

ЮНИЦКИЙ Анатолий Эдуардович

**СТРУННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ —
НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАЗЕМНОМ
ТРАНСПОРТЕ**

ДИССЕРТАЦИЯ
в форме научного доклада на соискание ученой степени
доктора наук в области информационных технологий
(транспорт)

Работа выполнена в центре “Звездный мир” (Гомель), ООО “НТЛ” (Минск), “NTL Neue Transportlinien GmbH” (Германия) и в ряде научных учреждений и вузов РБ, РФ и БО МАИПТ.

Эксперты:

1. Академик АНБ, д.т.н., профессор, лауреат Государственной премии СССР **ВЫСОЦКИЙ М.С.**
2. Академик МАИПТ, член-корреспондент АНБ, д.т.н., профессор, лауреат Государственной премии СССР **МАНЬШИН Г.Г.**
3. Академик МАИПТ, д.т.н., профессор **РУКТЕШЕЛЬ О.С.**

Работу рекомендуют Научному Совету МАИПТ:

1. Академик МАИПТ, д.т.н., профессор **МАСЛАКОВ А.Д.**
2. Академик МАИПТ, д.т.н., профессор **СТАРОДЕТКО Е.А.**

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1.1. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время весьма актуальна задача создания принципиально нового вида высокоскоростного наземного транспорта, сочетающего, с одной стороны, преимущества известных видов транспорта: высокую скорость самолета и поезда на магнитном подвесе, низкую себестоимость железнодорожных перевозок, высокую пропускную способность автомагистралей, экологическую безопасность электромобилей, с другой — свободного от их недостатков: экологической опасности и высокой аварийности автотранспорта, больших площадей отчуждения земли под автомобильные и железные дороги, отдаленности аэропортов от городов, высокой стоимости и сложности решений научных и технических проблем при создании и эксплуатации электромобилей и поездов на магнитном подвесе. Кроме того, возрастающая коммуникативность мирового сообщества выдвигает дополнительные требования: транспорт должен быть индивидуальным, обеспечивать оперативную, безопасную и комфортную связь независимо от расстояний и быть доступным непрофессиональному пользователю.

В области создания новых видов наземного высокоскоростного транспорта ученые и инженеры разных стран с 1960-х годов сосредоточили свой поиск на бесконтактных (бесколесных) системах для достижения скоростей движения 500 км/ч. Однако последние достижения в технике свидетельствуют, что колесо еще не исчерпало своих возможностей. Рекорд скорости автомобиля, занесенный в книгу рекордов Гиннеса, составляет 1190 км/ч; платформы, разогнанной по рельсовому пути двигателем — 9851 км/ч. Таковы рекорды. Для нужд наземного транспорта достаточна скорость в 500—600 км/ч, а это всего 5000—6000 оборотов в минуту для колеса средних размеров.

1.2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ — разработка принципиально новой высокоскоростной транспортной системы, экологически безопасной, имеющей низкую материалоемкость, не требующей для своего строительства большого отчуждения земли, работающей на электрической энергии и имеющей высокую скорость движения экипажей с использованием для опирания колес.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- найти технические решения, позволяющие максимально использовать прочностные свойства материалов несущей конструкции путевой структуры;

- разработать принципиальную схему транспортной системы, путевая структура которой имела бы повышенную ровность рабочих поверхностей; исследовать ее основные характеристики и дать технические решения и рекомендации по всем основным составным элементам: путевой структуре, опорной части, экипажу;

- предложить технологию строительства и организацию движения экипажей;

— исследовать динамику движения экипажей и колебаний путевой структуры, дать рекомендации по организации движения, исключаящей возникновение резонансных явлений;

— оценить значимость полученных результатов и выполнить их технико-экономический анализ;

— разработать новые информационные технологии и процессы, способы, устройства, системы и технологические решения, обеспечивающие реализацию принципиальной схемы новой транспортной системы.

1.3. НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ состоят в том, что в ней впервые использован комплексный подход к современной информационной среде, что позволило получить принципиально новые решения в различных областях техники.

Разработана струнная путевая структура, имеющая повышенную ровность, высокую жесткость и низкую материалоемкость.

Теоретически исследована динамика экипажа и путевой структуры в широком диапазоне скоростей движения (0...500 м/с). Выявлены основные параметры транспортной системы, оказывающие наибольшее влияние на динамику движения. Показано, что при определенных скоростях движения экипажей и характеристиках струнной путевой структуры колесо экипажа будет двигаться по невозмущенному полотну. Найдены условия быстрого затухания колебаний и предложены технические решения по безрезонансным режимам эксплуатации системы.

Выявлены режимы движения одиночных экипажей и группы экипажей, при которых исключаются возникновение резонансных явлений, представляющих угрозу безопасности движения. Проведены численные исследования и даны рекомендации.

Разработана концепция транспортного модуля, его основных компоновочных решений по ходовой части, приводу, колесу, салону, форме и дизайну корпуса. Предложена форма корпуса, экспериментальные аэродинамические исследования которого показали уникальный результат — коэффициент аэродинамического сопротивления $C_x = 0,075$.

Предложена технология строительства, обеспечивающая поточность и всепогодность строительства транспортной системы.

Комплексные исследования предложенной автором струнной транспортной системы (СТС) показывают, что СТС в будущем может стать лидирующим видом высокоскоростного наземного транспорта благодаря низкой себестоимости проезда, высокому комфорту и безопасности движения, технологичности строительства и простоте эксплуатации, низкой материалоемкости и высокой экологичности всех этапов осуществления программы: строительства трасс, эксплуатации транспортной системы и организации движения экипажей.

1.4. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ

Практическая ценность проекта СТС не ограничена географически или экономически, т.к. в скоростном, дешевом и экологически безопасном транспорте нуждается любое государство. Наиболее целесообразна реализация программы в крупных странах со слабой сетью автомобильных и железных дорог (Россия, Канада, Австралия), высокораз-

витых странах, экономика которых позволит создать новую сеть скоростных трасс СТС (США, Япония, Германия, Франция и др.), в островных государствах, для которых актуальна транспортная связь с материком (Япония, Великобритания, Тайвань и др.). Реализация проекта может быть начата как с небольших локальных трасс (например, "город-аэропорт"), так и с трасс, в которых заинтересована группа стран (например, трасса "Париж—Берлин—Варшава—Минск—Москва").

Потенциальный рынок высокоскоростного сообщения значителен на любом из континентов, особенно в Западной Европе. Совет Министров Европейского сообщества одобрил "Европейский основной план высокоскоростных линий (до 2010 г.)". Общая стоимость создания высокоскоростной сети в этом плане оценивается в 200 миллиардов экю для ЕС, а с учетом всего континента, включая бывший СССР — 300 миллиардов экю. Основные линии оцениваются в 70 миллиардов экю. 1 ноября 1993 г. вступил в силу Договор ЕС, подписанный в Маастрихе. Глава 12 этого договора обязывает Союз развивать трансевропейские информационные сети (телекоммуникации), энергетические и транспортные сети. В разделе транспортной инфраструктуры новые высокоскоростные линии получили статус приоритетных. По прогнозу на 2010 г. доход от высокоскоростных линий увеличится с 10% в настоящее время до 72% от доходов всех видов транспорта.

В работе предложены варианты выполнения линейной схемы СТС в различных географических условиях (на равнинных участках, в горах и на море).

Разработана инженерная методика определения монтажных прогибов струн, перемещений путевой структуры СТС под действием стационарной нагрузки и динамики ее колебаний под действием движущихся экипажей в диапазоне скоростей 0...500 м/с.

Предложены различные варианты выполнения путевой структуры, осуществлена их оптимизация и сделан выбор наиболее целесообразного варианта с двумя размещенными горизонтально струнами-рельсами.

Предложены различные варианты выполнения рельса-струны, опор (анкерных, тормозных и поддерживающих) и схемы размещения их по трассе.

Осуществлена вариантная проработка транспортного модуля и его приводного агрегата, колес и их подвески, различных компоновочных решений.

Предложена поточная технология строительства трасс СТС.

Осуществлена технико-экономическая проработка проекта в сравнении с известными видами транспорта, определены основные технико-экономические показатели: стоимость трасс и их инфраструктуры, себестоимость перевозки пассажиров и грузов в широком диапазоне исходных данных и др.

