03 [95]; S_k – горизонтальное усилие натяжения несущего каната.

Единичная стоимость фундамента C_f пропорциональна величине массы устанавливаемой опорной конструкции, т.е. ее высоте H_t. Поэтому для определения C_f возможно также использовать степенную регрессионную зависимость

$$C_f = C_{f0} H_t^{a_f},$$

причем стоимость C_f принимается как фиксированная доля стоимости C_t: C_f. Значения эмпирических коэффициентов C_{f0} и a_f для нескольких значений доли стоимости χ приведены в табл. 11.

Таблица 11
Значения коэффициентов в регрессионной зависимости для определения C_f, руб.

Тип многогранной стальной опоры	Доля стоимости χ	Значения эмпирических коэффициентов	
		C_{f0}, руб./м	a_f

ПГМ 500	0,05	115,00	1,74
	0,10	232,00	
	0,15	348,00	
МУ 330	0,05	35,82	2,37
	0,10	71,64	
	0,15	107,46	
ПМ 220	0,05	0,14	3,60
	0,10	0,28	
	0,15	0,43	
АМ 220	0,05	0,72	3,44
	0,10	1,43	
	0,15	2,15	
КМ 220	0,05	1,43	3,30
	0,10	2,86	
	0,15	4,29	

Согласно требованиям Ростехнадзора [95] в качестве тяговых и несущих стальных канатов в конструкции канатного метро необходимо использовать либо специальные канаты повышенной агрегатной прочности, либо традиционные для канатных дорог и лифтов грузолюдские канаты по ГОСТ 2688-80, ГОСТ 3066-80, ГОСТ 3077-80, ГОСТ 3079-80, ГОСТ 3081-80, ГОСТ 7665-80 и ГОСТ 7667-80. Их конструкция приведена в табл. 12.

Таблица 12

Основные типы отечественных грузолюдских стальных канатов

ГОСТ на канат	Тип каната	Конструкция	Диаметр каната, мм	
			минимальный $d_{\hat{e}}^{min}$	максимальный $d_{\hat{e}}^{max}$
ГОСТ 2688-80	Двойной свивки ЛК-Р	6×19(1+6+6/6)+1о.с.	3,6	56,0

ГОСТ 3066-80	Двойной свивки ЛК-Р	6×7(1+6)+1×7(1+6)	1,9	27,5
ГОСТ 3077-80	Двойной свивки ЛК-О	6×19(1+9+9)+1о.с.	4,6	46,0
ГОСТ 3079-80	Двойной свивки ТЛК-О	6×37(1+6+15+15)+1о.с.	5,8	75,0
ГОСТ 3081-80	Двойной свивки ТЛК-О	6×37(1+9+9)+7×7(1+6)	6,4	43,0
ГОСТ 7665-80	Двойной свивки ЛК-З	6×25(1+6; +12)+1о.с.	14,5	48,5
ГОСТ 7667-80	Двойной свивки ЛК-З	6×25(1+6;6+12)+7×7(1+6)	14,0	47,0

Используемые в дальнейших расчетах основные параметры грузолюдских стальных канатов целесообразно представить в виде регрессионных соотношений в зависимости от диаметра каната d_k. Анализ показал, что наилучшее приближение к исходным данным достигается при использовании следующих регрессионных зависимостей:

– для расчета собственного веса 1 погонного метра длины каната

$$q_k = q_{k0} d_k^2 \;;$$

– для расчета агрегатной прочности (разрывного усилия) каната

$$R_k = r_{k0} + r_{k1} d_k + r_{k2} d_k^2 \;;$$

– для расчета стоимости 1 погонного метра длины каната

$$\tilde{N}_k = \tilde{n}_{k0} + \tilde{n}_{k1} d_k + \tilde{n}_{k2} d_k^2 \,.$$

Значения эмпирических коэффициентов в указанных регрессионных зависимостях (d_k – в мм), полученные обработкой методом наименьших квадратов данных соответствующих ГОСТ и ценовых данных отечественных фирм-изготовителей и поставщиков [75], приведены в табл. 13.

Таблица 13

Значения коэффициентов в регрессионных зависимостях

для расчета параметров отечественных грузолюдских канатов

ГОСТ на канат	Значения коэффициентов при расчете						
	вес $q_{\hat{e}0}$, Н	агрегатная прочность каната*, Н			стоимость каната, руб./м		
		$r_{\hat{e}0}$	$r_{\hat{e}1}$	$r_{\hat{e}2}$	$\tilde{n}_{\hat{e}0}$	$\tilde{n}_{\hat{e}1}$	$\tilde{n}_{\hat{e}2}$
ГОСТ 2688-80	0,0375	122,8	11,0	624,2	5,04	0,2946	0,1635
ГОСТ 3066-80	0,0419	58,4	12,4	749,7	4,23	0,3039	0,1582
ГОСТ 3077-80	0,0370	-2354,0	317,8	619,5	-1,38	1,4100	0,1573
ГОСТ 3079-80	0,0354	3850,9	-413,0	614,0	-0,09	1,3740	0,1469
ГОСТ 3081-80	0,0401	-10825,5	966,5	737,1	2,43	0,7968	0,1793
ГОСТ 7665-80	0,0375	-8730,0	897,2	590,8	0,19	-0,3620	0,1860
ГОСТ 7667-80	0,0421	-11400,0	1135,0	718,5	22,58	-0,0622	0,1786

Примечание. * Для канатов маркировочной группы 2060 (210) Н/мм^2 (кгс/мм^2).

Расчетная схема участка линии канатного метро между двумя соседними промежуточными опорными конструкциями представлена на рис. 99. Линия провисания несущего каната формируется под действием нескольких сил:

– вертикальной равномерно распределенной нагрузки от собственного веса каната интенсивностью q_{kn};

– вертикальной сосредоточенной нагрузки от веса пассажирских кабин Q_{cab};

– горизонтального продольного усилия натяжения каната S_k;

– горизонтальной поперечной статической составляющей ветрового давления на пассажирскую кабину p_{cab};

– горизонтальной поперечной статической составляющей ветрового давления на несущие канаты p_{kn}.

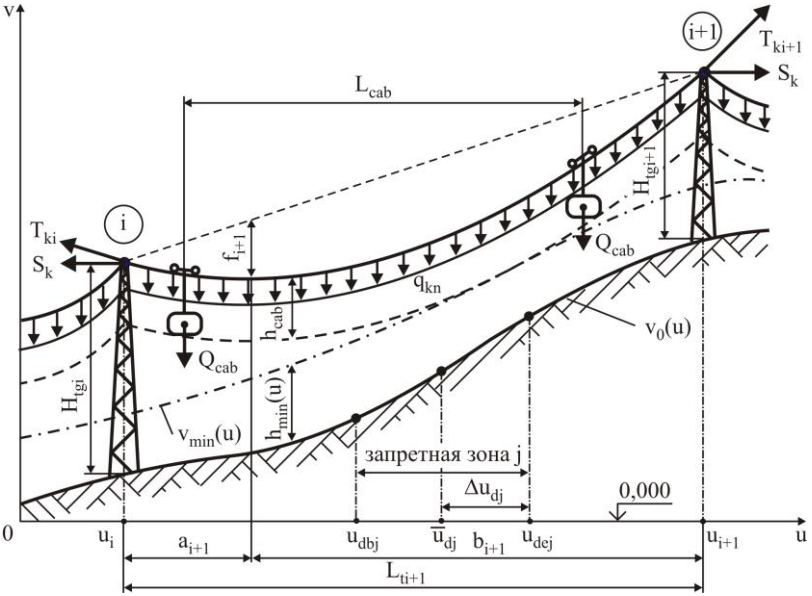


Рис. 99. Расчетная схема линии канатного метро

между соседними промежуточными опорными конструкциями i и $i+1$

Сосредоточенные нагрузки Q_{cab} удобно заменить распределенными интенсивностью

$$q_{cab} = \frac{Q_{cab}}{n_{kn} L_{cab}},$$

где L_{cab} – расстояние между соседними пассажирскими кабинами.

Равнодействующая поперечной распределенной нагрузки

на m-й несущий канат составит (рис. 100):

$$q_{Rknm} = \sqrt{(q_{cabm} + q_{kn})^2 + (p_{cab} + p_{knm})^2} =$$

$$= \sqrt{\left(q_{kn0} d_{kn}^2 + \mu_m \frac{Q_{cab}}{n_{kn} L_{cab}}\right)^2 + w_0^2 \left(\eta_m C_{wkn} k_{wkn} d_{kn} + \mu_{wm} C_{wcab} k_{wcab} \frac{A_{cab}}{n_{kn} L_{cab}}\right)^2},$$

где μ_m, μ_{wm} – коэффициенты неравномерности распределения весовой и ветровой нагрузки на m-й несущий канат от пассажирской кабины; η_m – коэффициент ослабления давления ветра на поверхность m-го несущего каната для ряда параллельно расположенных канатов [54]; w_0 – нормативное значение ветрового давления [54] в зависимости от номера ветрового района [102]; C_{wkn}, C_{wcab} – аэродинамические коэффициенты несущего каната [54] и пассажирской кабины; k_{wkn}, k_{wcab} – коэффициенты возрастания ветрового давления с высотой от поверхности [54], рассчитанные для высоты расположения оси каната и центра тяжести кабины; A_{cab} – расчетная площадь пассажирской кабины (площадь проекции кабины на вертикальную плоскость).

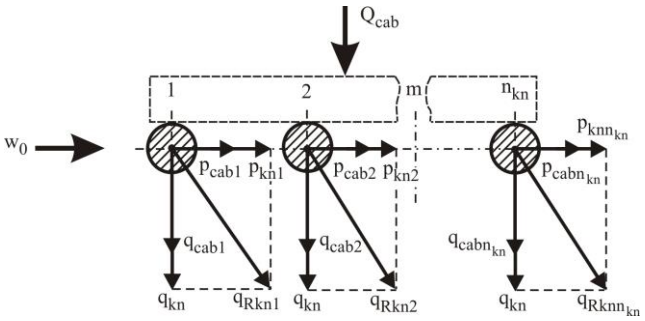


Рис. 100. Расчетная схема сил,
действующих на систему несущих канатов

Аппроксимация табличных данных [54] позволяет выразить

зависимость коэффициента возрастания ветрового давления с высотой от поверхности k_w в интервале высот $h =$ 0…100 м кубическим полиномом:

$$k_w = a_{kw0} + a_{kw1}h + a_{kw2}h^2 + a_{kw3}h^3 .$$

Коэффициенты полинома для разных типов окружающей местности приведены в табл. 14. Если линия канатного метро проходит через местности различных типов, то при расчете нагрузки на несущие канаты q_{Rkn} коэффициент k_w следует принимать по наиболее неблагоприятному ее типу.

Таблица 14

Значения коэффициентов в полиноме для расчета величины k_w

Окружающая местность		Значения коэффициентов полинома			
Тип	Описание	a_{kw0}	a_{kw1}	a_{kw2}	a_{kw3}
А	Большие открытые пространства, берега озер, морей, водохранилищ, поля и т.п.	0,75	0,0292	-0,000306	0,00000140
Б	Городские территории и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м	0,49	0,0199	-0,000136	0,00000048
В	Городские районы с застройкой зданиями высотой более 25 м	0,37	0,0066	0,000128	-0,00000107

Наибольшая нагрузка приходится на крайние несущие канаты, что обусловлено наибольшей горизонтальной поперечной статической составляющей ветрового давления $p_{kn1} > p_{knm}$ ($m = 2, ..., n_{kn}$). Поэтому в качестве расчетной поперечной распределенной нагрузки на несущие канаты следует принимать

$$q_{Rkn} = q_{Rkn1} = \\ = \sqrt{\left(q_{kn0}d_{kn}^2 + \mu_1 \frac{Q_{cab}}{n_{kn}L_{cab}}\right)^2 + w_0^2\left(\eta_1 C_{wkn}k_{wkn}d_{kn} + \mu_{w1}C_{wcab}k_{wcab}\frac{A_{cab}}{n_{kn}L_{cab}}\right)^2} .$$

(7)

В процессе эксплуатации канатного метро на несущие канаты наряду с весовыми и ветровыми статическими нагрузками действуют также динамические нагрузки, связанные с раскачиванием пассажирских кабин при их движении и раскачиванием самих канатов под действием динамической составляющей ветрового давления. Они приводят к повышению уровня действующих к канатах напряжений от весовых нагрузок и к увеличению стрелы провисания. Аналогично тому, как подобные динамические нагрузки учитываются при выполнении проектных расчетов подъемно-транспортной техники [1, 4], при расчете канатной системы целесообразно использовать коэффициент динамичности $\psi_d > 1$.

В зависимости от соотношения величины горизонтального усилия натяжения несущего каната S_k, длины $(i+1)$-го пролета между соседними i-й и $(i+1)$-й опорами L_{ti+1} и разностью высотных отметок крепления каната на этих опорах

$$\Delta v_{i+1} = (v_{0i+1} + H_{tgi+1}) - (v_{0i} + H_{tgi})$$

возможны различные формы провисания несущих канатов:

– форма I, характеризующаяся расположением сечения наибольшего провисания каната внутри пролета между промежуточными опорами (см. рис. 99);

– форма II, характеризующаяся расположением сечения наибольшего провисания каната за пределами пролета (рис. 101);

– форма III, характеризующаяся совпадением расположения сечения наибольшего провисания каната с одной из опор пролета.

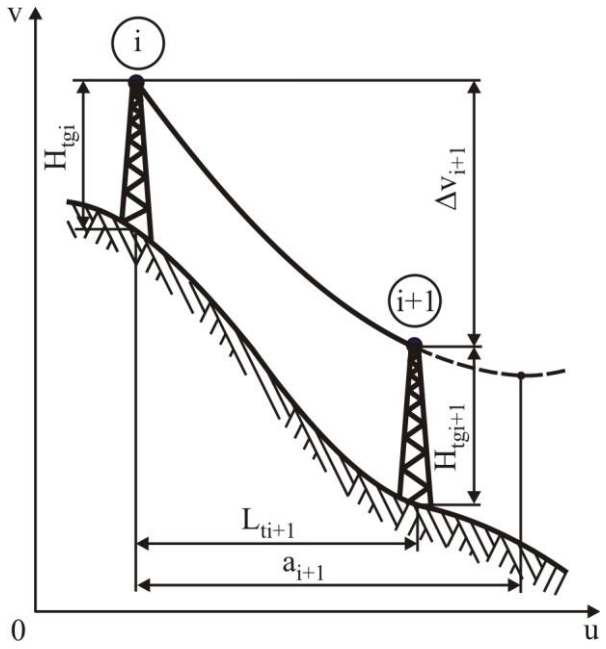


Рис. 101. Положение несущего каната для II формы провисания

В качестве безразмерного критерия K_f, определяющего реализацию одной из указанных форм провисания несущего каната, выступает соотношение

$$K_f = \frac{q_{Rkn} L_{ti+1}^2}{2S_k \Delta v_{i+1}} = \frac{q_{Rkn} L_{ti+1}^2}{2S_k[(v_{0i+1} + H_{tgi+1}) - (v_{0i} + H_{tgi})]}.$$

При $K_f \notin (-1; +1)$ реализуется I форма провисания каната, при $K_f \in (-1; +1)$ – II форма, при $K_f = \pm 1$ – III форма.

Соотношение для оценки величины критерия K_f может быть использовано для определения величины перепада высот расположения узлов крепления несущего каната на соседних

промежуточных опорах, при которых реализуются возможные формы провисания каната. Если указанный перепад высот

$$\Delta v_{i+1} < q_{Rkn} L_{ti+1}^2 / 2S_k$$

или соответствующий ему продольный уклон

$$i_{ti+1} = \Delta v_{i+1} / L_{ti+1} < q_{Rkn} L_{ti+1} / 2S_k,$$

то будет реализовываться I форма провисания несущего каната, в противном случае – I форма, а при условии равенства – III форма.

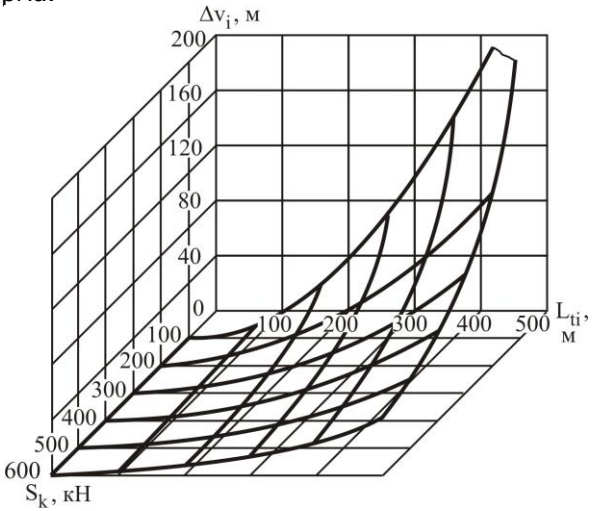


Рис. 102. Поверхность K_f =1 при q_{Rkn} = 200 Н/м

На рис. 102 показана конфигурация поверхности критерия K_f =1 при характерных для линий канатного метро интервалах изменения параметров S_k, L_{ti} и $q_{Rkn} = const$. Геометрическое место точек, лежащих ниже указанной поверхности, соответствует реализации I формы провисания несущего каната, лежащих выше – II форме, лежащих непосредственно на поверхности – III форме. Для значений q_{Rkn}, отличающихся от принятого при построе-

нии графика на рис. 102 значения q_{Rkn} = 200 Н/м, поверхность критерия K_f = 1 будет прямо пропорционально смещаться вдоль оси Δv_i.

При характерной для канатного метро относительной величине стрелы провисания каната f_i / L_{ti} < 0,1 с погрешностью менее 1,3% [4] геометрическая линия провисания несущего каната по I форме в $(i+1)$-м пролете между соседними i-й и $(i+1)$-й опорами в том случае, когда точки подвеса концов каната находятся на разной высоте, в системе координат $x0y$ (см. рис. 98) может быть представлена параболической зависимостью вида

$$v_{kn}(u_i \le u \le u_{i+1}) = \begin{cases} v_{0i} + H_{tgi} - \psi_d \dfrac{q_{Rkn} u^2}{S_k}, & u_i \le u \le u_i + a_{i+1}; \\ v_{0i} + H_{tgi} + \psi_d \dfrac{q_{Rkn} u(u-2a)}{S_k}, & u_i + a_{i+1} \le u \le u_i + L_{ti+1}. \end{cases}$$

(8)

Максимальная стрела провисания f_{i+1} составляет

$$f_{i+1} = a_{i+1}\left[\psi_d \frac{q_{Rkn}\, a_{i+1}}{S_k} + \frac{(v_{0i+1} + H_{tgi+1}) - (v_{0i} + H_{tgi})}{L_{ti+1}}\right]$$

(9)

и находится в сечении на расстоянии a_{i+1} и b_{i+1} от смежных опор i и $i+1$ (см. рис. 99):

$$a_{i+1} = \frac{1}{2}\left\{L_{ti+1} - \frac{S_k}{q_{Rkn}\, L_{ti+1}}\left[(v_{0i+1} + H_{tgi+1}) - (v_{0i} + H_{tgi})\right]\right\};$$

(10)

$$b_{i+1} = \frac{1}{2}\left\{L_{ti+1} + \frac{S_k}{q_{Rkn}\, L_{ti+1}}\left[(v_{0i+1} + H_{tgi+1}) - (v_{0i} + H_{tgi})\right]\right\}.$$

(11)

Длина несущего каната в пролете между опорами i и $i+1$ приближенно будет составлять

$$l_{ki+1} \approx a_{i+1}\left(1+\psi_d^2 \frac{q_{Rkn}^2 a_{i+1}^2}{24S_k^2}\right)+b_{i+1}\left(1+\psi_d^2 \frac{q_{Rkn}^2 b_{i+1}^2}{24S_k^2}\right),$$

а его минимальный диаметр, определяемый из условия агрегатной прочности, находится как наибольшее значение из двух величин:

$$d_{kn}=0,5\left[\sqrt{r_{k1}^2-4r_{k2}(r_{k0}-[n]_k T_{ki})}-r_{k1}\right]/r_{k2}; \qquad (12)$$

$$d_{kn}=0,5\left[\sqrt{r_{k1}^2-4r_{k2}(r_{k0}-[n]_k T_{ki+1})}-r_{k1}\right]/r_{k2}, \qquad (13)$$

где T_{ki}, T_{ki+1} – осевые усилия натяжения несущего каната на опорах i и $i+1$ соответственно, определяемые зависимостями:

$$T_{ki}=S_k/\cos\left[arctg(\psi_d\, q_{Rkn}\, a_{i+1}/S_k\right];$$

$$T_{ki+1}=S_k/\cos\left[arctg(\psi_d\, q_{Rkn}\, b_{i+1}/S_k\right].$$

Учитывая требуемые значения минимального диаметра несущего каната для всех I_t+1 пролетов линии канатного метро, окончательно его минимальный диаметр выбирается равным максимальному из рассчитанных по зависимостям (12) и (13).

Геометрическая линия провисания несущего каната по II и III формам в $(i+1)$-м пролете между соседними i-й и $(i+1)$-й промежуточными опорами в том случае, когда точки подвеса концов каната находятся на разной высоте, в системе координат $x0y$ (см. рис. 101) выражается параболической зависимостью

$$v_{kn}(u_i \le u \le u_{i+1})=v_{0i}+H_{tgi}+$$
$$+\left[\frac{(v_{0i+1}+H_{tgi+1})-(v_{0i}+H_{tgi})}{L_{ti+1}}-\psi_d \frac{q_{Rkn}}{2S_k}(L_{ti+1}-u+u_i)\right](u-u_i).$$

(14)

Максимальная стрела провисания f_{i+1} составляет

$$f_{i+1} = \psi_d \frac{q_{Rkn} L_{ti+1}}{8S_k} \qquad (15)$$

и находится в сечении на расстоянии $L_{ti+1}/2$ от смежных опор i и $i+1$.

Длина несущего каната в пролете между опорами i и $i+1$ приближенно будет составлять

$$l_{ki+1} \approx L_{ti+1}\left(1 + \psi_d^2 \frac{q_{Rkn}^2 L_{ti+1}^2}{24S_k^2}\right).$$

Осевые усилия натяжения несущего каната T_{ki}, T_{ki+1} на опорах i и $i+1$ определяются зависимостями

$$T_{ki} = S_k / \cos\left[arctg\left(\frac{(v_{0i+1} + H_{tgi+1}) - (v_{0i} + H_{tgi})}{L_{ti+1}} - \psi_d \frac{q_{Rkn}}{2S_k} L_{ti+1}\right)\right]$$

;

$$T_{ki+1} = S_k / \cos\left[arctg\left(\frac{(v_{0i+1} + H_{tgi+1}) - (v_{0i} + H_{tgi})}{L_{ti+1}} + \psi_d \frac{q_{Rkn}}{2S_k} L_{ti+1}\right)\right]$$

.

Для природных условий Российской Федерации характерны значительные перепады температур окружающей среды как в течение года, так и на протяжении ряда лет [102]. Эксплуатация канатного метро при температурах t, отличных от принятой при его проектировании расчетной величины t_0, приводит к изменению длины несущих канатов между промежуточными опорами:

$$l_{ki+1}(t) = l_{ki+1}(t_0) + \alpha_{Tnk}(t - t_0) L_{ti+1},$$

где α_{Tnk} – коэффициент температурного удлинения несущего каната.

Формально температурное изменение длины несущих канатов при постоянном значении усилия их натяжения $S_k(t_0) = S_k(t) = const$ может быть представлено как изменение

усилия $S_k(t) \neq S_k(t_0)$ при постоянной температуре, равной расчетной $t = t_0 = const$. Из условия эквивалентности изменения длины канатов в обоих случаях, усилие натяжения $S_k(t)$ при реализации I формы провисания несущего каната определяется путем решения нелинейного уравнения вида:

$$a_{i+1}(t)\left(1+\psi_d^2\frac{q_{Rkn}^2 a_{i+1}^2(t)}{24S_k^2(t)}\right)+b_{i+1}(t)\left(1+\psi_d^2\frac{q_{Rkn}^2 b_{i+1}^2(t)}{24S_k^2(t)}\right)-$$

$$-\left[a_{i+1}\left(1+\psi_d^2\frac{q_{Rkn}^2 a_{i+1}^2}{24S_k^2}\right)+b_{i+1}\left(1+\psi_d^2\frac{q_{Rkn}^2 b_{i+1}^2}{24S_k^2}\right)\right]-\alpha_{Tkn}(t-t_0)L_{ti+1}=0,$$

в котором расстояния $a_{i+1}(t)$ и $b_{i+1}(t)$ являются функциями искомой величины $S_k(t)$ согласно зависимостям (10) и (11). Для II и III форм провисания каната усилие натяжения $S_k(t)$ определяется зависимостью

$$S_k(t) = S_k\frac{\psi_d q_{Rkn} L_{ti+1}}{\sqrt{\psi_d^2 q_{Rkn}^2 L_{ti}^2 + 24\alpha_{Tkn}(t-t_0)S_k^2}}.$$

Геометрическая линия провисания несущего каната в $(i+1)$-м пролете и максимальная стрела провисания f_{i+1} при произвольной температуре окружающей среды t будут определяться зависимостями (8) и (9) или (14) и (15) при подстановке в них скорректированных значений $S_k(t)$ и $a_{i+1}(t)$. Повышенные температуры окружающей среды при эксплуатации канатного метро обусловливают увеличение провисания несущих канатов f_{i+1}, а пониженные – увеличение осевых усилий их натяжения T_{ki} и T_{ki+1}.

В качестве варьируемых параметров задачи оптимизации линии канатного метро (см. рис. 98), направленной на минимизацию затрат на строительство зданий и опорных сооружений, необходимо использовать следующие влияющие на величину

елеевой функции (5) параметры:

– число промежуточных опорных конструкций I_t;

– координаты точек расположения промежуточных опорных конструкций вдоль линии канатного метро $u_i\ (i \in [1; I_t])$, учитывая, что координаты расположения посадочных станций составляют $u_A = u_{i=0} = 0$ (для станции A) и $u_B = u_{i=I_t+1} = L_{AB}$ (для станции B);

– высоты промежуточных опорных конструкций $H_{tgi}\ (i \in [1; I_t])$ и посадочных станций $H_A = H_{tgi=0}$ и $H_B = H_{tgi=I_t+1}$;

– усилие натяжения несущих канатов S_k.

Из них формируется вектор управляемых параметров

$$\{x\}^T = \{x_1\ x_2 \dots x_n \dots x_N\} = \{H_A\ H_B\ S_k\ u_1\ u_2 \dots u_{I_t}\ H_{tg1}\ H_{tg2} \dots H_{tgI_t}\}, \quad (16)$$

число элементов которого составляет $N = 2I_t + 3$. При характерных для линий канатного метро расстояниях между соседними посадочными станциями L_{AB} = 1…3 км число искомых переменных в задаче оптимизации будет достигать N = 10…50.

Остальные величины, входящие в используемые при проектировании зависимости, являются фиксированными параметрами. Они либо задаются в качестве исходных данных, либо вычисляются в зависимости от указанных управляемых параметров.

Целевая функция вида (5) вместе с вектором варьируемых параметров (16) характеризуют задачу оптимального проектирования линии канатного метро в самой общей постановке, которую следует рассматривать в качестве полной оптимизации. Целесообразно также рассматривать задачи параметрической (неполной) оптимизации, связанные с исключением из вектора варьируемых параметров (16) отдельных слагаемых x_i вследствие необходимости учета при проектировании линии канатного метро различных технико-экономических соображений.

В числе указанных задач параметрической оптимизации далее рассматриваются такие, как:

– оптимизация шага установки промежуточных опор для случаев горизонтальной и наклонной поверхностей рельефа;

– оптимизация линии канатного метро с унифицированными промежуточными опорами;

– оптимизация линии канатного метро с унифицированными промежуточными опорами заданной равной высоты;

– оптимизация линии канатного метро при заданных точках установки промежуточных опор.

