

ЮНИЦКИЙ Анатолий Эдуардович

СТРУННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ –  
НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАЗЕМНОМ ТРАНСПОРТЕ



Москва, 2004

## Содержание

|   |    |
|---|----|
| 1. Общая характеристика работы .....  | 3  |
| 1.1. Актуальность проблемы .....  | 3  |
| 1.2. Цель работы .....  | 4  |
| 1.3. Научная новизна и значимость работы.....   | 5  |
| 1.4. Практическая ценность работы .....   | 6  |
| 2. Основное содержание работы.....  | 7  |
| 2.1. Оптимизация транспортной системы .....   | 7  |
| 2.2. Конструктивные особенности СТЮ .....   | 16 |
| 2.2.1. Принципиальная схема СТЮ .....   | 16 |
| 2.2.2. Струнная путевая структура .....   | 20 |
| 2.2.3. Подвижной состав СТЮ .....   | 23 |
| 3. Техничко-экономическое обоснование СТЮ.....  | 33 |
| 4. Статика СТЮ .....  | 35 |
| 5. Динамика СТЮ.....  | 37 |
| 6. Апробация проекта СТЮ, международное сотрудничество,<br>публикации, реализация ..... | 40 |
| 6.1. Основные результаты реализации проекта .....                                       | 40 |
| 6.2. Международное сотрудничество .....   | 42 |
| 6.3. Научные труды по тематике СТЮ.....   | 43 |
| 6.4. Текущие работы по проекту .....  | 44 |
| 7. Перспективы программы СТЮ .....  | 45 |
| 7.1. Альтернативные варианты использования технологии СТЮ.....                          | 45 |
| 7.2. Разработанные проекты трасс СТЮ .....  | 45 |
| 7.3. Доставка природной питьевой воды .....   | 45 |
| 7.4. Проект "Линейный город".....   | 46 |
| 7.5. Создание новой отрасли .....   | 47 |
| 8. Основные результаты работы .....   | 50 |
| 9. Список основных публикаций по тематике СТЮ .....                                     | 53 |

# 1. Общая характеристика работы

## 1.1. Актуальность проблемы

Транспорт – это огромная индустрия, и эту индустрию в XXI веке ожидают большие перемены, связанные с тремя основными факторами.

Во-первых, на планете происходит изменение ситуации, связанное с проблемой энергетических ресурсов. Современный транспорт почти полностью зависит от нефти, запасы которой быстро истощаются, и в конце концов наступит время, когда она станет недоступной для использования на транспорте. Различные способы повышения эффективности использования нефти могут отодвинуть, но не предотвратить наступление этого времени. Транспортная система будущего должна быть "всеядной": в начале развития она может работать на относительно дешевом нефтяном топливе, затем должна быть электрифицирована, либо переведена на альтернативные виды топлива или другие источники энергии без дополнительных значительных затрат.

Вторым фактором, диктующим необходимость перемен, является современное состояние самой мировой транспортной системы, основные стандарты которой, например, железнодорожная колея, были заложены ещё в XIX веке. Система является устаревшей, а некоторые её элементы устарели уже давно, так как в неё вносились лишь небольшие и малосущественные изменения, не затрагивающие основ системы.

В-третьих, в XXI веке ещё острее встанут глобальные проблемы экологии и безопасности, так как транспорт, из-за масштабности своего использования, стал наиболее опасным изобретением человечества. Приведем лишь два примера: 1) из-за транспортных катастроф на планете ежегодно гибнет более миллиона человек (из них около 950 тысяч – на автомобильных дорогах; еще больше людей умирает от транспортных травм и смертельно опасных изменений в организме много путешествующих авиапассажиров, особенно в результате многочасовых авиаперелетов), около 5 млн. человек становятся инвалидами и калеками, в то время как в войнах, учитывая мировые войны, гибнет в среднем около 500 тыс. человек в год; 2) только в одной стране, в США, закатана под асфальт и бетон дорог (их протяжённость более 6 млн. км) территория, равная площади Греции. Эта земля не дышит, не производит кислород, в то время как в двигателях транспортных средств США сжигается больше кислорода, чем его производят зелёные растения, растущие на её территории.

Таким образом, возникает острая необходимость в появлении новой транспортной системы, основанной на новых технологиях и новых стандартах, способных привести к радикальным изменениям в способах транспортировки.

Будущая транспортная система для перевозки пассажиров, мало- и крупнотоннажных грузов должна удовлетворять многим противоречивым

требованиям: высокая пропускная способность при малой площади занимаемой земли и низких затратах на содержание и ремонт путей сообщения; минимальное негативное воздействие на окружающую среду при сохранении большого суточного пробега транспортного средства; высокая средняя скорость движения при снижении расхода топлива и числа дорожно-транспортных происшествий; путь движения должен быть пригоден для движения и маневрирования общественного и индивидуального транспорта.

Таким, образом, в настоящее время весьма актуальна задача создания принципиально нового вида наземного транспорта, сочетающего 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 стороны – свободного от их недостатков: экологической опасности и высокой аварийности автотранспорта, больших площадей отчуждения земли под автомобильные и железные дороги, удаленности 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 (бесколёсных) 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 реактивным двигателем – 9851 км/ч. Таковы рекорды. Для нужд наземного транспорта достаточна скорость в 350...500 км/ч, а это всего 3000...5000 оборотов в минуту для колеса средних размеров.

## **1.2. Цель работы**

Цель работы – разработка принципиально новой транспортной системы, экологически безопасной, имеющей низкую материалоемкость, не требующей для своего строительства большого отчуждения земли, работающей на электрической или химической энергии и имеющей высокую скорость движения экипажей с опорой на колеса.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- найти технические решения, позволяющие максимально использовать прочностные свойства материалов 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, подвижному составу;
- предложить технологию строительства и организацию движения подвижного состава при заданной пропускной способности;
- исследовать статику путевой структуры с учетом сезонных изменений температуры;
- исследовать динамику движения транспортных модулей и колебаний путевой структуры, дать рекомендации по выбору параметров и организации движения, исключающих резонансные явления;
- оценить значимость полученных результатов и выполнить их технико-экономический анализ;
- разработать новые технологии и процессы, способы, устройства, системы и технологические решения, обеспечивающие реализацию принципиальной схемы новой транспортной системы.

### **1.3. Научная новизна и значимость работы**

Научная новизна и значимость работы состоят в том, что в ней использован комплексный подход к транспортным проблемам современности и перспективам их развития, что позволило получить принципиально новые решения в различных областях техники.