Определены задачи механики высокоскоростного транспорта: динамика движения транспортных модулей по струнной направляющей, прочность модулей и направляющей, трибология контакта "колесо-струна" и др.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные результаты докладывались и обсуждались на Белорусском конгрессе по теоретической и прикладной механике "Механика - 95", Минск, 1995; Международной научно-практической конференции "Ресурсо- и энергосберегающие технологии на транспортном и строительном комплексе", Гомель, 1995; научно-техническом совете ПО "Транстехника", Минск, 1995; научно-техническом совете Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, 1995; ученом Совете Петербургского государственного университета путей сообщения, С.-Петербург, 1996. Модель транспортного модуля (масштаб 1:5) была исследована в большой аэродинамической трубе Центрального научно-исследовательского института им. ак. А.Н. Крылова (С.-Петербург). Работа экспонировалась (в виде действующей модели масштаба 1:5) на двух Лейпцигских ярмарках (март и апрель 1995) и Ганноверской промышленной ярмарке (апрель 1996), на выставке достижений Академии Наук Республики Беларусь, Минск, 1995.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

2.1. ВВЕДЕНИЕ

Основу любой транспортной системы составляет транспортная магистраль, по которой осуществляется движение транспортных модулей. Как правило, она является очень материалоемкой (автодорожное полотно, рельсовый путь, мосты, туннели, земляное полотно и т.п.), и затраты на нее определяют основную стоимость всей системы. Поэтому важно, насколько эффективно используются физико-механические свойства материалов в конструкции транспортных коммуникаций.

Диссертационная работа изложена в главах 1...4 монографии автора "Струнные транспортные системы: на Земле и в космосе" [1].

2.2. ПЕРВАЯ ГЛАВА МОНОГРАФИИ

Предложена принципиальная схема транспортной системы, где наиболее нагруженные элементы (струны) работают на растяжение в диапазоне напряжений, близком к пределу прочности материала [2, 3, 4]. На рис. 1 показана струнная блочная система, в которой напряжения

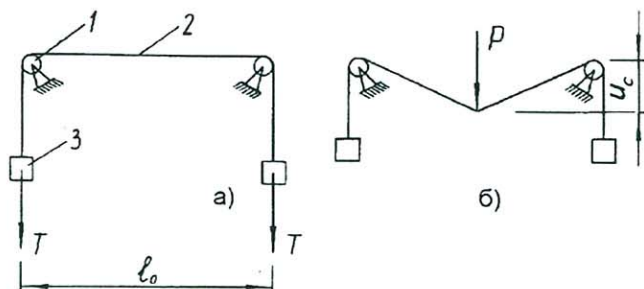


Рис. 1. Струнная блочная система: а — без внешней нагрузки; б — с нагрузкой; 1 — блок; 2 — струна; 3 — груз

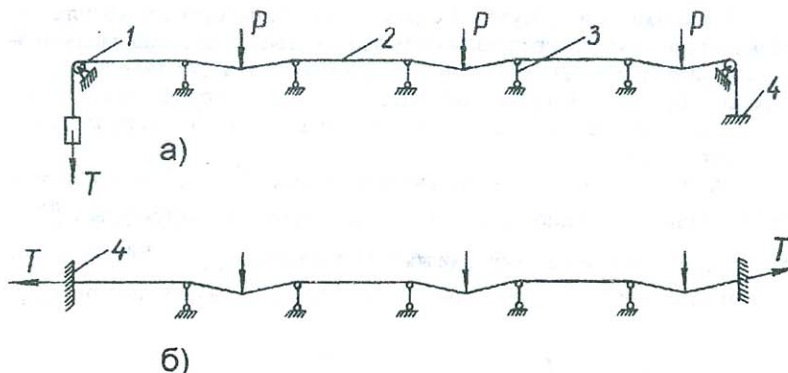


Рис. 2. Струнная линейная система: а — с блоком на конце струны; б — с заделкой концов струны; 1 — блок; 2 — струна; 3 — шарнирная опора; 4 — заделка (анкер)

в струне не зависят от внешней нагрузки P . Такая конструкция может быть трансформирована в линейную схему большой протяженности (рис. 2).

Проведенный автором анализ показал, что при $P < 0,01 T$ напряженно-деформированное состояние конструкций, показанных на рис. 1 и 2, отличаются друг от друга на значения, не превышающие 1%. Этой разницей при инженерных расчетах можно пренебречь, а конструкции можно считать идентичными.

Исходя из такого предположения предложены различные варианты выполнения СТС и проведено технико-экономическое сравнение СТС и известных транспортных систем (автомобильные дороги с асфальто- и железобетонным покрытием и эстакадного типа; железные дороги и гражданская авиация).

2.3. ВТОРАЯ ГЛАВА МОНОГРАФИИ

2.3.1. Принципиальная схема СТС

На рис. 3 представлена линейная схема СТС в различных георграфических условиях: на равнинной местности, в горах и на море. Она содержит струнную путевую структуру и три типа опор (высота 5...50 м и более): поддерживающие (через 10...200 м), тормозные (через 0,1...10 км) и анкерные (через 1...100 км). На участках со сложным рельефом местности трасса может иметь безопорный пролет, например, через глубокое ущелье, пролив, протяженностью до 5...10 км. Параболический прогиб пути при этом будет в пределах 0,001...0,05 от длины пролета.

На морском участке трасса размещена на глубине 10...100 м в подводной трубе-тоннеле, выполненной с нулевой плавучестью.

На основных участках СТС, т.е. в промежутке между поддерживающими опорами 2 (рис. 4), путевая структура не имеет прогибов, т.к. статический прогиб u_c струны 3 является монтажным и размещен ("спрятан") внутри ее конструкции.

Нагрузка от веса путевой структуры и транспортного модуля передается на струну посредством прокладки 4, высота которой вдоль пролета изменяется от нуля (над опорой) до максимального значения u_c (в середине пролета). Поэтому головка 5 рельса, по которой движутся колеса транспортных модулей, в статике имеет ровную поверхность без прогибов и стыков.

На рис. 5 представлены зависимости максимальных статических прогибов струны от погонной (линейной) массы ρ_1 путевой структуры ($u_c^{\max}$), а на рис. 6 — максимальных прогибов путевой структуры ($u_c^{\max}$) под действием одиночной нагрузки P (нагрузка и прогиб — в середине пролета)

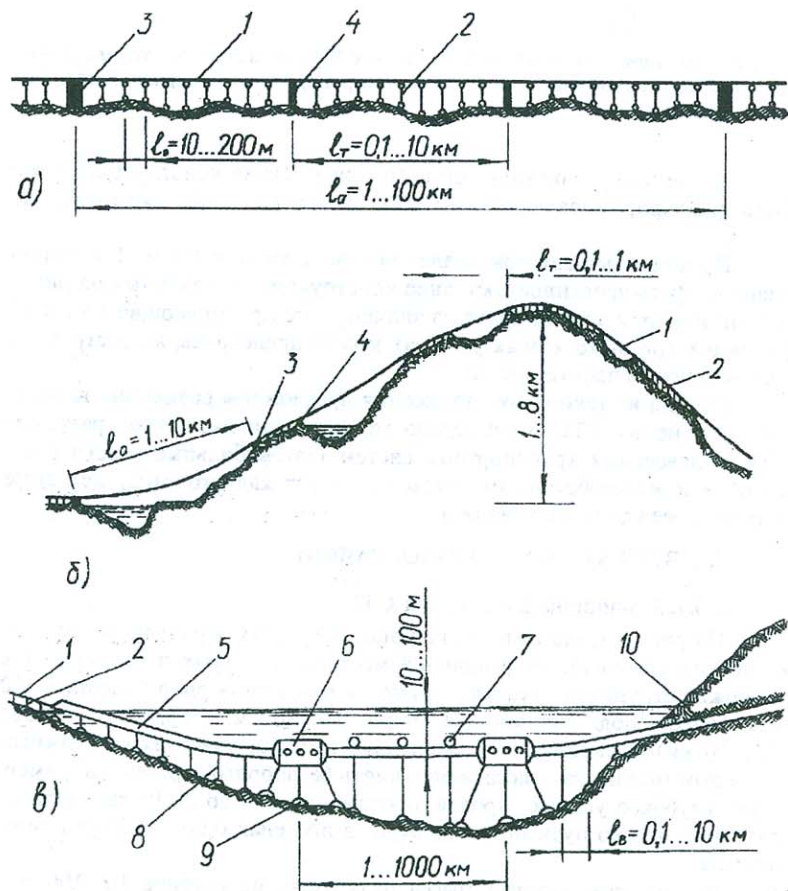


Рис. 3. Линейная схема СТС: а — равнинный участок; б — горный; в — морской; 1 — струнная путевая структура; 2 — промежуточная (поддерживающая) опора; 3 — анкерная опора; 4 — тормозная опора; 5 — труба-тоннель; 6 — подводная станция-поплавок; 7 — поддерживающий поплавок; 8 — якорная тяга; 9 — якорь; 10 — подземный тоннель.