3.2. Полная оптимизация линии канатного метро

Задача полной технико-экономической оптимизации при проектировании линии канатного метро между соседними посадочными станциями с учетом рельефа поверхности и характеристик городской высотной застройки сводится к минимизации целевой функции – суммарной стоимости строительства – при фиксированном значении числа промежуточных опорных конструкций $I_t = const$, которая, исходя из выражения (5), имеет вид:

$$\begin{aligned} \ddot{O}(\{x\})\big|_{I_t=const} &= \left(\frac{C_{sA}S_{fA}}{h_{fA}}\right)x_1 + \left(\frac{C_{sB}S_{fB}}{h_{fB}}\right)x_2 + C_{eA} + C_{eB} + \\ &+ \sum_{i=1}^{i=I_t}\left(C_{t0i}x_{i+I_t+3}^{a_{ti}} + C_{f0i}x_{i+I_t+3}^{a_{fi}} + C_{ei}\right) + (C_{kt} + n_{kn}C_{kn}) \times \\ &\times \sum_{m=1}^{m=I_t+1}\left[a_m(x_{m+I_t+2}; x_{m+I_t+3}; x_{m+2I_t+2}; x_{m+2I_t+3})\left(1+\psi_d^2\frac{q_{Rkn}^2 a_m^2}{6x_3^2}\right) + \right. \\ &\left. + b_m(x_{m+I_t+2}; x_{m+I_t+3}; x_{m+2I_t+2}; x_{m+2I_t+3})\left(1+\psi_d^2\frac{q_{Rkn}^2 b_m^2}{6x_3^2}\right)\right] \to \min \end{aligned} \quad (17)$$

Таким образом, алгоритм оптимального проектирования участка линии канатного метро предусматривает многократную поочередную минимизацию целевой функции (17) при различном значении параметра I_t. Глобальный минимум среди множества

полученных значений $\ddot{O}(\{x\})\big|_{I_t=const}$ и будет определять характеристики оптимального варианта проектируемой линии. Параметр I_t целесообразно варьировать в диапазоне целых значений, выражаемом соотношением

$$0,002L_{AB} \le I_t \le 0,01L_{AB}.$$

При нахождении минимума целевой функции (17) должны выполняться следующие ограничения в форме неравенств, определяющие требования:

1) к взаимному расположению соседних промежуточных опор:

$$u_1 \ge 0; \quad u_{i+1} - u_i, i \in [1; I_t - 1]; \quad L_{AB} - u_{I_t} \ge 0;$$

2) расположению промежуточных опор за пределами запретных зон (исключению попадания места их установки в пределы запретных зон – рек, оврагов, водоемов, автотрасс, стадионов и др.):

$$\left|u_i - \bar{u}_{dj}\right| - \Delta u_{dj} \ge 0, i \in [1; I_t], j \in [1; J_d];$$

3) допустимому диапазону изменения величины шага установки соседних опор:

$$L_{t\max} - u_1 \ge 0; \quad L_{t\max} - (u_{i+1} - u_i) \ge 0, i \in [1; I_t - 1];$$

$$L_{t\max} - (L_{AB} - u_{I_t}) \ge 0; \quad u_1 - L_{t\min} \ge 0;$$

$$(u_{i+1} - u_i) - L_{t\min} \ge 0, i \in [1; I_t - 1]; \quad (L_{AB} - u_{I_t}) - L_{t\min} \ge 0;$$

4) максимальной высоте промежуточной опоры

$$H_{t\max} - H_{tgi} \ge 0, i \in [1; I_t];$$

5) допустимому углу наклона несущих канатов к горизонту при движении пассажирской кабины между соседними промежуточными опорами при максимальной температуре окружающей среды:

– при I форме провисания каната:

$$[\beta] - \left|arctg(\psi_d\, q_{Rkn}\, a_{i+1}(t_{\max}) / S_k(t_{\max})\right| \ge 0;$$

$$[\beta] - \left|arctg(\psi_d\, q_{Rkn}\, b_{i+1}(t_{\max}) / S_k(t_{\max})\right| \ge 0, \quad i \in [1; I_t + 1];$$

– при II и III формах провисания каната:

$$[\beta]-\left|arctg\left(\frac{(v_{0i+1}+H_{tgi+1})-(v_{0i}+H_{tgi})}{L_{ti+1}}-\psi_d\frac{q_{Rkn}}{2S_k(t_{\max})}L_{ti+1}\right)\right|\geq 0$$

;

$$[\beta]-\left|arctg\left(\frac{(v_{0i+1}+H_{tgi+1})-(v_{0i}+H_{tgi})}{L_{ti+1}}+\psi_d\frac{q_{Rkn}}{2S_k(t_{\max})}L_{ti+1}\right)\right|\geq 0,$$

$$i\in[1;I_t+1];$$

6) допустимому взаимному высотному расположению узлов крепления несущего каната на соседних промежуточных опорах

$$[i_t]-\left|\frac{(v_{0i+1}+H_{tgi+1})-(v_{0i}+H_{tgi})}{L_{ti+1}}\right|\geq 0,\ i\in[1;I_t+1]$$

;

7) допустимому высотному расположению пассажирских кабин при их движении вдоль трассы канатного метро при максимальной температуре окружающей среды

$$v_{kn}(u_i\leq u\leq u_{i+1})\big|_{\text{ïðè } t_{\max}}-h_{cab}-h_{\min}(u_i\leq u\leq u_{i+1})-$$

$$-v_0(u_i\leq u\leq u_{i+1})\geq 0,\ i\in[1;I_t+1];$$

8) допустимым диапазонам изменения диаметров тягового и несущих канатов:

$$d_{kt\max}-d_{kt}\geq 0;\qquad d_{kt}-d_{kt\min}\geq 0;$$

$$d_{kn\max}-d_{kn}\geq 0;\qquad d_{kn}-d_{kn\min}\geq 0;$$

9) допустимой стреле провисания несущего каната между промежуточными опорами при максимальной температуре окружающей среды

– при I форме провисания каната

$$\psi_f(u_{i+1}-u_i)-a_{i+1}(t_{\max})\times$$
$$\times\left[\frac{\psi_d q_{Rkn} a_{i+1}(t_{\max})}{2S_k(t_{\max})}+\frac{(v_{i+1}-v_i)+(H_{tgi+1}-H_{tgi})}{L_{ti+1}}\right]\geq 0,\ i\in[1;\ I_t+1];$$

– при II и III формах провисания каната

$$\psi_f(u_{i+1}-u_i)-\psi_d q_{Rkn} L_{ti+1}/8S_k(t_{\max})\geq 0,\ i\in[1;\ I_t+1];$$

10) минимальному усилию натяжения каната согласно требованиям ПБ 10-559-03 [95]

$$S_k-10n_{cab}\psi_d Q_{cab}/n_{kn}\geq 0;$$

11) максимальному осевому усилию натяжения несущего каната, исходя из его наибольшей возможной агрегатной прочности:

– при I форме провисания каната:

$$R_{kn}(d_{kn\max})/[n]_k-S_k/\cos\left[arctg(\psi_d\, q_{Rkn}\, a_{i+1}/S_k\right]\geq 0;$$

$$R_{kn}(d_{kn\max})/[n]_k-S_k/\cos\left[arctg(\psi_d\, q_{Rkn}\, b_{i+1}/S_k\right]\geq 0,\ i\in[1;\ I_t];$$

– при II и III формах провисания каната:

$$\frac{R_{kn}(d_{kn\max})}{[n]_k}-$$
$$-S_k/\cos\left[arctg\left(\frac{(v_{0i+1}+H_{tgi+1})-(v_{0i}+H_{tgi})}{L_{ti+1}}-\psi_d\frac{q_{Rkn}}{2S_k}L_{ti+1}\right)\right]\geq 0;$$

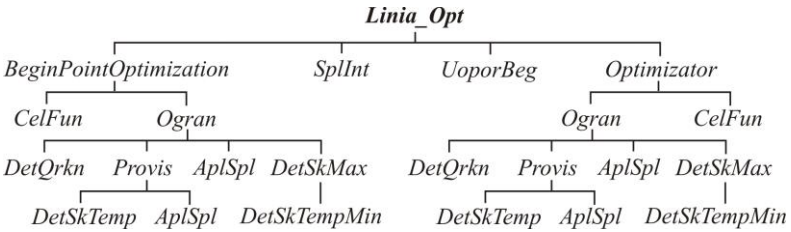
$$\frac{R_{kn}(d_{kn\max})}{[n]_k}-$$
$$-S_k/\cos\left[arctg\left(\frac{(v_{0i+1}+H_{tgi+1})-(v_{0i}+H_{tgi})}{L_{ti+1}}+\psi_d\frac{q_{Rkn}}{2S_k}L_{ti+1}\right)\right]\geq 0,$$
$$i\in[1;\ I_t];$$

где L_{AB} – расстояние между соседними посадочными стан-

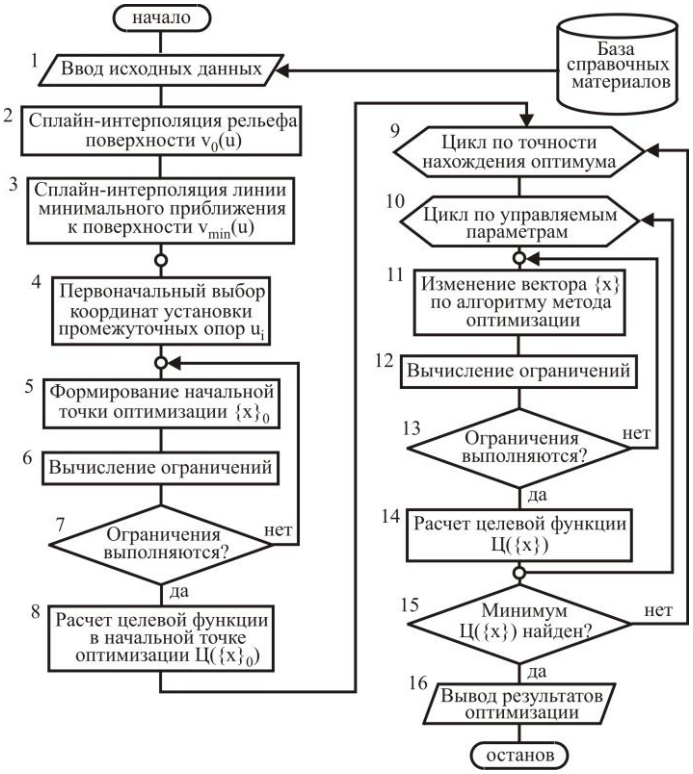
циями; $\bar{u}_{dj}, \Delta u_{dj}$ – координата положения центра и полуширина j-й запретной зоны; $L_{t\max}$, $L_{t\min}$ – максимальное и минимальное предельные расстояния между промежуточными опорами; $[i_t]$ – допустимый продольный уклон высотного расположения узлов крепления несущего каната к соседним промежуточным опорам; $t_{\max}$ – максимальная температура окружающей среды; $[\beta]$ – предельный угол наклона к горизонту несущих канатов; $v_{\min}$ – минимально допустимое высотное приближение пассажирской кабины к поверхности земли; $d_{kt\max}$, $d_{kn\max}$ – максимальный диаметр тягового и несущего канатов (см. табл. 12); $d_{kt\min}$, $d_{kn\min}$ – минимальный диаметр тягового и несущего канатов (см. табл. 12); ψ_f – коэффициент допустимого провисания несущего каната между опорами; h_{cab} – вертикальный габарит пассажирской кабины вместе с системой подвески; $R_{kn}(d_{kn\max})$ – агрегатная прочность несущего каната максимального диаметра выбранной конструкции (см. табл. 12); $H_{t\max}$ – предельная высота промежуточной опоры; n_{cab} – число пассажирских кабин, одновременно находящихся в пределах одного пролета.

Для нахождения минимума целевой функции (17) с учетом принятых ограничений необходимо использовать один из прямых методов условной оптимизации [11, 65], основанный на непосредственном вычислении величины целевой функции $\ddot{O}(\{x\})$.

Решение задачи полной оптимизации линии канатного метро на основе минимизации целевой функции (17) и соответствующей системы ограничений реализовано в компьютерной программе «Оптимизация линии канатного метро» [76]. Структурная схема этой программы с указанием входящих процедур представлена на рис. 103, *а*, а ее укрупненная блок-схема – на рис. 103,*б*.



а)



б)

Рис. 103. Программа «Оптимизация линии канатного мет-

ро»:

а – структурная схема; *б* – блок-схема

Программа [76] структурно включает в себя головную процедуру *Linia_Opt*, 10 процедур тип Procedure:

- *BeginPointOptimization* – расчет целевой функции в начальной точке оптимизации;
- *CelFun* – вычисление значения целевой функции $\ddot{O}(\{x\})$;
- *DetSkMax* – расчет максимального усилия натяжения при минимальной температуре;
- *DetSkTemp* – расчет усилия натяжения каната при нерасчетной температуре $S_k(t)$;
- *DetSkTempMin* – расчет натяжения каната при минимальной возможной температуре $S_k(t_{\min})$;
- *Ogran* – вычисление левых частей ограничений задачи оптимизации;
- *Optimizator* – реализация алгоритма оптимизации целевой функции;
- *Provis* – расчет углов наклона на опорах, стрелы провисания f и длины l_k несущих канатов;
- *SplInt* – вычисление коэффициентов кубических сплайнов при сплайн-интерполяция [19] функции одного переменного;
- *UoporBeg* – расчет первоначальной расстановки промежуточных опор, а также две процедуры типа Function:
- *AprSpl* – расчет значения функции, заданной кубическим сплайном, в заданной точке;
- *DetQrkn* – расчет величины погонной нагрузки на несущий канат q_{Rknm}.

Расчеты, проведенные с помощью вычислительной программы [76] для ряда возможных вариантов конструктивного исполнения канатной транспортной системы, позволили выполнить анализ влияния изменения геометрических параметров рельефа земной поверхности вдоль линии канатного метро на всем протя-

жении на ее минимальную стоимость [55, 57].

Для оценки влияния параметров рельефа земной поверхности на результаты оптимизации стоимости канатного метро были выполнены расчеты модельной линии при синусоидальной форме поверхности с различным числом полуволн по длине трассы (рис. 104):

$$v(u) = V_{\max} \sin(2\pi n u / L_{AB}) . \qquad (18)$$

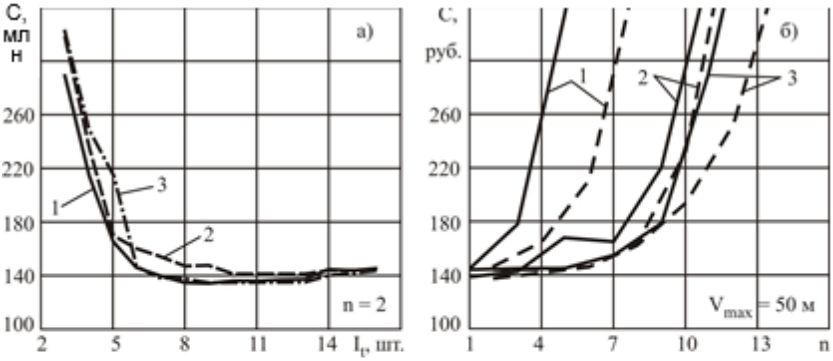


Рис. 104. Влияние параметров рельефа на стоимость линии канатного метро при синусоидальной форме поверхности: *а* – высота (*1* – V_{max} = 50 м; *2* – 25 м; *3* – 0 м); *б* – продольная неравномерность (—— – нечетное число полуволн синусоиды; – – – – четное число полуволн синусоиды; *1* – I_t = 9 шт.; *2* – 12 шт.; *3* – 15 шт.)

Как видно из данных, приведенных на рис. 104, стоимость строительства линии канатного метро очень чувствительна к количеству промежуточных опор и геометрической неоднородности рельефа. При малом числе промежуточных опор ($I_t \leq 7$) с уменьшением I_t стоимость линии резко возрастает (до двух раз – с ~140 до ~280 млн руб.), что обусловлено быстрым возрастанием высоты опор H_t из-за необходимости нейтрализовать увеличение стрелы провисания несущих канатов по мере увеличения расстояния между соседними опорами. При $I_t \approx 8...14$ стоимость линии

минимальна и примерно одинакова, составляя ~140 млн руб., а затем начинает возрастать, так как высота опор достигает своего минимума по условию высотного приближения пассажирских кабин к поверхности. Дальнейшее увеличение числа опор и, как следствие, уменьшение расстояния между ними, ведет к росту затрат на установку конструктивно лишних опор.

Рис. 104,*б* дает представление о влиянии неравномерности рельефа на стоимость линии канатного метро (неравномерность рельефа возрастает с увеличением числа полуволн n). В случае слабо неравномерного рельефа (n < 3…4) стоимость линии минимальна и приблизительно одинакова для разного числа опор. Однако при существенно неравномерном рельефе (n > 4…5) повышенное число опор благоприятно сказывается на стоимости вследствие того, что в этом случае опоры возможно установить в зонах возвышенности поверхности, что обуславливает снижение высоты опор и, несмотря на большее количество, снижение их суммарной стоимости.

На рис. 105 показано расположение на местности и высота промежуточных опор (I_t = 15) для оптимальных вариантов линии канатного метро длиной L_{AB} = 3000 м в зависимости от четного числа полуволн n синусоиды (18) с $V_{\max}$ = 50 м. Независимо от степени неоднородности рельефа (числа полуволн n) оптимальное расположение промежуточных опор практически не отклоняется от равномерного распределения с шагом $L_{ti} = L_{AB}/(I_t + 1)$ =187,5 м. Однако их оптимальная высота, а следовательно, и общая стоимость линии канатного метро чувствительны к неоднородности рельефа. Однако когда шаг опор L_{ti} существенно меньше шага волнистости рельефа высота опор H_{tgi} и стоимость строительства C минимальны, причем высота опор

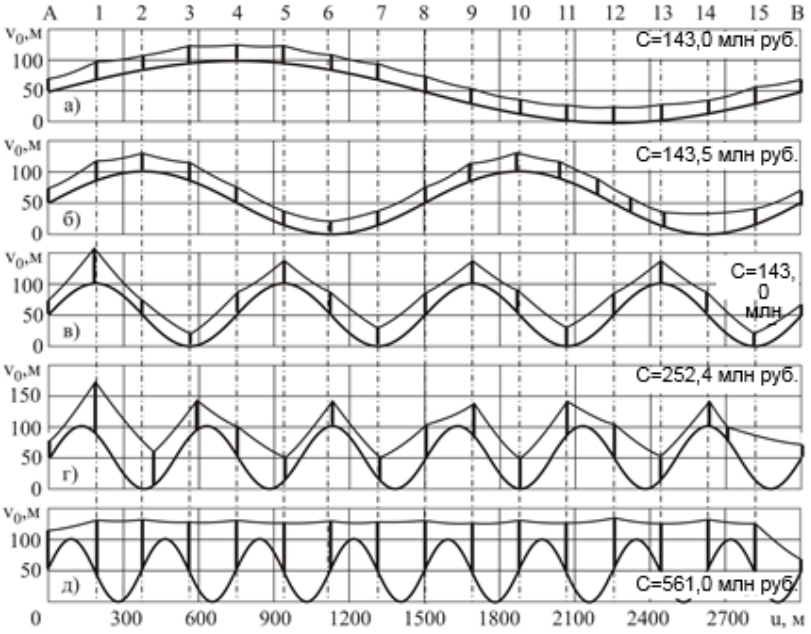


Рис. 105. Влияние неоднородности рельефа поверхности на оптимальные расположение и высоту промежуточных опор линии канатного метро: *а* – при числе полуволн синусоиды $n = 2$; *б* – $n = 4$; *в* – $n = 8$; *г* – $n = 12$; *д* – $n = 16$

практически одинакова вдоль всей линии L_{AB}, а стоимость строительства мало отличается при близких значениях n. Это наблюдается при соотношении $L_{ti} < L_{AB}/(2...3)n$. В условиях, когда шаг установки промежуточных опор L_{ti} становится сравнимым с размером неоднородности рельефа, необходимо обеспечить повышенную высоту опор, что приводит к резкому росту стоимости строительства линии канатного метро.

3.3. Параметрическая оптимизация шага установки промежуточных опор

Задача расположения промежуточных опор канатного метро, которую следует рассматривать как частный случай задачи полной оптимизации линии канатного метро, также является задачей технико-экономической оптимизации. Ее цель заключается в определении такого оптимального шага между двумя соседними промежуточными опорами, который бы обеспечивал минимальную величину затрат на возведение опорных конструкций, приобретение тягового и несущих канатов, а также комплекта устанавливаемого на опору необходимого технологического оборудования. Знание величины оптимального шага позволяет на предпроектной стадии проектирования линии канатного метро в первом приближении оценить необходимое количество и высоту промежуточных опор между соседними посадочными станциями без учета ограничений на их расстановку вдоль проектируемой линии и, таким образом, оценить в первом приближении затраты на строительство этой линии.

Целевая функция, имеющая стоимостное выражение C, складывается из ряда слагаемых – стоимости самих промежуточных опор и фундамента под ними, а также стоимости тягового и несущих стальных канатов и технологического оборудования:

$$C = n_t(C_f + C_t + C_e) + (n_t + 1)(C_{kt} + n_{kn}C_{kn})l_k, \qquad (19)$$

где C_t, C_f, C_e – единичная стоимость опорной конструкции, фундамента и комплекта технологического оборудования соответственно; C_{kt}, C_{kn} – стоимость 1 погонного метра тягового и несущего каната соответственно; $n_t = L_{tr} / L_t - 1$ – число опорных конструкций; L_{tr} – длина линии канатного метро; L_t – шаг установки опорных конструкций; n_{kn} – число несущих канатов; l_k – длина каната между соседними промежуточными опорами с учетом его провисания.

Расчетная схема участка линии канатного метро между двумя соседними промежуточными опорами для случая их горизонтальной установки дана на рис. 106. Линия провисания несущего каната формируется под действием нескольких сил: вертикальной равномерно распределенной нагрузки от собственного веса каната интенсивностью q_{kn}, вертикальной сосредоточенной нагрузки от веса пассажирских кабин Q_{cab} и осевого усилия натяжения каната T_k. При дальнейших расчетах сосредоточенные нагрузки Q_{cab} удобно заменить распределенными интенсивностью q_{cab}.

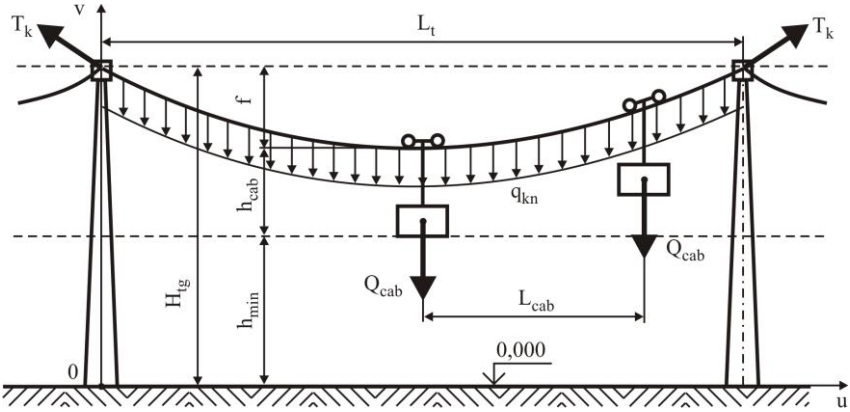


Рис. 107. Расчетная схема участка линии канатного метро между соседними промежуточными опорами для случая их горизонтальной установки

При характерной для канатного метро относительной величине стрелы провисания каната f / L_t < 0,1 с погрешностью менее 1,3% геометрическая линия провисания несущего каната между соседними опорами может быть представлена параболической зависимостью [4]:

$$v(u) = H_{tg} - \frac{\psi_d (q_{Rkn} + q_{cab})}{2T_k} u(L_t - u)$$

со стрелой провисания в середине пролета

$$f = \frac{\psi_d (q_{Rkn} + q_{cab}) L_t^2}{8T_k}.$$

При этом длина самого несущего каната будет составлять

$$l_k = L_t \left[1 + \frac{\psi_d^{\,2} (q_{Rkn} + q_{cab})^2 L_t^2}{24T_k^2} \right],$$

а его минимальный диаметр, определяемый из условия агрегатной прочности, выражается соотношением

$$d_{kn} = 0,5\left[\sqrt{r_{k1}^2 - 4r_{k2}(r_{k0} - [n]_k T_k)} - r_{k1} \right] / r_{k2}.$$

Анализ приведенных зависимостей, составляющих математическую модель рассматриваемой технической проблемы, позволяет сделать вывод о том, что в качестве варьируемых параметров задачи оптимизации шага установки промежуточных опор канатного метро следует взять две независимые величины: расстояние между опорами L_t и усилие натяжения несущих канатов T_k. Из них формируется вектор управляемых параметров

$$\{x\}^T = \{x_1\ x_2\} = \{L_t\ T_k\}.$$

Остальные величины являются фиксированными, так как либо задаются в качестве исходных данных, либо вычисляются в зависимости от указанных управляемых параметров. К первой группе относятся: $L_{tr}, L_{cab}, Q_{cab}, h_{\min}, h_{cab}, \psi, \psi_d, [n]_k, C_{f0}, a_f, C_{t0}, a_t, q_{k0}, r_{k0}, r_{k1}, r_{k2}, c_{k0}, c_{k1}, c_{k2}$. Ко второй группе относятся: $q_{Rkn}, q_{cab}, f, d_{kt}, d_{kn}, H_{tg}, l_k, n_t$. Из величин второй группы формируется вектор неуправляемых параметров, которые не подлежат варьированию в процессе решения оптимизационной задачи:

$$\{z\}^T = \{z_1\ z_2\ z_3\ z_4\ z_5\ z_6\ z_7\ z_8\} = \{q_{Rkn}\ q_{cab}\ f\ d_{kt}\ d_{kn}\ H_{tg}\ l_k\ n_t\}.$$

Окончательно задача технико-экономической оптимизации

шага установки промежуточных опорных конструкций канатного метро на горизонтальной плоскости сводится к минимизации целевой функции – суммарной стоимости изготовления и монтажа опор, приобретения тягового и несущих канатов, которая согласно (19) имеет вид:

$$\ddot{O}(\{x\},\{z\}) = \frac{L_{tr}}{x_1}\left\langle C_{f0}\left\{\left[h_{\min} + h_{cab} + \frac{\psi_d (z_1+z_2)x_1^2}{8x_2}\right]\left(1+\psi\frac{x_2[n]_k}{R_{kn}}\right)\right\}^{a_f} + \right.$$

$$\left. C_{t0}\left\{\left[h_{\min} + h_{cab} + \frac{\psi_d (z_1+z_2)x_1^2}{8x_2}\right]\left(1+\psi\frac{x_2[n]_k}{R_{kn}}\right)\right\}^{a_t} + C_e\right\rangle +$$

$$+\left(\frac{L_{tr}}{x_1}-1\right)(C_{kt}+n_{kn}C_{kn})x_1\left[1+\frac{\psi_d{}^2(z_1+z_2)^2 x_1^2}{24x_2^2}\right] \to \min .$$

(20)

При этом должны выполняться ограничения в форме неравенств, определяющие требования:

– к допустимому диапазону изменения величины шага установки соседних опор:

$x_1 \ge 0$; $L_{t\max} - x_1 \ge 0$; $L_{tr}/x_1 - 1 \ge 0$;

– допустимым диапазонам изменения диаметров тягового и несущих канатов:

$d_{kt\max} - d_{kt} \ge 0$; $d_{kt} - d_{kt\min} \ge 0$;

$d_{kn\max} - d_{nt} \ge 0$; $d_{kn} - d_{kn\min} \ge 0$;

– максимально допустимой величине провисания несущего каната между опорами

$$\psi_f x_1 - \frac{\psi_d (z_1+z_2)x_1^2}{8x_2} \ge 0;$$

– минимальному усилию натяжения каната согласно требованиям ПБ 10-559-03 [95]

$x_2 - 10 n_{cab}\psi_d Q_{cab}/n_{kn} \ge 0$;

– максимальному усилию натяжения каната, исходя из его

наибольшей возможной агрегатной прочности

$$R_{kn}(d_{kn\max})/[n]_k - x_2 \geq 0;$$

– максимальной высоте промежуточной опоры

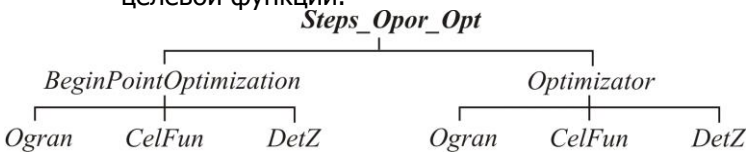
$$H_{t\max} - h_{\min} - h_{cab} - \frac{\psi_d(z_1+z_2)x_1^2}{8x_2} \geq 0.$$

Для нахождения минимума целевой функции (20) с учетом принятых ограничений необходимо использовать один из прямых методов условной оптимизации [11, 65], основанный на непосредственном вычислении величины целевой функции $\ddot{O}(\{x\},\{z\})$.

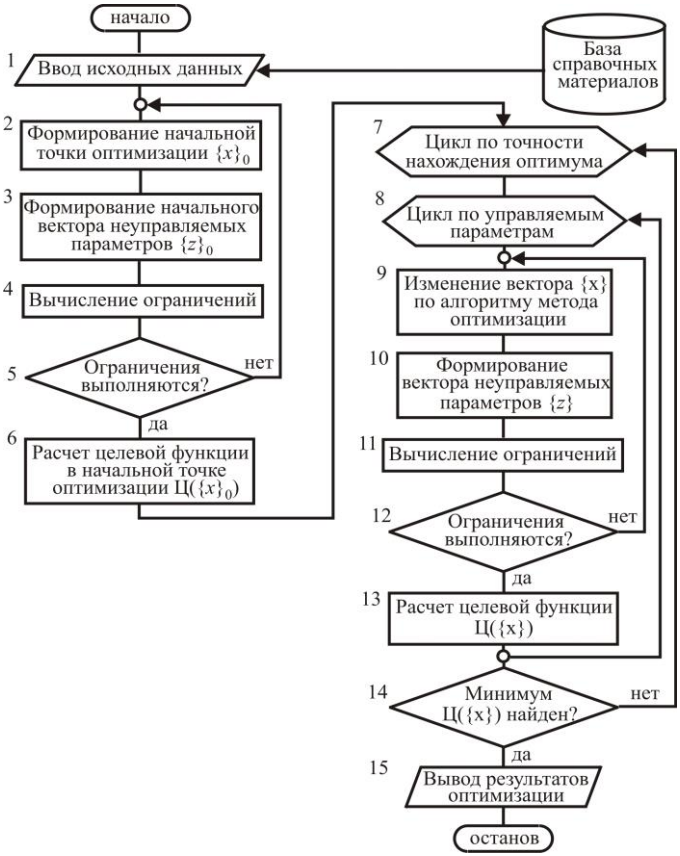
Решение задачи параметрической оптимизация шага установки промежуточных опор линии канатного метро на основе минимизации целевой функции (20) и соответствующей системы ограничений реализовано в компьютерной программе «Оптимизация шага установки опор канатного метро» [77]. Структурная схема этой программы с указанием входящих процедур представлена на рис. 107, *а*, а ее укрупненная блок-схема – на рис. 107, *б.*

Программа [77] структурно включает в себя головную процедуру *Steps_Opor_Opt* и 5 процедур тип Procedure:

- *BeginPointOptimization* – расчет целевой функции в начальной точке оптимизации;
- *CelFun* – вычисление значения целевой функции $\ddot{O}(\{x\})$ в соответствии с соотношением (20);
- *DetZ* – вычисление неуправляемых параметров – компонентов вектора $\{z\}$;
- *Ogran* – вычисление левых частей ограничений задачи оптимизации;
- *Optimizator* – реализация алгоритма оптимизации целевой функции.