Разработан проект струнной путевой структуры, имеющей повышенную ровность, высокую жесткость и низкую материалоемкость.

Теоретически исследована динамика подвижного состава и путевой структуры в широком диапазоне скоростей движения (0...150 м/с) [3]. Выявлены основные параметры транспортной системы, оказывающие наибольшее влияние на ее динамику. 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. 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 предложенного автором струнного транспорта Юницкого (СТЮ) показывают, что СТЮ в будущем может стать лиди-

рующим видом 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 подвижного состава.

#### **1.4. Практическая ценность работы**

Практическая ценность проекта СТЮ 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), высокоразвитых странах, экономика которых позволит создать новую сеть скоростных трасс СТЮ (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. Например, 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 USD для стран ЕС, а с учетом всего континента, включая бывший СССР – 300 миллиардов USD. Основные линии оцениваются в 70 миллиардов USD. 1 ноября 1993 г. вступил в силу Договор ЕС, подписанный в Маастрихе. Глава 12 этого договора обязывает Союз развивать трансъевропейские 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 СТЮ в различных географических условиях (на равнинных участках, в горах и на море).

Разработана инженерная методика определения монтажных прогибов и усилий натяжения струн, их изменения в случае разновысоких опор, перемещений путевой структуры СТЮ под действием стационарной нагрузки и динамики ее колебаний под действием движущихся экипажей в диапазоне скоростей до 150 м/с (до 540 км/час).

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

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 СТЮ.

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, управление их движением по линии с заданной пропускной способностью, прочность модулей и направляющей, трибология контакта "колесо – рельс" и др.

## **2. Основное содержание работы**

Основу любой транспортной системы составляет транспортная магистраль, по которой осуществляется движение транспортных модулей. Как правило, она является очень материалоёмкой (автодорожное полотно, железнодорожный рельсовый путь со шпальной решеткой, 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 монографии автора "Струнные транспортные системы: на Земле и в космосе" [3]. В настоящее время готовится 2-е издание, переработанное и дополненное.

### **2.1. Оптимизация транспортной системы**

XXI век предъявит массовому транспорту более жёсткие требования, чем все предыдущие тысячелетия развития.

Во-первых, пользователей станет больше – около 8 млрд. человек, при этом, по данным ООН, уже к 2030 г. коммуникативность людей возрастёт в 6 раз, а население городов мира увеличится на 3 млрд. человек. Поэтому пропорционально будет расти и потребность в скоростном транспорте.

Во-вторых, начнёт исчерпываться целый ряд ископаемых минеральных ресурсов, в первую очередь углеводородного сырья, и человечество начнёт разрабатывать новые месторождения во всё более отдалённых и труднодоступных местах, удалённых от потребителя на 10 тыс. км и более.

В-третьих, ещё острее встанут глобальные проблемы экологии и безопасности, так как транспорт, как уже отмечалось выше, из-за масштабности своего использования сегодня стал наиболее опасным изобретением человечества.

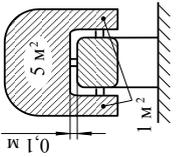
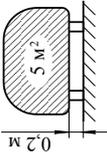
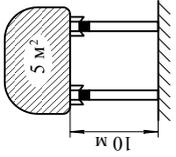
Сегодня известно более 300 видов и вариантов транспортных систем, но какая из них наиболее близка к идеальной? И что такое идеальная транспортная система?

Если берётся груз в точке А, скажем, в Лондоне, и доставляется в точку В, например, во Владивосток, то энергетическое состояние груза при этом не изменяется: в точке В он имеет ту же высоту над уровнем моря и ту же нулевую скорость относительно земли. Поэтому с точки зрения физики полезная транспортная работа в гравитационном поле Земли, в данном случае, равна нулю и в идеале затраты энергии на перемещение груза также должны быть равны нулю. А поскольку энергия все-таки расходуется, то с позиций механики коэффициент полезного действия любой реальной наземной транспортной системы всегда будет равен нулю, т.к., если разделить ноль на какое-либо число, то в результате также получится ноль. Поскольку любое наземное транспортное средство расходует энергию не на полезную транспортную работу, а на преодоление сопротивления окружающей среды и на разрушение этой среды, то совершенствование транспорта должно быть направлено не на наращивание мощности двигателей, повышение грузоподъёмности и пассажировместимости, увеличение скоростей, как это происходит сейчас, а – на уменьшение сопротивления перемещению.

В табл. 1 представлен анализ основных видов сопротивления движению усредненного высокоскоростного транспортного модуля, имеющего скорость движения 100 м/с (360 км/час), массу 10 т и площадь поперечного сечения (мидель) 5 м<sup>2</sup>. Основное сопротивление движению такого транспортного средства – это аэродинамическое сопротивление, которое зависит не только от формы корпуса модуля и качества его поверхности, но и от схемы его размещения относительно путевой структуры. Монорельсовая схема подвеса, которая использована, например, в поезде на магнитном подвесе "Трансрапид" (в таблице – крайняя слева схема), имеет самое высокое значение коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_x$ . Его значение при скорости 100 м/с не может быть ниже 0,3 из-за наличия "юбки", охватывающей несущую балку, и градиента скоростей в воздушном зазоре между движущейся со скоростью 100 м/с "юбкой" и неподвижной балкой. Минимально возможное значение  $C_x$  для модуля, размещённого в непосредственной близости от полотна (как у автомобиля), – 0,2, из-за эффекта экрана, который создаёт неподвижное дорожное полотно (в таблице – средняя схема). Наименьшее значение  $C_x = 0,1$  – у бескрылого модуля, летящего на высоте 10 м и более (крайняя справа схема). В первом случае мощность аэродинамического сопротивления составит 1120 кВт (это мощность двух танковых двигателей), во втором случае – 620 кВт (мощность маневрового тепловоза), в третьем – 310 кВт (мощность двигателя современного легкового автомобиля).