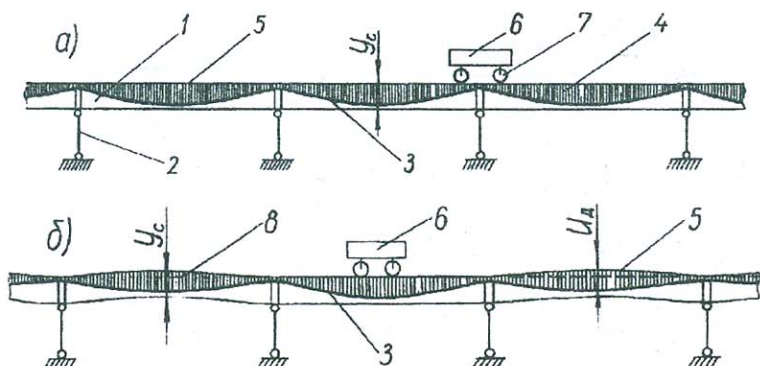


Рис. 4. Схема продольного сечения струнной путевой структуры: а — путевая структура без прогибов; б — с антипрогибом; 1 — путевая структура; 2 — промежуточная опора; 3 — струна; 4 — прокладка переменной высоты; 5 — головка рельса; 6 — транспортный модуль; 7 — колесо; 8 — прямая линия

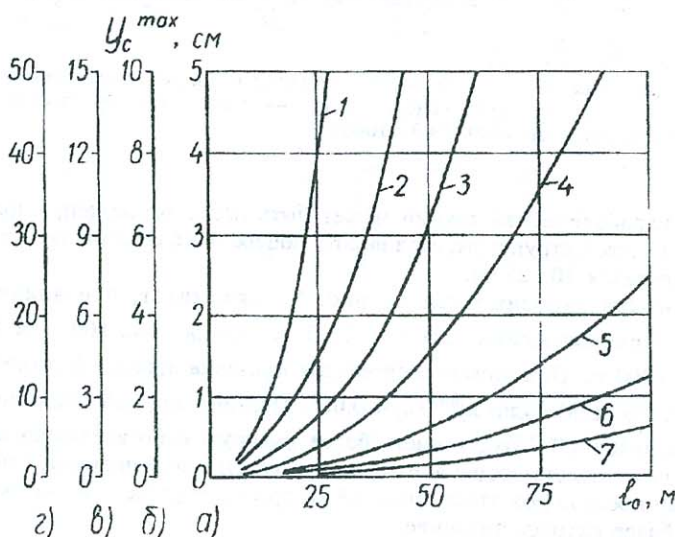


Рис. 5. Максимальный параболический прогиб струны под действием веса путевой структуры: а — для $\rho_1 = 50$ кг/м; б — 100 кг/м; в — 150 кг/м; г — 500 кг/м; 1—7 соответственно при $T_c = 100, 250, 500, 1000, 2500, 5000$ и 10000 тс

для различных значений усилий T_c натяжения струны, имеющей параболический прогиб, и усилий T_0 натяжений путевой структуры (кроме струн, в ней могут быть натянуты головка рельса, корпус и другие конструктивные элементы). Расчеты проводились по формулам, представленным в главе 4. Из графиков на рис. 5 следует, что значения $y_c^{\max} \leq 10$ см достижимы при $l_0 = 10 \dots 100$ м, $T_c = 100 \dots 1000$ тс и $\rho_1 = 50 \dots 500$ кг/м.

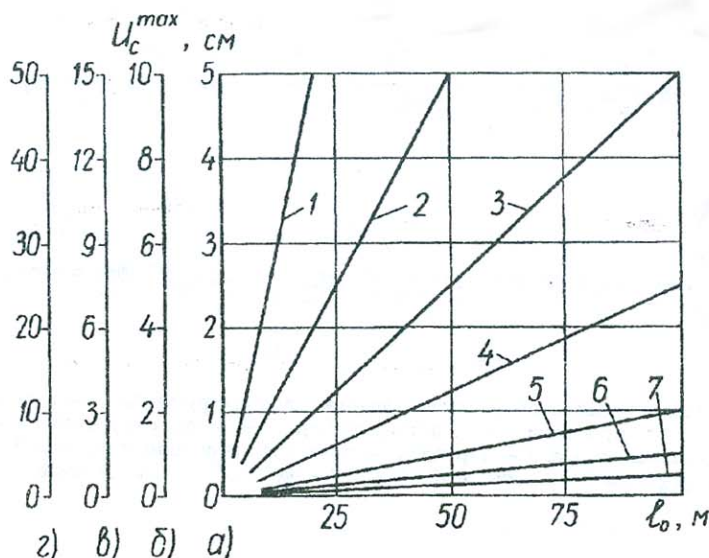


Рис. 6. Максимальный прогиб путевой структуры под действием одиночной нагрузки: а — для $P = 1$ тс; б — 2 тс; в — 3 тс; г — 10 тс; 1—7 соответственно при $T_0 = 100, 250, 500, 1000, 2500, 5000$ и 10000 тс

Такой параболический прогиб может быть легко размещен, спрятан внутри путевой структуры, если высота поперечного сечения рельса будет в пределах 10...25 см.

Анализ зависимостей на рис. 6 показывает, что значения $u_c^{\max} \leq 5$ см достижимы для $P = 1...3$ тс при $l_0 = 10...100$ м и $T_0 = 100...1000$ тс. При этом относительная величина прогиба (отнесенная к длине пролета) будет $u_c^{\max}/l_0 < 0,001$. Поэтому под действием полезной нагрузки СТС будет иметь более высокую относительную жесткость, чем существующие автодорожные мосты и путепроводы, относительный прогиб пролетных строений которых при расчетных нагрузках имеет более высокое значение.

2.3.2. Струнная путевая структура

Струнная путевая структура может быть набрана из различного количества рельсов-струн (рис. 7): от одного до четырех и более. При этом рельсы в пространстве могут размещаться в горизонтальной или вертикальной плоскости, либо образовывать в поперечном сечении треугольник или четырехугольник. Наиболее целесообразна традиционная схема, типа железнодорожной — два рельса, размещенных в горизонтальной плоскости.

Стабильность размера колеи трассы на всем протяжении обеспечивают поперечные планки (рис. 8), установленные через 5...50 м (в зависимости от усилия натяжения струн, жесткости рельсов, массы транспортного модуля и других факторов).

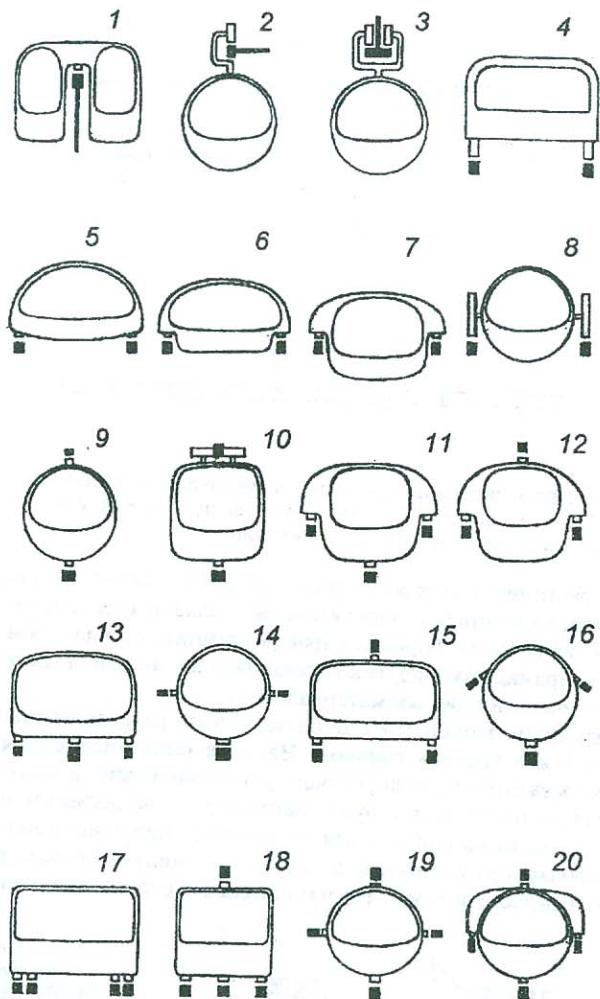


Рис. 7. Схемы размещения рельсов: 1, 2, 3 — СТС с одним рельсом; 4, 5, 6, 7, 8 — с двумя рельсами, размещенными по горизонтали; 9, 10 — с двумя рельсами, размещенными по вертикали; 11, 12, 13, 14, 15, 16 — с тремя рельсами; 17, 18, 19, 20 — с четырьмя рельсами

Основным элементом путевой структуры СТС является рельс-струна, различные варианты исполнения которой показаны на рис. 9.