а)



б)

Рис. 107. Программа «Оптимизация шага установки опор линии

канатного метро»: *а* – структурная схема; *б* – укрупненная блок- схема

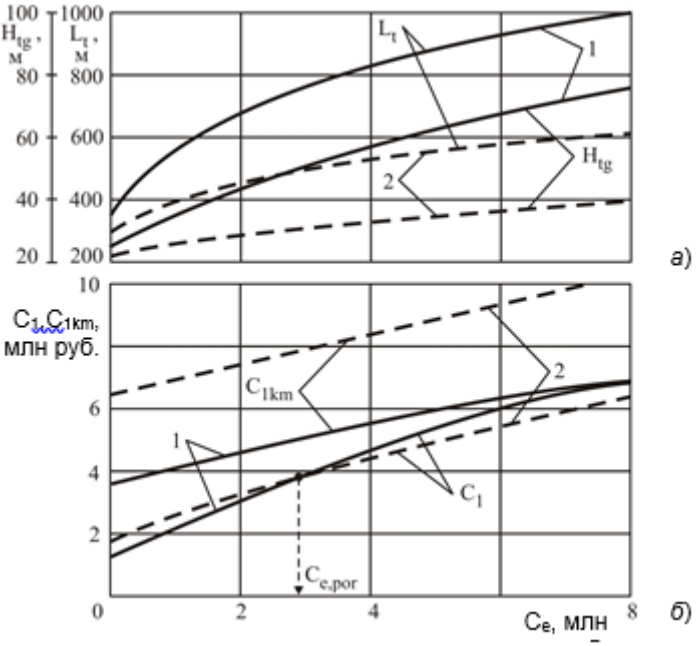


Рис. 108. Влияние стоимости опоры и комплекта технологического оборудования на показатели оптимального варианта установки промежуточных опор: *а* – технические показатели; *б* – стоимостные показатели; *1* – опора типа ПГМ 500; *2* – опора типа МУ 330

Технико-экономические показатели оптимального варианта установки промежуточных опорных конструкций канатного метро в значительной мере зависят от стоимости комплекта технологического оборудования, монтируемого на опоре, и самой опоры. На рис. 108 приведены результаты оптимизации в зависимости от величины C_e для двух вариантов линии канатного метро на основе использования опор, аналогичных по стоимости опорам типа ПГМ 500 и типа МУ 330, при двух несущих и одном тяговом канатах по ГОСТ 3079-80 маркировочной группы G_k = 2160 (220) кН/мм^2 (кгс/мм^2). Для характеристики стоимостных

показателей на рис. 108,*б* приведены графики $C_1(C_e)$ и $C_{1km}(C_e)$, которые определяют соответственно стоимость одного пролета линии (суммарную стоимость опоры, фундамента и канатов в пролете между соседними опорами без стоимости установленного оборудования) и стоимость 1 км линии канатного метро. Расчеты показывают, что опоры, более дорогие в стоимостном выражении (типа МУ 330), требуют применение меньших шагов их установки L_t, так как в данном случае возможно использование опор меньшей высоты H_{tg}. При этом стоимость одного пролета $\tilde{N}_1$ в зависимости от стоимости оборудования C_e сначала оказывается выше соответствующей стоимости для более дешевых типов опор (типа ПГМ 500), а начиная с некоторого порогового значения $C_e > C_{e,por}$, оказывается ниже. Однако стоимость 1 км линии канатного метро C_{1km} всегда выше независимо от величины C_e.

На рис. 109 показано взаимное влияние стоимостных показателей опорных конструкций и канатов при стоимости комплекта технологического оборудования C_e = 1,0 млн руб. и числе несущих канатов n_{kn} = 3 маркировочной группы G_k = 2160 (220) кН/мм^2 (кгс/мм^2). Стоимостные показатели опорных конструкций существенно влияют на оптимальную величину шага L_t и стоимость C_{1km}, тогда как влияние стоимостных показателей канатов значительно меньше. В условиях сильно урбанизированной городской среды, практически не имеющей резервов землеотведения под установку промежуточных опор, приоритетным является обеспечение больших пролетов вдоль линии канатного метро. В этом случае наиболее целесообразно использовать канаты по ГОСТ 3081-80 в сочетании с опорами типа ПГМ 500. Немного худшие результаты дают канаты по ГОСТ 3079-80 и ГОСТ 7667-80 также в сочетании с опорами типа ПГМ 500. При наличии достаточных резервов землеотведения приоритетной становится

задача максимального снижения стоимости строительства. В этом случае наиболее целесообразно использовать канаты по ГОСТ 3079-80 в сочетании с опорами типа ПМ 220. Немного худшие результаты дают канаты по ГОСТ 3081-80 и ГОСТ 7667-80 также в сочетании с опорами типа ПМ 220.

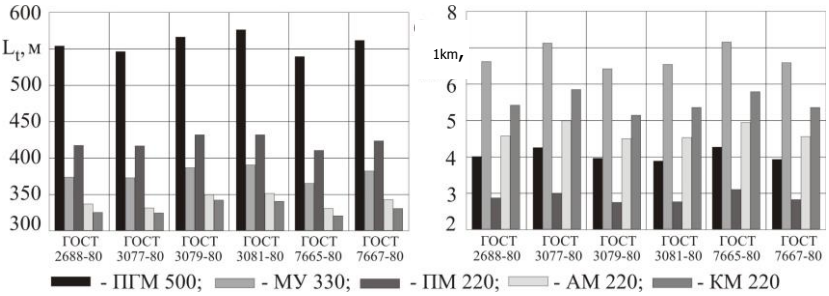


Рис. 109. Влияние стоимостных показателей промежуточных опор

и несущих канатов: *а* – на оптимальный шаг установки опор;

б – на стоимость 1 км линии канатного метро

Число несущих канатов n_{kn} оказывает незначительное влияние на оптимальный шаг установки опор: с увеличением их числа с 2 до 4 канатов оптимальное значение L_t увеличивается лишь на 1,0…1,5 % или на 4…9 м, а высота промежуточной опоры H_{tg} – на 0,5…1,5 % или на 0,2…0,5 м. Однако увеличение числа канатов приводит к заметному уменьшению их диаметра d_k и требуемого усилия нятяжения T_k: при n_{kn} = 2, 3 и 4 соответствующие значения диаметров составляют 57, 46 и 36…40 мм, а значения усилий натяжения – 390, 260 и 195 кН. Уменьшение необходимого диаметра каната приводит к снижению его погонной стоимости C_k и, как следствие, к снижению стоимости 1 км линии канатного метро C_{1km}, даже несмотря на увеличение суммарной длины не-

сущих канатов. Указанное снижение C_{1km} может достигать 7 % или 0,4 млн руб.

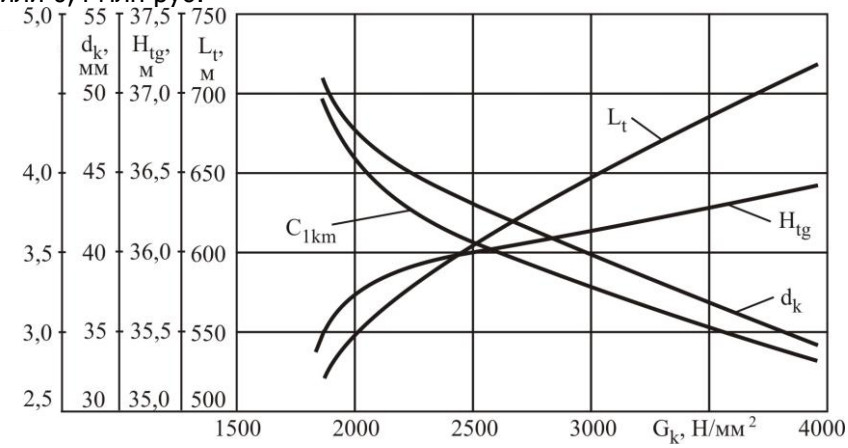


Рис. 110. Влияние маркировочной группы несущих канатов на конструктивные

и стоимостные показатели шага установки промежуточных опор

Агрегатная прочность несущих канатов имеет существенное влияние на конструктивные и стоимостные показатели шага установки промежуточных опор канатного метро. Представление о влиянии агрегатной прочности несущих канатов R_{kn} также дает рис. 110, на котором представлены результаты расчетов оптимального шага L_t^{opt} и высоты H_{tg} опор, диаметра несущих канатов d_k и стоимости 1 км линии метро C_{1km} для случая горизонтального положения опорной поверхности (α_{sl} = 0^0) в зависимости от маркировочной группы G_k каната по ГОСТ 3079-80 при использовании промежуточных опор, аналогичных по стоимости многогранным опорам типа ПГМ 500, стоимости комплекта технологического оборудования C_e = 1,0 млн руб. и числе несущих

1km,

канатов n_{kn} = 3. Обращает внимание тот факт, что с увеличением агрегатной прочности канатов существенное увеличение оптимального шага L_t влечет за собой незначительное увеличение высоты опор H_{tg}: в интервале изменения маркировочной группы G_k = 1770 (180)… 3930 (400) кН/мм^2 (кгс/мм^2) шаг опор меняется в интервале L_t = 520…717 м (почти на 200 м), тогда как высота – в интервале H_{tg} = 35,5…36,4 м (всего лишь на 0,9 м). Этим объясняется наблюдаемое существенное снижение стоимости 1 км линии канатного метро C_{1km} с 4,46 до 2,80 млн руб., т.е. в 1,6 раза.

В связи с тем, что одним из преимущественных условий строительства канатного метро является наличие ландшафтно неоднородной городской среды [40, 53, 60], научный и практический интерес имеет решение задачи нахождения величины оптимального шага установки промежуточных опор для случая рельефа с не горизонтальной, наклонной поверхностью при расположении соседних опор на различных высотных отметках.

Для этого случая расчетная схема участка линии канатного метро между двумя соседними промежуточными опорами представлена на рис. 111, *а*. Как и в случае горизонтальной установки соседних опор, линия провисания несущего каната формируется под действием нескольких сил: вертикальной равномерно распределенной нагрузки от собственного веса каната интенсивностью q_{kn}, вертикальной сосредоточенной нагрузки от веса пассажирских кабин Q_{cab} и горизонтального осевого усилия натяжения каната S_k. Как и ранее, при дальнейших расчетах сосредоточенные нагрузки Q_{cab} заменяем распределенными интенсивностью q_{cab} и, учитывая вклад в величину нагруженности несущих канатов от динамических нагрузок из-за раскачивания пассажирских кабин и самих канатов при движении кабин и от ветрового давления на кабины и канаты, в качестве расчетной величины суммарной распределенной нагрузки на крайний в ряду несущий канат будем

использовать характеристику q_{Rkn} (см. п. 3.1).

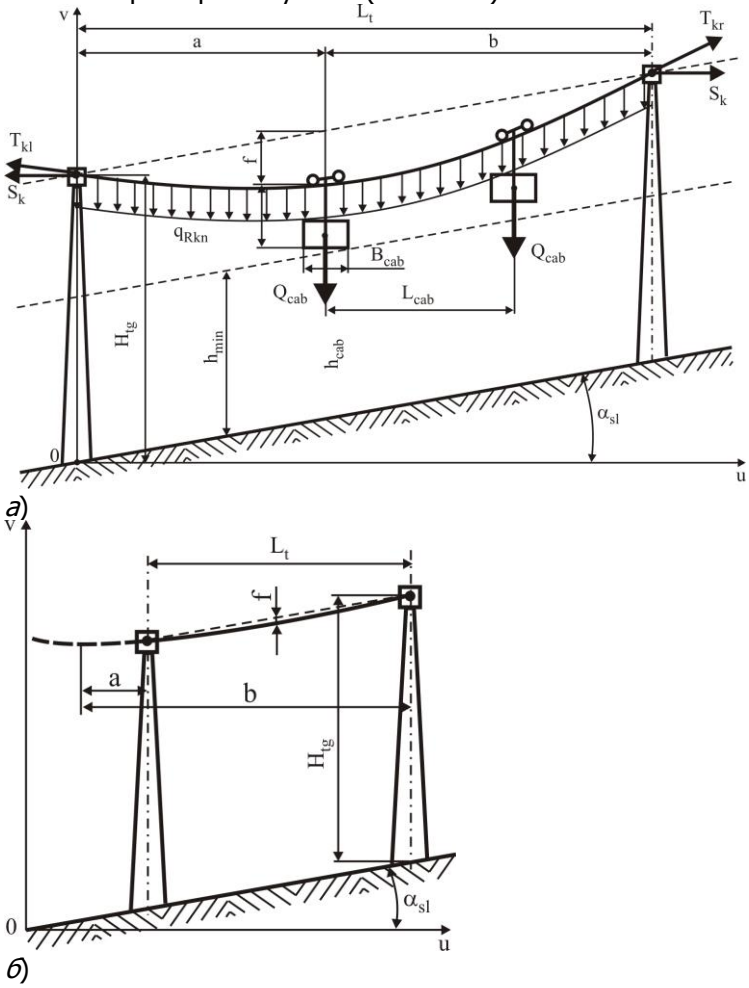


Рис. 111. Расчетная схема участка линии канатного метро между соседними промежуточными опорами для случая негоризонтальной поверхности рельефа: *а* – I форма провисания; *б* – II форма провисания

В зависимости от соотношения величины горизонтального усилия натяжения несущего каната S_k, шага установки промежуточных опор L_t и разности высотных отметок крепления каната на соседних опорах вследствие не горизонтальности поверхности рельефа с углом продольного уклона α_{sl}

$$\Delta v = L_t tg\alpha_{sl}$$

возможны, как показано в п. 3.1, три возможные различные формы провисания несущих канатов (см. рис. 111).

При характерной для канатного метро относительной величине стрелы провисания каната f / L_t < 0,1 с погрешностью менее 1,3% геометрическая линия провисания несущего каната по I форме в пролете между соседними промежуточными опорами в том случае, когда точки подвеса концов каната находятся на разной высоте, может быть представлена параболической зависимостью вида (см. рис. 111, *а*):

$$v_{kn}(u) = \begin{cases} H_{tg} - \psi_d \dfrac{q_{Rkn} u^2}{S_k}, & 0 \le u \le a; \\ H_{tg} + \psi_d \dfrac{q_{Rkn}}{S_k} u(u - 2a), & a < u \le L_t. \end{cases}$$

Максимальная стрела провисания составляет

$$f = a\left(\psi_d \frac{q_{Rkn}\, a}{S_k} + tg\alpha_{sl}\right)$$

и находится в сечении на расстоянии a и b от соседних промежуточных опор (см. рис. 111, *а*):

$$a = \frac{1}{2}\left(L_t - \frac{S_k}{q_{Rkn}} tg\alpha_{sl}\right); \quad b = \frac{1}{2}\left(L_t + \frac{S_k}{q_{Rkn}} tg\alpha_{sl}\right).$$

С учетом [4] длина несущего каната в пролете между опорами приближенно будет составлять

$$l_k \approx \frac{L_t}{\cos\alpha_{sl}}\left[1+\frac{8a^2\cos^2\alpha_{sl}}{3L_t^2}\left(\psi_d\frac{q_{Rkn}a}{S_k}+tg\alpha_{sl}\right)^2\right],$$

а его минимальный диаметр, определяемый из условия агрегатной прочности, находится как наибольшее значение из двух величин:

$$d_{kn}=\frac{1}{2r_{k2}}\left[\sqrt{r_{k1}^2-4r_{k2}(r_{k0}-[n]_k T_{kl})}-r_{k1}\right]; \qquad (21)$$

$$d_{kn}=\frac{1}{2r_{k2}}\left[\sqrt{r_{k1}^2-4r_{k2}(r_{k0}-[n]_k T_{kr})}-r_{k1}\right], \qquad (22)$$

где T_{kl}, T_{kr} – осевые усилия натяжения несущего каната на левой и правой опорах соответственно, определяемые зависимостями:

$$T_{kl}=S_k/\cos\left[arctg(\psi_d\, q_{Rkn}\, a/S_k)\right];$$

$$T_{kr}=S_k/\cos\left[arctg(\psi_d\, q_{Rkn}\, b/S_k)\right].$$

Окончательно минимальный диаметр несущего каната выбирается равным максимальному значению из рассчитанных по зависимостям (21) и (22).

Геометрическая линия провисания несущего каната по II и III формам в пролете между соседними промежуточными опорами в том случае, когда точки подвеса концов каната находятся на разной высоте выражается параболической зависимостью (см. рис. 111,*б*):

$$v_{kn}(u)=H_{tg}+u\left[tg\alpha_{sl}-\psi_d\frac{q_{Rkn}}{2S_k}(L_t-u)\right].$$

Максимальная стрела провисания составляет

$$f=\psi_d q_{Rkn}L_t^2/8S_k$$

и находится в сечении на расстоянии $L_t/2$ от соседних промежуточных опор. С учетом [4] длина несущего каната в про-

лете приближенно будет составлять

$$l_k \approx \frac{L_t}{\cos\alpha_{sl}}\left(1+\psi_d^2\frac{q_{Rkn}^2 L_t^2}{24S_k^2\cos^2\alpha_{sl}}\right).$$

Осевые усилия натяжения несущего каната на левой и правой опорах составляют

$$T_{kl} = S_k/\cos\left[arctg\left(tg\alpha_{sl} - \psi_d\frac{q_{Rkn}}{2S_k}L_t\right)\right];$$

$$T_{kr} = S_k/\cos\left[arctg\left(tg\alpha_{sl} + \psi_d\frac{q_{Rkn}}{2S_k}L_t\right)\right].$$

В качестве целевой функции при формулировке задачи технико-экономической оптимизации шага установки промежуточных опор линии канатного метро будем использовать целевую функцию вида (19).

Вектор управляемых параметров формируется из двух независимых величин задачи оптимизации – шага установки промежуточных опор L_t и горизонтального усилия натяжения несущего каната S_k:

$$\{x\}^T = \{x_1\ x_2\} = \{L_t\ S_k\}.$$

Остальные величины являются фиксированными, так как либо задаются в качестве исходных данных, либо вычисляются в зависимости от указанных управляемых параметров. К первой группе относятся: L_{tr}, L_{cab}, Q_{cab}, A_{cab}, $h_{\min}$, h_{cab}, α_{sl}, ψ, ψ_d, $[n]_k$, w_0, C_{wkn}, C_{cab}, k_{wkn}, μ_1, k_{wcab}, μ_{w1}, η_1 и эмпирические коэффициенты в регрессионных зависимостях связи стоимости промежуточных опор с их высотой и стоимости 1 погонного метра несущего и тягового канатов с их диаметром C_{f0}, a_f, C_{t0}, a_t, q_{k0}, r_{k0}, r_{k1}, r_{k2}, c_{k0}, c_{k1}, c_{k2}. Ко второй группе относятся: q_{Rkn},

$q_{cab}, f, a, b, \quad d_{kt}, d_{kn}, \quad H_{tg}, l_k, n_t, T_{kl}, T_{kr}$. Из величин второй группы формируется вектор неуправляемых параметров, которые не подлежат варьированию в процессе оптимизации

$$\{z\}^T = \{z_1\ z_2\ z_3\ z_4\ z_5\ z_6\ z_7\ z_8\ z_9\ z_{10}\ z_{11}\ z_{12}\} =$$
$$= \{q_{Rkn}\ q_{cab}\ f\ d_{kt}\ d_{kn}\ H_{tg}\ l_k\ n_t\ a\ b\ T_{kl}\ T_{kr}\}.$$

Окончательно задача технико-экономической оптимизации шага установки промежуточных опорных конструкций канатного метро на наклонной поверхности сводится к минимизации целевой функции – суммарной стоимости изготовления и монтажа опор, приобретения тягового и несущих канатов, которая согласно (19) имеет вид:

– при I форме провисания несущего каната между опорами

$$\ddot{O}(\{x\},\{z\}) = \left(\frac{L_{tr}}{x_1} - 1\right) \times$$
$$\times \left\langle C_{f0} \left\{ \left[h_{\min} + h_{cab} + z_9 \left(\frac{\psi_d z_1 z_9}{x_2} + tg\alpha_{sl} \right) + \frac{\psi_d z_1 B_{cab}^2}{4x_2} \right] \left(1 + \psi \frac{x_2 [n]_k}{R_{kn}} \right) \right\}^{a_f} + \right.$$
$$+$$
$$\left. C_{t0} \left\{ \left[h_{\min} + h_{cab} + z_9 \left(\frac{\psi_d z_1 z_9}{x_2} + tg\alpha_{sl} \right) + \frac{\psi_d z_1 B_{cab}^2}{4x_2} \right] \left(1 + \psi \frac{x_2 [n]_k}{R_{kn}} \right) \right\}^{a_t} + C_e \right\rangle +$$
$$+$$
$$(C_{kt} + n_{kn} C_{kn}) \frac{L_{tr}}{\cos\alpha_{sl}} \left[1 + \frac{8}{3} \left(\frac{z_9 \cos\alpha_{sl}}{x_1} \right)^2 \left(\psi_d \frac{q_{Rkn} z_9}{x_2} + tg\alpha_{sl} \right)^2 \right] \to \min$$
; (23)

– при II и III формах провисания несущего каната между соседними опорами

$$\ddot{O}(\{x\},\{z\}) = \left(\frac{L_{tr}}{x_1} - 1\right) \times$$

$$\times\left\langle C_{f0}\left\{\left[h_{\min}+h_{cab}+\frac{\psi_d z_1 x_1^2}{8x_2}+\frac{B_{cab}}{2}\left(tg\alpha_{sl}+\frac{\psi_d z_1 B_{cab}}{4x_2}\right)\right]\left(1+\psi\frac{x_2[n]_k}{R_{kn}}\right)\right\}^{a_f}+\right.$$

$$+$$

$$\left.C_{t0}\left\{\left[h_{\min}+h_{cab}+\frac{\psi_d z_1 x_1^2}{8x_2}+\frac{B_{cab}}{2}\left(tg\alpha_{sl}+\frac{\psi_d z_1 B_{cab}}{4x_2}\right)\right]\left(1+\psi\frac{x_2[n]_k}{R_{kn}}\right)\right\}^{a_t}+C_e\right\rangle+$$

$$+(C_{kt}+n_{kn}C_{kn})\frac{L_{tr}}{\cos\alpha_{sl}}\left[1+\frac{1}{6}\left(\frac{\psi_d x_1 z_1}{2x_2\cos\alpha_{sl}}\right)^2\right]\to\min.$$

(24)

При этом должны выполняться ограничения в форме неравенств, которые определяют следующие требования:

– к допустимому диапазону изменения величины шага установки соседних опор

$x_1 \geq 0$; $L_{t\max}-x_1\geq 0$; $L_{tr}/x_1-1\geq 0$;

– к допустимым диапазонам изменения диаметров тягового и несущих канатов:

$d_{kt\max}-d_{kt}\geq 0$; $d_{kt}-d_{kt\min}\geq 0$;

$d_{kn\max}-d_{nt}\geq 0$; $d_{kn}-d_{kn\min}\geq 0$;

– к максимально допустимой величине провисания несущего каната между опорами:

– при I форме провисания каната

$$\psi_f x_1 - z_9\left(\psi_d\frac{z_1 z_9}{x_2}+tg\alpha_{sl}\right)\geq 0;$$

– при II и III формах провисания каната

$$\psi_f x_1-\psi_d\frac{x_1^2 z_1}{8x_2}\geq 0;$$

– к минимальному усилию натяжения каната согласно требованиям ПБ 10-559-03 [95]:

– при I форме провисания каната

$$x_2 - \frac{10 n_{cab} \psi_d Q_{cab}}{n_{kn}} \cos\left[arctg\left(\psi_d \frac{z_1 z_9}{x_2} \right) \right] \geq 0 \quad ; \qquad (25)$$

– при II и III формах провисания каната

$$x_2 - \frac{10 n_{cab} \psi_d Q_{cab}}{n_{kn}} \cos\left[arctg\left(tg\alpha_{sl} - \psi_d \frac{x_1 z_1}{2x_2} \right) \right] \geq 0 \quad ; \qquad (26)$$

– к максимальному усилию натяжения каната, исходя из его наибольшей возможной агрегатной прочности:

– при I форме провисания каната

$$\frac{R_{kn}(d_{kn\max})}{[n]_k} \cos\left[arctg\left(\psi_d \frac{z_1(x_1 - z_9)}{x_2} \right) \right] - x_2 \geq 0 \quad ; \qquad (27)$$

– при II и III формах провисания каната

$$\frac{R_{kn}(d_{kn\max})}{[n]_k} \cos\left[arctg\left(tg\alpha_{sl} + \psi_d \frac{z_1 x_1}{2x_2} \right) \right] - x_2 \geq 0 \quad ; \qquad (28)$$

– к максимальной высоте промежуточной опоры:

– при I форме провисания каната

$$H_{tg\max} - h_{\min} - h_{cab} - \frac{\psi_d z_1 B_{cab}^2}{4x_2} - z_9 \left(\psi_d \frac{z_1 z_9}{x_2} + tg\alpha_{sl} \right) \geq 0 \quad ;$$

– при II и III формах провисания каната

$$H_{tg\max} - h_{\min} - h_{cab} - \frac{B_{cab}}{2} \left(\psi_d \frac{z_1 B_{cab}}{4x_2} + tg\alpha_{sl} \right) - \psi_d \frac{x_1^2 z_1}{8x_2} \geq 0 \quad ,$$

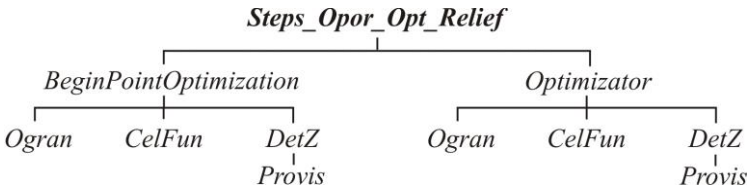
где B_{cab} – длина пассажирской кабины.

Для нахождения минимума целевой функции (23) или (24) с учетом принятых ограничений необходимо использовать один из прямых методов условной оптимизации [11, 65], основанный на непосредственном вычислении величины целевой функции $\ddot{O}(\{x\},\{z\})$.

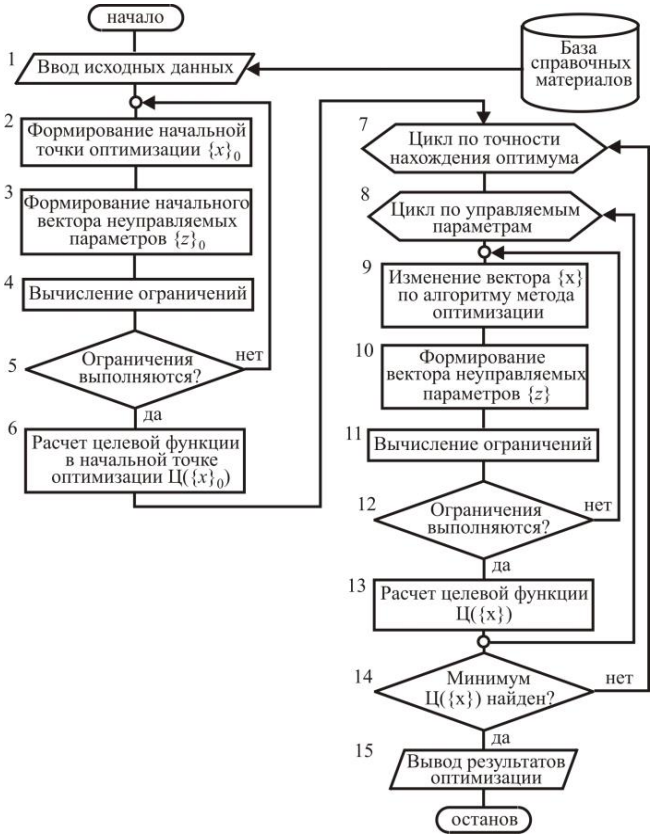
Решение задачи параметрической оптимизация шага установки промежуточных опор линии канатного метро на основе минимизации целевых функций (23) или (24) и соответствующей системы ограничений реализовано в компьютерной программе «Оптимизация шага опор канатного метро с учетом рельефа» (рис. 112).

Программа структурно включает в себя головную процедуру *Steps_Opor_Opt_Relief* и 6 процедур тип Procedure:

- *BeginPointOptimization* – расчет целевой функции в начальной точке оптимизации;
- *CelFun* – вычисление значения целевой функции $Ц(\{x\})$ в соответствии с соотношением (23) или (24);
- *DetZ* – вычисление неуправляемых параметров – компонент вектора $\{z\}$;



а)



б)

Рис. 112. Программа «Оптимизация шага опор канатного метро

с учетом рельефа»: *а* – структурная схема; *б* – укрупненная блок-схема

- *Provis* – определение формы провисания каната и вычисление компонент вектора $\{z\}$, зависящих от

формы провисания каната;

- *Ogran* – вычисление левых частей ограничений задачи оптимизации (23) или (24);
- *Optimizator* – реализация алгоритма оптимизации целевой функции.

Расчеты, проведенные с помощью вычислительных программ [76, 77] для ряда возможных вариантов конструктивного исполнения канатной транспортной системы, показали, что технико-экономические показатели оптимального варианта установки промежуточных опор вдоль линии канатного метро в значительной мере зависят от характеристик ландшафта, в частности, от угла наклона опорной поверхности α_{sl}, а также от стоимости комплекта технологического оборудования C_e, монтируемого на опоре, и стоимости самой опоры $\tilde{N}_t + C_f$ [50, 58, 67].

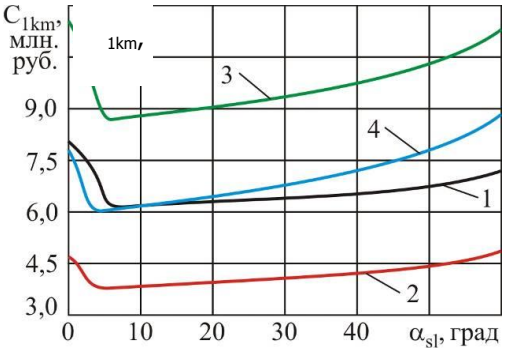


Рис. 113. Минимальная стоимость 1 км линии канатного метро при оптимальном шаге установки промежуточных опор в зависимости от угла наклона поверхности рельефа: *1*, *2* – опоры типа ПГМ 500; *3*, *4* – опоры решетчатого типа

На рис. 113 представлены результаты оптимизации – минимальная стоимость 1 км линии канатного метро C_{1km} в зависимо-

сти от величины α_{sl} для двух вариантов линии на основе использования опор, аналогичных по стоимости опорам типа ПГМ 500 (табл. 11) и опорам решетчатого типа (их стоимость в 2 раза превышает стоимость опор ПГМ 500), при двух несущих и одном тяговом канатах по ГОСТ 3079-80 маркировочной группы G_k = 2160 (220) кН/мм^2 (кгс/мм^2). Каждый из указанных конструктивных вариантов рассматривался для двух значений стоимости устанавливаемого на промежуточной опоре комплекта технологического оборудования: C_e = 1,0 млн руб. и C_e = 0. Обращает на себя внимание экстремальный характер зависимости $C_{1km} \sim \alpha_{sl}$ с выраженным минимумом при малых углах наклона поверхности рельефа порядка 3…6°. Положение минимума является достаточно устойчивым и незначительно изменяется при достаточно существенном изменении стоимости промежуточных опор C_t и технологического оборудования C_e. Видно также, что наиболее эффективными условиями для строительства канатного метро является рельеф местности со значительными перепадами высотных отметок по длине трассы транспортирования. Для вариантов исполнения канатного метро, представленных на рис. 113, лишь при углах наклона поверхности свыше 50…60^0 стоимость 1 км линии начинает превышать стоимость 1 км линии, проложенной вдоль строго горизонтальной поверхности (при α_{sl} = 0). Таким образом, канатное метро оказывается наиболее эффективным в условиях гористой или холмистой местности, когда другие традиционные виды наземного пассажирского транспорта использовать с точки зрения обеспечения безопасности движения либо невозможно, либо проблематично.