Таблица 1

## Сопротивление движению усредненного\* высокоскоростного транспортного модуля

| Показатель                         | Аэродинамическое сопротивление**  |   |  | Колесо                      |  | Магнитный подвес + линейный электродвигатель (КПД 40%) | Воздушный подвес (КПД 30%) |
|------------------------------------|---|---|--|-----------------------------|--|--|----------------------------|
|                                    | <br>$C_x^{\min} = 0,3$ | <br>$C_x^{\min} = 0,2$ | <br>$C_x^{\min} = 0,1$ | Резиновое<br>( $K = 0,05$ ) | Стальное<br>Колесная пара с коническими колесами ( $K = 0,001$ )<br>Колесо с независимой подвеской без конуса ( $K = 0,0005$ ) |  |                            |
| Мощность сопротивления, кВт        | 1120  | 620   | 310  | 500                         | 10   | 1700   | 2600                       |
| Расход топлива, т/год              | 1220  | 680   | 340  | 550                         | 11   | 1800   | 2800                       |
| Стоимость топлива, тыс. USD/год*** | 610   | 340   | 170  | 275                         | 5,5  | 900  | 1400                       |
| Мощность сопротивления, млн. кВт   | 11200   | 6200  | 3100   | 5000                        | 100  | 17000  | 26000                      |
| Расход топлива, млн. т/год         | 12200   | 6800  | 3400   | 5500                        | 110  | 18000  | 28000                      |
| Стоимость топлива, млрд. USD/год   | 6100  | 3400  | 1700   | 2750                        | 55   | 9000   | 14000                      |

\* Усредненный транспортный модуль: скорость движения - 100 м/с (360 км/час); масса - 10 т; вместимость - 50 чел. (6 т груза); коэффициент использования - 0,5 (12 час./сутки); расход топлива - 0,25 кг/кВт час; мидель салона -  $f_m = 5 \text{ м}^2$

\*\* Мощность аэродинамического сопротивления:  $W_{a.c.} = \frac{1}{2} \rho v^3 \cdot c_x \cdot f_m$  (где  $\rho$  - плотность воздуха,  $v$  - скорость движения,  $c_x$  - коэффициент аэродинамического сопротивления,  $f_m$  - мидель салона)

\*\*\* Среднемировая стоимость топлива - 0,5 USD/кг

Разница в мощностях аэродинамического сопротивления особенно существенна, если учесть масштабный фактор – предположим, что на сети дорог в 10 млн. км будет эксплуатироваться 10 млн. скоростных модулей (по одному модулю на 1 км трасс или по одному модулю на 600...800 жителей, т.е. примерно в 50 раз меньше, чем сегодня автомобилей). Тогда годовой расход топлива на аэродинамику составит 12,2 млрд. тонн для модулей с "юбкой" и 6,8 млрд. тонн для модулей типа автомобиля. Это превышает прогнозную добычу нефти – по данным Всемирного Энергетического Совета, мировое потребление нефти составит в 2020 г. 5,3 млрд. тонн. Стоимость годового потребления топлива скоростным транспортом при этом составит (исходя из сегодняшней средней мировой цены – 0,5 USD/кг): в первом случае – 6,1 триллиона USD, во втором – 3,4 триллиона USD. Приемлемые показатели только у бескрылого самолёта, который назван автором "юнилёт" – такой транспорт будет потреблять 3,4 млрд. т горючего в год, стоимость которого составит 1,7 триллиона USD. Это примерно соответствует мировому потреблению топлива транспортом сегодня (с учётом электрифицированных дорог: железные дороги, трамвай, троллейбус, метро, поезд на магнитном подвесе, канатные и монорельсовые дороги и др.).

Разница в годовом расходе топлива по первой и третьей схемам составит 8,8 млрд. тонн, или в стоимостном выражении – 4,4 триллиона USD. Причём только "юбка", увеличивающая мидель скоростных модулей не менее чем на 1 м<sup>2</sup>, даст перерасход топлива в размере 2 млрд. т/год на сумму 1 трлн. USD.

Невысокие характеристики также у транспортных средств, использующих воздушную подушку и магнитный подвес с линейным электродвигателем. Мало того, что у них очень плохая аэродинамика, но и система их подвеса очень чувствительна к зазору между полотном и "юбкой", т.к. при увеличении зазора, который, например, в "Трансрапиде" не должен превышать 10 мм, КПД привода резко падает и не превышает 40%. Причём такой подвес чувствителен к загрязнениям в зазоре, в том числе в виде снега и льда. А с учётом КПД электростанций, где идёт первичная выработка электроэнергии, её потерь в линиях электропередач, многочисленных трансформаторных подстанциях, преобразователях, кабельном хозяйстве, электродвигателях, суммарное энергетическое КПД такой системы составляет менее 10%, в то время как у современного паровоза КПД достигает 15%. Если же говорить о расходе топлива, то его суммарное годовое потребление в последнем случае составило бы 18 млрд. тонн при стоимости 9 триллионов USD. К этим затратам топлива необходимо добавить и расход горючего на аэродинамику.

Колесо имеет лучшие характеристики среди других систем подвеса скоростного модуля относительно путевой структуры. Однако резиновое колесо плохо подходит для высоких скоростей, так как при скорости 100 м/с его сопротивление качению увеличивается и составляет 0,05 (т.е. его КПД = 95 %). Поэтому на преодоление этого сопротивления (в дополнение к аэро-

динамическому сопротивлению) потребуется дополнительная мощность двигателя модуля в 500 кВт, что для указанного мирового скоростного парка модулей потребует дополнительного расхода топлива в 5,5 млрд. т/год (2,75 триллиона USD в год).

Наилучшие характеристики имеет стальное колесо, имеющее независимую ("автомобильную") подвеску и цилиндрическое опирание. Наличие колёсной пары, у которой левое и правое колёса всегда будут иметь различия в диаметрах, а также наличие конической опорной поверхности, приводит к проскальзыванию колёс пары относительно рельса, что увеличивает коэффициент сопротивления качению с 0,0005 до 0,001. Цена этой разницы в 0,0005 для упомянутого ранее парка модулей составит 55 млн. тонн топлива в год стоимостью 27,5 миллиарда USD. За 100 лет эта разница составит 5,5 млрд. тонн топлива стоимостью 2,75 триллиона USD, хотя речь, казалось бы, идёт о такой "мелочи": использовать колесо с КПД 99,9% или 99,95% ?

Маловероятно, что в XXI веке изобретут движитель модуля с КПД более высоким, чем 99,95 %, поэтому в высокоскоростном транспорте стальное жёсткое колесо, вероятнее всего, будет лидировать как экономически более оправданное решение.

Сверхэкономичность юнилёта СТЮ особенно проявляется при невысоких, например, традиционных для автомобильного транспорта скоростях движения – 100 км/час. При устоявшемся движении на горизонтальном участке пути 50-местному юнилёту весом 10 тонн необходима мощность двигателя в 9 кВт (из них – 6,6 кВт на аэродинамическое сопротивление, 1,5 кВт – на сопротивление качению стального двухребордного колеса по стальному рельсу). При этом расход топлива на 100 км пути составит 2,25 литра (или 0,045 л/100 пасс.·км или 0,45 л/1000 пасс.·км), что экономичнее легкового автомобиля в 20...30 раз (лучшие легковые автомобили расходуют 1...1,5 литра горючего на 100 пасс.·км, при худших комфортности, безопасности, экологичности), экономичнее самолёта в 200...300 раз (лучший 50-местный самолёт расходует на 100 км пути 500...700 литров топлива).