Струна 3 состоит из отдельных предварительно натянутых элементов (проволок или лент), размещенных параллельно друг другу вдоль струны. Элементы струны заключены в изоляционную оболочку 4. Защитная оболочка, как и корпус 2, может выполнять функции электроизоляции, теплоизоляции и демпфирования для гашения колебаний, передаваемых струне при движении транспортного модуля. Проволоки или ленты струны могут быть изготовлены из любого материала, проч-

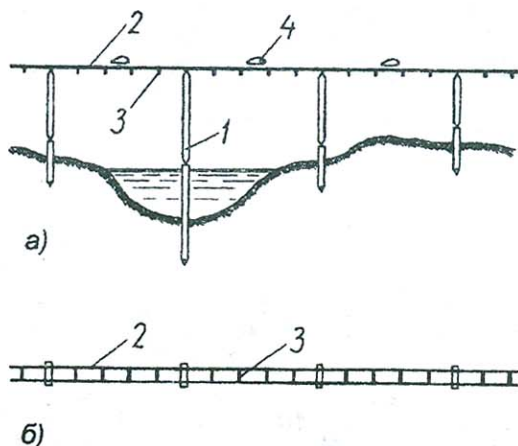


Рис. 8. Схема размещения поперечных планок по длине трассы: а — вид сбоку на СТС; б — вид сверху; 1 — поддерживающая опора; 2 — рельс; 3 — поперечная планка; 4 — транспортный модуль

ность на растяжение которого превышает 5000 кгс/см^2 : из высокопрочных сталей, алюминиевых или титановых сплавов, стекловолокна, углепластика, из волокон: борных, карбида кремния, оксида алюминия, углеродных, арамидных и других высокопрочных полимерных, керамических или композиционных материалов.

Натянутые элементы в струне могут быть разделены жидкой, консистентной или твердой смазкой. Наличие смазочной среды повысит долговечность струны, ее коррозионную устойчивость, а в случае обрыва отдельных проволок в струне (например, из-за дефектов изготовления) — позволит им сократиться по длине без нарушения напряженно-деформированного состояния остальных элементов рельса. Благодаря такой особенности и тому, что напряжения в струне практически оди-

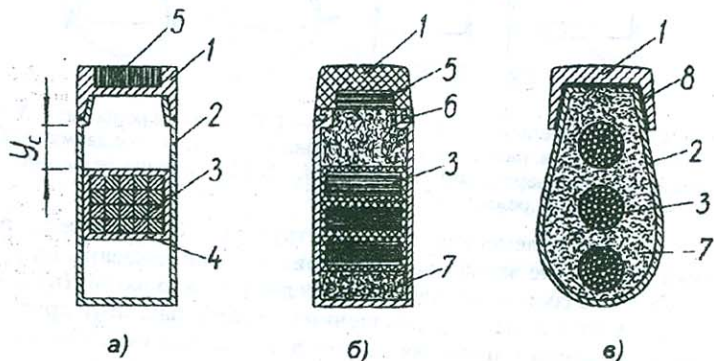


Рис. 9. Конструкция рельса-струны: а — со струной из проволок; б — из лент; в — со струной-тросом; 1 — головка рельса; 2 — корпус; 3 — струна; 4 — защитный кожух струны; 5 — дополнительная струна; 6 — замок-защелка; 7 — наполнитель; 8 — клей

наковы при наличии и отсутствии подвижной нагрузки (см. главу 1), струна может быть предварительно натянута до значений, близких к пределу прочности материала $[T_c]$:

$$T_c \leq [T_c] - \Delta T_t,$$

где ΔT_t — изменение усилия натяжения в струне, обусловленное ее температурными деформациями.

В СТС, эксплуатирующихся при неизменных температурных режимах, например, в подземных или подводных тоннелях, на участках трасс с термостатированием струны, усилия ее предварительного натяжения могут находиться в пределах $0,9[T_c] < T_c < 0,99[T_c]$. Это позволит максимально использовать прочностные возможности материала струны.

Описанная особенность СТС позволит исключить температурные деформационные швы по длине путевой структуры (так же, как их нет, например, в телефонных линиях связи или линиях электропередач). Однако это приведет к сезонному изменению напряжений в ее растянутых элементах — к увеличению их зимой и снижению летом. Поэтому максимальные значения параболического прогиба струны u_c (в середине пролета) в течение года из-за изменения значения T_c будут колебаться в пределах 10...20% от первоначального значения (от -5...-10% до +5...+10% от проектного положения — см. рис. 4). Это не отразится существенно на функционировании СТС (на ровности головки рельса в вертикальной плоскости), так как дополнительная выпуклость (зимой) и провис (летом) путевой структуры составят величину порядка $(10^{-4} \dots 10^{-5}) l_0$.

2.3.3. Транспортный модуль

Движение экипажа по путевой структуре СТС осуществляется с помощью колес, через которые производится токосъем и запитка привода электрической энергией. Варианты выполнения приводного агрегата показаны на рис. 10.

Вариант компоновочного решения четырехместного салона экипажа дальнего следования показан на рис. 11.

Для уменьшения массы колеса и исключения прохождения оси колесной пары через салон экипажа, каждое колесо имеет независимую

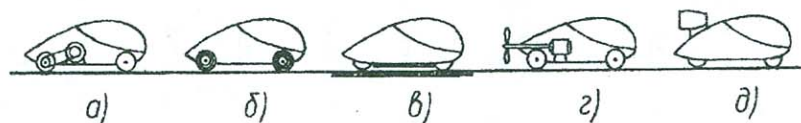


Рис. 10. Транспортный модуль с различными типами приводного агрегата: а, г — двигатель вращения с приводом на колесо и воздушный винт, соответственно; б — мотор-колесо; в — линейный электродвигатель; д — газовая турбина

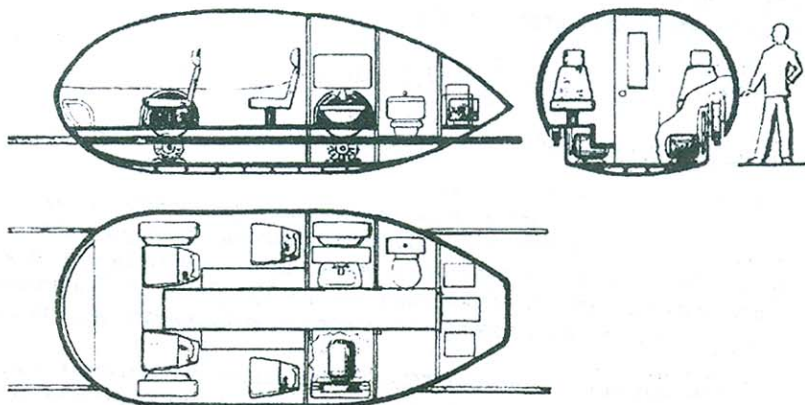


Рис. 11. Четырехместный экипаж дальнего следования

подвеску и две реборды, фиксирующие положение колеса на рельсе. При высокой скорости движения очень важно уменьшить динамические нагрузки, обусловленные микронеровностями рельсового пути и его колебаниями. Для этого колесо может быть выполнено составным (рис. 12) и обод либо реборды в нем имеют возможность поперечного (относительно рельса) перемещения. Возможно также выполнение колеса с одной ребордой или без реборд.