Рис. 114 дает представление об относительном вкладе в стоимость 1 км линии канатного метро C_{1km} трех основных составляющих: стоимости промежуточных опор (включая фундамент под опорами) $C_{1km}^{опора}$, стоимости канатной системы (не-

сущих и тягового канатов) $C_{1km}^{канат}$ и стоимости смонтированного технологического оборудования $C_{1km}^{оборуд}$.

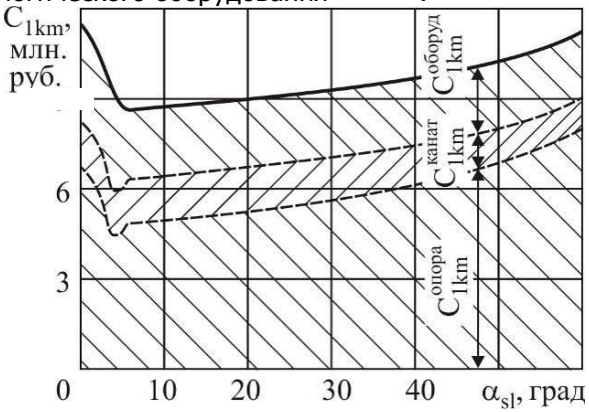
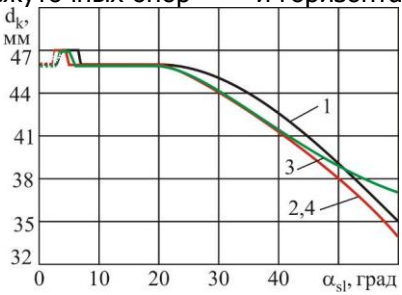


Рис. 114. Вклад отдельных слагаемых
в стоимость 1 км линии опоры решетчатого типа

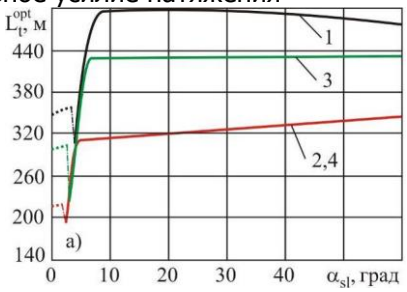
Естественно, что основная доля приходится на стоимость промежуточных опор, причем графики зависимостей $C_{1km}^{опора} \sim \alpha_{sl}$, $C_{1km}^{канат} \sim \alpha_{sl}$ и $C_{1km}^{оборуд} \sim \alpha_{sl}$ приближенно параллельны графику суммарной зависимости $C_{1km} \sim \alpha_{sl}$. С увеличением угла наклона поверхности рельефа относительный вклад стоимости канатной системы несколько снижается, что является следствием уменьшения абсолютного значения $C_{1km}^{канат}$ из-за уменьшения диаметров используемых канатов (рис. 115,*а*). При этом диаметры несущих канатов мало зависят от стоимости промежуточных опор и технологического оборудования: разница для рассмотренных вариантов составляет 0…2 мм.

На рис. 115,*б,в* показано влияние рельефа на величину

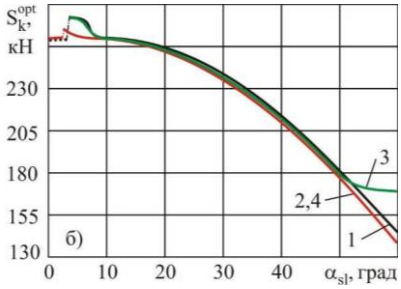
управляемых параметров задачи оптимизации – шаг установки промежуточных опор L_t^{opt} и горизонтальное усилие натяжения



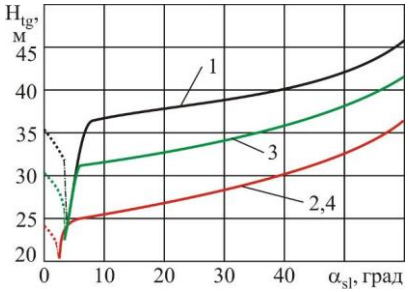
а)



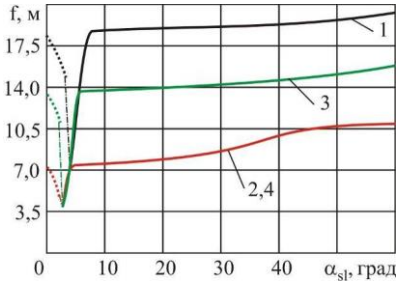
б)



в)



г)



д)

Рис. 115. Влияние угла наклона поверхности рельефа на следующие показатели: *а* – диаметр несущих канатов; *б* – шаг установки промежуточных опор L_t^{opt}; *в* – горизонтальное усилие натяжения несущего каната S_k^{opt}; *г* – высоту промежуточных опор; *д* – стрелу провисания несущих канатов при действии усилия натяжения S_k^{opt}; *1*, *2* – опоры типа ПГМ 500; *3*, *4* – опоры решетчатого типа

несущего каната S_k^{opt} для оптимального по стоимости варианта исполнения канатного метро. При малых углах наклона поверхности α_{sl} < 6…8^0 для минимизации стоимости строительства линии канатного метро требуется более частая установка промежуточных опор (рис. 115,*б*), которая несмотря на возможность строительства более низких и, следовательно, более дешевых опор (рис. 115,*г*), тем не менее, обуславливает в целом повышенные значения C_{1km} оптимального варианта конструктивного исполнения линии (см. рис. 113).

При больших углах наклона поверхности необходима более редкая установка (рис. 115, *б*) более высоких промежуточных опор (рис. 115, *г*), причем изменение величины оптимального шага L_t^{opt} с ростом α_{sl} может иметь различный характер: может возрастать (графики 2,4 на рис. 115, *б*), может уменьшаться (график 1 на рис. 115,*б*), может быть практически постоянным (гра-

фик 3 на рис. 115,*б*). Однако в пределах угла наклона 10…60° диапазон изменения оптимального шага L_t^{opt} достаточно мал, составляя не более ±10 % от значения L_t^{opt} при α_{sl} = 10°.

Горизонтальное усилие натяжения несущего каната S_k^{opt} для оптимального по стоимости варианта исполнения канатного метро с ростом угла наклона поверхности рельефа α_{sl} монотонно снижается (рис. 115,*в*). Наибольшие значения S_k^{opt} для поверхностей с малыми значениями угла α_{sl}, т.е. незначительно отклоняющихся от строго горизонтальной поверхности, связаны с необходимостью обеспечения приемлемой величины стрелы провисания f несущих канатов под действием собственного веса и веса пассажирских кабин (рис. 115,*д*). При больших значениях угла α_{sl} для поддержания таких же величин f требуется создание меньших горизонтальных усилий S_k. Усилие натяжения S_k^{opt} практически не зависит от стоимости промежуточных опор, канатной системы и технологического оборудования.

Анализ графиков на рис. 114–115 позволяет отметить скачкообразные изменения исследованных параметров линии канатного метро в диапазоне малых углов наклона поверхности рельефа α_{sl} ~ 3…6⁰. Это связано с тем, что в указанном диапазоне углов происходит смена форм провисания несущих канатов, что подтверждается графиками изменения критерия K_f (рис. 116).

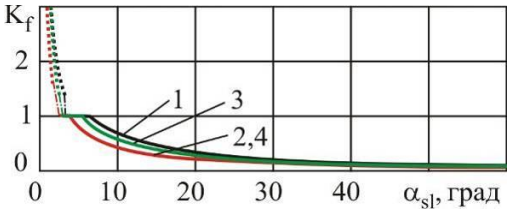


Рис. 116. Изменение критерия формы провисания несущих канатов от угла наклона поверхности рельефа: *1*, *2* – опоры типа ПГМ 500; *3*, *4* – опоры решетчатого типа

На рис. 117 более детально представлен механизм влияния смены формы провисания несущих канатов на характеристики оптимального варианта конструктивного исполнения линии канатного метро на примере варианта 1 (см. рис. 113). С отклонением поверхности рельефа от строго горизонтального положения в диапазоне углов наклона $0 \le \alpha_{sl} < \alpha_{sl,2}$ провисание несущих канатов происходит по форме I, т.е. с положением точки наибольшего провисания между соседними промежуточными опорами. При этом величина критерия формы провисания снижается, находясь в диапазоне $\infty > K_f > 1$. Сменяющая форму I форма провисания III, при которой положение точки наибольшего провисания находится на опоре, расположенной на меньшей высотной отметке, начинает реализовываться при $\alpha_{sl} \ge \alpha_{sl,1}$.

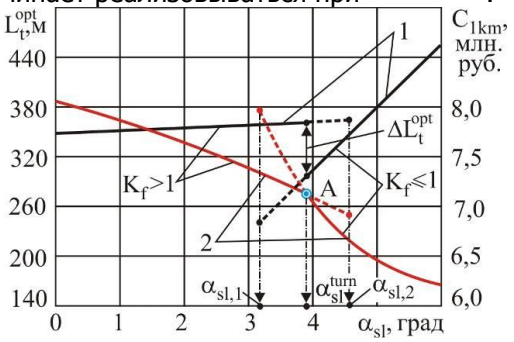


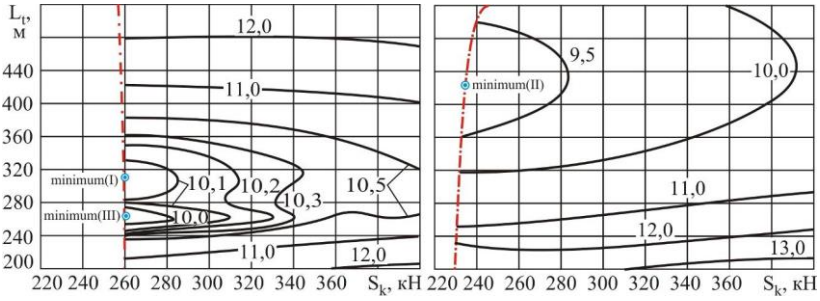
Рис. 117. Механизм влияния смены формы провисания несущих канатов на формирование характеристик

оптимального варианта линии канатного метро: *1* – C_{1km}; *2*

– L_t^{opt}

Таким образом, в диапазоне углов $\alpha_{sl,1} \le \alpha_{sl} \le \alpha_{sl,2}$ оптимальное решение линии канатного метро может быть построено как на основе реализации формы I провисания несущих канатов, так и на основе формы III. Этот вывод подтверждается анализом конфигурации поверхности целевой функции $C_{1km}(L_t, S_k)$ в области определения вектора управляемых параметров $\{x\}$ задачи оптимизации (23) или (24). Как пример, на рис. 118,*а* показаны изолинии равных значений стоимости $C_{1km}(L_t, S_k) = const$ для значения угла наклона поверхности рельефа, принадлежащего диапазону $\alpha_{sl,1} \le \alpha_{sl} \le \alpha_{sl,2}$. Поверхность целевой функции имеет два локальных минимума: *minimum(I)* соответствует форме провисания I, а *minimum(III)* – форме провисания III. При $\alpha_{sl,1} \le \alpha_{sl} < \alpha_{sl}^{turn}$ (см.рис. 117) глобальным минимумом является точка *minimum(I)*, т.е. оптимальный вариант линии канатного метро целесообразно принимать на основе формы I. При $\alpha_{sl} > \alpha_{sl}^{turn}$ глобальным минимумом является точка *minimum(III)*, т.е. оптимальный вариант линии канатного метро целесообразно принимать на основе формы III. При значении угла $\alpha_{sl} = \alpha_{sl}^{turn}$ зависимость $C_{1km}(\alpha_{sl})$ имеет точку перелома *A*, а другие характеристики оптимального варианта – положительный или отрицательный скачок. Например, представленная на рис. 118,*а* характеристика – оптимальный шаг промежуточных опор L_t^{opt} – испытывает отрицательный скачок на величину ΔL_t^{opt} = -60 м (с L_t^{opt} = 360 м до L_t^{opt} = 300 м).

1km,



а) *б*)

Рис. 118. Изолинии равных значений целевой функции $C_{1km}(L_t, S_k) = const$:

а – α_{sl} = 3,5°; *б* – α_{sl} = 30°

Форма III является оптимальной для узкого диапазона углов α_{sl}, составляющего ~2…3°, а затем плавно, без скачкообразного изменения характеристик оптимального варианта конструктивного исполнения канатного метро, сменяется формой II. Поверхность целевой функции $C_{1km}(L_t, S_k)$ в области определения вектора управляемых параметров $\{x\}$ имеет только один, глобальный минимум (точка *minimum(II)* на рис. 118, *б*). Однако при больших значениях угла наклона α_{sl} > 40…50° возможно появление второго локального минимума, значение которого заметно отличается от глобального минимума в большую сторону, так как соответствующий ему шаг установки промежуточных опор оказывается существенно меньше L_t^{opt}.

При малых углах наклона поверхности рельефа, когда оптимальный вариант конструктивного исполнения линии канатного метро реализуется на основе форм I или III провисания несущих канатов, точка глобального минимума целевой функции лежит на

ограничении (27) или (28) соответственно. В случаях оптимального варианта на основе формы II она лежит на ограничении (26). Указанные ограничения связаны с величиной агрегатной прочности $R_{kn}(d_{kn\max})$ используемых несущих канатов максимального диаметра $d_{kn\max}$ и их числом n_{kn}. С увеличением агрегатной прочности канатов и увеличением их числа можно ожидать улучшения технико-экономических характеристик оптимального варианта конструктивного исполнения линии канатного метро.

Это подтверждается результатами расчета оптимальной стоимости C_{1km} для двух значений числа несущих канатов: n_{kn} = 3 и n_{kn} = 6. Однако экономический выигрыш оказывается весьма незначительным, составляя лишь ~4 %. При этом практически не изменяются такие оптимальные характеристики линии, как шаг установки L_t^{opt} и высота H_{tg} промежуточных опор, форма и стрела провисания несущих канатов f. В частности, оптимальное значение L_t^{opt} увеличивается лишь на 1,0…1,5 % или на 4…9 м, а высота промежуточной опоры H_{tg} – на 0,5…1,5 % или на 0,2…0,5 м. Однако существенно снижается требуемый диаметр несущих канатов и горизонтальное усилие их натяжения S_k^{opt} (приблизительно в 2 раза), что положительно сказывается на характеристиках натяжного устройства. Также уменьшение необходимого диаметра каната приводит к снижению его погонной стоимости C_k и, как следствие, к снижению стоимости 1 км линии канатного метро C_{1km}, несмотря на увеличение суммарной длины несущих канатов.

В то же время, эффект от увеличения агрегатной прочности канатов оказывается весьма заметным (рис. 119). Величина R_{kn} несущих канатов характеризуется коэффициентом

$$\psi_R = R_{kn} / R_{kn}^{вариант2},$$

где $R_{kn}^{вариант2}$ – агрегатная прочность несущего каната, соответствующая варианту 2 конструктивного исполнения линии канатного метро (см. рис. 113).

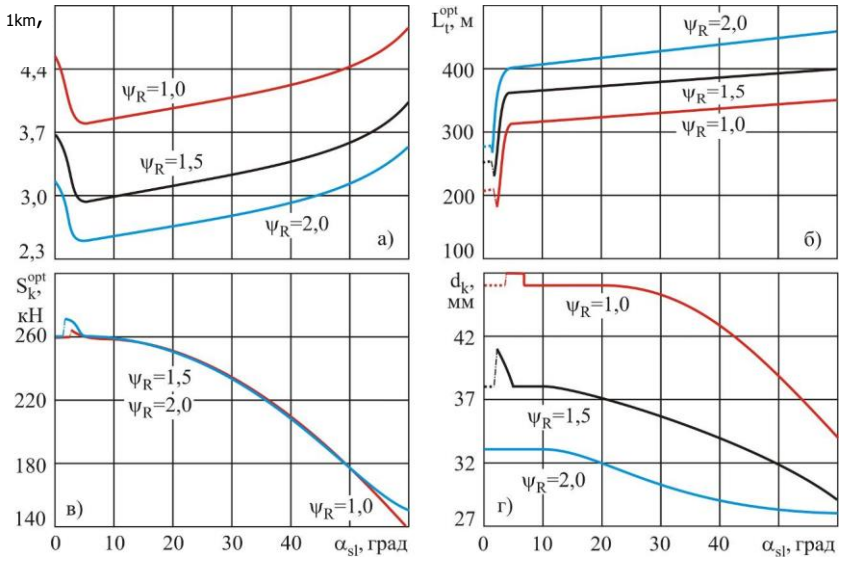


Рис. 119. Влияние агрегатной прочности несущих канатов R_{kn} на характеристики оптимального варианта конструктивного исполнения линии канатного метро для различных значений угла наклона поверхности рельефа

В диапазоне углов наклона поверхности рельефа $\alpha_{sl} > 10^0$ рост агрегатной прочности канатов обеспечивает прямо пропорциональный рост оптимального шага установки промежуточных опор (рис. 119, *б*) в соответствии с линейной зависимостью вида

$$\frac{L_t^{opt}(\psi_R)}{L_t^{opt}(\psi_r = 1)} \sim 0,65\psi_R .$$

Практический интерес представляет собой выявление и анализ взаимосвязи между оптимальным шагом установки промежуточных опор линии канатного метро и такой важной технико-экономической характеристикой любой транспортной системы, как ее пропускная способность. Для канатного метро теоретическая пропускная способность (максимальное количество пассажиров, перевозимое за 1 ч в одном направлении) может быть рассчитана по следующей зависимости:

$$C_p^t = \frac{N_{p,cab} v_m}{L_{cab}} = \frac{\psi_v N_{p,cab} v_{\max}}{L_{cab}}, \qquad (29)$$

где $N_{p,cab}$ – проектная вместимость одной пассажирской кабины; v_m – средняя скорость движения пассажирской кабины (с учетом остановок на пассажирских станциях); $v_{\max}$ – максимально допустимая скорость движения пассажирской кабины на перегоне между соседними пассажирскими станциями; $\psi_v = v_m / v_{\max}$ – коэффициент пропорциональности между средней и максимально допустимой скоростью движения пассажирской кабины.

Согласно соотношению (29), теоретическая пропускная способность линии канатного метро прямо пропорциональна скорости движения (средней v_m или максимальной $v_{\max}$) пассажирской кабины и ее проектной вместимости $N_{p,cab}$, а также обратно пропорциональна расстоянию между двумя пассажирскими кабинами L_{cab}.

В рамках рассматриваемой математической модели оптимизации шага установки промежуточных опор максимальная скорость движения пассажирской кабины может быть учтена в вели-

чине коэффициента динамичности ψ_d >1, причем коэффициент динамичности и скорость кабины связаны между собой прямо пропорциональной зависимостью. Для установления расчетного соотношения между ψ_d и $v_{\max}$ (или v_m) необходимо моделирование динамики движения пассажирской кабины, поддерживаемой системой гибких стальных канатов, на основе построения соответствующих динамических моделей, примеры которого применительно к подъемным сооружениям можно найти в работах [51, 63, 64, 101, 118]. Влияние коэффициента динамичности ψ_d на характеристики оптимального варианта конструктивного исполнения линии канатного метро для различных значений угла наклона поверхности рельефа (на примере варианта 2 на рис. 113) показано на рис. 120. Рассмотренный гипотетический случай ψ_d = 1 позволяет определить наиболее динамически благоприятные условия работы канатного метро. Анализ графиков на рис. 120 показывает, что основные характеристики линии канатного метро весьма чувствительны к изменению коэффициента динамичности. С ростом ψ_d стоимость 1 км линии и горизонтальное усилие натяжения несущих канатов возрастают приблизительно прямо пропорционально.

Диаметр несущих канатов тоже возрастает, однако меньшими темпами. Шаг установки промежуточных опор с ростом ψ_d уменьшается также по приблизительно прямо пропорциональной зависимости. При этом высота самих опор практически не изменяется: разница составляет ~1%. Таким образом, рост стоимости 1 км линии канатного метро обусловлен необходимостью построения большего числа промежуточных опор и усиления их конструкции для обеспечения большего требуемого усилия натяжения несущих канатов, а также стоимости самих кана-

1km,

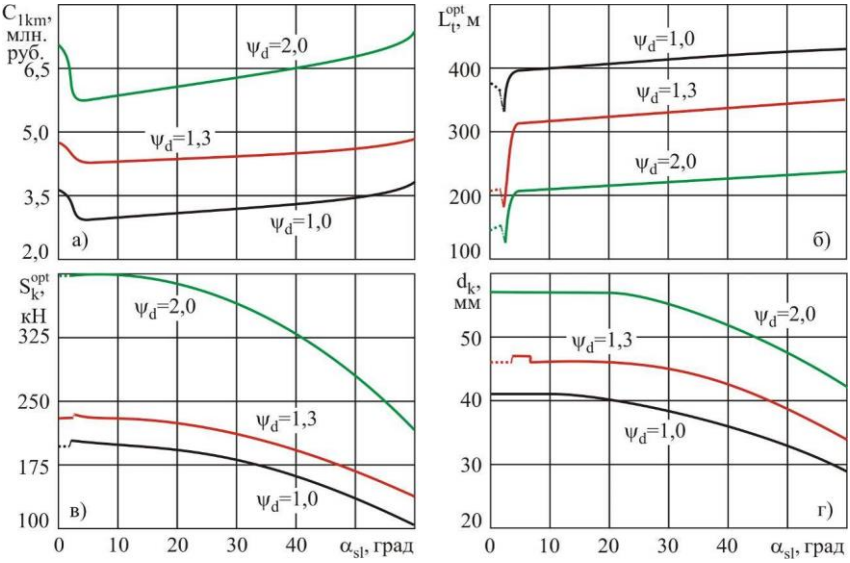


Рис. 120. Влияние коэффициента динамичности на характеристики оптимального варианта конструктивного исполнения линии канатного метро: *а* – стоимость 1 км линии; *б* – шаг установки промежуточных опор; *в* – горизонтальное усилие натяжения несущих канатов; *г* – диаметр несущих канатов

тов. Эти данные свидетельствуют о том, что при технико-экономической оптимизации в процессе проектирования линии канатного метро обязательно необходим учет средней или максимальной скоростью движения пассажирских кабин, а при дальнейшей эксплуатации линии – контроль скорости с обязательным ее ограничением согласно принятого при проектировании значения. Дополнительным источником повышения коэффициента динамичности в условиях эксплуатации выступают ветровые нагрузки на канатную систему и пассажирские кабины, что должно учитываться при ограничении скорости движения или при задании

проектного значения коэффициента динамичности. При разработке конструкций пассажирских кабин и канатной системы канатного метро необходимо в максимальной степени внедрять конструктивные мероприятия, направленные на снижение уровня протекающих при эксплуатации динамических процессов.

В рамках рассматриваемой математической модели оптимизации шага установки промежуточных опор учет проектной вместимости $N_{p,cab}$ и расстояния между двумя пассажирскими кабинами L_{cab} может быть выполнен комплексно путем изменения расчетной величины распределенной нагрузки q_{Rkn}, определяемой согласно зависимости (7). Тогда распределенная нагрузка q_{Rkn} с проектной вместимостью пассажирской кабины $N_{p,cab}$ расстоянием между кабинами может быть связана соотношением

$$q_{Rkn} = \left[\left(q_{kn0} d_{kn}^2 + \mu_1 \frac{q_{cab} N_{p,cab}^{b_q}}{n_{kn} L_{cab}} \right)^2 + \right.$$

$$\left. + w_0^2 \left(\eta_1 C_{wkn} k_{wkn} d_{kn} + \mu_{w1} C_{wcab} k_{wcab} \frac{a_{cab} N_{p,cab}^{a_q}}{n_{kn} L_{cab}} \right)^2 \right]^{0,5}, \qquad (30)$$

где q_{cab}, b_q – коэффициенты степенного регрессионного уравнения $Q_{cab} = q_{cab} N_{p,cab}^{b_q}$, аппроксимирующего функцию $Q_{cab} = f(N_{p,cab})$; a_{cab}, a_q – коэффициенты степенного регрессионного уравнения $A_{cab} = a_{cab} N_{p,cab}^{a_q}$, аппроксимирующего функцию $A_{cab} = f(N_{p,cab})$.

Согласно (30) теоретическая пропускная способность линии канатного метро и расчетная распределенная нагрузка q_{Rkn} на несущий канат связаны прямо пропорциональной нелинейной зависимостью. Влияние величины распределенной нагрузки q_{Rkn} на характеристики оптимального варианта конструктивного исполнения линии канатного метро для различных значений угла наклона поверхности рельефа (на примере варианта 2 на рис. 113) показано на рис. 121. Величина распределенной нагрузки q_{Rkn} характеризуется коэффициентом

$$\psi_q = q_{Rkn} / q_{Rkn}^{вариант2},$$

где $q_{Rkn}^{вариант2}$ – распределенная нагрузка на несущий канат, соответствующая варианту 2 конструктивного исполнения линии канатного метро (см. рис. 113).

C_{1km}, млн руб.

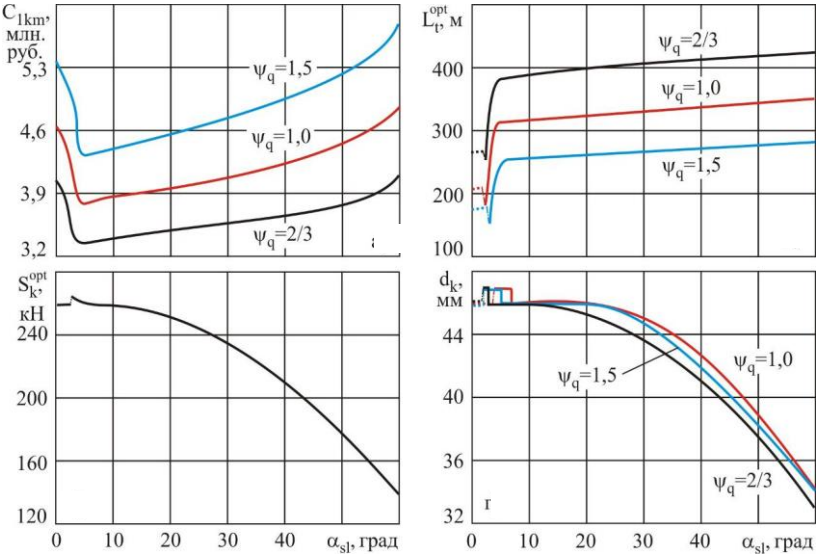


Рис. 121. Влияние распределенной нагрузки на несущий канат на характеристики оптимального варианта конструктивного исполнения линии канатного метро: *а* – стоимость 1 км линии; *б* – шаг установки опор; *в* – горизонтальное усилие натяжения несущих канатов; *г* – диаметр несущих канатов

Анализ рис. 121 показывает, что заметное влияние изменение нагрузки q_{Rkn} оказывает на стоимость 1 км линии канатного метро C_{1km} и шаг установки промежуточных опор L_t^{opt}, хотя изменение этих характеристик происходит медленнее, чем изменение q_{Rkn}: при росте q_{Rkn} в 2,25 раза (с ψ_q = 2/3 до ψ_q = 1,5) стоимость C_{1km} увеличивается в 1,3…1,4 раза (рис. 121, *а*), а шаг L_t^{opt} снижается в 1,4…1,5 раза (рис. 121, *б*) при разных значениях угла наклона поверхности рельефа α_{sl}. На величину горизонтального усилия натяжения несущих канатов S_k^{opt} влияние изменения нагрузки q_{Rkn} практически не наблюдается (рис. 121, *в*), а на диаметр несущих канатов d_{kn} оно оказывается минимальным: только при повышенных уклонах поверхности рельефа диаметры могут отличаться на 1…2 мм (рис. 121, *г*).

Анализ влияния различных факторов на оптимальные характеристики линий канатного метро позволяет сформулировать следующие основные выводы.

1. Зависимость стоимости 1 км линии канатного метро от параметров рельефа носит экстремальный характер с выраженным минимумом при малых углах наклона поверхности рельефа порядка 3…6°. Положение минимума является достаточно устойчивым и незначительно изменяется при достаточно существенном изменении стоимости промежуточных опор и установленного на них технологического оборудования.

2. Наиболее эффективными условиями для строительства канатного метро является рельеф местности со значительными перепадами высотных отметок по длине трассы транспортирования: лишь при углах наклона поверхности свыше 50…60° стоимость 1 км линии начинает превышать стоимость 1 км линии, проложенной вдоль строго горизонтальной поверхности.

3. При малых углах наклона поверхности (менее 6…8°) для минимизации стоимости строительства линии канатного метро требуется более частая установка промежуточных опор. Однако, несмотря на возможность строительства более низких и более дешевых опор, наблюдаются повышенные значения стоимости 1 км оптимального варианта линии. При больших углах наклона поверхности необходима более редкая установка более высоких промежуточных опор. В пределах угла наклона 10…60° диапазон изменения оптимального шага достаточно мал, составляя не более ±10 % от значения шага при угле наклона поверхности 10°.

4. В диапазоне малых углов наклона поверхности рельефа (3…6°) наблюдаются скачкообразные изменения основных технико-экономических характеристик линии канатного метро. Это связано со сменой форм провисания несущих канатов.

5. Увеличение числа несущих канатов имеет весьма незначительный экономический эффект (в пределах 4 %). При этом не изменяются такие оптимальные характеристики линии, как шаг установки и высота промежуточных опор, форма и стрела провисания несущих канатов. Однако существенно снижается диаметр несущих канатов и горизонтальное усилие их натяжения.

6. Повышение агрегатной прочности несущих канатов обеспечивает прямо пропорциональное повышение оптимального шага установки промежуточных опор и приводит к заметному снижению стоимости строительства линии канатного метро. На высоту промежуточных опор и горизонтальное усилие натяжения несущих канатов их агрегатная прочность влияния практически не

оказывает, однако приводит к существенному снижению требуемого диаметра несущих канатов, что также положительно сказывается на снижении стоимостных характеристик строительства линии канатного метро.