Для создания мировой сети скоростных дорог в XXI веке потребуется значительное количество ресурсов. Ведь только в России, территория которой, на 4/5 состоящая из болот, вечной мерзлоты, тайги и гор, и по площади большая, например, территории США в 1,8 раза, нужно построить не менее 5 млн. км дорог, чтобы только догнать США XX века. Основные ресурсы, необходимые для создания сети дорог протяжённостью 10 млн. км, показаны в табл. 2. Наиболее значимый ресурс – отчуждаемая земля. При наземной прокладке трасс её потребуется около 50 млн. га (500 тыс. км<sup>2</sup>), что равно суммарной площади таких стран, как Австрия, Венгрия, Греция, Дания, Израиль, Швейцария и Куба. При заниженной стоимости этой земли в 200 тыс. USD/га, цена этого ресурса составит 10 триллионов USD. Поэтому трассы необходимо прокладывать над землёй на опорах, на втором уровне.

Таблица 2

## Основные ресурсы для создания сети скоростных многопутных дорог протяженностью 10 млн. км

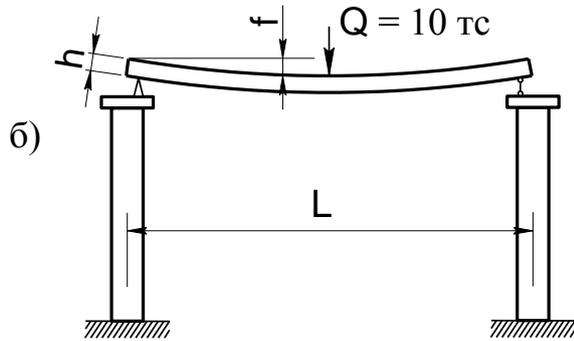
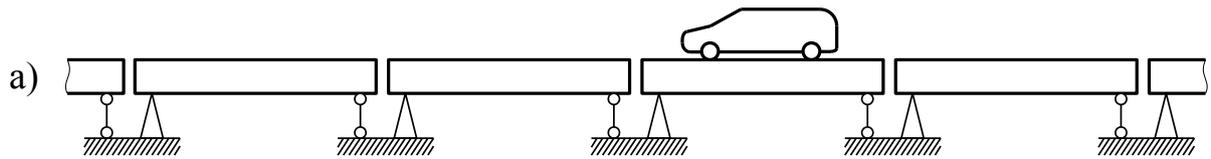
| Ресурс  | Единица измерения         | Наземная трасса           |                        |                     |                          | Наземная трасса |                          |                               |                  | Струнные пролеты |
|---|---------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------|--------------------------|-----------------|--------------------------|-------------------------------|------------------|------------------|
|   |                           | Дорожное полотно          |                        | Рельсовая структура | Балочные пролеты (сталь) |                 | Балочные пролеты (сталь) |                               | Струнные пролеты |                  |
|   |                           | асфальто-бетонное полотно | железобетонное полотно |                     | полотно (эстакада)       | монорельс       | Для колесного транспорта | магнитная (воздушная) подушка |                  |                  |
| 1. Отчуждаемая земля (с инфраструктурой)<br>(200 тыс. USD/га) | млн. га<br>млрд. USD      | 50<br>10.000              | 50<br>10.000           | 50<br>10.000        | 50<br>10.000             | 30<br>6.000     | 5<br>1.000               | 5<br>1.000                    | 2<br>400         |                  |
| 2. Земляные работы<br>(5 USD/куб. м)                          | млрд. куб. м<br>млрд. USD | 200<br>1.000              | 200<br>1.000           | 200<br>1.000        | 200<br>1.000             | 20<br>100       | 10<br>50                 | 10<br>50                      | 5<br>25          |                  |
| 3. Железобетонные конструкции<br>(500 USD/куб. м)             | млрд. куб. м<br>млрд. USD | 2<br>1.000                | 50<br>25.000           | 10<br>5.000         | 10<br>5.000              | 100<br>50.000   | 5<br>2.500               | 10<br>5.000                   | 2<br>1.000       |                  |
| 4. Стальные конструкции<br>(2000 USD/т)                       | млрд. т<br>млрд. USD      | 0,1<br>200                | 4<br>8.000             | 5<br>10.000         | 5<br>10.000              | 20<br>40.000    | 20<br>40.000             | 40<br>80.000                  | 3<br>6.000       |                  |
| 5. Щебеночная подушка<br>(20 USD/куб. м)                      | млрд. куб. м<br>млрд. USD | 50<br>1.000               | 10<br>200              | 30<br>600           | 30<br>600                | -<br>-          | -<br>-                   | -<br>-                        | -<br>-           |                  |
| 6. Песчаная подушка<br>(10 USD/куб. м)                        | млрд. куб. м<br>млрд. USD | 50<br>500                 | 50<br>500              | 20<br>200           | 20<br>200                | -<br>-          | -<br>-                   | -<br>-                        | -<br>-           |                  |
| 7. Асфальтобетонное покрытие<br>(100 USD/т)                   | млрд. т<br>млрд. USD      | 100<br>10.000             | -<br>-                 | -<br>-              | -<br>-                   | 3<br>300        | -<br>-                   | -<br>-                        | -<br>-           |                  |
| Всего (для сети дорог)  | трлн. USD                 | 23,7                      | 44,7                   | 26,8                | 26,8                     | 96,4            | 43,6                     | 86,1                          | 7,4              |                  |
| Всего (для 1 км трассы)                                       | млн. USD/км               | 2,4                       | 4,5                    | 2,7                 | 2,7                      | 9,6             | 4,4                      | 8,6                           | 0,7              |                  |
| Средняя скорость движения                                     | км/час                    | 120                       | 120                    | 200                 | 200                      | 150             | 150                      | 350                           | 350              |                  |

Известны два способа создания опорного пролёта между опорами: 1) с помощью жёсткой балки; 2) с помощью гибкой нити, натянутой до высоких усилий. Поскольку абсолютно жёстких систем не бывает, то в результате компромисса между требованиями по снижению материалоемкости пролётных строений и требованиями по получению максимально высокого значения жёсткости путевой структуры под воздействием расчётной подвижной нагрузки, во всём мире была принята расчётная относительная жёсткость пролётов мостов и путепроводов, равная  $1/400 \dots 1/800$ .