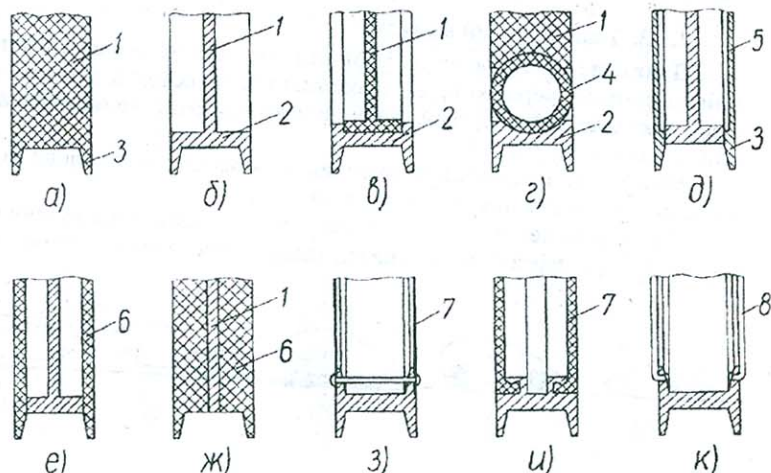


Рис. 12. Конструкция опорной части колеса: а, б — цельное (монокристаллическое) колесо; в, г, з, и, к — составное с подвижным ободом; д, е, ж — комбинированное с подвижными ребордами; 1 — тело колеса; 2 — обод; 3 — реборда; 4 — упругий торроидальный элемент; 5 — упругая пластина; 6 — упругий диск; 7 — мембрана; 8 — спица

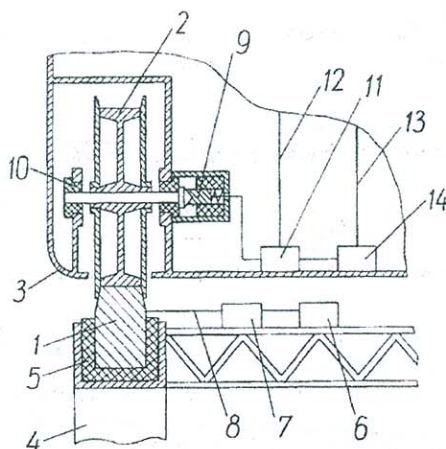


Рис. 13. Схема электропитания транспортного модуля: 1 — рельс; 2 — колесо; 3 — корпус модуля; 4 — опора СТС; 5 — электроизолятор рельса; 6 — источник электрической энергии; 7 — преобразователь; 8 — электрическая сеть для запитки рельса; 9 — токосъем с оси колеса; 10 — подшипниковый узел; 11 — распределительное устройство; 12 — высоковольтная сеть; 13 — низковольтная сеть; 14 — низковольтный источник энергии (аккумулятор)

Электропитание транспортного модуля осуществляется через контакт «колесо-рельс» (рис. 13). Оно будет эффективным даже при высоких скоростях движения, т.к. этот контакт не является скользящим, а в самом пятне контакта будут достаточно высокие усилия прижима колеса к рельсу.

2.3.4. Технология строительства СТС

Технологические этапы строительства трассы СТС показаны на рис. 14, а на рис. 15—18 изображены двухпутная трасса и основные этапы ее строительства.

2.3.5. Техничко-экономическое сравнение транспортных систем

Техничко-экономическое сравнение СТС целесообразно вести в сравнении с железнодорожным, автомобильным, воздушным транспортом и поездами с магнитным подвесом. Главными конкурентами СТС будут автомобильный и традиционный скоростной железнодорожный транспорт.

Расход материалов и стоимость двухпутной трассы СТС представлены в табл. 1. Данные приведены для трассы со следующими параметрами: средняя высота опор 20 м; расстояние между промежуточными опорами 25 м, анкерными — 1 км; усилие натяжения одной струнной путевой структуры (два рельса) 320 тс; ширина колеи 2 м; расстояние между осями путевых структур 6 м.

Издержки по эксплуатации трасс СТС можно проанализировать в сравнении со скоростными железными дорогами, транспортных модулей — в сравнении с автомобилем. Ежегодные эксплуатационные расходы будут зависеть как от провозной способности трассы, так и от расчетной скорости

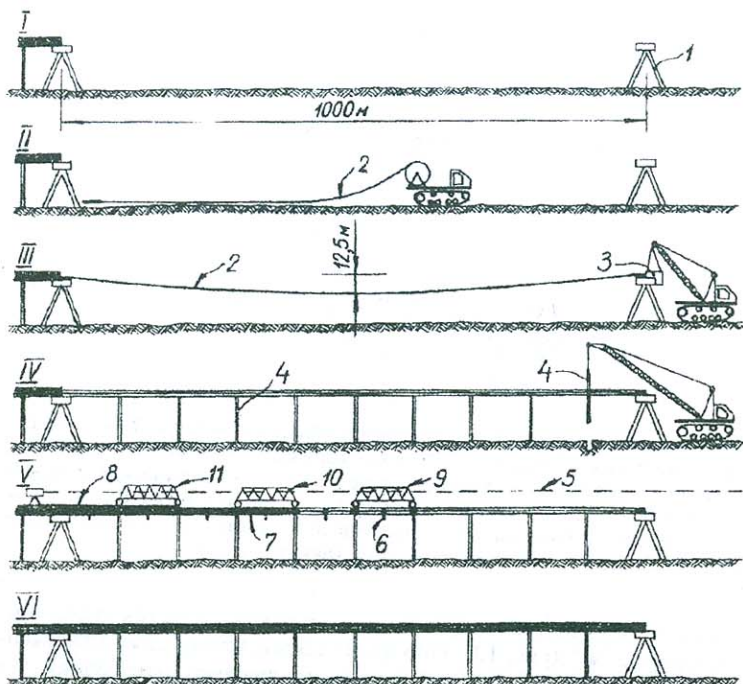


Рис. 14. Технология строительства трассы СТС: 1 — анкерная опора; 2 — трос (элемент струны); 3 — механизм натяжения троса; 4 — промежуточная опора; 5 — визирная линия; 6 — поперечная планка; 7 — корпус рельса; 8 — головка рельса; 9, 10, 11 — технологические платформы для установки, соответственно: поперечных планок, корпуса рельса и головки рельса; I — строительство анкерной опоры; II — раскладка тросов струны вдоль трассы; III — натяжение и анкеровка струны; IV — установка промежуточных опор; V — монтаж элементов рельса и путевой структуры; VI — готовый участок трассы

движения по ней. Техничко-экономические показатели двухпутной линии СТС приведены в табл. 2, а приведенные затраты пассажирских и грузовых перевозок соответственно в табл. 3 и 4.

Приведенные в табл. 3 и 4 данные следует рассматривать как частный случай, т.к. при их определении использовались жесткие требования к сроку окупаемости транспортной линии и экипажей (5 лет), была взята высокая стоимость электрической энергии (0,02 долл./кВтч) и других показателей. Их оптимизация позволит снизить приведенные затраты в 1,5—2 раза. Тем не менее, при объеме пассажирских перевозок в 50 и 100 тысяч пассажиров в сутки стоимость проезда одного пассажира (соответственно 13,23 и 7,95 долл.) на расстоянии 1000 км будет дешевле проезда по железной дороге в 2—5 раз.

По мере роста объема перевозок возрастает доля стоимости электрической энергии в приведенных затратах. Например, если при объеме пассажирских перевозок 5 тыс. пасс. в сутки доля электроэнергии составляет всего 4%, то при 100 тыс. пасс./сутки — уже 27,7%. Еще выше