7. Пропускная способность линии канатного метро оказывает заметное влияние на оптимальные значения ряда ее основных технико-экономических характеристик, в частности, на стоимость 1 км линии, шаг установки промежуточных опор, усилие натяжения и диаметр несущих канатов. Ее повышение возможно путем увеличения разрешенной скорости движения пассажирских кабин и (или) их вместимости и количества. Во всех этих случаях повышение пропускной способности обуславливает рост стоимости 1 км линии и снижение шага установки промежуточных опор. Степень влияния перечисленных направлений повышения пропускной способности является неодинаковой, что позволяет предполагать наличие для заданного значения теоретической пропускной способности оптимального сочетания скорости движения, вместимости и количества пассажирских кабин, при котором будет достигаться наибольший технико-экономический эффект при строительстве линии метро.

3.4. Параметрическая оптимизация линии канатного метро с унифицированными промежуточными опорами

Представленные в работах [50, 55, 57, 58, 67] результаты технико-экономической оптимизации проектирования линий канатного метро показывают, что на стоимостные характеристики оптимальных вариантов конструктивного исполнения линий значительное влияния имеют высоты промежуточных опор. Как следствие, оптимальное проектирование линии, проходящей вдоль ландшафтно неоднородной поверхности, путем математически формализованного поиска минимума стоимостной целевой функции с помощью известных методов оптимизации приводит к тому, что оптимальный вариант требует установки промежуточных опор индивидуальной высоты. С практической точки зрения это является крайне неудобным обстоятельством, так как требует индивидуального подхода к проектированию и производству промежуточных опор, что, естественно, усложняет и удорожает процессы их конструирования, технологической подготовки к производству, изготовления и монтажа. Учитывая, что строительство линии ка-

натного метро предусматривает возведение достаточно большого числа промежуточных опор (как правило, от 3 до 6 штук в пределах 1 км линии), актуальной является задача унификации промежуточных опор по высоте. Указанная унификация должна предусматривать использование промежуточных опор нескольких типоразмеров, начиная от минимального (высотой $H_{t\min}^{un}$) и кончая максимальным (высотой $H_{t\max}^{un}$). Промежуточные типоразмеры унифицированных опор в диапазоне $H_{t\min}^{un} \ldots H_{t\max}^{un}$ отличаются между собой по высоте на постоянный шаг унификации ΔH.

Необходимость использования унифицированных промежуточных опор обуславливает необходимость коррекции тех математических моделей задачи оптимального проектирования линий канатного метро, которые представлены в пп. 3.2 и 3.3.

Для решения технико-экономической задачи оптимального проектирования линии канатного метро с унифицированными по высоте промежуточными опорами целесообразно использовать две оптимизационные математические модели:

– модель оптимизации шага установки промежуточных унифицированных опор;

– модель оптимизации линии канатного метро в целом.

Первая из названных математических моделей позволяет оценить оптимальные характеристики линии канатного метро, проложенной преимущественно вдоль практически горизонтальной или наклонной поверхности рельефа с практически постоянным углом наклона α_{sl}. В связи с постоянством геометрической формы рельефа в рамках данной модели достаточно рассмотреть сравнительно небольшой участок линии – локальный участок между двумя соседними промежуточными опорами L_t равной высоты H_{tg}.

Вторая модель позволяет оценить оптимальные характеристики линии канатного метро, проложенной вдоль ландшафтно неоднородной трассы, по длине которой имеют место значимые изменения геометрической формы рельефа и ее количественных параметров. Указанная модель максимально приближена к оптимизации реальных линий канатного метро и поэтому в ее рамках необходимо рассматривать линию канатного метро на всем протяжении L_{tr}, причем унифицированные промежуточные опоры,

как правило, будут иметь неодинаковую высоту $H_{tg,i}$ с разностью, кратной шагу унификации ΔH_{tg}.

3.4.1. Математическая модель оптимизации шага установки промежуточных унифицированных опор

В качестве целевой функции при формулировке задачи технико-экономической оптимизации линии канатного метро будем использовать целевую функцию вида (19).

При построении модели целесообразно использовать методический подход, который представлен в пп. 3.2 и 3.3, внеся в него определенные коррективы. Расчетная схема математической модели оптимизации шага установки промежуточных унифицированных опор соответствует рис. 111,*а*.

В данном случае вектор управляемых параметров целесообразно сформировать также из двух независимых величин задачи оптимизации, однако вместо шага установки промежуточных опор L_t включить геометрическую высоту промежуточных опор H_{tg} и горизонтальное усилие натяжения несущего каната S_k. Поэтому вектор варьируемых (управляемых) параметров будет иметь следующий вид:

$$\{x\}^T = \{x_1\ x_2\} = \{H_{tg}\ S_k\}.$$

Такая замена варьируемых параметров позволяет упростить процедуру поиска глобального минимума целевой функции (19), так как при ее реализации с помощью одного из прямых методов оптимизации [11, 65] возможно непосредственное варьирование высотой промежуточной опоры H_{tg} с принятым шагом унификации ΔH. Это гарантирует, что в процессе поиска минимума целевой функции будет получен такой оптимальный вектор варьируемых параметров $\{x\}^{opt}$, в котором переменная $x_1^{opt} = H_{tg}^{opt}$ будет иметь не произвольное, а требуемое по условию унификации высоты опор значение. Шаг установки промежуточных опор, соответствующий известным значениям H_{tg} и S_k, определяется следующими соотношениями [56]:

– при I форме провисания несущего каната между соседними опорами (при значении критерия формы провисания каната

$K_f > 1)$

$$L_t = \frac{S_k}{\psi_d q_{Rkn}} \left\{ \left[\frac{4\psi_d q_{Rkn}}{S_k} \left(H_{tg} - h_{\min} - h_{cab} - \frac{\psi_d q_{Rkn} B_{cab}^2}{4S_k} \right) + tg^2 \alpha_{sl} \right]^{0,5} + (\psi_d - 1) tg\alpha_{sl} \right\}$$

;

– при II и III формах провисания несущего каната между опорами (при значении критерия формы провисания каната $K_f \leq 1)$

$$L_t = 2 \left\{ \frac{2S_k}{\psi_d q_{Rkn}} \left[H_{tg} - h_{\min} - h_{cab} - \frac{B_{cab}}{2} \left(\frac{\psi_d q_{Rkn} B_{cab}}{4S_k} + tg\alpha_{sl} \right) \right] \right\}^{0,5}$$

.

Остальные величины, используемые в математической модели и характеризующие геометрические размеры линии канатного метро, эксплуатационные нагрузки на несущие канаты, параметры пассажирских кабин и др., являются фиксированными, так как либо задаются в качестве исходных данных, либо вычисляются в зависимости от указанных управляемых параметров.

К первой группе относятся: длина линии L_{tr}, расстояние между соседними кабинами L_{cab}, вес Q_{cab} и площадь проекции пассажирской кабины на вертикальную плоскость A_{cab}, минимально допустимое приближение низа пассажирской кабины к поверхности рельефа $h_{\min}$, высота пассажирской кабины с учетом устройства подвешивания h_{cab}, угол наклона поверхности рельефа α_{sl}, коэффициент усиления конструкции опоры при действии максимально допустимого по условию прочности каната усилия натяжения ψ, коэффициент динамичности ψ_d, минимальный коэффициент запаса прочности каната согласно требованиям Ростехнадзора [104] $[n]_k$, нормативное значение ветрового давления в зависимости от номера ветрового района w_0, аэродинамические коэффициенты несущего каната C_{wkn} и пассажирской кабины C_{cab}, коэффициенты возрастания ветрового давления с высотой от поверхности, рассчитанные для высоты расположения оси каната k_{wkn} и центра тяжести кабины k_{wcab}, коэффициенты

неравномерности распределения весовой μ_1 и ветровой μ_{w1} нагрузки на крайний несущий канат от пассажирской кабины, коэффициент ослабления давления ветра на поверхность крайнего несущего каната для ряда параллельно расположенных канатов η_1, агрегатная прочность несущего каната максимального диаметра $d_{kn\max}$ выбранной конструкции $R_{kn}(d_{kn\max})$, число несущих канатов n_{kn} и эмпирические коэффициенты в регрессионных зависимостях связи стоимости промежуточных опор с их высотой и стоимости 1 погонного метра несущего и тягового канатов с их диаметром $C_{f0}, a_f, C_{t0}, a_t, q_{k0}, r_{k0}, r_{k1}, r_{k2}, c_{k0}, c_{k1}, c_{k2}$.

Ко второй группе относятся: расчетная величина распределенной нагрузки на один несущий канат q_{Rkn}, распределенная нагрузка от веса пассажирской кабины q_{cab}, стрела провисания f и расстояния сечения максимального провисания несущего каната от промежуточных опор a и b, диаметры тягового d_{kt} и несущего d_{kn} канатов, шаг установки промежуточных опор L_t, длина несущего каната в пролете с учетом его провисания l_k, число промежуточных опор вдоль линии канатного метро n_t, осевые усилия натяжения несущего каната на левой T_{kl} и правой T_{kr} опорах. Из величин второй группы формируется вектор неуправляемых параметров, которые не подлежат варьированию в процессе решения оптимизационной задачи:

$$\{z\}^T = \{z_1\ z_2\ z_3\ z_4\ z_5\ z_6\ z_7\ z_8\ z_9\ z_{10}\ z_{11}\ z_{12}\ z_{13}\ z_{14}\} =$$
$$= \{q_{Rkn}\ q_{cab}\ f\ d_{kt}\ d_{kn}\ L_t\ l_k\ n_t\ a\ b\ T_{kl}\ T_{kr}\ R_{kn}(d_{kn\max})/[n]_k\ K_f\}.$$

Окончательно задача технико-экономической оптимизации шага установки промежуточных опор канатного метро, унифицированных по высоте, сводится к минимизации целевой функции – суммарной стоимости изготовления и монтажа опор, приобретения тягового и несущих канатов, которая согласно (19) имеет вид:

– при I форме провисания несущего каната между соседними опорами

$$\ddot{O}(\{x\},\{z\}) = \left(\frac{L_{tr}}{z_6} - 1\right)\left\{C_{f0}\left[x_1\left(1+\psi\frac{x_2}{z_{14}}\right)\right]^{a_f} + C_{t0}\left[x_1\left(1+\psi\frac{x_2}{z_{14}}\right)\right]^{a_t}\right\} +$$

$$+(C_{kt}+n_{kn}C_{kn})\frac{L_{tr}}{\cos\alpha_{sl}}\left[1+\frac{8}{3}\left(\frac{z_9\cos\alpha_{sl}}{z_6}\right)^2\left(\psi_d\frac{z_1 z_9}{x_2}+tg\alpha_{sl}\right)^2\right]\to\min;$$

(31)

– при II и III формах провисания несущего каната между соседними опорами

$$\ddot{O}(\{x\},\{z\})=\left(\frac{L_{tr}}{z_6}-1\right)\left\{C_{f0}\left[x_1\left(1+\psi\frac{x_2}{z_{14}}\right)\right]^{a_f}+C_{t0}\left[x_1\left(1+\psi\frac{x_2}{z_{14}}\right)\right]^{a_t}\right\}+$$

$$+(C_{kt}+n_{kn}C_{kn})\frac{L_{tr}}{\cos\alpha_{sl}}\left[1+\frac{1}{6}\left(\frac{\psi_d z_1 z_6}{2x_2\cos\alpha_{sl}}\right)^2\right]\to\min.$$

(32)

При этом должны выполняться ограничения в форме неравенств, которые определяют следующие требования:

– к высоте предельных типоразмеров унифицированных промежуточных опор

$$H_{t\max}^{un}-x_1\geq 0;\quad x_1-H_{t\min}^{un}\geq 0;$$

– минимальной высоте промежуточной опоры:

– при I форме провисания каната

$$x_1-h_{\min}-h_{cab}-\frac{\psi_d z_1 B_{cab}^2}{4x_2}-z_9\left(\psi_d\frac{z_1 z_9}{x_2}+tg\alpha_{sl}\right)\geq 0;$$

– при II и III формах провисания каната

$$x_1-h_{\min}-h_{cab}-\frac{B_{cab}}{2}\left(\psi_d\frac{z_1 B_{cab}}{4x_2}+tg\alpha_{sl}\right)-\psi_d\frac{z_1 z_6^2}{8x_2}\geq 0;$$

– к максимально допустимому горизонтальному усилию натяжения несущего каната

$$z_{14}-x_2\geq 0;$$

– к допустимому диапазону изменения величины шага установки соседних опор:

$$L_{t\max}-z_6\geq 0;\quad L_{tr}/z_6-1\geq 0;$$

– к допустимому диапазону изменения диаметров тягового каната:

$$d_{kt\max}-z_4\geq 0;\quad z_4-d_{kt\min}\geq 0;$$

– к допустимому диапазону изменения диаметров несущих канатов:

$$d_{kn\max} - z_5 \geq 0; \quad z_5 - d_{kn\min} \geq 0;$$

– к максимально допустимой величине провисания несущего каната между опорами:

– при I форме провисания каната

$$\psi_f z_6 - z_9 \left(\psi_d \frac{z_1 z_9}{x_2} + tg\alpha_{sl} \right) \geq 0;$$

– при II и III формах провисания каната

$$\psi_f z_6 - \psi_d \frac{z_1 z_6^2}{8x_2} \geq 0;$$

– к минимальному усилию натяжения каната согласно требованиям Ростехнадзора [104]:

– при I форме провисания каната

$$x_2 - \frac{10 n_{cab} \psi_d Q_{cab}}{n_{kn}} \cos\left[arctg\left(\psi_d \frac{z_1 z_9}{x_2} \right) \right] \geq 0;$$

– при II и III формах провисания каната

$$x_2 - \frac{10 n_{cab} \psi_d Q_{cab}}{n_{kn}} \cos\left[arctg\left(tg\alpha_{sl} - \psi_d \frac{z_1 z_6}{2x_2} \right) \right] \geq 0;$$

– к максимальному усилию натяжения каната, исходя из его наибольшей возможной агрегатной прочности:

– при I форме провисания каната

$$z_{14} \cos\left[arctg\left(\psi_d \frac{z_1 (z_6 - z_9)}{x_2} \right) \right] - x_2 \geq 0;$$

– при II и III формах провисания каната

$$z_{14} \cos\left[arctg\left(tg\alpha_{sl} + \psi_d \frac{z_1 z_6}{2x_2} \right) \right] - x_2 \geq 0.$$

Для нахождения минимума целевой функции (31) или (32) с учетом принятых ограничений необходимо использовать один из прямых методов условной оптимизации, основанный на непосредственном вычислении величины целевой функции $\ddot{O}(\{x\},\{z\})$. Известные прямые методы (например, методы типа Хука-Дживса) предусматривают поиск точки оптимума $\{x\}^{opt}$ путем постепенно-

го пошагового приближения к ней от исходной начальной точки оптимизации $\{x\}^{beg}$, причем по мере приближения производится постепенное уменьшение шага поиска до тех пор, пока он не достигнет требуемой точности положения точки вычисления оптимума в пределах множества управляемых параметров $\{x\}$. В рассматриваемом случае такой вычислительный алгоритм является неприемлемым, так как по одному из управляемых параметров – высоте промежуточной опоры $x_1 = H_{tg}$ – шаг оптимизации должен оставаться постоянным в течение всего поиска положения точки оптимума и быть равным шагу унификации:

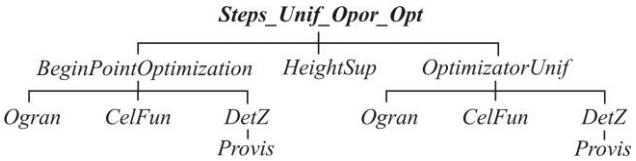
$$\Delta x_1 = \Delta H = const.$$

Это требует соответствующей коррекции выбранного традиционного метода оптимизации. Следует ожидать, что на величину минимальной стоимости строительства линии канатного метро, определяемую расчетом целевой функции (19), также будет оказывать влияние принятый минимальный типоразмер унифицированных промежуточных опор, характеризующийся минимальной высотой $H_{t\min}^{un}$. Это требует проведения ряда оптимизационных расчетов для нескольких начальных точек оптимизации $\{x\}^{beg}$, отличающихся значением высоты промежуточной опоры $x_1^{beg} = H_{t\min}^{un,i}$, причем для i-го расчета величина $H_{t\min}^{un,i}$ задается в интервале $H_{t\min}^{un} \ldots H_{t\min}^{un} + \Delta H$.

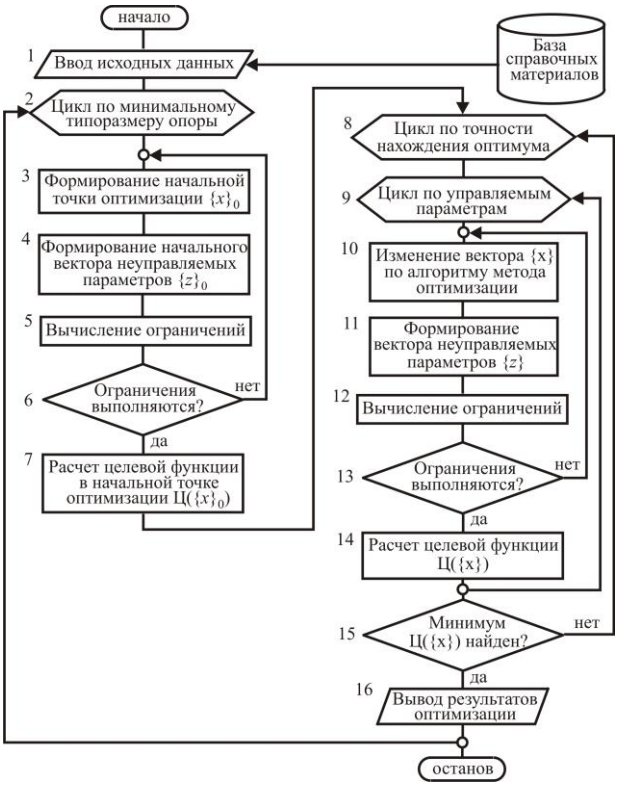
Решение задачи оптимизации шага установки унифицированных по высоте промежуточных опор линии канатного метро с учетом названных выше особенностей вычислительного алгоритма метода оптимизации было реализовано в компьютерной программе «Оптимизация линии канатного метро с унифицированными опорами» (рис. 122). Программа структурно включает в себя головную процедуру *Steps_Unif_Opor_Opt* и 7 подпрограмм типа Procedure:

- *BeginPointOptimization* – расчет целевой функции в начальной точке оптимизации;
- *CelFun* – вычисление значения целевой функции $Ц(\{x\})$ в соответствии с соотношениями (31) или (32);
- *DetZ* – вычисление неуправляемых параметров –

компонент вектора $\{z\}$;



а)



б)

Рис. 129. Программа «Оптимизация линии канатного метро с унифицированными опорами»:
а – структурная схема; *б* – укрупненная блок-схема

- *Provis* – определение формы провисания каната и

вычисление компонент вектора $\{z\}$, зависящих от формы провисания каната;

- *Ogran* – вычисление левых частей ограничений задачи оптимизации;
- *OptimizatorUnif* – реализация алгоритма оптимизации целевой функции (с учетом коррекции алгоритма на основе постоянства шага оптимизации по одному из управляемых параметров – высоте промежуточной опоры);
- *HeightSup* – определение минимального типоразмера унифицированной промежуточной опоры.

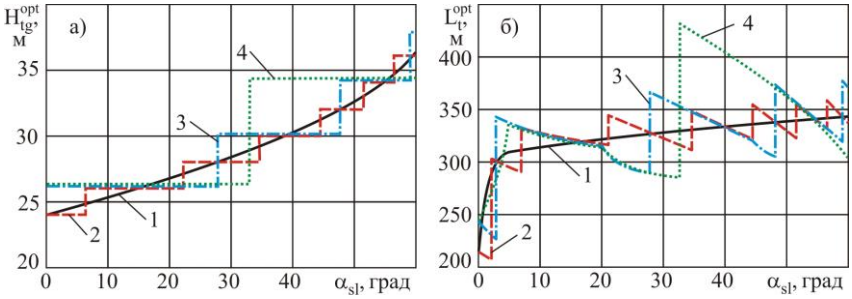
3.4.2. Математическая модель оптимизации линии канатного метро с унифицированными по высоте промежуточными опорами

В основу данной математической модели целесообразно положить представленную в п. 3.2 и реализованную в виде компьютерной программы [77] математическую модель полной технико-экономической оптимизации проектирования линии канатного метро. В указанной модели рассматривается случай промежуточных опор, неунифицированных по высоте, причем в вектор управляемых параметров задачи оптимизации непосредственно включены высоты промежуточных опор. Таким образом, данная математическая модель справедлива и для оптимального проектирования линии канатного метро с унифицированными по высоте промежуточными опорами при условии, что алгоритм используемого прямого метода оптимизации будет предусматривать постоянный шаг варьирования высоты всех промежуточных опор $H_{tgi} = \Delta H = const$ в течение всего процесса поиска положения точки минимума целевой функции.

Расчеты, проведенные с помощью вычислительной программы «Оптимизация линии канатного метро с унифицированными опорами» для ряда возможных вариантов конструктивного исполнения канатной транспортной системы, показали, что технико-экономические показатели оптимального варианта установки унифицированных по высоте промежуточных опор зависят от шага унификации ΔH, стоимости строительства самой опоры и комплекта технологического оборудования, монтируемого на опо-

ре, а также угла наклона земной поверхности α_{sl} (см. рис. 122).

На рис. 123 представлены результаты оптимизации – графики изменения высоты и шага установки унифицированных промежуточных опор H_{tg}^{opt} для трех значений шага унификации ΔH = 2, 4 и 8 м в зависимости от угла наклона поверхности рельефа α_{sl}. Конструктивно каждый из указанных шагов может быть реализован с помощью специальной секции-вставки соответствующей длины, крепящейся на промежуточной опоре базовой высоты, например, опоре минимального типоразмера $H_{tg\,\min}^{un}$. Конструктивно секции-вставки могут крепиться либо на оголовке опоры (для опор мачтового типа), либо на верхней части стоек опоры (для опор арочного типа). Для рассмотренных вариантов ΔH был принят единый минимальный типоразмер $H_{tg\,\min}^{un}$ = 18 м.



а)

б)

Рис. 123. Изменение оптимальных характеристик линии канатного метро с унифицированными промежуточными опорами в зависимости от угла наклона поверхности рельефа: *а* – высота опор; *б* – шаг установки опор; *1* – неунифицированная опора; *2* – ΔH = 2 м; *3* – ΔH = 4 м; *4* – ΔH = 8 м

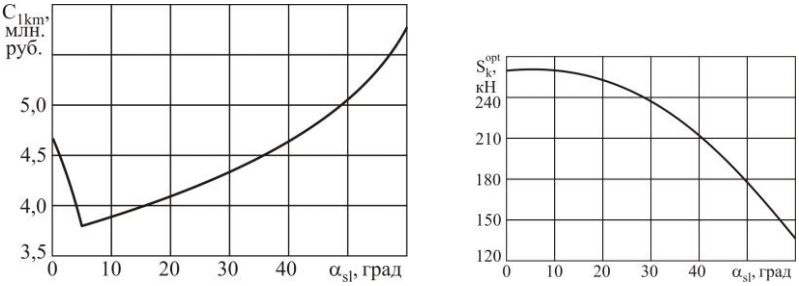
На рис. 123 также нанесен график $H_{tg}^{opt}(\alpha_{sl})$, рассчитанный для неунифицированных опор на основе решения задачи технико-экономической оптимизации линии канатного метро [65]. Для унифицированных опор график $H_{tg}^{opt}(\alpha_{sl})$ имеет дискретно-ступенчатый характер (рис. 123, *а*), причем с увеличением шага унификации ΔH дискретность увеличивается: ширина диапазона

углов α_{sl}, в пределах которых высота опор H_{tg}^{opt} имеет неизменное значение, возрастает.

Изменение шага установки унифицированных промежуточных опор L_t^{opt} для оптимального варианта конструктивного исполнения линии канатного метро в зависимости от угла наклона поверхности рельефа α_{sl} также носит дискретно-ступенчатый характер (рис. 123, *б*). Переход на больший типоразмер унифицированной промежуточной опоры обуславливает необходимость установки опор с большим шагом L_t^{opt}. Его величина затем начинает монотонно уменьшаться с дальнейшим ростом угла наклона α_{sl} до тех пор, пока не потребуется переход на новый типоразмер опоры.

Такая синхронность изменения оптимальных значений высоты и шага установки промежуточных опор приводит к тому, что оптимальные стоимостные характеристики линии канатного метро выражаются не дискретно-ступенчатой, а гладкой функцией. Как пример, на рис. 124,*а* показан график стоимости 1 км линии канатного метро $C_{1km}(\alpha_{sl})$ для унифицированных опор с шагом унификации ΔH = 8 м. В качестве стоимостных характеристик промежуточных опор и несущих канатов были рассмотрены стоимостные характеристики стальных многогранных опор типа ПГМ 500 и грузолюдских канатов по ГОСТ 3079-80. Немонотонный характер графика $C_{1km}(\alpha_{sl})$ обусловлен тем, что, как показано в п. 3.3, при малых углах наклона поверхности рельефа $\alpha_{sl} \leq$ ~5° кривая провисания несущих канатов для оптимального конструктивного исполнения линии канатного метро характеризуется формой I, затем при углах наклона до α_{sl} ~ 6…8° – формой III, а далее – формой II. Анализируя форму графиков $H_{tg}^{opt}(\alpha_{sl})$ на рис. 123, *а*, можно ожидать, что для тех значений угла α_{sl}, при которых наблюдается наибольшая разница высот унифицированных и неунифицированных опор, должна также наблюдаться и наибольшая разница в стоимости 1 км линии канатного метро. Расчеты показали, что даже при достаточно большом шаге унификации ΔH = 8 м наибольшая разница в стоимости оказывается практически незначимой: она лежит в пределах до 2…3%, воз-

растая с ростом α_{sl} и стоимости отдельных опор.



а) *б*)

Рис. 124. Изменение стоимости 1 км линии канатного метро (*а*) и горизонтального усилия натяжения несущих канатов (*б*) в зависимости от угла наклона поверхности рельефа для унифицированной опоры типа ПГМ 500 с шагом унификации 8 м

Унификация промежуточных опор по высоте и ее шаг практически не оказывают влияния на оптимальное значение горизонтального усилия натяжения несущих канатов S_k^{opt}, которое определяется, главным образом, углом наклона поверхности рельефа α_{sl} (рис. 124, *б*). Расчеты показали, что отклонение величины S_k^{opt} для неунифицированных и унифицированных опор в пределах диапазона углов наклона поверхности рельефа α_{sl} = 0…60° составляет не более 0,5…0,8 %.

Численное исследование влияния минимального типоразмера унифицированных промежуточных опор $H_{t\min}^{un}$ на оптимальные характеристики конструктивного исполнения линии канатного метро показали, что даже при достаточно большом шаге унификации ΔH = 8 м выбор минимального типоразмера в интервале высоты опоры 0…8 м приводит к отклонению стоимости C_{1km} в малых пределах ±1,3%, хотя отклонение L_t^{opt} может достигать ±(15…20)%.

Анализ влияния различных факторов на оптимальные характеристики линий канатного метро позволяет сформулировать следующие основные выводы.

1. Для унифицированных опор график зависимости их высоты от угла наклона поверхности рельефа имеет дискретно-ступенчатый характер. С увеличением шага унификации дискретность увеличивается: ширина диапазона углов наклона поверхности рельефа, в пределах которых высота опор остается постоянной, возрастает.

2. Для унифицированных опор график зависимости шага их установки вдоль линии канатного метро от угла наклона поверхности рельефа также имеет дискретно-ступенчатый характер. Переход на больший типоразмер унифицированной промежуточной опоры обуславливает необходимость установки опор с большим шагом. Его величина затем начинает монотонно уменьшаться с дальнейшим ростом угла наклона поверхности рельефа до тех пор, пока не потребуется переход на новый типоразмер опоры.

3. Синхронное изменение оптимальных значений высоты и шага установки промежуточных опор в зависимости от угла наклона поверхности рельефа приводит к тому, что оптимальные стоимостные характеристики линии канатного метро выражаются не дискретно-ступенчатой, а гладкой функцией. Она имеет экстремальный характер с минимумом при углах наклона поверхности рельефа ~5°, что связано с изменением формы провисания несущих канатов.

5. Унификация промежуточных опор оказывает незначительное влияние на оптимальные стоимостные характеристики линии канатного метро. Даже при достаточно большом шаге унификации наибольшая разница в оптимальной стоимости оказывается практически незначимой: она лежит в пределах до 2…3%, возрастая с ростом угла наклона поверхности рельефа и единичной стоимости промежуточной опоры.

4. Унификация промежуточных опор по высоте и ее шаг практически не оказывают влияния на оптимальное значение горизонтального усилия натяжения несущих канатов. Оно определяется, главным образом, углом наклона поверхности рельефа. Отклонение величины горизонтального усилия натяжения несущих канатов для неунифицированных и унифицированных опор в пределах диапазона углов наклона поверхности рельефа 0…60° составляет не более 0,5…0,8 %.

ГЛАВА 4. ОСНОВЫ ПРОВЕДЕНИЯ РИСК-АНАЛИЗА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАНАТНОГО МЕТРО

В настоящее время пассажирские подвесные канатные дороги зачастую являются основным видом транспортной инфраструктуры в горноклиматических зонах и туристических комплексах. Как правило, здесь они исполняют функции узлового звена транспортных технологий, от них зависит не только нормальное функционирование всего спортивно-туристического или природно-рекреационного комплекса, но и безопасность отдыхающих людей. Для крупных городов-мегаполисов и городских агломераций данный вид транспорта остается пока еще достаточно редким дополнительным видом транспорта, хотя и имеющим хорошие перспективы для развития вследствие своей несомненной инновационности.

Объекты, на которых используются стационарно установленные канатные дороги, согласно Федерального закона №116-ФЗ [105] относятся к категории опасных производственных объектов III класса опасности. Поэтому Правила ФНП [104] предписывают, что при разработке проектов пассажирских подвесных канатных дорог должен выполняться их риск-анализ с выявлением и количественным анализом угроз (ущерба), потенциально возможных при функционировании данного вида транспорта, и на его основе должен быть разработан комплекс необходимых организационно-технических мероприятий по безопасности. Градостроительный Кодекс РФ [17], рассматривающий пассажирский канатный транспорт как линейный объект транспортной инфраструктуры, также регламентирует безопасность пассажиров как определяющий параметр проектирования.