На рис. 1 показано балочное пролётное строение однопутной дороги монорельсового типа. Относительный прогиб такой балки пропорционален квадрату её длины и обратно пропорционален высоте в третьей степени, модулю упругости материала и коэффициенту, учитывающему форму поперечного сечения балки. Поэтому при проектировании балочного пролёта стремятся уменьшить пролёт, увеличить высоту балки, и использовать материал с высоким модулем упругости. На рисунке показано оптимальное поперечное сечение стальной балки максимально облегчённого коробчатого типа, имеющей относительную жёсткость  $1/400$  в пролёте 50 м при воздействии нагрузки в 10 тс. Расход стали на такую балку будет равен 750 кг/м (общая масса балки  $G=37,5$  т), площадь поперечного сечения –  $960 \text{ см}^2$ . Температурные усилия (при перепаде температур  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , от  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  зимой, до  $+50 \text{ }^\circ\text{C}$  летом на солнце) в такой балке могут достигать 2400 тс, поэтому на балке устраивают температурный шов, опирая её концы на ригель опоры. Поскольку верх опоры не закреплён, то коэффициент  $\mu$ , который определяет приведённую высоту опоры при определении её несущей способности, равен двойке.

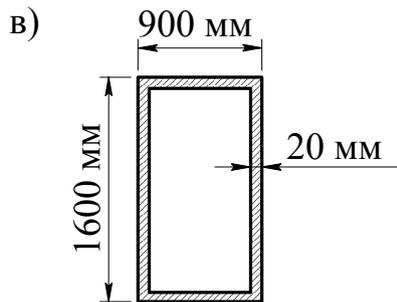
Рассмотрим струнное пролётное строение (рис. 2). Относительный прогиб такого пролёта пропорционален нагрузке  $Q$  и обратно пропорционален натяжению  $T$  струны. Следует обратить внимание на то, что относительный прогиб струнного пролёта не зависит от материала струны, от её формы и поперечных размеров, а также – от длины пролёта. Для обеспечения относительной жёсткости  $1/400$ , под нагрузкой 10 тс, натяжение нити должно быть равно 1000 тс. Поскольку жёсткость пролёта не зависит от формы поперечного сечения нити, то она может быть набрана из высокопрочной проволоки с расчётными напряжениями растяжения порядка  $10000 \text{ кгс/см}^2$  (например, СНиП 2.05.03-84 на мосты допускает нормативные сопротивления растяжению в арматурных канатах К-7 в  $13200 \dots 14000 \text{ кгс/см}^2$ ). Тогда площадь поперечного сечения стальной струны составит  $100 \text{ см}^2$ , а её масса – 78 кг/м (общая масса на пролёте – 3,9 т).

Поскольку верх опоры закреплён на нити (прикреплён к путевой структуре), то коэффициент  $\mu$ , определяющий приведённую высоту опоры, равен 0,7. Поэтому при той же высоте опоры, что и у балочного пролёта, опора струнного пролёта будет иметь в 8 раз большую несущую способность (см. несущие способности опор на рис. 1 и 2). А поскольку балочный пролёт

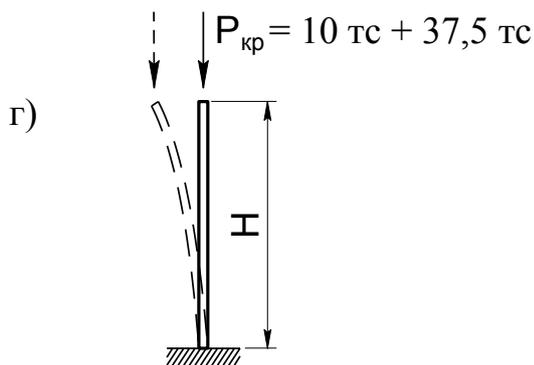


Относительный прогиб  
коробчатой балки:

$$\frac{f}{L} = \frac{QL^2}{48 E h^3} + \frac{5}{384} \frac{GL^2}{E h^3}$$



При  $L = 50$  м,  $Q = 10$  тс,  $f/L = 1/400$ ,  
 $E = 2 \cdot 10^6$  кгс/см<sup>2</sup>,  $[\sigma] = 2000$  кгс/см<sup>2</sup> (прокат):  
 $F = 960$  см<sup>2</sup>,  $G = 750$  кг/м,  $G = 37,5$  тс  
 $\Delta T_{\Delta t = 100^\circ \text{C}}^{\text{max}} = 2400$  тс (неразрезная балка)