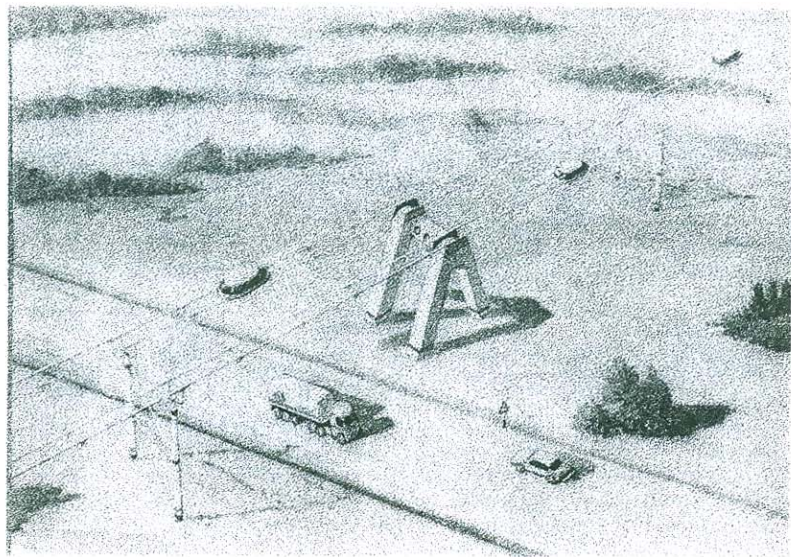


Рис. 15. Двухпутная трасса

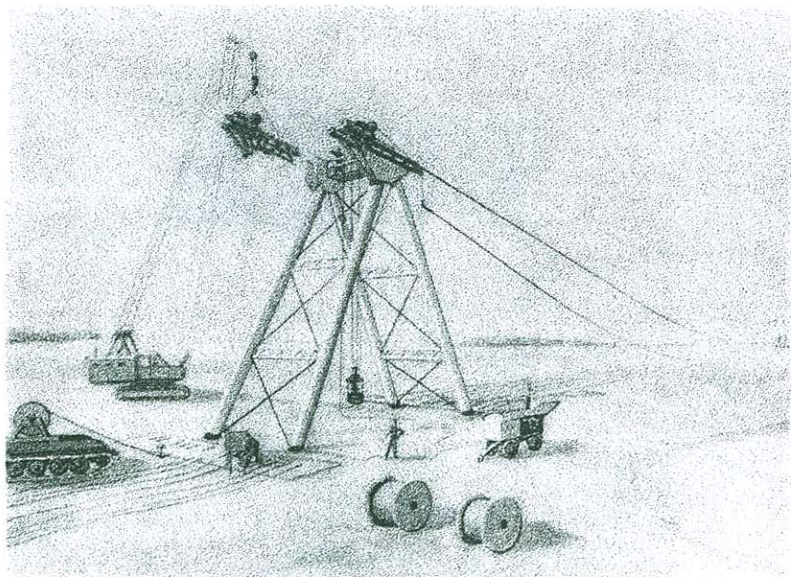


Рис. 16. Натяжение струны на анкерную опору

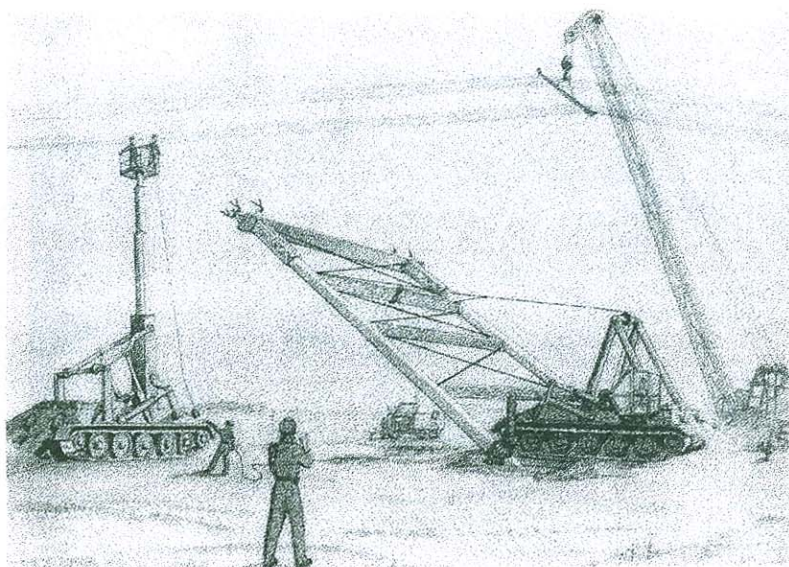


Рис. 17. Установка промежуточной опоры

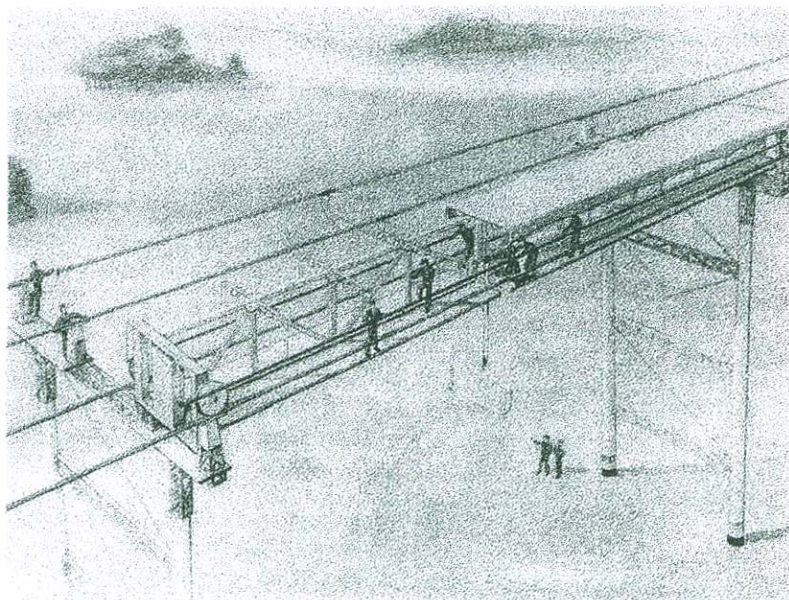


Рис. 18. Технологическая платформа для монтажа струнной путевой структуры

**Таблица 1. Расход материалов и стоимость участка двухпутной
трассы СТС протяженностью 1 км**

№ п.п.	Конструктивный элемент СТС	Материал	Расход материалов на 1 км трассы		Ориенти- ровочная стоимость*, тыс.USD/км
			масса, т	объем, м ³	
1.	РЕЛЬСЫ, всего	—	—	—	160
	В том числе:				
1.1.	Головка	Сталь, прокат	24	—	36
1.2.	Корпус	Алюминиевый лист толщиной 1 мм	4	—	18
1.3.	Струна	Сталь, проволока диаметром 1 мм	47	—	70
1.4.	Наполнитель	Композицион- ный материал	—	32	16
1.5.	Клеевая мастика	Мастика	1	—	2
1.6.	Защитная оболочка струны	Полимер	2	—	8
1.7.	Гидроизоляция струны	Полимер	1	—	6
1.8.	Прочее	—	—	—	4
2.	ПОПЕРЕЧНЫЕ ПЛАНКИ, всего	—	—	—	10
3.	ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ОПОРЫ, всего	—	—	—	90
	В том числе:				
3.1.	Столбы	Железобетон	—	160	32
3.2.	Перемычки, раскосы	Сталь, прокат	24	—	24
3.3.	Верхнее строение опор	Сталь, прокат	30	—	30
3.4.	Прочее	—	—	—	4
4.	АНКЕРНЫЕ ОПОРЫ, всего	—	—	—	25
	В том числе:				
4.1.	Тело опоры	Железобетон	—	45	9
4.2.	Свайное основание	Железобетон	—	16	4
4.3.	Металлоконструкции	Сталь, прокат	2	—	2
4.4.	Элементы анкерного крепления	Сталь	1	—	2
4.5.	Прочее	—	—	—	8

* Усредненная оценка стоимости взята с учетом стоимости материалов, изготовления элементов конструкции, их монтажа и транспортных расходов в условиях Республики Беларусь (в ценах 1995 г.).