4.1. Анализ аварийности при эксплуатации пассажирских подвесных канатных дорог

В настоящее время на более чем 73 000 поднадзорных Ростехнадзору предприятиях и организациях России эксплуатируются свыше 776 000 подъемных сооружений (рис. 125) [79], включая:

– 204 780 грузоподъемных кранов;
– 23 218 подъемников (вышек);
– 527 567 лифтов;
– 213 подвесных канатных дорог;
– 542 буксировочные канатные дороги;
– 5 фуникулеров;
– 11 543 эскалатора (в том числе, 347 – в метрополитенах);

– 4 946 строительных подъемников;
– 3 254 подъемника для инвалидов.

Рис. 125. Распределение подъемных сооружений по типам оборудования

В табл. 15 приведены данные об изменении общего количества эксплуатирующихся в Российской Федерации подъемных сооружений в 2014–2015 гг. [79]. В табл. 16 приведены дополнительные данные об изменении количества пассажирских подвесных канатных дорог за период 2013–2014 гг.

Таблица 15

Данные об изменении общего количества эксплуатирующихся в Российской Федерации подъемных сооружений в 2015 г. по сравнению с 2014 г.

Тип технического устройства	Общее количество технических устройств в 2014 г., шт.	Общее количество технических устройств в 2015 г., шт.	Прирост (+) / снижение (-), % (шт.)
Краны	242 231	204 780	-15 (-37 451)
Подъемники (вышки)	25 815	23 218	-10 (-2 597)
Лифты	529 662	527 567	-1 (-2 095)
Подвесные канатные дороги	167	213	+27,5 (+46)
Буксировочные канатные дороги	521	542	+4 (+21)
Фуникулеры	2	5	+150 (+3)
Эскалаторы	10 757	11 543	+7,3 (+786)
Строительные подъ-	4 442	4 946	+11,3 (+504)

емники			
Подъемники для инвалидов	3 085	3 254	+5,5 (+169)
Итого:	816 682	776 068	-5 (-40 614)

Таблица 16

Данные об изменении общего количества эксплуатирующихся в Российской Федерации пассажирских подвесных канатных дорог в 2014 г. по сравнению с 2013 г.

Тип канатной дороги	Общее количество канатных дорог в 2013 г., шт.	Общее количество канатных дорог в 2014 г., шт.	Прирост, % (шт.)
Подвесные канатные дороги	140	167	19,3 (27)
Буксировочные канатные дороги	486	521	7,2 (35)
Фуникулеры	2	2	0 (0)

На уровень безопасности подъемных сооружений оказывают влияние технические, технологические и организационные проблемы на поднадзорных предприятиях [35, 48]. Основной причиной снижения уровня безопасности в области надзора за подъемными сооружениями является большая доля оборудования, отработавшего расчетный ресурс. Сводные данные о среднем износе грузоподъемных технических устройств по состоянию на 1 января 2016 г. приведены в табл. 17 [79]. На рис. 126 представлены данные о количестве и относительной доле канатных дорог, отработавших свой нормативный срок службы, по федеральным округам Российской Федерации. Видно, что наибольшая доля канатных дорог, отработавших свой нормативный срок службы (75 % эксплуатирующихся канатных дорог), приходится на Северо-Кавказский федеральный округ. Это объясняется тем, что на Северном Кавказе началось широкое использованием данного вида транспорта для обслуживания горно-спортивных объектов.

Таблица 17

Сводные данные о среднем износе грузоподъемных технических устройств по состоянию на 1 января 2016 г.

Тип технического устройства	Общее количество технических устройств, шт.	Количество технических устройств, отработавших срок службы, шт.	Средний процент износа, %
Краны	204 780	140 915	68,8
Подъемники (вышки)	23 218	10 473	45,1
Лифты	527 567	150 173	28,5
Подвесные канатные дороги	213	29	13,6

Буксировочные канатные дороги	542	58	10,7
Фуникулеры	5	2	40,0
Эскалаторы	11 543	65	0,6
Строительные подъемники	4 946	683	13,8
Подъемники для инвалидов	3 254	5	0,2
Итого:	776 068	302 403	39,0

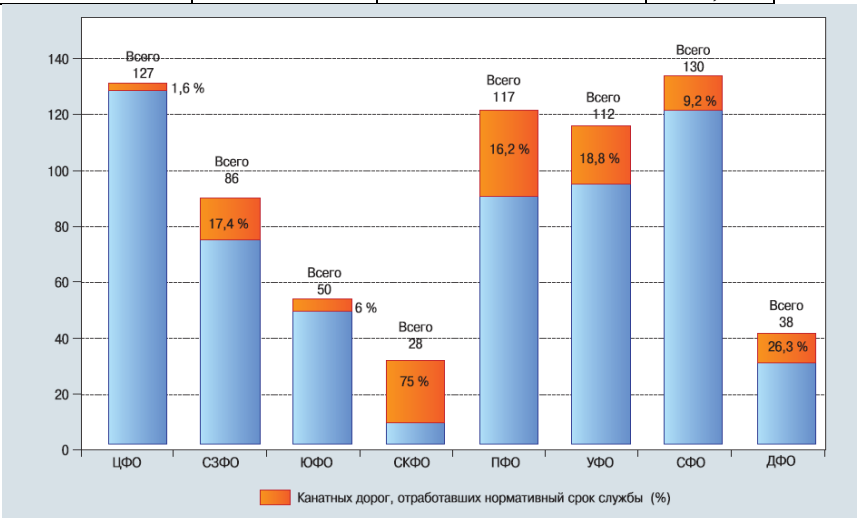


Рис. 126. Распределение количества и относительной доли канатных дорог,
отработавших свой нормативный срок службы, по федеральным округам
Российской Федерации

В 2015 г. на опасных производственных объектах, поднадзорных Ростехнадзору, произошло 53 аварии, что на 19 аварий (на 56 %) больше, чем в 2014 г., и 60 несчастных случаев со смертельным исходом, что на 9 смертельных несчастных случаев (на 18 %) больше, чем в 2014 г. Возросло количество пострадавших, получивших в результате групповых несчастных случаев тяжелые травмы: в 2015 г. – 20 травмированных, в 2014 г. – 14.

По количеству несчастных случаев пассажирские подвесные канатные дороги являются одним из самых безопасных видов транспорта. Однако и при их эксплуатации зафиксированы серьезные аварии, повлекшие за собой многочисленные человеческие

жертвы и критическое повреждение конструкций канатных дорог. Наиболее тяжелые несчастные случаи на канатных дорогах за последние десятилетия (по данным [79] и Skiresort Service International [121]):

- 29.08.1959 – в г. Сантос (Бразилия) произошел сход пассажирской кабины с главного троса с последующим падением на крутой склон. Погибло 31 человек.
- 29.08.1961 – в Белой долине региона Монблан между пиками Aiguille du Midi и Heilbronner реактивный истребитель допустил задевание крылом тягового каната с его последующим разрушением, в результате чего несколько пассажирских кабин упали на ледник. Погибло 9 человек.
- 12.07.1972 – между Беттеном и Беттмералем (Оберваль, Швейцария) произошел обрыв несущего каната. Погибло 13 человек.
- 26.10.1972 – на французской лыжном курорте Les Deux-Alpes к востоку от Гренобля в процессе испытания новой канатной дороги произошло столкновение с последующим падением двух пассажирских кабин. Погибло 9 человек.
- 09.03.1976 – в регионе зимнего отдыха Цермис вблизи Кавалезе (Триест, Северная Италия) произошел обрыв несущего каната, после чего полностью загруженная пассажирская кабина упала с высоты 60 м. Погибло 42 человека.
- 29.01.1983 – в Сингапуре произошло падение нефтяной вышки на линию канатной дороги, что привело к падению двух пассажирских вагонов. Погибло 7 человек.
- 13.02.1983 – в регионе Камполук (Италия) вследствие сильного ветра произошел срыв нескольких пассажирских кабин с несущих канатов, упавших на людей. Погибло 11 человек.
- Февраль 1990 – в Лейсине (Швейцария) произошел самопроизвольный сход пассажирской кабины с посадочной станции. Погиб 1 человек.
- 01.06.1990 – в Тбилиси (Грузия) в результате перегрузки пассажирских кабин и их неправильной установки во время технического обслуживания произошел срыв нескольких кабин с несущего каната с последующим самопроизвольным скольжением вниз до соударения с бетонной стеной посадочной станции. Погиб 21 человек, 45 человек получили тяжелые увечья.

- Февраль 1991 – в Шеффау (Австрия) из-за сильного порыва ветра происходит сход главного каната с промежуточной опоры. Погибло 7 человек, множество раненых.
- 29.01.1992 – в Насфельде (Каринтия, Австрия) произошло отцепление четырех кресел с несущего каната. Погибло 4 человека.
- 16.12.1996 – в Ридерале (Швейцария) произошла поломка оси шкива механизма привода. Погиб 1 человек, 18 человек ранены.
- Февраль 1997 – в Шпитталь ан дер Драу (Австрия) произошло отцепление пассажирской кабины в месте наибольшего провисания несущего каната. Ранено 25 человек.
- 26.10.1997 – в Ле Дез Альп (Франция) в процессе испытаний новой канатной дороги произошло столкновение с последующим падением двух пассажирских кабин. Погибло 9 человек.
- 03.02.1998 – в Флеймстале (Кавалезе, Италия) истребитель ВВС США в результате несанкционированного полета на малой высоте фюзеляжем разрушает несущий канат, что привело к падению пассажирской кабины с высоты 80 м. Погибло 20 человек.
- 01.07.1999 – в Сен-Этьен эн Деволю (Франция) произошло падение пассажирской кабины. Погибло 20 человек.
- 10.06.2000 – в Кацштайнтуннеле (Бавария, Германия) между Гармиш-Партенкирхеном и озером Айбзее произошло столкновение двух поездов. Получили серьезные травмы 57 человек.
- 06.07.2000 – в Оберстдорфе (Германия) происходит столкновение на высокой скорости пассажирской кабины с посадочной станцией. Погибло 7 человек.
- 20.01.2003 – в штате Гуджарат (Индия) в результате обрыва канатов произошло падение трех пассажирских кабин, в которых находились 68 человек. Погибло 7 человек, 45 получили тяжелые ранения.
- 02.04.2004 – в Армении на ереванской канатной дороге произошло падение пассажирского вагона, в котором находилось 8 человек, с высоты 15 м. Погибло 3 человека.
- 05.09.2005 – на горнолыжном курорте Зелбден (Тироль, Австрия) произошел обрыв несущего каната вследствие падения перемещаемого транспортным вертолетом

бетонного блока на одну из пассажирских кабин. Погибло 9 человек, 7 человек получили травмы различной тяжести.

- 17.09.2007 – в высокогорном туристическом центре «Цей» (Северная Осетия) из-за отключения электроэнергии остановилась канатно-кресельная дорога. При эвакуации погиб 1 человек.
- 18.02.2011 – на Эльбрусе в Баксанском районе (Кабардино-Балкария, Россия) вследствие подрыва несущих металлоконструкций подвесной канатной дороги «Азау-Старый Кругозор» упало 30 гондол. Погибших не было.
- 25.03.2011 – во Владикавказе (Северная Осетия) произошла резкая остановка канатной дороги вследствие того, что оборванный порывом сильного ветра канат соседней канатной дороги перебил кабель электропитания. Пострадал 1 человек и потребовалась эвакуация 115 человек.
- 13.01.2013 – в Сочи (Краснодарский край, Россия) произошло падение дерева на три пассажирские кабины. Пострадавших не было.
- 11.08.2013 – в Крыму (Россия) на маятниковой канатной дороге Ай-Петри из-за неисправности подшипникового узла шкива произошла аварийная остановка двух пассажирских вагонов (один – на высоте 50 м, другой – на высоте 145 м), в которых находилось 76 человек. Пострадавших не было.
- 18.01.2015 – в Южно-Сахалинске (о. Сахалин, Россия) из-за Самопроизвольного движения канатной дороги в обратную сторону произошло столкновение 15 пассажирских гондол. Находившиеся в гондолах люди получили травмы.
- 11.03.2015 – на альпийском курорте Валь Гарден (Италия) вследствие падения дерева на несущий канат произошла остановка канатной дороги. Пострадавших не было, для эвакуации 200 лыжников использовались спасательные вертолеты.
- 09.09.2016 – на границе Франции и Италии в горном массиве Монблан произошла аварийная остановка маятниковой канатной дороги на высоте 3600 м. Потребовалась эвакуация 110 человек.

Обобщенные данные об инцидентах и авариях на пассажирских канатных дорогах приведены в табл. 18 [70].

Таблица 18

Причины и количество инцидентов и аварий пассажирских подвесных канатных дорог в 1995–2015 гг.

Краткая характеристика причины инцидента или аварии	Количество
Техническое состояние, связанное с неисправностью механической части, электрооборудования, систем безопасности или ошибочными действиями персонала при эксплуатации и проведении эвакуации	17
Форс мажорные обстоятельства не связанные с эксплуатацией канатных дорог: природные явления (сейсмические воздействия, сход лавины, ураганный ветре), техногенные воздействия (падение летательного аппарата, диверсия и др.)	16
Итого:	33

Статистические исследования аварийных остановок на пассажирских подвесных канатных дорогах, а также анализ причин их возникновения свидетельствуют о том, что каждая четвертая-пятая аварийная остановка (а именно 22%) обусловлена отсутствием в конструкциях высокоэффективных и безопасных систем (узлов) спасения и эвакуации пассажиров (рис. 127) [43]. Обработка статистических данных по причинам аварий также показывает, что большинство их происходит вследствие неквалифицированных действий персонала или внешних антропогенных воздействий.

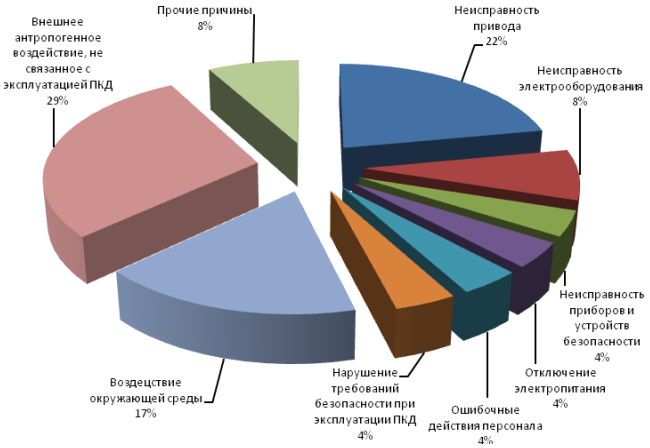


Рис. 127. Диаграмма распределения причин аварийных остановок канатных дорог

Почти 90% несчастных случаев со смертельным исходом произошло по таким организационным причинам, как нарушение производственной и технологической дисциплины, неправильные

или несогласованные действия обслуживающего персонала и неправильная организация производства работ. Иными словами, большинство несчастных случаев обусловлено так называемым человеческим фактором – низким уровнем профессиональной подготовки эксплуатационного персонала, ошибочным принятием решений исполнителями, незнанием требований нормативно-технических и распорядительных документов [59]. Таким образом, при эксплуатации пассажирского подвесного канатного транспорта в условиях возрастающих пассажиропотоков, обусловленных интенсивным развитием мобильности населения, и при отсутствии должного внимания к вопросам подготовки и переподготовки эксплуатационного персонала, в том числе к действиям в аварийных ситуациях, возможно увеличение количества аварий и несчастных случаев со смертельным исходом или нарушением здоровья.

Как следствие, при разработке проектов строительства пассажирских подвесных канатных дорог, в том числе и на основе инновационной технологии канатного метро, возникает необходимость разработки количественных методов оценки рисков перемещения пассажиров с помощью канатного транспорта и проведения эвакуационных мероприятий при возникновении нештатных ситуаций. Это будет способствовать созданию безопасных условий труда эксплуатационного персонала и пассажиров.

4.2. Методология проведения риск-анализа пассажирских канатных дорог на стадии проектирования

Канатный транспорт относится к линейным объектам, однако в действующей в настоящее время нормативно-распорядительной документации [98] требования к составу проектной документации на линейные объекты капитального строительства отсутствуют. Поэтому при разработке проекта строительства пассажирских подвесных канатных дорог необходимо разрабатывать требования к разделам проектной документации, а именно требования к эксплуатационной документации (руководству по эксплуатации), которая должна включать:

– указания по использованию и техническому обслуживанию канатного транспорта;

– меры по обеспечению безопасности при вводе и при эксплуатации объекта;

– перечень видов ремонта;

– требования к периодическому диагностированию и испытаниям;

– перечень критических отказов;

– перечень возможных ошибочных действий эксплуатационного персонала, приводящих к инциденту или аварии;

– действия персонала в случае критического отказа, инцидента или аварии;

– сведения о квалификации эксплуатационного персонала.

Проект по канатному транспорту должен содержать:

– обоснование риска травмирования персонала на всех рабочих местах, где может возникнуть описанные в плане эвакуации критические отказы, экспертным методом на основании анализа действия по устранению критических отказов;

– характеристики трассы, оборудования и инструментов, применяемых при эвакуации;

– характеристики средств индивидуальной защиты персонала;

– статистические данные.

В общем виде схема процесса менеджмента риска на этапе проектирования представлена на рис. 128.

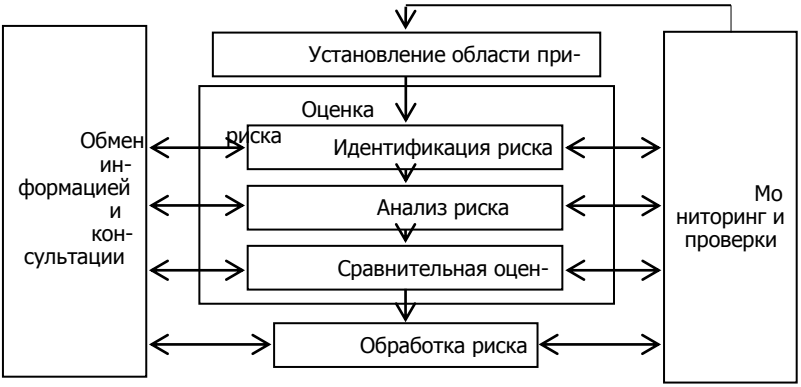


Рис. 128. Обобщенная схема процесса менеджмента риска проекта, применительно к канатному транспорту в соответствии с ИСО 31000

При определении критериев риска травмирования персонала при выполнении эвакуации на канатном транспорте необходимо рассмотреть [38, 42]:

– природу и причины источников риска, их вероятность;

– природу и возможные последствия, которые могут воз-

никнуть, а также способ определения их величины;

– границы интервала времени, в пределах которых возможно появление последствий;

– метод определения уровня риска;

– уровень приемлемого или допустимого риска;

– необходимость учета множественных рисков и (если да) виды и способ комбинаций, которые следует рассмотреть.

Должны быть разработаны критерии приемлемости и допустимости риска. Они используются для определения количественной оценки риска на более поздних стадиях процесса проектирования.

Существует ряд методов идентификации риска, а именно:

– мозговой штурм в пределах структуры ключевых элементов;

– экспертные оценки;

– интервью и анкетирование;

– контрольные листы;

– хронологические данные;

– данные испытаний и моделирования;

– формальные методы (метод анализа видов и последствий отказов FMEA, метод анализа опасностей и работоспособности HAZOP).

При идентификации риска большое значение имеет своевременная и актуализированная информация. По возможности, она должна включать соответствующую исходную информацию. В идентификации риска должны принимать участие сотрудники с соответствующими знаниями и использоваться все доступные источники информации.

Идентифицируя риск, необходимо выделить и проанализировать каждую стадию жизненного цикла объекта. Для решения поставленной задачи возможно применение процедуры анализа видов, последствий и критичности отказов.

Процедуру анализа видов, последствий и критичности отказов необходимо проводить для подтверждения, проверки достаточности, показателей эффективности и надзора за выполнением управленческих решений, нацеленным на усовершенствование технологии производства, конструкции и ремонта объекта. Она позволяет предупредить появление и (или) обеспечить ослабление тяжести потенциальных последствий его отказов, а также обеспечить необходимые характеристики безопасности, надежности и эффективности эксплуатации пассажирской подвесной канатной дороги.

Процедура анализа видов, последствий и критичности отказов дает возможность:

– обнаружить потенциальные виды отказов как конструкции в целом, так и ее составных частей, выявить возможные причины, условия их формирования и развития;

– установить потенциальные последствия возникновения выявленных отказов и провести анализ (качественный) тяжести возможных последствий отказов и/или оценку (количественную) их критичности;

– сформировать и итерационно исправлять реестры технологических процессов и критичных элементов;

– оценить эффективность предусмотренных мер и методов проверки диагностики и работоспособности канатной дороги для своевременного обнаружения и локализации ее отказов, подтвердить необходимость применения и внедрения дополнительных средств уведомления, контроля и диагностики;

– разработать методику рекомендаций и предложения по усовершенствованию производственной технологии канатной дороги и (или) конструкции в целом или ее составных элементов, нацеленных на минимизацию тяжести и (или) потенциальной вероятности последствий отказа, а также дать оценку ранее внесенных изменений;

– оценить эффективность предусмотренных превентивных и контрольно-диагностических мер в системе технологического обслуживания, призванных предупредить отказы канатной дороги в процессе эксплуатации, сформировать корректирующие методы и периодичность технического обслуживания;

– разработать эксплуатационную документацию по правилам поведения персонала в аварийных (экстренных) ситуациях, произошедших из-за потенциально возможных отказов канатной дороги, сформировать средства по их усовершенствованию, а также вносить дополнения в документацию при их отсутствии;

– проанализировать потенциальные ошибки обслуживающего персонала в процессе эксплуатации, технического обслуживания и ремонта канатной дороги, разработать методы защиты ее функционирования от ошибочных действий работников, модернизации технической, эксплуатационной и ремонтной инструкций.

Кроме того, процедура анализа видов, последствий и критичности отказов предоставляет первичную информацию для планирования системы технического обслуживания и необходимого ремонта канатной дороги и разработки или модернизации обучающих и тренировочных методик для обслуживающего пер-

сонала.

В процедуре анализа видов, последствий и критичности отказов можно выделить базовые принципы. В широком смысле указанная процедура основывается на сочетании качественного анализа типов отказов объекта и их потенциальных последствий с количественной оценкой отказов, учитываемых при эксплуатации.

Она позволяет провести промежуточную количественную оценку и произвести ранжирование выявленных потенциальных отказов канатной дороги по степени критичности последствий их возникновения с целью проведения в дальнейшем детальных анализа и оценки тяжести. Данная процедура позволяет выстроить методику по модернизации канатной дороги, ее технологического производства и системы технического и ремонтного обслуживания.

Следует учитывать, что для объективной качественной оценки последствий отказов перед проведением процедуры анализа видов, последствий и критичности отказов необходимо систематизировать отказы на основании категории критичности их потенциальных последствий. Систематизация может быть применена к конкретному объекту или же внесена в соответствующий нормативный документ, регламентирующий работу группы объектов.

Группирование отказов по критичности их последствий формируется на основании следующих различных сочетаний:

– уровня влияния опасности отказа на здоровье и жизнь человека (в том числе, обслуживающего персонала), на окружающую среду, на сам объект, на сохранность имущества окружающих объектов;

– скорости возникновения негативных последствий в результате отказа, призванной определить потенциальность принятия решений по защите от отказов или минимизации их воздействия;

– воздействия отказа на качественный уровень работы канатной дороги и комплексность заданных ей функций, потенциальные негативные последствия, которые могут произойти из-за снижения эффективности работы или полного невыполнения заданных функций.

Процедура анализа видов, последствий и критичности отказов дает возможность предварительно качественно оценить частоту возникновения отказов различных уровней тяжести в период эксплуатации канатной дороги. Подобная оценка используется для распределения отказов по порядку необходимости усовер-

шенствования (доработки) объекта в превентивных целях с помощью матриц «вероятность отказа – тяжесть последствий» (табл. 19) и для ранжирования по шкале бальных оценок критических отказов (табл. 20–22).

Таблица 19
Матрица «Вероятность отказа – тяжесть последствий» для распределения отказов при проведении анализа видов, последствий и критичности отказов применительно к канатному транспорту

Прогнозируемая частота проявления отказа	Тяжесть последствий*			
	катастрофический отказ (категория IV)	критический отказ (категория III)	некритический отказ (категория II)	отказ без проявления негативных последствий (категория I)
Частый	A	A	A	C
Вероятный	A	A	B	C
Возможный	A	B	B	D
Редкий	A	B	C	D
Маловероятный	B	C	C	D

****Примечание:*** A – требуется всесторонний количественный анализ критичности; B – рекомендуется количественный анализ критичности; C – возможно использование только качественного анализа; D – анализ не требуется.

Таблица 20
Балльная оценка вероятности отказа

Виды отказов по вероятности возникновения за время эксплуатации	Ожидаемая вероятность отказов, полученная расчетом или экспериментально	Оценка вероятности отказа B_1, балл
Отказ практически невероятен	Менее 0,00005	1
Отказ маловероятен	0,00005…0,0001	2
Отказ имеет малую вероятность, обусловленную только точностью расчета	0,0001… 0,0005	3
Умеренная вероятность отказа	0,0005 … 0,001	4
Отказы возможны, но при испытаниях или в эксплуатации изделий-аналогов не наблюдались	0,001 … 0,005	5
Отказы возможны, наблюдались при испытаниях или в эксплуатации изделий-аналогов	0,005 … 0,01	6
Отказы вполне вероятны	0,01 … 0,05	7
Высокая вероятность отказов	0,05 … 0,1	8
Вероятны повторные отказы	Более 0,11	10

Таблица 21
Балльная оценка последствий отказов

Характеристика последствий отказов	Оценка последствий отказов B_2, балл
Отказ не приводит к заметным последствиям, потребитель вероятно не обнаружит наличие неисправности	1
Последствия отказа незначительны, но потребитель может выразить неудовольствие его появлением	2…3
Отказ приводит к заметному для потребителя снижению эксплуатационных характеристик и (или) к неудобству применения изделия	4…6
Высокая степень недовольства потребителя, изделие не может быть использовано по назначению, но угрозы безопасности отказ не представляет	7…8
Отказ представляет угрозу безопасности людей или окружающей среды	9…10

Таблица 22
Балльная оценка вероятности обнаружения отказа до поставки изделия потребителю

Виды отказов по вероятности обнаружения до поставки	Вероятность обнаружения отказа, определенная расчетом или экспериментально	Оценка вероятности обнаружения отказа B_3, балл
Очень высокая вероятность выявления отказа при контроле, сборке, испытаниях	Более 0,95	1
Высокая вероятность выявления отказа при контроле, сборке, испытаниях	0,95…0,85	2…3
Умеренная вероятность выявления отказа при контроле, сборке, испытаниях	0,85… 0,45	4…6
Высокая вероятность поставки потребителю дефектного изделия	0,45 … 0,25	7…8
Очень высокая вероятность поставки потребителю дефектного изделия	Менее 0,25	9…10

В табл. 23 приведена шкала отнесения отказов канатного транспорта к категории тяжести негативных последствий этих отказов, а в табл. 24 – качественные оценки частоты отказов для линейных канатных дорог и канатного метро как общественного транспорта.

Таблица 23
Шкала для определения категории тяжести

негативных последствий отказа для канатного транспорта

Категория негативного последствия	Характеристика негативного последствия
IV	Отказ, который может повлечь за собой существенный ущерб для жизни и здоровья граждан, имущества третьих лиц, окружающей среды, работоспособности канатного транспорта
III	Отказ, который может повлечь за собой ущерб для окружающей среды и работоспособности канатного транспорта, не создающий угрозы жизни и здоровья граждан, имущества третьих лиц
II	Отказ, который может повлечь за собой нарушение оперативной готовности функционирования канатного транспорта и его эффективности без создания угрозы жизни и здоровья граждан и окружающей среды
I	Отказ, который может повлечь за собой снижение эффективности функционирования канатного транспорта, без создания угрозы жизни и здоровья граждан и окружающей среды

Таблица 24

Качественные оценки частоты отказов для канатного транспорта

Виды отказов по частоте	Качественная характеристика отказов по частоте	
	для канатной дороги линейного типа	для канатного метро как сети общественного транспорта
Частый	Регулярное появление	Постоянное проявление
Вероятный	Возможное проявление несколько раз за срок службы	Регулярное проявление
Возможный	Разовые проявления	Возможное проявление несколько раз за срок службы
Редкий	Маловероятное проявление	Разовые проявления в течение срока службы
Невозможный	Проявление в исключительных случаях	Маловероятное проявление

Процедура анализа видов, последствий и критичности отказов оценивает критичность отказов с помощью следующих показателей, характерных для каждого рассматриваемого отказа. Первым показателем является вероятность возникновения отказа процессе эксплуатации объекта. Следующий показатель – риск возникновения потенциальных негативных последствий отказа (при возможности появления различных по критичности и характеру последствий). Третий показатель представляет собой масштаб потенциального ущерба как следствие каждого из предполагаемых отказов.

Чаще всего показатель критичности отказа есть не что

иное, как вероятность его наступления, умноженная на усредненный размер ущерба, однако существуют и другие методы измерения критичности отказов [6, 47, 66].

Процедура анализа видов, последствий и критичности отказов при измерении потенциального ущерба в результате негативных последствий каждого отказа использует баллы (по определенной шкале) или определенные показатели. Чаще балльная шкала разрабатывается к каждому конкретному объекту по определенной методике, однако может использоваться и для группы объектов, установленных процедурой анализа видов, последствий и критичности отказов. Существуют объекты, для которых использовать абсолютные оценки отказов нерационально или невозможно по ряду причин, поэтому к ним также применяется балльная оценка потенциального ущерба.

Если речь идет о показателях, то используются числовые характеристики, которые соотносятся с функцией потери. В таких случаях используется моделирование нестандартных или аварийных ситуаций, в результате которых происходит отказ.

Учитывая вышеперечисленное, можно сделать вывод, что процедура анализа видов, последствий и критичности отказов достаточно эффективна. Необходимость ее выполнения для конкретного объекта определяется при согласии заинтересованных сторон и при формировании требований к методике обеспечения надежности, вносимых в контрактную и техническую документацию.

Рассмотрим порядок анализа и методику его проведения.

Государственные стандарты определяют группу объектов, для которых рекомендовано провести процедуру анализа видов, последствий и критичности отказов. Среди них объекты, потенциальные отказы которых могут нанести вред окружающей среде, причинить серьезный экономический ущерб, представить угрозу безопасности людей. Также важно выделить объекты, на которых невозможно провести непосредственное экспериментальное подтверждение соответствия, в результате чего требования безопасности могут быть установлены только расчетными методами.

Существует ряд случаев, когда процедура анализа видов, последствий и критичности отказов является обязательной. В их число входят такие случаи, когда отсутствуют данные для оценки надежности объекта другими методами или их недостаточно для конкретного этапа жизненного цикла объекта.