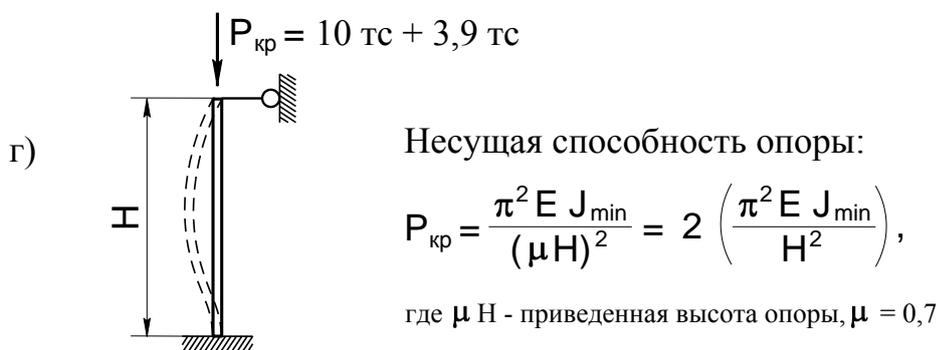
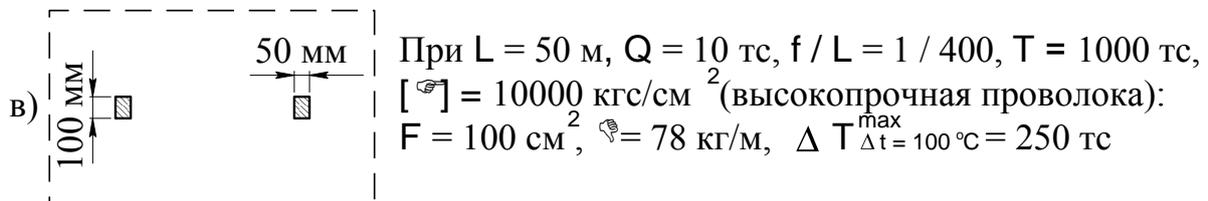
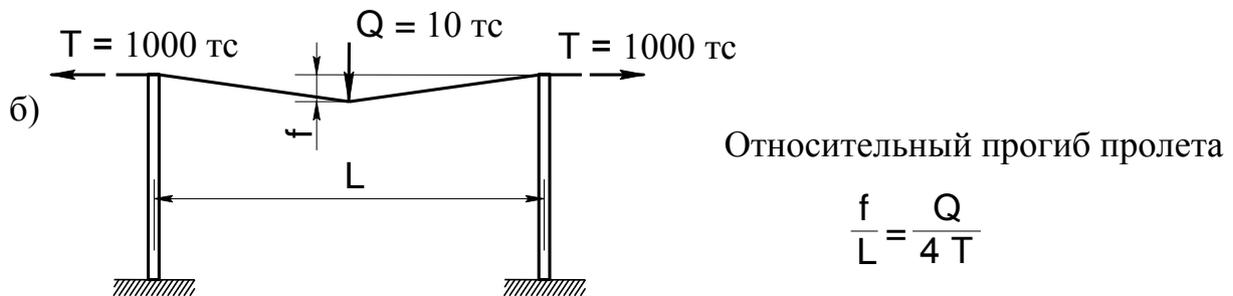
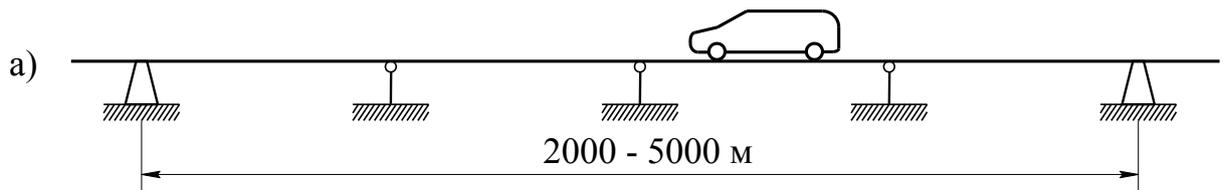


Несущая способность опоры:

$$P_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 E J_{\text{min}}}{(\mu H)^2} = \frac{1}{4} \left( \frac{\pi^2 E J_{\text{min}}}{H^2} \right),$$

где  $\mu H$  - приведенная высота опоры,  $\mu = 2$

Рис. 1. Балочное пролетное строение:  
 а) схема балочной эстакады; б) балочное пролетное строение; в) поперечное сечение оптимальной коробчатой балки; г) схема работы опоры балочного пролетного сечения.



д) Относительное удлинение струны под нагрузкой ( $f/L=1/400$ )

$$\Delta = \frac{\sqrt{(L/2)^2 + f^2} - L/2}{L/2} = 0,0000124$$

Увеличение напряжений в струне под нагрузкой ( $f/L=1/400$ )

$$\sigma_Q - [\sigma] = \Delta \cdot E = 24,8 \text{ кгс/см}^2$$

Рис. 2. Струнное пролетное строение:

а) схема струнной эстакады; б) струнное пролетное строение; в) поперечное сечение струнной путевой структуры; г) схема работы опоры струнного пролетного строения; д) зависимости, определяющие напряженно-деформированное состояние струны.

длиной 50 м будет весить 37,5 тс, а струнный пролёт – только 3,9 тс, то расчётная материалоёмкость опор и самих пролётов струнного типа будет примерно в 10 раз более низкой. Во столько же раз будет ниже и стоимость струнных дорог, так как стоимость высокопрочной стальной проволоки примерно равна стоимости стального проката и составляет, например в России, 360...400 USD/т (с НДС).

Стоимость основных ресурсов, необходимых для сооружения 1 км усредненной высокоскоростной двухпутной струнной трассы составит около 700 тыс. USD, что для сети дорог, протяжённостью 10 млн. км, даст экономию: 16,3 трлн. USD – по сравнению с автобанами с асфальтобетонным покрытием, 37,3 трлн. USD – для автобанов с железобетонным полотном, 19,4 трлн. USD – по сравнению с железными дорогами, 89 трлн. USD – по сравнению с автомобильными эстакадами, 36,2 трлн. USD – по сравнению с эстакадой монорельсового типа, 78,7 трлн. USD – по сравнению с эстакадой для поездов на магнитном подвесе (см. табл. 2).

Из приведённого анализа можно сделать вывод, что скоростную сеть дорог в XXI веке целесообразнее всего создавать на опорах с натянутой путевой структурой, без образования сплошного полотна. В качестве движителя целесообразнее использовать стальное двухребордное колесо с независимой подвеской. В механическую работу энергии топлива лучше всего преобразовывать непосредственно на борту модуля, например, с помощью двигателя внутреннего сгорания. Такая транспортная система является оптимальной.

## **2.2. Конструктивные особенности СТЮ**

### **2.2.1. Принципиальная схема СТЮ**

На рис. 3 представлена линейная схема СТЮ в различных географических условиях: на равнинной местности, в горах и на море. Она содержит струнную путевую структуру и три типа опор (высота 1...50 м и более): поддерживающие (через 10...200 м), тормозные (через 0,5...1 км) и анкерные (через 1...10 км). На участках со сложным рельефом местности трасса может иметь безопорный пролёт, например, через глубокое ущелье, пролив, протяжённостью до 2...3 км; прогиб пути при этом будет в пределах 0,005...0,05 от длины пролёта.

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

На основных участках СТЮ, 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 внутри конструкции рельса.