Окончание таблицы 1

№ п.п.	Конструктивный элемент СТС	Материал	Расход материалов на 1 км трассы		Ориенти- ровочная стоимость, тыс. USD/км
			масса, т	объем, м ³	
5.	ЗЕМЛЯНЫЕ РАБОТЫ	—	—	—	5
6.	СИСТЕМА ЭЛЕКТРОЗАПИТКИ РЕЛЬСА	—	—	—	50
7.	СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЗА СОСТОЯНИЕМ ОПОР И ПУТЕВОЙ СТРУКТУРЫ	—	—	—	10
8.	СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЗА ДВИЖЕНИЕМ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА	—	—	—	20
9.	СИСТЕМА АВАРИЙНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ	—	—	—	10
10.	СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА (СТРЕЛОЧНЫЕ ПЕРЕВОДЫ И Т.П.)	—	—	—	20
11.	ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ СТАНЦИИ И ПЛОЩАДКИ ДЛЯ АВАРИЙНОЙ ОСТАНОВКИ	—	—	—	70
12.	ПРОЕКТНО- ИЗЫСКАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ	—	—	—	5
13.	СТОИМОСТЬ ОТВОДА ЗЕМЛИ И ЕЕ ПОДГОТОВКИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА	—	—	—	10
14.	ПРОЧИЕ РАСХОДЫ	—	—	—	15
	ВСЕГО				500

Таблица 2. Техничко-экономические показатели двухпутной линии

№ п.п.	Показатель	Величина
1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСПОРТНОЙ ЛИНИИ		
1.1.	Общая стоимость, тыс. долл./км	500
1.2.	Амортизационные отчисления, %	5
1.3.	Коэффициент развития линии	1,1
1.4.	Годовые эксплуатационные издержки и затраты по содержанию и текущему ремонту путевой структуры и опор, % от стоимости (тыс. долл./км)	10(50)
1.5.	Норма прибыли, %	20
2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКИПАЖА		
2.1.	Стоимость, тыс. долл./шт.	
	- пассажирский:	
	бизнес-класса	10
	первого класса	15
	класса "люкс"	20
	- грузовой	5
2.2.	Вместимость, чел.:	
	бизнес-класса	5
	первого класса	2
	класса "люкс" (спальный экипаж)	1
2.3.	Грузоподъемность, кг:	
	- пассажирский	500
	- грузовой	1500
2.4.	Общая масса, кг:	
	- пассажирский	1500
	- грузовой	1000
2.5.	Коэффициент использования на линии	0,5
2.6.	Резерв парка подвижного состава, %	20
2.7.	Среднеходовая скорость, км/ч	500
2.8.	Годовой пробег одного экипажа, млн км	1,825
2.9.	Годовой объем перевозок одним транспортным модулем:	
	- пассажиров, тыс. пасс./1000 км	8,29
	- грузов, тыс. т/1000 км	2,49
2.10.	Удельные энергозатраты на тягу:	
	- пассажирский, кВтч/(пасс.-км)	0,1
	- грузовой, кВтч/(тркм)	0,33
2.11.	Амортизационные отчисления, %	10
2.12.	Годовые эксплуатационные издержки, % от стоимости экипажа	10
2.13.	Норма прибыли, %	20

Таблица 3. Затраты на пассажирские перевозки по транспортной линии СТС протяженностью 1000 км

Показатель	Объем пассажирских перевозок, тыс. пасс./сутки (млн. пасс./год)					
	Однопутная линия			Двухпутная линия		
	1 (0,365)	2,5 (0,913)	5 (1,825)	10 (3,65)	50 (18,25)	100 (36,5)
1. Приведенные затраты для СТС, долл. на 1000 пасс.-км	266,37	108,16	55,42	55,42	13,23	7,95
В том числе:						
1.1. Издержки по транспортной линии, всего	263,69	105,48	52,49	52,74	10,55	5,27
В том числе:						
- амортизационные отчисления	37,67	15,07	7,53	7,53	1,51	0,75
- эксплуатационные издержки	75,34	30,14	15,07	15,07	3,01	1,51
- отчисления на прибыль	150,68	60,27	30,14	30,14	6,03	3,01
1.2. Издержки по подвижному составу, всего	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68

Таблица 4. Затраты на грузовые перевозки по транспортной линии СТС протяженностью 1000 км

Показатель	Объем грузовых перевозок, тыс. т/сутки (млн. т/год)					
	Однопутная линия			Двухпутная линия		
	5 (1,825)	10 (3,65)	25 (9,125)	50 (18,25)	100 (36,5)	250 (91,25)
1. Приведенные затраты для СТС, долл. на 1000 тркм	60,80	34,43	18,60	18,60	13,33	10,17
В том числе:						
1.1. Издержки по транспортной линии, всего	52,74	26,37	10,54	10,54	5,27	2,11
В том числе:						
- амортизационные отчисления	7,53	3,77	1,51	1,51	0,75	0,30
- эксплуатационные издержки	15,07	7,53	3,01	3,01	1,51	0,60
- отчисления на прибыль	30,14	15,07	6,02	6,02	3,01	1,21
1.2. Издержки по подвижному составу, всего	8,06	8,06	8,06	8,06	8,06	8,06

доля стоимости энергии в грузовых перевозках — при 10 и 250 тыс. т/сутки соответственно 21,1 и 71,4%. Поэтому грузовые перевозки целесообразнее осуществлять в диапазоне более низких скоростей движения (100—250 км/ч), где ниже потери энергии на аэродинамику, и следует строить для них более дешевые специальные грузовые трассы.

2.4. ТРЕТЬЯ ГЛАВА МОНОГРАФИИ

Представлены задачи механики высокоскоростного транспорта применительно к СТС:

- а) динамика движения транспортных модулей по струнной направляющей (транспортный модуль, струна);
- б) прочность транспортных модулей и струнной направляющей;
- в) трибология контакта колесо-струна (проскальзывание и изнашивание; электропроводность контакта; температурные режимы).

2.5. ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА МОНОГРАФИИ

Представлена динамическая модель и расчетные оценки параметров движения транспортных модулей по струнной транспортной линии (СТЛ).

2.5.1. Вывод уравнений движения СТС

Рассмотрена горизонтальная СТС с числом пролетов N_0 , длиной каждого пролета l_0 и двумя параллельными СТЛ, по которым движутся транспортные модули (ТМ). Расчетная схема СТС в поперечном разрезе представлена на рис. 19, где 1 — металлический корпус коробчатого

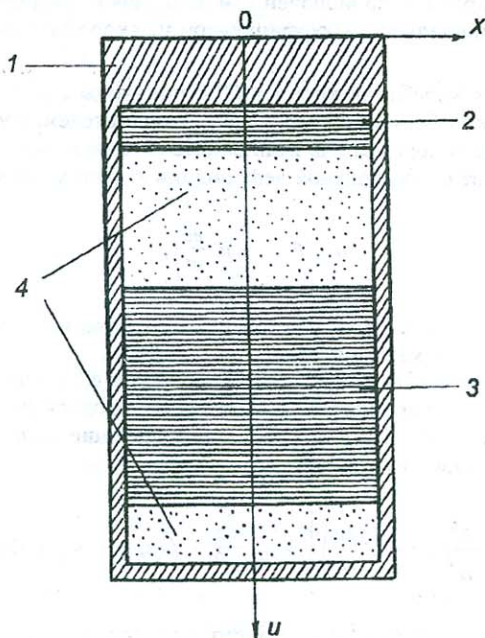


Рис. 19

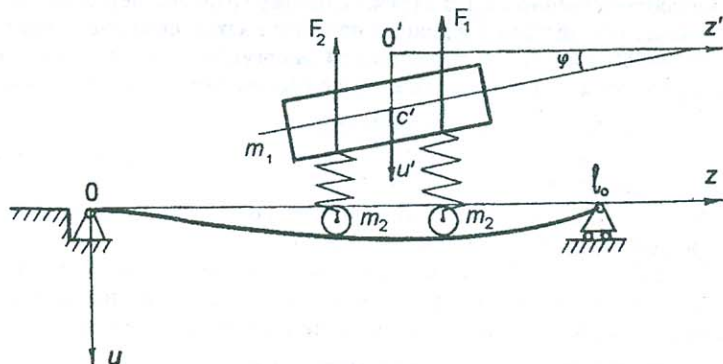


Рис. 20

сечения; 2 и 3 — предварительно напряженные (натянутые) элементы, слабо сопротивляющиеся изгибу (струны, соответственно верхняя и нижняя); 4 — заполнитель (сплошная среда, занимающая объем внутри корпуса).

ТМ представляет собой тележку, имеющую платформу массой $2m_1$ и четыре равномерно нагруженные в состоянии покоя колеса массой m_2 каждое. Амортизатор (подвеска колеса) моделируется пружиной с жесткостью s и параллельно включенным демпфером, рабочее усилие которого пропорционально с коэффициентом ν_a скорости изменения длины пружины.

Уравнения колебаний корпуса СТЛ получены с учетом изгибных вертикальных колебаний корпуса СТЛ с заполнителем. Будем считать, что для материала корпуса и для заполнителя зависимость нормального напряжения σ от относительной деформации ε дается формулой

$$\sigma = E \left(\varepsilon + \mu' \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right), \quad (1)$$

где постоянные E — модуль Юнга и μ' — коэффициент, характеризующий внутреннее трение материала.