В случаях, когда цели анализа могут быть достигнуты другими (более эффективными) методами, процедура анализа видов,

последствий и критичности отказов не применяется.

Этапы проведения процедуры анализа видов, последствий и критичности отказов включают:

Этап 1. Определение этапов по видам работ в соответствии со стадией жизненного цикла объекта.

Этап 2. Определение методов работы на каждом этапе жизненного цикла объекта на основании нормативных регламентов и методик.

Этап 3. В случае отсутствия нормативного регламента производится формирование необходимой методики анализа видов, последствий и критичности отказов.

Этап 4. Установление уровня ранжирования объекта, начиная с которого процедура анализа видов, последствий и критичности отказов будет проводиться поэтапно.

Этап 5. Структурная характеристика анализа на каждом этапе (дистрибуция полномочий и ответственности по этапам проведения и реализации результатов, способы отчетности, реализация результатов анализа).

Этап 6. Проведение контроля выполнения, оформления и реализации результатов анализа видов, последствий и критичности отказов со стороны заказчика.

Анализ необходимо начинать на наиболее ранних этапах создания проекта канатной дороги, а затем регулярно повторять на более поздних этапах в процессе амортизации конструкции объекта и технологии его производства. Процедурой анализа видов, последствий и критичности отказов для более поздних этапов строительства канатной дороги необходимо предусмотреть инспектирование полноты реализации и продуктивность мер по доработкам, запланированных на ранних этапах.

Вне зависимости от этапа жизненного цикла объекта рассмотрение начинается с процедуры анализа видов, последствий и критичности отказов объекта, что дает возможность определить целесообразность дальнейшего углубленного количественного анализа и диагностики критичности различных видов потенциально возможных отказов.

К основаниям для определения уровня декомпозиции объекта, с которого начинает проводиться процедура анализа видов, последствий и критичности отказов на определенном этапе его формирования относятся:

– необходимые результаты анализа;

– уровень инновационности технических решений, использованных в конструкции объекта и его составных элементов;

– уровень инновационности методов производства, эксплуатационного обслуживания, процедур обработки всех видов документации (технологической, конструкционной и эксплуатационной).

Наряду с другими равными условиями, инновационные технологические конструкции, сформированные на новейших элементных базах, нуждаются в более глубоком и детально анализе, чем традиционные конструкции и технологии производства объекта и его составных элементов. Это в полной мере относится к пассажирским канатным дорогам на основе инновационной технологии канатного метро.

Весьма важно рационально сформировать перечень видов потенциальных отказов объекта и его составных элементов, основываясь на существующих у аналогичных по конструкции и функциональному назначению объектов отказов и дополнив их, при необходимости, другими отказами, характерными только для анализируемого объекта.

Содержание методики анализа видов, последствий и критичности отказов показано на рис. 129 [79]. В табл. 25 содержится характеристика отчетов, составленных по результатам проведения процедуры анализа видов, последствий и критичности отказов.

Рис. 129. Содержание методики анализа видов, последствий и критичности отказов

Таблица 25

Характеристика отчетов, составленных по результатам

проведения процедуры анализа видов, последствий и критичности отказов

Содержание отчета	Предложения, касающиеся последующих этапов разработки
Формальные характеристика объекта с указанием целей анализа и уровнем декомпозиции	Замена используемых материалов и комплектующих изделий
Характеристики методики проведенного анализа	Изменения конструкции с целью снижения возникновения потенциальных отказов до минимального (приемлемого) уровня
Сформированные рабочие листы	Изменения, направленные на возрастание устойчивости функционирования объекта в случае возникновения отказов
Общие результаты анализа (реестр потенциальных отказов, классифицированных по типам, условиям и причинам появления, возможным последствиям и критичности	Внесение дополнительных или изменение методов надзора, диагностики и представления отказов, порядок проверки технического состояния и технического обслуживания объектов в период эксплуатации
Заключение о возможности выхода на последующий этап разработки объекта или переработке проекта, если указанные недостатки невозможно устранить на следующих этапах	Занесение в эксплуатационную инструкцию действий персонала при возникновении критических отказов, призванных минимизировать их последствия

Существуют различные методы анализа видов, последствий и критичности отказов, среди которых выделяют следующие:

– структурный;
– функциональный;
– комбинированный.

В основе структурного метода лежит метод индукции, так как применяется он на простых объектах, отказы на которых локализованы. При этом следует учитывать, что последствия потенциальных отказов начального отобранного уровня декомпозиции должны отражаться на всех последующих уровнях структуры объекта. Основные операции по структурному методу анализа видов, последствий и критичности отказов представлены на рис. 130.

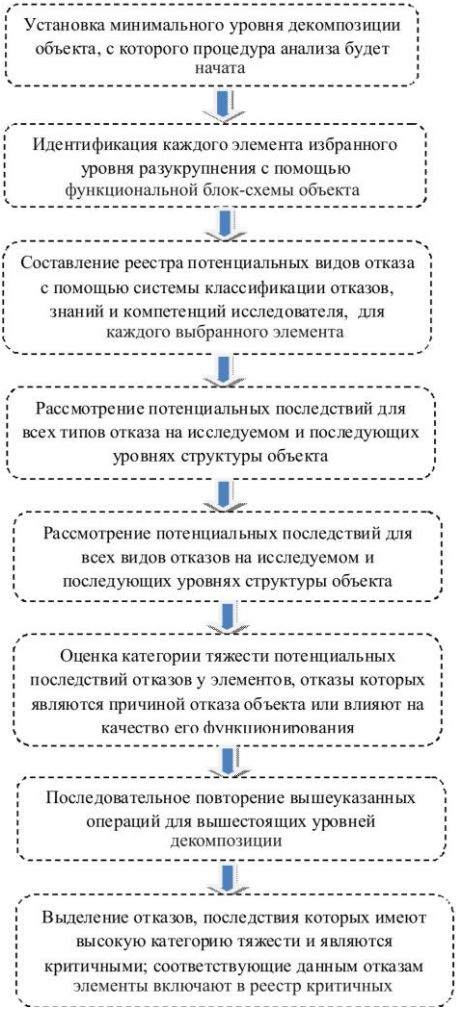


Рис. 130. Основные операции по структурному методу анализа видов,

последствий и критичности отказов

У каждого типа критичного элемента можно определить:

– состоятельность предложенных и предпринятых мер для выявления, локализации и индикации отказа;

– потенциальные меры, позволяющие сохранить функциональность объекта при отказе (резервирование, смена алгоритма работоспособности, реформируемая структура);

– потенциальные меры по минимизации отказов (использование в щадящем режиме, использование системы перегрузочной защиты, вспомогательные экспертизы и испытания при производстве и эксплуатации);

– допустимые превентивные меры для наиболее критичных отказов (система сигнализации, дополнительные правила по действию обслуживающего персонала и т.д.).

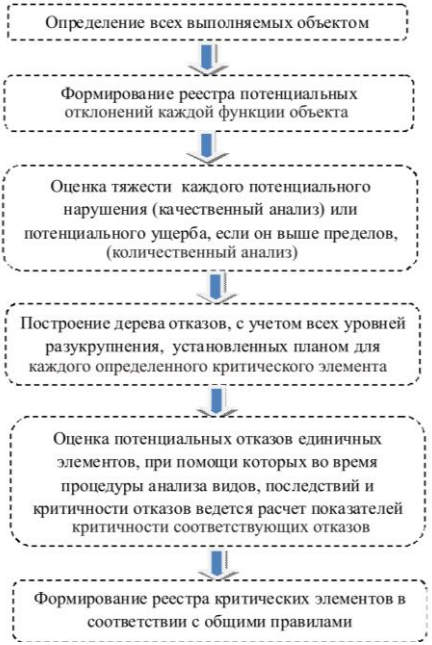


Рис. 131. Основные операции
по функциональному методу анализа видов,
последствий и критичности отказов

При функциональном методе, в отличие от структурного, используется метод дедукции. Данный метод применяется для комплексных многофункциональных объектов, у которых сложные зависимые отказы сложно локализировать. Основные операции по функциональному методу анализа видов, последствий и критичности отказов представлены на рис. 131 [79].

Комбинированный метод представляет собой сочетание двух вышеописанных методов – структурного и функционального. При любом из указанных методов этап 1 должен быть построен по определенному алгоритму [79]:

– формирование списка и содержания каждой функциональной задачи, которые выполняются объектом в процессе эксплуатации, а также функций, требуемых объекту для исполнения каждой задачи с учетом определения всех элементов указанного и вышестоящего уровня;

– кодировка функций и элементов объектов согласно принятой системе кодирования;

– изложение режима и условий осуществления определенных функций, иллюстрируемых в виде диаграмм временного характера или циклограмм нагружения объекта и его элементов;

– компиляция блок-схемы функционирования объекта и структурированной схемы надежности объекта.

4.3. Оценка профессионального риска персонала при устранении критических отказов и мероприятия по снижению травмоопасности

С точки зрения безопасности по способам эвакуации пассажиров и условий труда персонала канатные дороги можно условно разбить на два типа.

Тип 1. Конструкции оборудования канатного транспорта этого типа представляют собой одно- или двухканатные системы с отцепляемыми и неотцепляемыми зажимами. Они обладают элементами частичного дублирования, которые предусматривают проведение спасательной операции, в том числе, путем эвакуации пассажиров из подвижного состава на землю. Обязательными требованиями к резервированию является наличие второго источника питания и резервного (аварийного) привода. С точки зрения эффективности организации эвакуации пассажиров применение оборудования канатного транспорта этого типа значительно ограничивает его использование в качестве городской, пригородной или территориальной транспортной системы.

Тип 2. Современное оборудование канатного транспорта данного типа, например, кольцевые многоканатные системы 3S, предусматривает гарантированную доставку пассажиров на станции при любых сценариях наступления и развития критических отказов (инциденте или аварии) без эвакуации пассажиров из подвижного состава на землю.

Из литературных источников известны следующие технологии проведения эвакуации:

– спуск пассажиров из подвижного состава на землю, используя альпинистское снаряжение (спуск пассажира из подвижного состава с помощью каната вручную или с применением лебедки);

– свободное движение подвижного состава при растормаживании привода;

– специальный спасательный подвижной состав (вагон, кабина, гондола, платформа), перемещаемый посредством дополнительного тягового каната или автономного движителя;

– частичное размыкание зажима и стягивание подвижного состава по канату к месту эвакуации;

– использование средств резервирования для передвижения подвижного состава к станциям.

Таким образом, для использования канатного транспорта в качестве городской или пригородной общественной транспортной инфраструктуры, представляет интерес только применение оборудования второго типа, что требует наличия систем полного резервирования, гарантирующих доставку пассажиров на станции при любом сценарии возникновения и развития критического отказа.

Критические отказы оборудования на канатном транспорте по месту их возникновения можно разделить на 4 категории [79]:

– отказы на трассе;

– отказы на приводной и промежуточной станциях;

– отказы привода или оборудования обводной станции;

– отказы системы управления.

Для всех критических отказов оборудования канатных дорог составляется своя технологическая карта, в которой должен содержаться перечень потенциально подверженных критическим отказам конструктивных элементов, узлов, механизмов, агрегатов и систем, а также меры по их устранению или резервированию, в том числе, указывается трудоемкость выполнения данных работ с учетом квалификации обслуживающего персонала.

Как правило, на канатном транспорте используются системы резервирования в виде дублирования (с кратностью резерва, равной 1). Дублирование – осуществляется с восстановлением отказавших основных элементов без нарушения работоспособности системы в целом.

Дублирование деталей, узлов, механизмов и агрегатов на действующих пассажирских подвесных канатных дорогах включает следующие мероприятия [68]:

– два независимых источника питания;

– система электропитания с независимым приводом (генератор);

– аварийный привод, обеспечивающий движение подвижного состава с пониженной скоростью;

– два тормоза (рабочий и аварийный);

– дублирование зажимов, удерживающих подвижный состав на несущем стальном канате;

– независимый аварийный привод на отклоняющем шкиве, обеспечивающем движение подвижного состава;

– многоканатные системы, позволяющие подвижному составу перемещаться при отсутствии одного из элементов;

– устройства, предотвращающие перехлест тяговых и несущих канатов (подвесные опоры);

– деактивация основного (перевод в неактивное состояние) и активация аварийных подшипников на приводном, обводном и отклоняющих шкивах;

– отключение основного приводного механизма в сборе от приводного шкива;

– передвижение подвижного состава вдоль канатов при дефектном или потерянном ходовом ролике подвесной каретки;

– функциональное резервирование (параллельное) колесных конвейеров системы разгона и торможения на станциях;

– наличие дополнительного (гидравлического) аварийного привода системы разгона и торможения колесных конвейеров;

– наличие оборудования и инструмента на промежуточных опорах для подъема сошедшего или частично сошедшего несущего или тягового каната;

– дублирование системами управления;

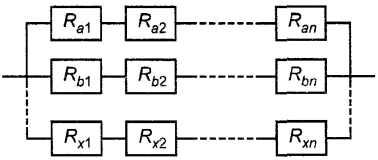
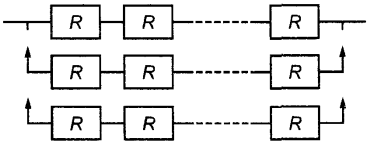
– ручное управление приводами.

Для оборудования канатного транспорта второго типа с кольцевым движением каната при проведении спасательной операции предусмотрено, что петля тягового (несуще-тягового) каната всегда перемещается и поэтому возможен возврат подвижного состава на станции. Данная операция обеспечивается наличием элементов резервирования при конструировании, а также организационно-технологическими мероприятиями, при которых задействован обслуживающий персонал.

К техническим мерам относится использование различных систем резервирования, структурные схемы которых и формулы для определения риска оценки безопасности приведены в табл. 26 [26].

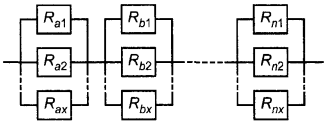
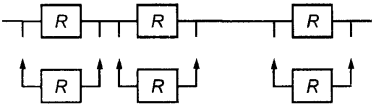
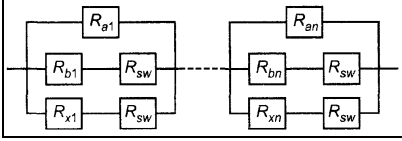
Таблица 26

Зависимости для определения риска канатных дорог с учетом резервирования ответственных элементов

Структурная схема резервирования канатной дороги	Расчетные зависимости для определения риска
1	2
1. Параллельно-последовательное соединение или система с резервированием	1.1. Нагруженный резерв с различными элементами $R_s = 1-(1-R_{a1}R_{a2}...R_{an})$; $R_s = 1-(1-R_{b1}R_{b2}...R_{bn})$; $R_s = 1-(1-R_{x1}R_{x2}...R_{xn})$
1.1. Нагруженный резерв  	1.2. Нагруженный резерв с одинаковыми последовательными элементами $R_{a1} = R_{a2} = ... = R_{an}$; $R_{b1} = R_{b2} = ... = R_{bn}$; $R_{x1} = R_{x2} = ... = R_{xn}$: $R_s = 1-(1-R_a^n)(1-R_b^n)...(1-R_x^n)$. 1.3. Нагруженный резерв с одинаковыми параллельными и последовательными элементами $R_{ai} = R_{bi} = ... = R_{xi} = R$: $R_s = 1-\prod(1-R^n)$
1.2. Ненагруженный резерв  	1.4. Ненагруженный резерв $P = \exp(-\lambda t)$; $R_s = \exp(-n\lambda t) + n\lambda t \exp(-n\lambda t) + ... +$ $+\dfrac{(n\lambda t)^{x-1}\exp(-n\lambda t)}{(x-1)!}$

Окончание табл. 26

1	2
2. Последовательно-параллельное соединение резервированных элементов	2.1. Нагруженный резерв $R_s = (1-(1-R_{a1})(1-R_{a2})...(1-R_{ax})\times$ $\times(1-(1-R_{b1})(1-R_{b2})...(1-R_{bx})\times...\times$ $\times(1-(1-R_{n1})(1-R_{n2})...(1-R_{nx})$.
2.1. Нагруженный резерв	2.2. Нагруженный резерв с одинаковыми

	параллельными элементами $R_{a1} = R_{a2} = ... = R_a$; $R_{b1} = R_{b2} = ... = R_b$; $R_{n1} = R_{n2} = ... = R_n$: $R_s = 1 - \prod(1 - R_a)\prod(1 - R_b)...\prod(1 - R_n)$. 2.3. Нагруженный резерв с одинаковыми последовательными элементами $R_{ai} = R_{bi} = ... = R_{xi} = R$:
2.2. Ненагруженный резерв 	2.4. Ненагруженный резерв $P = \exp(-\lambda t)$: $R_s = \left[e^{\frac{\lambda t}{n}} + \frac{\lambda t}{n} e^{\frac{\lambda t}{n}} \right]^n$
3. Резервированные элементы с подключением 	3.1. Нагруженный резерв, x=2 и $R_{ai} = R_{bi} = ... = R_{xi} = R = e^{-\lambda t}$ (исключая R_{sw}): $R_s = e^{-\lambda t} + e^{-(\lambda + \lambda_{sw})t} - e^{-(2\lambda + \lambda_{sw})t}$

Одним из основных вопросов для ненагруженного резервирования является определение коэффициента готовности (вероятность того, что объект будет находиться в работоспособном состоянии в определенный момент времени) и определение коэффициента оперативной готовности (вероятность того, что объект будет находиться в работоспособном состоянии в определенный момент времени и будет функционировать в течение определенного периода времени).

Для проведения эвакуации пассажиров из подвижного состава канатного метро авторами предлагаются инновационные структуры и конструкции с функцией постоянного резервирования. Они работают по принципу нагруженного резерва, а случае выхода из строя элемента или узла резервной группы функционирование канатной дороги осуществляется оставшимися элементами без необходимости ручной регулировки или переключений.

Идея постоянного резервирования заключается в применении распределенного привода: замена единственного центрального привода (монопривода) на многоприводную распределенную систему приводов по длине трассы – активную роликовую бата-

рею, установленную на промежуточных станциях или опорах (рис. 132).

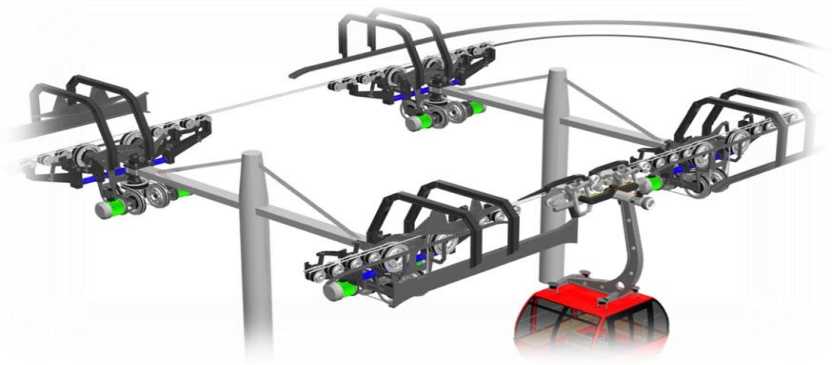


Рис. 132. Компьютерная модель канатного метро с дискретным приводом
(активная роликовая батарея), установленным на промежуточных станциях
или опорах

Помимо функций постоянного резервирования конструкция с промежуточными приводами обладает рядом других преимуществ, к которым можно отнести:

– снижение общей нагрузки на несущий или несуще-тяговый канат (тяговое усилие распределяется только между двумя соседними приводами);

– уменьшение диаметра каната и его массы;

– постоянная готовность к использованию;

– облегченные конструкции в целом (меньше бетонных работ и металлоконструкций);

– уменьшение энергопотребления (до 30%);

– упрощение монтажа и сервиса;

– гибкость планирования трассы;

– отсутствие ограничения по длине трассы;

– возможность увеличения скорости дороги и др.

В соответствии с требованием Федерального закона [105] организация, эксплуатирующая пассажирские подвесные канатные дороги, обязана:

– обеспечивать укомплектованность штата работников (персонала);

– допускать к работе лиц, удовлетворяющих соответствующим квалификационным требованиям и не имеющих медицинских противопоказаний;

– обеспечивать проведение подготовки и аттестации работников в области промышленной безопасности.

Предприятия, эксплуатирующие канатный транспорт, создают организационную структуру по системе управления производственной безопасности и охраной труда, предусматривающую уголовную ответственность руководства за ее выполнение и административную ответственность персонала. Следует отметить, что требования промышленной безопасности и охраны труда при эксплуатации канатного транспорта тесно увязаны.

В подразделе «Процедура выявления опасностей травмирования работников и оценки их уровня профессиональных рисков» типового положения о системе управления производственной безопасности и охраной труда отражаются основные составляющие процедуры, к которым относятся:

– идентификация опасностей травмирования персонала;

– оценка профессиональных рисков.

Рассмотрим пример критических отказов для кольцевой канатной дороги типа 3S, оснащенной узлами и механизмами резервирования, в том числе, опишем действия персонала по возобновлению ее работы (табл. 27) [72].

Таблица 27

Критические отказы и соответствующие действия персонала

Номер п/п	Наименование отказа X_i	Место отказа	Действия по устранению критических отказов Y_i
1	2	3	4
1	Перехлест тягового каната с несущим, X_1	Трасса	Устранение перехлеста тягового каната с помощью специальных средств, Y_1
2	Частичный сход тягового каната, X_2	Трасса	Подъем тягового каната с помощью инструментов, находящихся на каждой линейной опоре, Y_2
3	Отказ электропитания, X_3	Станция	Работа с аварийным приводом, используя электропитание от аварийного генератора или от второго источника питания, Y_3
4	Отказ станционного конвейера на станции, X_4	Станция	1. Отказ подшипникового узла конвейера, электродвигателя – отсоединение колесного конвейера. 2. Отказ частотного преобразователя – механически соединить колесный конвейер на станционной дуге. 3. Отказ системы управления канатной

			дороги – работа с аварийным приводом. 4. Отказ система разгона или торможения – запустить систему резервирования по механической или электрической части, Y_4
5	Отказ приводного механизма, X5	Привод/ обводная станция	Вращение возможно – работа с аварийным приводом. Вращение невозможно – отсоединение приводного механизма, расцеплением цепной муфты, работа со вторым аварийным приводом, Y5

Окончание табл. 27

1	2	3	4
6	Отказ подшипникового узла шкива, X_6	Привод/ обводная станция	Деактивация основного подшипника – аварийное возвращение канатной дороги на станцию с помощью аварийного подшипника, Y_6
7	Отказ аварийного привода на приводной станции, X_7	Привод/ обводная станция	Ввод в эксплуатацию второго аварийного привода на приводной станции, Y_7
8	Отказ системы управления канатной дороги, X_8	Управление	Работа с аварийным приводом. Колесные конвейеры приводятся в движение непосредственно по сигналу тахогенератора шкива – через частотный преобразователь, Y_8
9	Отказ тахогенератора на шкиве, X_9	Управление	Ручной режим, Y_9

Анализ действия по устранению критических отказов Y_i, приведенный в табл. 27, позволяет выделить работы, выполняемые эксплуатационным персоналом Ng_i и персоналом более высокой квалификации – выполняющего ремонт и техническое обслуживание Mk_i. Привлечение специальных спасательных подразделений для проведения работ по эвакуации не требуется при всех возможных критических отказах.

В табл. 28 указаны вероятности опасных ситуаций во время действий персонала при устранении критических отказов.

Таблица 28

Вероятность опасных ситуаций действие персонала при устранении критических отказов

Номер п/п	Действия по устранению критических отказов	Квалификация персонала	Балльная оценка риска травмирования	Вероятность опасной ситуации
1	$У_1$	Mk_1	9	$10^{-1} \ldots 10^{-3}$
2	$У_2$	Mk_2	10	$10^{-1} \ldots 10^{-3}$
3	$У_3$	Ng_3	5	$10^{-3} \ldots 10^{-5}$
4	$У_4$	Ng_4	5	$10^{-3} \ldots 10^{-5}$
5	$У_5$	Ng_5	7	$10^{-3} \ldots 10^{-5}$
6	$У_6$	Ng_6	6	$10^{-3} \ldots 10^{-5}$
7	$У_7$	Ng_7	4	Менее 10^{-5}
8	$У_8$	Ng_8	4	Менее 10^{-5}

9	$У_9$	Ng_9	5	$10^{-3} \ldots 10^{-5}$

Оценку профессиональных (индивидуальных) рисков на рабочем месте для персонала необходимо проводить для всех идентифицированных опасностей травмирования на основе установленных элементов риска: вероятности опасной ситуации, в результате которой может быть причинен этот ущерб.

Уровень профессионального риска (величина и степень) персонала рекомендуется определять с применением матрицы оценки риска, приведенной в табл. 29.

Таблица 29

Матрица оценки профессионального риска
персонала пассажирской подвесной канатной дороги

Класс травмо-опасности	Характеристика потенциального риска причинения вреда здоровью	Риск причинения вреда здоровью	Периодичность проведения
I класс	Чрезвычайно высокий	Более 10^{-1}	Ежемесячно
II класс	Высокий	$10^{-1} \ldots 10^{-3}$	Один раз в квартал
III класс	Средний	$10^{-3} \ldots 10^{-5}$	Один раз в 6 месяцев
IV класс	Низкий	Менее 10^{-5}	Совмещать с ежегодными техническими обслуживаниями

Получив по результатам риск-анализа численные значение технической, технологической и организационной опасностей, следует определить результирующее значение риска проведения эвакуации пассажиров применительно к проектируемому канатному транспорту.

Рекомендации по принятию решения по снижению травмоопасности персонала с учетом параметров риска канатного транспорта приведены в табл. 30.

Таблица 30

Мероприятия по снижению травмоопасности
с учетом параметров риска канатного транспорта

Класс травмоопасности и характеристика потенциального риска причинения вреда здоровью	Форма контрольно-надзорного мероприятия	Мероприятий по уменьшению риска травмирования
I класс (чрезвычайно высокий)	Экспертиза проектной документации. Проведение реконструкции канатной дороги	Внесение изменения в структурную схему канатной дороги, конструкцию систем резервирования, используемое оборудование и применяемый инструмент

II класс (высокий)	Экспертиза технологической документации. Разработка нового плана эвакуации	Внесение изменения в план эвакуации и технологическую пооперационную карту использования средств резервирования
III класс (средний)	Контроль со стороны отдела охраны труда. Увеличение частоту работы постоянно действующей комиссии по допуску персонала к работе	Увеличение частоты проведения проверки знаний, умений, навыков и тренировок по эвакуации
IV класс (низкий)	Ежегодные технические обследования	Использование существующей системы управления безопасностью

4.4. Обоснование безопасных условий труда персонала канатного метро за счет мероприятий технического, технологического и организационного характера

На начальном этапе разработки проекта строительства пассажирской подвесной канатной дороги на основе технологии канатного метро (в техническом задании) обосновываются технические требования к проведению эвакуации путем доставки пассажиров в подвижном составе на ближайшие посадочные станции при любом возможном сценарии, связанном с критическим отказом. Эти требования формулируются с учетом профиля трассы и ландшафта местности, предполагаемого оборудования и конструкций элементов канатного метро, системы резервирования и т.д.

Технологические требования заключаются в оценке риска при проведении эвакуации, при проведении которой учитывается структурная схема канатного метро, надежность ее элементов, коэффициент готовности узлов, агрегатов и т.д.

Организационные меры должны обеспечивать проведение эвакуации пассажиров с минимальной численностью персонала в течение отведенного для этой операции времени при обеспечении необходимых безопасных условий труда для осуществления необходимых действий. Современные конструкции канатного транспорта локализуют критические отказы резервирующими системами и позволяют проводить эвакуацию путем перемещения подвижного состава на станцию. Важнейшей функцией персонала, регламентированной в должностных и производственных ин-

струкциях, является участие персонала в эвакуации пассажиров с использованием систем резервирования, при которых необходимо обеспечить ему безопасные условия труда.

К технологическим мерам безопасности при эксплуатации канатного транспорта относится разработка плана эвакуации пассажиров, включающего технологические карты выполнения работ по резервированию с учетом трудоемкости и квалификации персонала, с их последующим обучением и регулярной тренировкой для проверки знаний и привития навыков по устранению критических отказов.

Условие безопасности канатного транспорта при эвакуации в заданный период времени имеет следующий вид:

$$[Q] \geq Q_i, \qquad (33)$$

где $[Q]$ – допустимый риск при реализации эвакуации; Q_i – соответственно технический, технологический и организационный (индивидуальный) риски.

При оценке технического риска применения канатного транспорта основное значение приобретает определение причинно-следственных связей между случайными и локальными событиями, происходящими с различной частотой возникновения критического отказа и проведения эвакуации.

Для выявления причинно-следственных связей использования систем резервирования при эвакуации воспользуемся логико-графическим методом на основе построения и анализа «дерева событий» (Event Tree Analysis – ETA) [6, 16].

Учитывая подтвержденные гипотезы о том, что распределение критических отказов элементов, узлов, механизмов и систем резервирования пассажирских подвесных канатных дорог, в наибольшей степени влияющих на их безопасную эксплуатацию, подчинен экспоненциальному закону, риск может быть определен из выражений:

$$Q(t) = 1 - P(t);$$

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t)dt\right];$$

$$\lambda(t) = -P'(t)/P(t), \qquad (34)$$

где $P(t)$ – вероятность безаварийной работы (функция безопасности); $\lambda(t)$ – интенсивность отказов, выраженная в вероятности, что после работы без проявленных отказов до момен-

та времени t критический отказ произойдет в следующем ограниченном промежутке времени, в результате которого необходимо включить (начнет функционировать) резервирование.

Статистические наблюдения свидетельствуют, что после непродолжительного пробного периода эксплуатации пассажирских подвесных канатных дорог (обкатки) функция $\lambda(t)$ в течение длительного времени сохраняет стабильность, т.е. $\lambda(t) = \text{const}$.