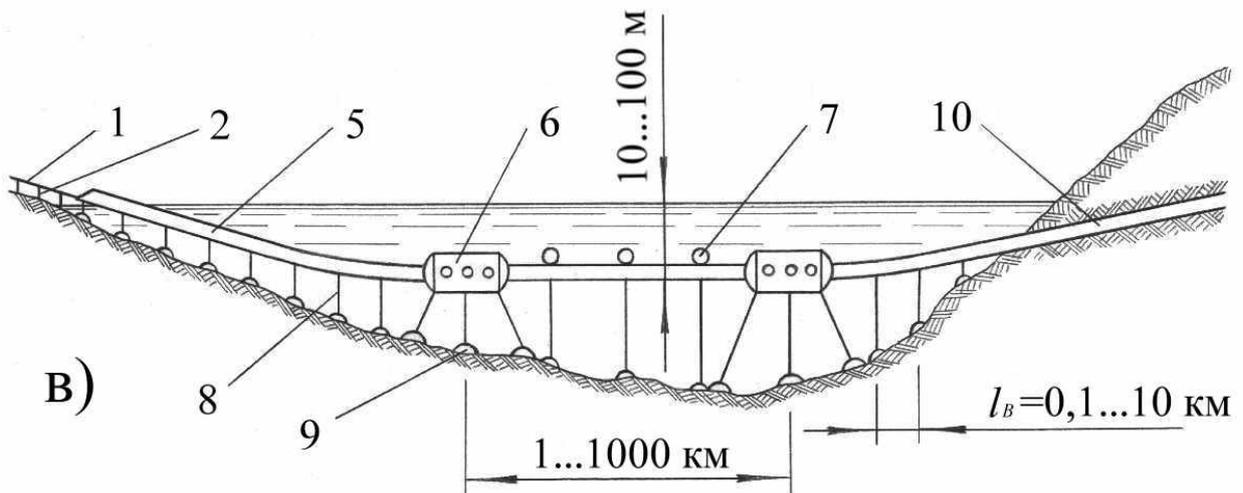
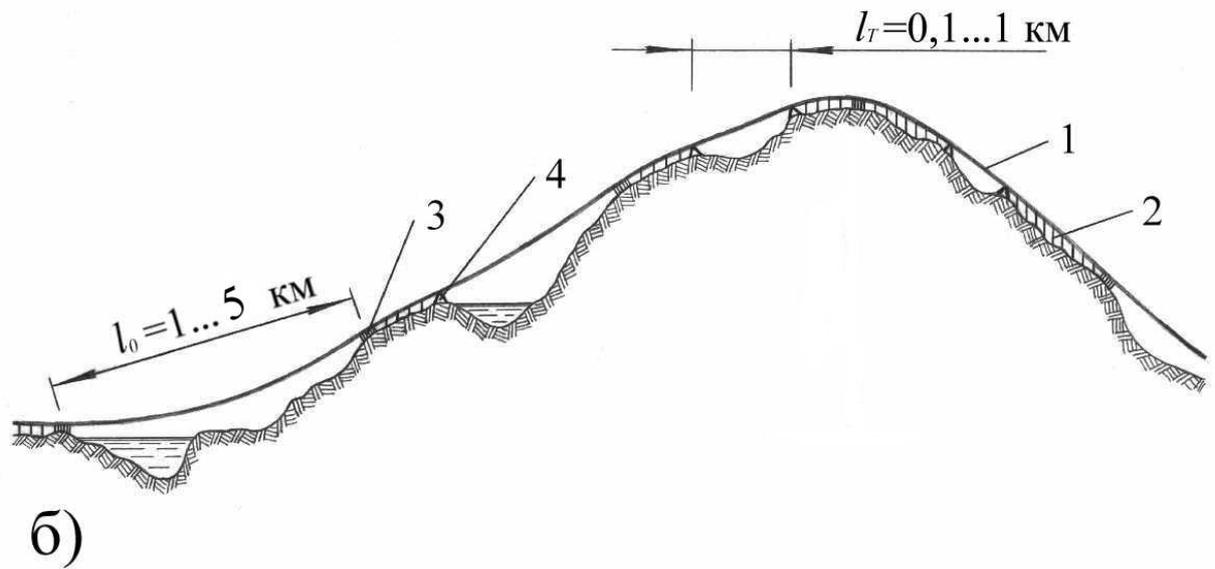
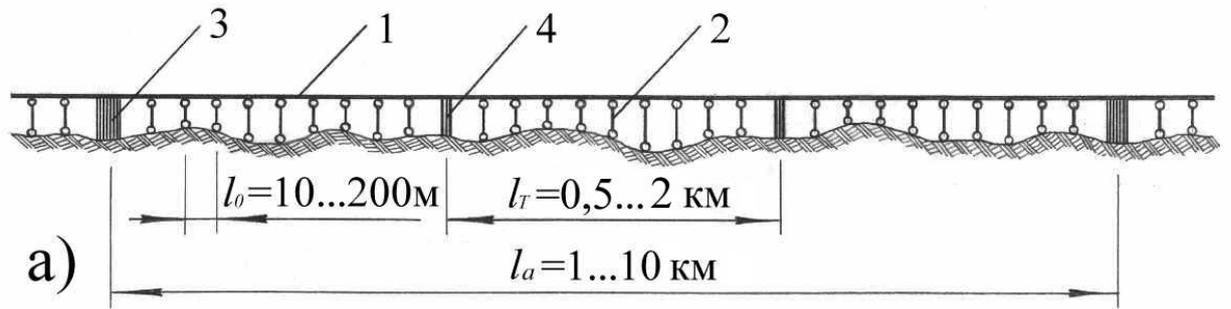


Рис. 3. Линейная схема СТС:

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

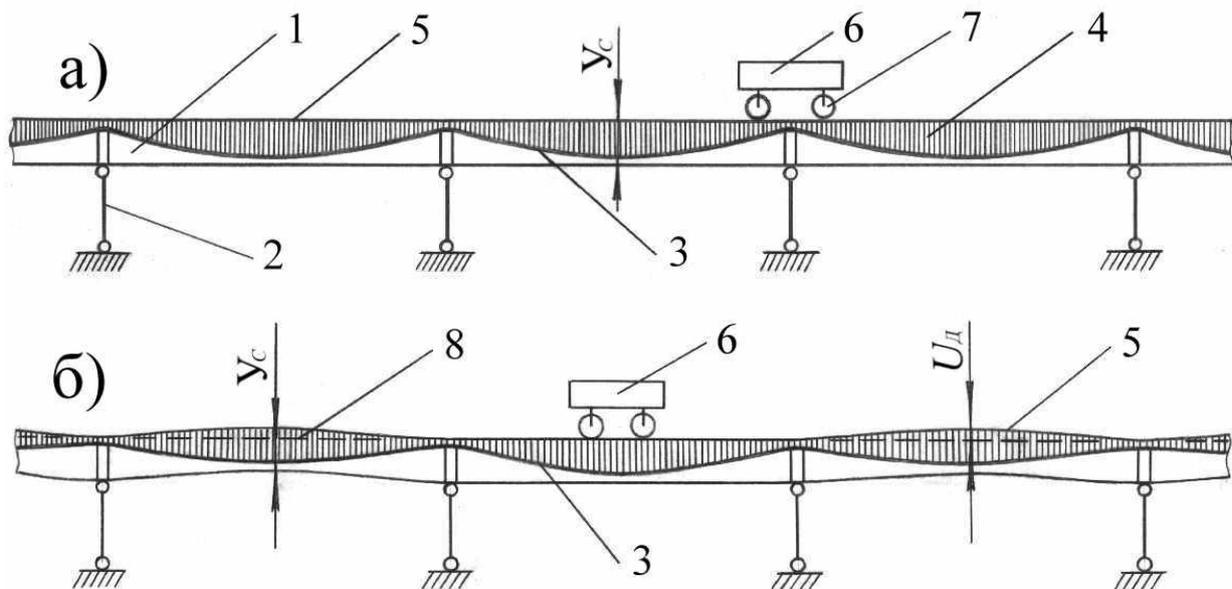


Рис. 4. Схема продольного сечения путевой структуры:

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.