Введем допущения о том, что при изучении вертикальных колебаний корпус СТЛ с заполнителем является однородной балкой с осредненными значениями E и μ' в (1). Тогда уравнение поперечных колебаний корпуса будет иметь вид:

$$E \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left[I \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(u + \mu' \frac{\partial u}{\partial t} \right) \right] + \rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = f(z, t) + R_1 + R_2 + \rho_0 g. \quad (2)$$

Здесь $u(z, t)$ — прогиб, $I(z)$ — момент инерции поперечного сечения, $\rho(z)$ — линейная плотность корпуса с заполнителем, $f(z, t)$ — интенсивность внешней нагрузки на корпус без учета силы тяжести,

$R_1(z, t)$, $R_2(z, t)$ — интенсивность воздействия на корпус верхней и нижней струн соответственно, g — ускорение свободного падения.

Уравнения движения одиночного ТМ, въезжающего на СТЛ в момент времени $t = 0$ (при плоскопараллельном движении его платформы без отрыва колес от линии) будут иметь вид:

$$m_1 \frac{d^2 U}{dt^2} = -F_1 - F_2 + m_1 g,$$

$$I_{c'} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \text{мом}_{c'} \bar{F}_1 + \text{мом}_{c'} \bar{F}_2 \quad (3)$$

Здесь $U = O'C'$, φ — угол наклона оси платформы, $I_{c'}$ — момент инерции платформы относительно центра масс C' ; $\bar{F}_1, \bar{F}_2$ — силы реакции амортизаторов, действующие на платформу.

2.5.2. Статический анализ

Получены формулы для определения максимальных значений параболического прогиба струны под действием веса путевой структуры ($u_c^{\max}$) и прогиба путевой структуры под действием сосредоточенной нагрузки P ($u_c^{\max}$):

$$u_c^{\max} = g l_0^2 \frac{\rho_0}{8T_c}, \quad (4)$$

$$u_c^{\max} = \frac{l_0 P}{4T_0}. \quad (5)$$

Графики прогибов, определенных по формулам (4) и (5) представлены на рис. 5 и 6, а их анализ дан в главе 2.

2.5.3. Анализ динамики

Колебания гибких пролетов СТС под действием одиночной нагрузки и группы экипажей исследованы для различных расчетных случаев. Определено, что основной динамической характеристикой СТЛ будет скорость распространения волны деформации вдоль нее $a = (T_0/\rho_0)^{1/2}$.

1. Случай $v > a$. При увеличении v максимальный динамический прогиб пролета убывает, а при скорости v , близкой к скорости a , в два раза превышает максимальный статический прогиб.

2. Случай $a/2 \leq v < a$. При уменьшении скорости v от a до $a/2$ прогиб $u^{\max}$ уменьшается в 9/8 раз.

Рассмотрен также динамический прогиб при движении потока нагрузок по жесткой СТЛ с разрезным корпусом над опорами и при движении по бесконечной сплошной СТЛ. Проведен анализ времени затухания длинных и коротких волн после схода нагрузки с пролета, получены условия резонанса при движении потока нагрузок по СТЛ со сплошным и разрезным корпусом.

Проведены численные исследования динамического прогиба пролета СТЛ и сделаны выводы:

а) одиночная нагрузка на СТЛ с разрезным корпусом:

- колебания пролета быстро затухают даже при малых значениях коэффициентов затухания и после схода нагрузки с пролета практически исчезают; максимальный динамический прогиб для $l_0 = 50$ м не превысит 1,5 см;

- в форме пролета четко просматривается положение нагрузки и направление ее движения, а также заметно влияние отраженных волн прогиба;

б) поток нагрузок на СТЛ с разрезным корпусом:

- основной вклад в значение прогиба в любой точке пролета вносит его стационарная составляющая ($\approx 90\%$ при $l_0 = 25$ м, $\approx 80\%$ при $l_0 = 35$ м, $\approx 70\%$ при $l_0 = 50$ м);

- динамический прогиб слабо зависит от направления движения потока нагрузок;

- максимальный прогиб растет с увеличением длины пролета l_0 и мало в сопоставлении с l_0 (относительный прогиб с увеличением пролета уменьшается) и находится в пределах 0,7...1,3 см.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На основании выполненных автором исследований предложены научно обоснованные пути совершенствования высокоскоростного наземного транспорта, даны решения ряда технических, технологических, экономических и экологических проблем, имеющих большое народнохозяйственное значение. При решении проблемы были получены следующие основные результаты:

1. Предложена, научно обоснована и исследована принципиально новая линейная струнная транспортная система. Показано, как наилучшим образом использовать физико-механические свойства материалов, чтобы снизить материалоемкость и капитальные затраты на сооружение транспортных коммуникаций.

2. Разработаны основы создания основных составных элементов струнных транспортных систем: опор (анкерных, промежуточных и тормозных), рельса-струны, путевой структуры, транспортного модуля.

3. Разработана и испытана форма корпуса транспортного модуля для струнных систем с коэффициентом аэродинамического сопротивления $C_x = 0,075$, не имеющего аналогов в других видах транспорта.

4. Разработаны основы технологии поточного строительства струнных транспортных систем.

5. Исследованы варианты выполнения струнной путевой структуры, осуществлена их оптимизация и выбор наиболее целесообразного варианта с двумя горизонтально размещенными рельсами-струнами.

6. Исследована статика струнных транспортных систем, определены максимальные прогибы струн под действием весовых нагрузок, а путевой структуры — под действием подвижной нагрузки. Даны рекомендации по выбору и оптимизации основных параметров системы: усилий натяжения струн, длины пролетов, высоты рельса-струны, размеров, вместимости и грузоподъемности транспортных модулей и др.

7. Исследована динамика колебаний путевой структуры и транспортного модуля при различных режимах движения (одиночный модуль и их поток в широком диапазоне скоростей), различной конструкции путевой структуры (сплошной и разрезной рульс-струна) и широком диапазоне конструктивных параметров (длина пролета, усилие натяжения струны, жесткость рельса, масса экипажа, физико-механические характеристики используемых материалов, жесткость подвески колеса, демпфирующие способности элементов системы и др.). Сделаны выводы и даны рекомендации:

- определены условия организации безрезонансного движения одиночного экипажа и потока экипажей по СТЛ;

- определены условия, при которых обеспечивается, путем подбора конструктивных параметров СТЛ и режимов движения экипажей, движение потока нагрузок по невозмущенному полотну (колебания остаются позади каждого экипажа и затухают через 0,1...0,5 с, до появления следующего экипажа);

- показано, что в случае потока нагрузок условия динамического нагружения пролета более благоприятны, чем при движении одиночной нагрузки;

- определено, что струнная транспортная линия сплошной конструкции предпочтительнее по сравнению с СТЛ с разрезным над опорами корпусом, т.к. динамический прогиб такого пролета будет ниже, а его форма не будет иметь угловых точек.

8. Осуществлен технико-экономический анализ струнных транспортных систем для пассажирских и грузовых перевозок. Оптимизирована организация движения транспортных модулей с целью снижения себестоимости перевозок.

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

1. Юницкий А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в космосе. / Гомель: "Инфотрибо". 1995. — 337 с.
2. Юницкий А.Э. Линейная транспортная система. Международная заявка на изобретение РСТ/IB94/00065 от 08.04.94. Заявитель "NTL Neue Transportlinien GmbH" (Германия) и Юницкий А.Э.
3. Юницкий А.Э. Линейная транспортная система. Патент Российской Федерации по заявке №94026782/11 (026280) от 11.01.95 г. МПК B61B 5/02, B61B 13/00, E01B 25/22. Патентообладатели "NTL Neue Transportlinien GmbH" (Германия) и Юницкий А.Э.
4. Anatoly E. Yunitsky. Linear transport system. Letters patent Republic of South Africa № 95/2888, 07.04.1995. International classification B65G.
5. Юницкий А.Э., Савчук В.П., Савенков В.А., Вярвильская О.Н. Анализ колебаний пролетных строений струнной транспортной системы / Тезисы докладов Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике "Механика-95", Минск, 1995, с. 253—254.
6. Юницкий А.Э., Савчук В.П., Савенков В.А., Вярвильская О.Н. К динамике струнной транспортной системы / Тезисы докладов Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике "Механика-95", Минск, 1995, с. 254—255.
7. Юницкий А.Э. Высокоскоростной наземный транспорт НТЛ / Тезисы докладов международной научно-практической конференции "Ресурсо- и энергосберегающие технологии на транспорте и строительном комплексе", Гомель, 1995, с. 69—70.