Таким образом, определив для периода нормальной работы пассажирской подвесной канатной дороги $\lambda(t) = \text{const}$, из (34) получаем экспоненциальное распределение:

$$P(t) = \exp(-\lambda T). \quad (35)$$

При этом $T = 1/\lambda$ – средняя наработка до критического отказа. Функцию риска в зависимости от средней наработки до критического отказа T можно выразить в следующем виде:

$$Q(t) = 1 - \exp(-t/T). \quad (36)$$

Вероятность Q проявления любого критического отказа представляет оценку риска эвакуации в период τ по формуле (34):

$$Q = 1 - Q(0, \lambda\tau) = 1 - \exp(-\lambda\tau). \quad (37)$$

Упомянутый метод «дерево событий» является ничем иным, как индуктивным логическим методом определения всевозможных потенциальных последствий от текущего события, взятого за исходное. Количество потенциальных конечных событий находится в зависимости от выбора событий, возникающих после исходного события. Метод демонстрирует дальнейшие пути проявления критического отказа, его интенсивности, что позволяет, в свою очередь, определять риск проведения эвакуации.

Используя накопленный опыт и статистический анализ, полученный по аналогичным сложным техническим системам (в том числе, пассажирским подвесным канатным дорогам) возможно приведение ранжирование конструктивных элементов узлов и механизмов, используемых при резервировании по интенсивностям их отказов λ_i (табл. 31) [79]. Данные в табл. 31 установлены по данным статистической отчетности Ростехнадзора.

Таблица 31

Интенсивность отказов конструктивных элементов узлов и механизмов, используемых при резервировании канатных дорог

№	Элемент		Интенсивность отказа λ_i
1	2		3
1.	Крепление балансиров		$4{,}358 \cdot 10^{-6}$
2.	Тормоза:		
	a.	Невыполнение тормозом функции нормально замкнутого	$3{,}5367 \cdot 10^{-5}$
	b.	Отказ тормозного шкива	$3{,}32 \cdot 10^{-7}$
	c.	Отказ муфты тормоза	$6{,}065 \cdot 10^{-6}$
3.	Стальной канат:		
	a.	Обрыв в пряди и износ	$3{,}599 \cdot 10^{-4}$
	b.	Сход канатов с концевых блоков	$5{,}76 \cdot 10^{-5}$
	c.	Износ канатов	$3{,}8552 \cdot 10^{-5}$
	d.	Обрыв	$1{,}45 \cdot 10^{-8}$
	e.	Сход канатов с блоков	$2{,}59806 \cdot 10^{-4}$
	f.	Отказ по совокупности дефектов	$4{,}89 \cdot 10^{-4}$
	g.	Обрыв в пряди и износ	$2{,}889 \cdot 10^{-5}$
	h.	Сход канатов с блоков	$1{,}162 \cdot 10^{-5}$
	i.	Обрыв	$1{,}24 \cdot 10^{-4}$
4.	Предохранительная планка		$1{,}0895 \cdot 10^{-5}$
5.	Блоки и подшипники блоков:		
	a.	Отказ по совокупности дефектов	$1{,}99 \cdot 10^{-3}$
	b.	Отказ по совокупности дефектов	$5{,}59 \cdot 10^{-4}$
	c.	Отказ по совокупности дефектов	$2{,}73 \cdot 10^{-3}$
6.	Предохранительные устройства		$4{,}69799 \cdot 10^{-4}$
7.	Траверса подвески:		
	a.	Дефект технологический	$1{,}14 \cdot 10^{-11}$
	b.	Отказ по совокупности дефектов	$1{,}676 \cdot 10^{-6}$
	c.	Дефект материала	$1{,}14 \cdot 10^{-8}$
8.	Крепление осей		$5{,}988 \cdot 10^{-6}$
9.	Повреждение подвески от соударения		$3{,}352 \cdot 10^{-6}$
10.	Быстроходная муфта привода		$3 \cdot 10^{-7}$
11.	Крепление вращающихся частей		$6{,}202 \cdot 10^{-6}$

Продолжение табл. 31

12.	Проушина		
	a.	Дефект технологический	$1{,}14 \cdot 10^{-11}$
	b.	Дефект материала	$8{,}68 \cdot 10^{-8}$
13.	Балансир уравнительный:		
	a.	Дефект материала	$1{,}14 \cdot 10^{-8}$
	b.	Отказ по совокупности дефектов	$2{,}794 \cdot 10^{-6}$
14.	Барабан:		
	a.	Отказ по совокупности дефектов	$5{,}07 \cdot 10^{-6}$
	b.	Опорный подшипник	$6{,}06 \cdot 10^{-6}$
	c.	Опорный подшипник	$6{,}641 \cdot 10^{-6}$
	d.	Крышка опорного подшипника	$1{,}88 \cdot 10^{-5}$
	e.	Кронштейн	$2{,}53 \cdot 10^{-6}$
	f.	Уплотнение входного вала	$2{,}53 \cdot 10^{-6}$
	g.	Вал барабана	$1{,}14 \cdot 10^{-8}$
	h.	Опора барабана	$2 \cdot 10^{-8}$
	i.	Установка барабана	$8{,}38 \cdot 10^{-7}$
	j.	Смещение барабана по оси	$1{,}767 \cdot 10^{-6}$
	k.	Муфта барабана	$3 \cdot 10^{-7}$
	l.	Муфта барабана	$6{,}705 \cdot 10^{-6}$
15.	Оседержатели блоков		$2{,}514 \cdot 10^{-6}$
16.	Крепление стального каната		
	a.	Отказ по совокупности дефектов	$2 \cdot 10^{-8}$
	b.	Отказ по совокупности дефектов	$1{,}2 \cdot 10^{-8}$
	c.	Отказ по совокупности дефектов	$1{,}87 \cdot 10^{-3}$
17.	Упруго-втулочная муфта		
	a.	Отказ по совокупности дефектов	$9{,}3071 \cdot 10^{-5}$
	b.	Износ резиновых втулок	$1 \cdot 10^{-5}$
	c.	Шпоночное крепление полумуфт на валах	$3{,}5 \cdot 10^{-5}$
18.	Зубчатая муфта		$9{,}498 \cdot 10^{-6}$
19.	Оси блоков		$1{,}14 \cdot 10^{-8}$
20.	Планетарная муфта		$5{,}944 \cdot 10^{-6}$
21.	Корпус редуктора:		
	a.	Отказ по совокупности дефектов	$6{,}06 \cdot 10^{-6}$
	b.	Ослабление болтов крепления редуктора	$1 \cdot 10^{-4}$

Продолжение табл. 31

	c.	Срез болтов крепления крышки	$3{,}03 \cdot 10^{-6}$
	d.	Дефект материала	$1 \cdot 10^{-9}$
	e.	Дефект технологический	$1{,}14 \cdot 10^{-11}$
	f.	Дефект электросварки	$3 \cdot 10^{-9}$
22.	Шестерня (колесо) зубчатое		$1{,}2 \cdot 10^{-7}$
23.	Шпонка вала-шестерни входного вала редуктора		$7{,}16 \cdot 10^{-6}$
24.	Вал редуктора:		
	a.	Дефект материала	$1{,}14 \cdot 10^{-8}$
	b.	Дефект технологический	$1{,}14 \cdot 10^{-11}$
25.	Редуктор типа ВКУ		$8{,}690 \cdot 10^{-6}$
26.	Редуктор типа ГК		$6{,}705 \cdot 10^{-6}$
27.	Червячный редуктор		$2{,}0114 \cdot 10^{-5}$
28.	Открытая зубчатая пара		$1{,}3409 \cdot 10^{-5}$
29.	Редуктор типа Ц2		$6{,}705 \cdot 10^{-6}$
30.	Ступень цилиндрического редуктора		$2{,}235 \cdot 10^{-6}$
31.	Тормоз:		
	a.	Механическая поломка	$6{,}4365 \cdot 10^{-5}$
	b.	Отказ по совокупности дефектов	$6{,}065 \cdot 10^{-6}$
	c.	Отказ колодочного тормоза по совокупности дефектов	$8{,}5484 \cdot 10^{-5}$
	d.	Механическая поломка	$3{,}37 \cdot 10^{-8}$
	e.	Электрическая часть тормоза	$6{,}3384 \cdot 10^{-5}$
	f.	Дефект технологический	$1{,}14 \cdot 10^{-11}$
	g.	Отказ тяжело нагруженной пружины	$1 \cdot 10^{-6}$
	h.	Шпоночное соединение на тормозном шкиве	$3{,}54 \cdot 10^{-5}$
	i.	Шкив тормозной	$1{,}01 \cdot 10^{-5}$
	j.	Вал тормозного шкива	$5{,}07 \cdot 10^{-6}$
	k.	Тормозные колодки	$2{,}988 \cdot 10^{-6}$
	l.	Тяга тормоза	$2{,}53 \cdot 10^{-6}$
	m.	Основание тормоза	$5{,}07 \cdot 10^{-6}$
	n.	Муфта	$6{,}065 \cdot 10^{-6}$
	o.	Регулировка тормоза	$3{,}5367 \cdot 10^{-5}$
	p.	Тормозные накладки	$2{,}0952 \cdot 10^{-5}$
	q.	Шарниры тормозов	$5{,}699 \cdot 10^{-6}$

Окончание табл. 31

	r.	Гидротолкатель тормоза	$1{,}7596 \cdot 10^{-5}$
	s.	Гидротолкатель тормоза	$3{,}03 \cdot 10^{-6}$
	t.	Тяги, рычаги тормоза	$1{,}509 \cdot 10^{-6}$
32.	Тихоходный вал		$5{,}59 \cdot 10^{-7}$
33.	Двигатель:		
	a.	Отказ по совокупности дефектов	$3{,}6876 \cdot 10^{-5}$
	b.	Отказ по совокупности дефектов	$1{,}28 \cdot 10^{-4}$
	c.	Отказ по совокупности дефектов	$6{,}944 \cdot 10^{-6}$
	d.	Отказ по совокупности дефектов	$6{,}2 \cdot 10^{-7}$
34.	Двигатель постоянного тока		$9{,}36 \cdot 10^{-6}$
35.	Двигатель переменного тока		$5{,}24 \cdot 10^{-6}$
36.	Концевые выключатели		$1{,}7704 \cdot 10^{-5}$
37.	Шкивы		$8{,}38 \cdot 10^{-7}$
38.	Токосъемник		$3{,}3523 \cdot 10^{-5}$
39.	Гибкий токопровод		$1{,}31579 \cdot 10^{-4}$
40.	Электропроводка		$1{,}85235 \cdot 10^{-4}$
41.	Привод кабельного барабана		$5{,}0790 \cdot 10^{-5}$
42.	Укладка кабеля гибкого токопровода		$1{,}0158 \cdot 10^{-5}$
43.	Кольцевой токосъемник		$4{,}0632 \cdot 10^{-5}$
44.	Густая смазка		$2{,}235 \cdot 10^{-6}$
45.	Крепление фундаментов		$2{,}7657 \cdot 10^{-5}$
46.	Металлоконструкция		$2{,}4584 \cdot 10^{-5}$
47.	Ходовые колеса		$9{,}937 \cdot 10^{-6}$
48.	Буфера		$3{,}352 \cdot 10^{-6}$
49.	Боковые направляющие ролики		$3{,}04392 \cdot 10^{-4}$
50.	Падение ролика		$3{,}044 \cdot 10^{-6}$
51.	Разрушение ловителя (непопадание ролика на площадку)		$9{,}219 \cdot 10^{-6}$
52.	Буфера пружинные		$3{,}35 \cdot 10^{-7}$
53.	Подшипники ходовых колес		$4{,}550 \cdot 10^{-6}$
54.	Пускорегулирующая аппаратура		$9{,}47033 \cdot 10^{-4}$
55.	Промвал		$5{,}59 \cdot 10^{-7}$
56.	Упорный подшипник		$4{,}190 \cdot 10^{-6}$

Для анализа критических отказов пассажирских подвесных канатных дорог (проведения эвакуации и расчета ее вероятности на основе значений вероятности исходных событий) воспользуемся методом «дерево отказов» [6].

Метод «дерево отказов» является дедуктивным логическим анализом причин, которые привели к критическому отказу канат-

ной дороги и ее конструктивных элементов. При анализе причин критического отказа пассажирской подвесной канатной дороги необходимо выявить причинно-следственную связь, которая связывает случайные локальные события, проявляющиеся с определенной частотой, к нестабильному состоянию машины – включению резервирования при проведении спасательной операции. Использование метода «дерево отказов» позволяет с помощью логико-графического формата продемонстрировать причины и их взаимодействие при различных вариантах произошедших случайных событий. Отследить причинное взаимодействие возможно путем анализа складывающихся опасных ситуаций в работе канатного транспорта в обратном порядке для более точной идентификации причин возникновения различных типов отказа. Построение «дерева отказов» является удобным механизмом структурирования сведений об объекте для дальнейшего углубленного анализа.

Для каждого анализируемого элемента конструкции канатной дороги моделируются случайные события, которые могут стать причинами для отказа системы. Механизм построения «дерева отказов» предполагает повторение анализа причин возможного отказа для каждого элемента конструкции канатной дороги. Первоначально смоделированное на этапе риск-анализа событие (проведение эвакуации пассажиров) является конечным, вершинным событием. Построение «дерева отказов» от выбранного вершинного или главного события в дальнейшем получает различные отдельно моделируемые аварийные события, которые могут привести к конечному событию (проведение эвакуации). Таким образом, «дерево отказов» разветвляется и является логической бинарной схемой событий.

Для удобства представления выявления и построения связей в структуре «дерева отказов» применяют блоки (символы событий и логические операторы), которые демонстрируют подчинение и взаимодействие моделируемых событий.

Основные логические операторы и взаимосвязанные с ними причинные взаимосвязи представлены в табл. 32.

Таблица 32

Логические операторы и их графическое представление

Номер п/п	Символ оператора	Название оператора	Причинная взаимосвязь
1		«И»	Выходное событие происходит, если все входные события случаются одновременно

2		«ИЛИ»	Выходное событие происходит, если случается из входных событий
3	m	«m из n» (голосования или выборки)	Выходное событие происходит, если случается m из n входных событий
4		«запрет»	Наличие входа вызывает появление выхода тогда, когда происходит условное событие
5		«приоритетное И»	Выходное событие происходит, если все входные события происходят в нужном порядке слева направо
6		«исключающее ИЛИ»	Выходное событие происходит, если случается одно (но не оба!) из входных событий

Логический оператор имеет один или несколько входов, но только один выход. Любая рассматриваемая логическая связь событий может быть представлена с помощью операторов «И» и «ИЛИ». Выделение событий с учётом их характеристик и детализации для принятия решения об их включении в «дерево отказов» возможно при помощи символов событий.

Основные символы событий и их характеристика представлены в табл. 33.

Таблица 33

Символы событий

Номер п/п	Символ оператора	Знак	Причинная взаимосвязь
1		Круг	Исходное событие, обеспеченно достаточными данными
2		Ромб	Событие, недостаточное детально разработанное
3		Прямоугольник	Событие, вводимое логическим элементом
4		Овал	Условное событие, используемое с логическим знаком «запрет»
5		Домик	Событие, которое может случаться и не случаться

6		Треугольник «перенос из»	Символы перехода
		Треугольник «перенос в»	

Предложенный для рассмотрения анализа причин проведения эвакуации метод «дерева отказов» позволяет выделить возможные поэлементные отказы конструкции с помощью моделирования события и логических операторов.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что указанные символы событий и логических операторов дают возможность сформировать причинно-следственные связи между случайными отдельными базовыми событиями в логическом и графическом виде «дерева отказов». Логические операторы позволяют привести последовательность событий к исходным данным (причинам) с выявленными данными по интенсивности отказов. Однако при построении «дерева отказов» следует на начальном этапе установить приделы выполняемого риск-анализа, иначе «громоздкое дерево отказов» приводит к появлению ошибок. Вероятностный анализ безопасности на подвесных пассажирских канатных дорогах должен быть основан на поиске исходных событий (влияющих на возможность наступления конечных событий в виде эвакуационных действий с использованием системы резервирования) или их сочетаний, т.е. оценить с точки зрения весомости исходных событий и их сочетаний построенную логистическую и графическую модель критических отказов с использованием метода «дерева отказов».

Для решения поставленной задачи возможно применение метода минимальных сечений в рамках выбранного метода «дерева отказов», что позволяет построенному «дереву отказов» не только графически изобразить причинно-следственные связи между случайными событиями, но и продемонстрировать различные пути поочередного возникновения отказов, приводящие к необходимости эвакуации пассажиров. С целью уменьшения возможности проведения эвакуации необходимо выявить виды критических отказов и затем применить резервирование для наиболее часто происходящих или наиболее вероятных из них. Применяя принцип сечений, доступно очертить связанные именно с данным «деревом отказов» виды критических отказов элементов канатной дороги. В качестве сечения принимаем ряд исходных событий

$$e_{i_j},\ j = 1 \ldots n_i,$$

где n_i принимает значения от 1 до *N*; *N* – количество событий в построенном «дереве отказов».

Данный ряд будет обладать следующим свойством: когда исходные события e_{i_j} текущего ряда происходят, то с определенной вероятностью P_r случается и конечное событие E. При изъятии из сечения любого исходного события данное сечение перестает быть критическим сочетанием и рассматривается как минимальное сечение, т.е. минимальное критическое сочетание.

В дополнение принципа сечений введем принцип проходных сочетаний. Таковым сочетание является при включении в него ряда исходных событий $e_{i_j}, j = 1 \ldots n_i$. Данный ряд будет обладать следующим свойством: когда исходное событие e_{i_j} текущего ряда не случается, то «дерево отказов» получает гарантию, что конечное событие E не происходит. При изъятии из проходного сочетания любого исходного события сечение перестает быть проходным сочетанием и рассматривается как минимальное проходное сочетание. Таким образом, «дерево событий» может как содержать, так и не содержать взаимоисключающие события в зависимости от минимальных сечений и минимальных проходных сочетаний.

В случае отсутствия в «дереве событий» взаимоисключающих событий алгоритм определения минимальных сечений строится следующим образом:

1) логическим операторам («И», «ИЛИ») присваивается буквенный символ (α, β, γ, ...);
2) нумеруются исходные события $e_{i_j}, i_j = 1 \ldots N$;
3) нумеруются буквенные символы наивысшего логического оператора «дерева отказа», которые следует поставить в исходном элементе (векторе-строке) формирующегося вектора-столбца, состоящего из минимальных сечений;
4) события, представленные в прямоугольниках, изменить на идентичные буквенные символы логических операторов и исходные события;
5) поэтапно изменить буквенный символ логического оператора «ИЛИ» на элементы набора, содержащихся на входе в вышеназванный оператор, при этом формируя новый вектор-строку, тем самым добавляя

количество сечений;

6) следует изменить символ «И» на набор элементов, стоящих на входе и исходные события e_{i_j}, увеличивая размер сечения;
7) продолжать выполнение пп. 4–6 алгоритма до того этапа, когда все буквенные символы операторов не сменятся на исходные события;
8) устранить суперсочетания (те сочетания, которые не подходят под определение минимального сечения), при этом остальные сочетания будут искомыми минимальными сечениями.

Общий вид алгоритма для измерения минимальных проходных сочетаний в случае отсутствия несовместимых исходных событий представляет собой последовательность следующих действий:

1) определенному логическому оператору необходимо присвоить свои буквенные символы (α, β, γ, ...);
2) необходимо задать нумерацию исходных событий (например, $e_{i_j}, i_j = 1 \ldots N$);
3) разметить наивысший символ верхнего логического оператора «дерева отказов» в элементе № 1 (векторе-строке) формирующегося вектора-столбца, причем элементами вектора-столбца выступают минимальные сечения;
4) заменить распространенные события в прямоугольниках эквивалентными буквенными символами логических операторов и исходными событиями;
5) изменить символ «ИЛИ» на набор буквенных символов, увеличивая величину проходного сочетания;
6) изменить символ «И» на набор элементов, стоящих на выходе и исходные события e_{i_j}, постоянно формируя новую вектор-строку, увеличивая число проходных сочетаний;
7) продолжать выполнение пунктов 4-6 алгоритма пока все буквенные символы операторов не сменятся на исходные события;
8) устранить суперсочетания (те сочетания, которые не подходят под определение минимального проходного значения), при этом остальные сочетания будут искомыми минимальными проходными значениями.

Можно сделать вывод, что вышеописанный алгоритм предо-

ставляет возможность поиска всех минимальных сечений, если отсутствуют несовместимые исходные события в сформированном «дереве отказов». Имея представления о потенциальных характеристиках канатной дороги, возможно проанализировать риск аварии *Q* пассажирской подвесной канатной дороги в целом, т.е. вероятность возникновения отказа в целом в момент времени *t*. Вероятность наступления связанным логическим оператором «И» событий можно определить следующим образом:

$$P_r(A) = P_r(e_1 \cap e_2 \cap ... e_n) = P_r(e_1) \cdot P_r(e_2) \cdot ... \cdot P_r(e_n),$$

где символ $\cap$ выражает пересечение случайных событий.

Вероятность происшествия события, в которых выход - это события, относящиеся к логическим оператором «ИЛИ», определяется соотношением

$$P_r(A) = P_r(e_1 \cup e_2 \cup ... e_n) = 1 - P_r(\bar{e}_1) \cdot P_r(\bar{e}_2) \cdot ... \cdot P_r(\bar{e}_n) =$$
$$= 1 - [1 - P_r(e_1)] \cdot [1 - P_r(e_2)] \cdot ... \cdot [1 - P_r(e_n)],$$

где символ $\cup$ означает объединение событий; $\bar{e}_i$ – случайное событие, являющееся дополнением к случайному событию e_i (т.е. наличие события $\bar{e}_i$ подразумевает не появление события e_i.

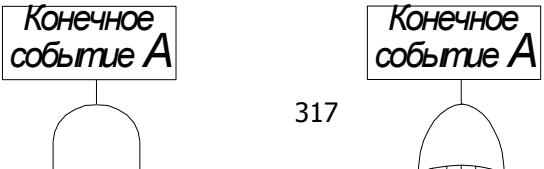
Или в общем виде, вероятность $P_{r"È"}$ наступления событий e_{i_j}, связанных логическим оператором «И», равна произведению вероятностей P_{ri_j} событий e_{i_j} и определяется по формуле

$$P_{r"È"} = \prod_{j=1}^{j=n_i} P_{ri_j},$$

а вероятность $P_{r"ÈËÈ"}$ наступления событий e_{i_j}, связанных логическим оператором «ИЛИ», – по формуле

$$P_{r"ÈËÈ"} = 1 - \prod_{j=1}^{j=n_i} (1 - P_{ri_j}).$$

На рис. 133 показано графическое представление объединения случайных событий e_i логическими операторами «И» и «ИЛИ».



а) *б*)

Рис. 133. События, связанные логическим оператором:
а – «И»; *б* – «ИЛИ»

Таким образом, используя математическое отражение причинно-следственных связей с учетом операторов «И» и «ИЛИ» возможно определить вероятность наступления искомого случайного события – начала эвакуации или приведения в действие резервного элемента, продвигаясь от исходных событий к главному по структуре «дерева отказов» канатной дороги.

Проиллюстрируем использование рассмотренной выше методики оценки вероятности наступления критических отказов на примере конкретной пассажирской подвесной канатной дороги (рис. 134)

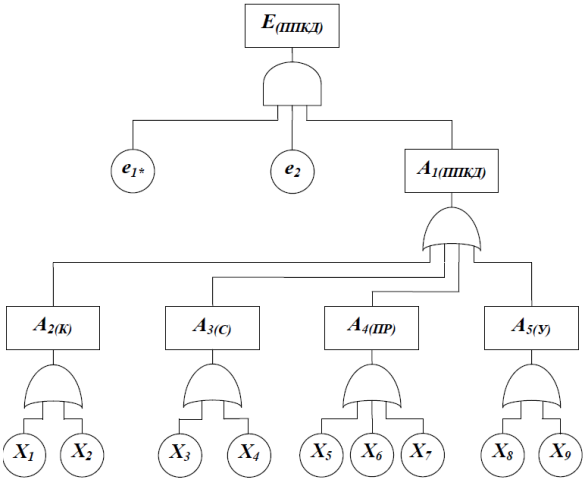


Рис. 134. «Дерево отказов» для пассажирской канатной дороги

Следуя теоретическим положениям логико-вероятностного алгоритма, установим опасные события - критические отказы, приводящие к возникновению главного события $E_{(ППКД)}$ - необходимости проведения эвакуации пассажиров с использованием систем резервирования. Событие $E_{(ППКД)}$ является главным и возникает в случае наступления промежуточного события $A_{1(ППКД)}$ - критического отказа канатной дороги. Одновременно с промежуточными событием $A_{1(ППКД)}$ должно выполнятся исходное событие e_2 - нахождение пассажиров на канатной дороге. Взаимосвязь этих случайных событий в структуре «дерева отказов» отражается логическим оператором «И».

Исходное событие e_{1*} (форс-мажорное) рассматривается только при анализе вероятности возникновения главного события $E_{(ППКД)}$ при форс-мажорных обстоятельствах (природно-антропогенного характера: сейсмическом воздействии, сходе лавины, ураганном ветре, падении на канат летательного аппарата и т.п.).

В ходе структурного анализа канатного транспорта установлены следующие причинно-следственные взаимосвязи между главным, промежуточными и исходными событиями:

– $A_{2(К)}$: x_1 – перехлеста тягового каната с несущим канатом или x_2 – частичный сход тягового каната;

– $A_{3(С)}$: x_3 – отказа электропитания или x_4 – отказа станционного конвейера на посадочной станции;

– $A_{4(ПР)}$: x_5 – отказа приводного механизма или x_6 – отказа подшипникового узла шкива или x_7 – отказа аварийного привода на приводной станции;

– $A_{5(У)}$: x_8 – отказа системы управления канатной дороги или x_9 – отказа тахогенератора на шкиве.

К технологическим мерам безопасности при эксплуатации канатного транспорта относится разработка плана эвакуации пассажиров, включающего технологические карты выполнения работ по резервированию с учетом трудоемкости (Tg_i, Tk_i) и квалификацию персонала (g, k), с их последующим обучением и регулярной тренировкой для проверки знаний и привития навыков по устранению критических отказов.

Рассмотрим технологические меры при проведении эвакуации для канатного транспорта на основе технологии канатного метро. Особенность процесса эвакуации в этом случае заключается в устранении различных неисправностей на трассе и на станциях, в том числе, используя резервные системы, для восстановления движения подвижного состава в течение отведенного времени силами собственного персонала. Правилами безопасно-

сти предусмотрено, что ответственный за исправное состояние и безопасную эксплуатацию канатной дороги должен разработать план спасательной операции (технологические меры) и обеспечить его исполнение. Чтобы уложиться в необходимый отрезок времени (4 часа), отведенного для проведения эвакуации, необходимо произвести расчет численности персонала с учетом сложившейся организации труда и действующей системы управления безопасностью на предприятии.

Для расчета оптимальной численности персонала, участвующего в эвакуации, воспользуемся методами, учитывающими структурную схему резервирования, риск критических отказов и коэффициент готовности элементов резервирования. Целевой функцией в поставленной задаче является минимизация численности персонала при выполнении работ по эвакуации в заданный интервал времени:

$$\sum (Tg_i + Tk_i) / N \le 240, \qquad (38)$$

где Tg_i – трудоемкость работ по устранению i-го критического отказа, выполняемого персоналом, связанного с эксплуатацией; Tk_i – трудоемкость работ по устранению i-го критического отказа, выполняемого персоналом, связанного с ремонтом и обслуживанием; N – общая численность персонала; 240 – максимальное время (мин), отведенное на эвакуацию.

Трудоемкость работ в формуле (38) определяется выражениями

$$Tg_i = t_{Yi} Ng_i; \qquad Tk_i = t_{Yi} Mk_i,$$

где t_{Yi} – время, затрачиваемое на устранение i-го критического отказа; Mk_i – количество персонала, выполняющего ремонт и техническое обслуживание, определяемое расчетом.

Количество персонала Ng, связанного с эксплуатацией, а также количество персонала, занятого ремонтом и техническим обслуживанием Mk, зависит от конструкции, типа, количества промежуточных станций канатной дороги и определяется проектировщиком на основании расчетов, отраженных в руководстве по эксплуатации:

$$N = 2Ng_i + R + Mk_i,$$

R – количество лиц, ответственных за содержание пассажирской канатной дороги в исправном состоянии и за их безопасную эксплуатацию (определяется штатным расписанием и принятой системой управления безопасностью на предприятии).

При расчете численности персонала для выполнения эвакуации, анализируются технологические карты по устранению критических отказов, определяются маршруты и трудоемкости выполняемых работ по утвержденному плану эвакуации, проводятся фотохронометражные наблюдения на существующих объектах, изучаются технические характеристики оборудования и применяемых средств механизации, анализируется организация труда и системы управления безопасностью на предприятии, оцениваются средства индивидуальной защиты персонала.

По результатам анализа технологических карт и уровню требуемой квалификации персонала устанавливаются соотношения трудоемкостей выполняемых операций по эвакуации. Чем выше уровень автоматизации систем дублирования, тем ниже могут быть уровни квалификации персонала.

В результате расчета устанавливается соотношение по численности персонала, возможность проведения эвакуации с минимальной численностью персонала, участвующего только в эксплуатации, либо с привлечением слесарей-обходчиков и электромехаников, находящихся посменно на дежурстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований, нашедшие свое отражение в монографии, вносят определенный вклад в решение актуальной научной и практической задачи по развитию и реформированию общественного городского пассажирского транспорта. В этой связи авторским коллективом были рассмотрены основные проблемы, возникающие при использовании в рамках единой транспортной инфраструктуры крупных городов-мегаполисов и городских агломераций, а также природно-ландшафтных территорий такого нового инновационного вида общественного транспорта, как канатное метро.

Канатное метро, синергетически объединившее в себе на основе принципов мехатроники механическую систему – пассажирские подвесные канатные дороги, электротехнические компоненты распределенного привода и компьютеризированную систему управления, является одной из наиболее перспективных транспортных систем XXI века. Это не только социально-привлекательный, но и экономически эффективный вид транспорта.

Как и для любой другой сложной технической системы, эффективность функционирования канатного метро и максимальная

реализация присущих ему технико-экономических преимуществ перед уже известными видами транспорта могут быть достигнуты на основе проведения широкого круга фундаментальных и прикладных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, результаты которых должны быть внедрены в практику проектирования и эксплуатации всех конструкционных элементов и систем канатного метро.

В данной монографии, являющейся, по сути, первой обобщающей научной публикацией о возможностях и особенностях инновационной технологии канатного метро, авторами сделана попытка дать достаточно цельное представление об этом вопросе, включая описание конструкции и принципов функционирования возможных разновидностей канатного метро, рациональные подходы к его размещению с учетом территориально-планировочных и ландшафтных условий, основы технико-экономической оптимизации (минимизации) затрат на строительство, основы проведения риск-анализа на стадии проектирования и обеспечения безопасности при эксплуатации.