Нагрузка от веса путевой структуры и транспортного модуля передается на струну посредством прокладки 4, толщина которой вдоль пролета изменяется согласно расчетному прогибу струны от минимальной (над опорой) до максимальной величины  $y_c$  (в середине пролета). Поэтому головка 5 рельса, по которой движутся колеса транспортных модулей, в статике имеет прямолинейную поверхность без прогибов и стыков.

На рис. 5 представлены зависимости максимальных статических прогибов струны от погонной (линейной) массы  $\rho_l$  путевой структуры ( $y_c^{max}$ ), а на рис. 6 – максимальных прогибов путевой структуры ( $u_c^{max}$ ) под действием одиночной нагрузки  $P$  (нагрузка и прогиб – в середине пролета) для различных значений усилий  $T_c$  натяжения струны 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 монографии [3]. 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  $\rho_l = 50 \dots 500$  кг/м. Такой прогиб может быть легко размещен 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  $P = 1 \dots 10$  тс при  $l_0 = 10 \dots 100$  м и  $T_0 = 100 \dots 1000$  тс. При этом относительная величина прогиба (отнесенная к длине пролета) будет

$u_c^{max}/l_0 < 1/800$ . Поэтому под действием полезной нагрузки СТЮ может иметь более высокую относительную жесткость, чем существующие автодорожные и железнодорожные мосты и путепроводы, относительный прогиб пролетных строений которых при расчетных нагрузках имеет более высокое значение.

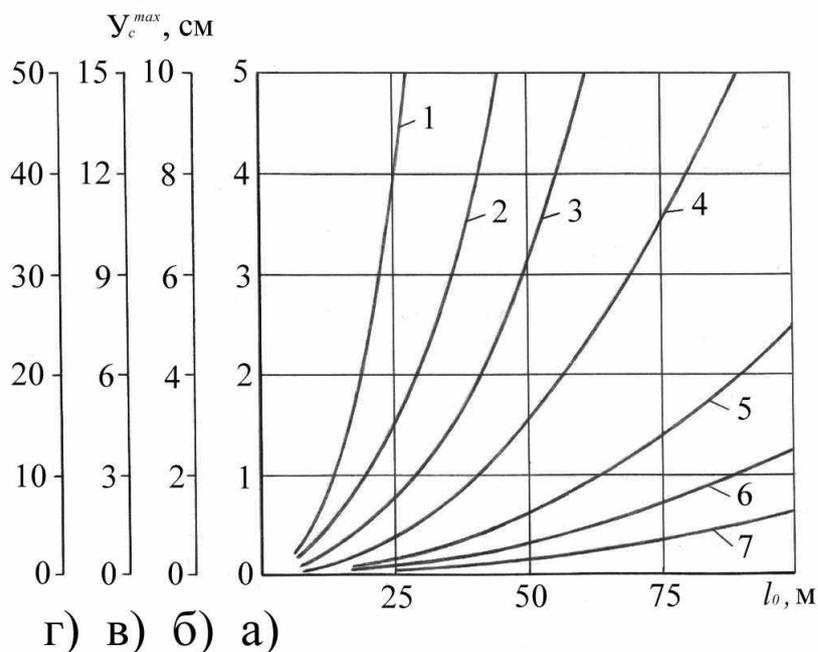


Рис. 5. Максимальный прогиб струны под действием веса путевой структуры:  
 а) для  $\rho_l = 50$  кг/м; б) 100 кг/м; в) 150 кг/м; г) 500 кг/м; 1–7 соответственно при  $T_c = 100, 250, 500, 1000, 2500, 5000$  и  $10000$  тс.

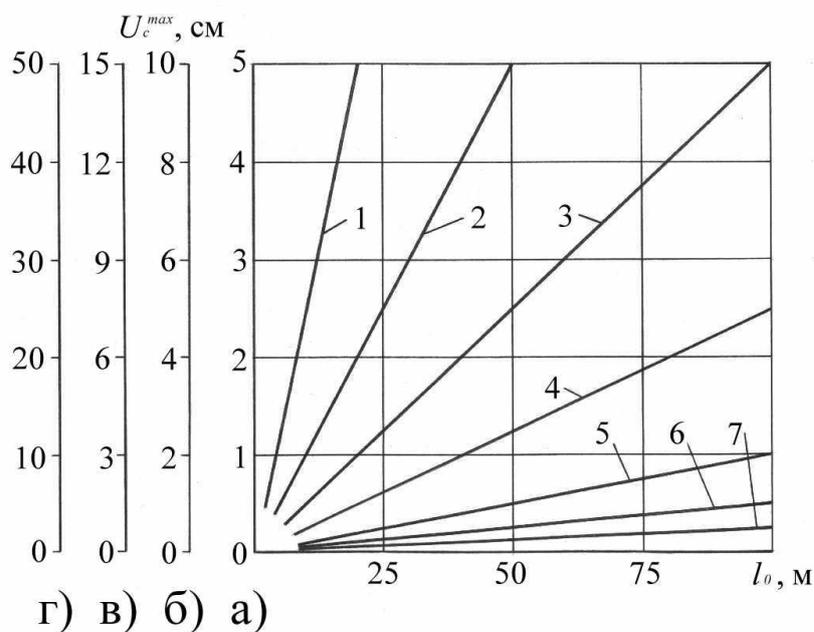


Рис. 6. Максимальный прогиб путевой структуры под действием одиночной нагрузки:  
 а) для  $P = 1$  тс; б) 2 тс; в) 3 тс; г) 10 тс; 1–7 соответственно при  $T_0 = 100, 250, 500, 1000, 2500, 5000$  и  $10000$  тс.

## 2.2.2. Струнная путевая структура

Струнная путевая структура может быть набрана из различного количества рельсов-струн (рис. 7): от одного до четырех. 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.

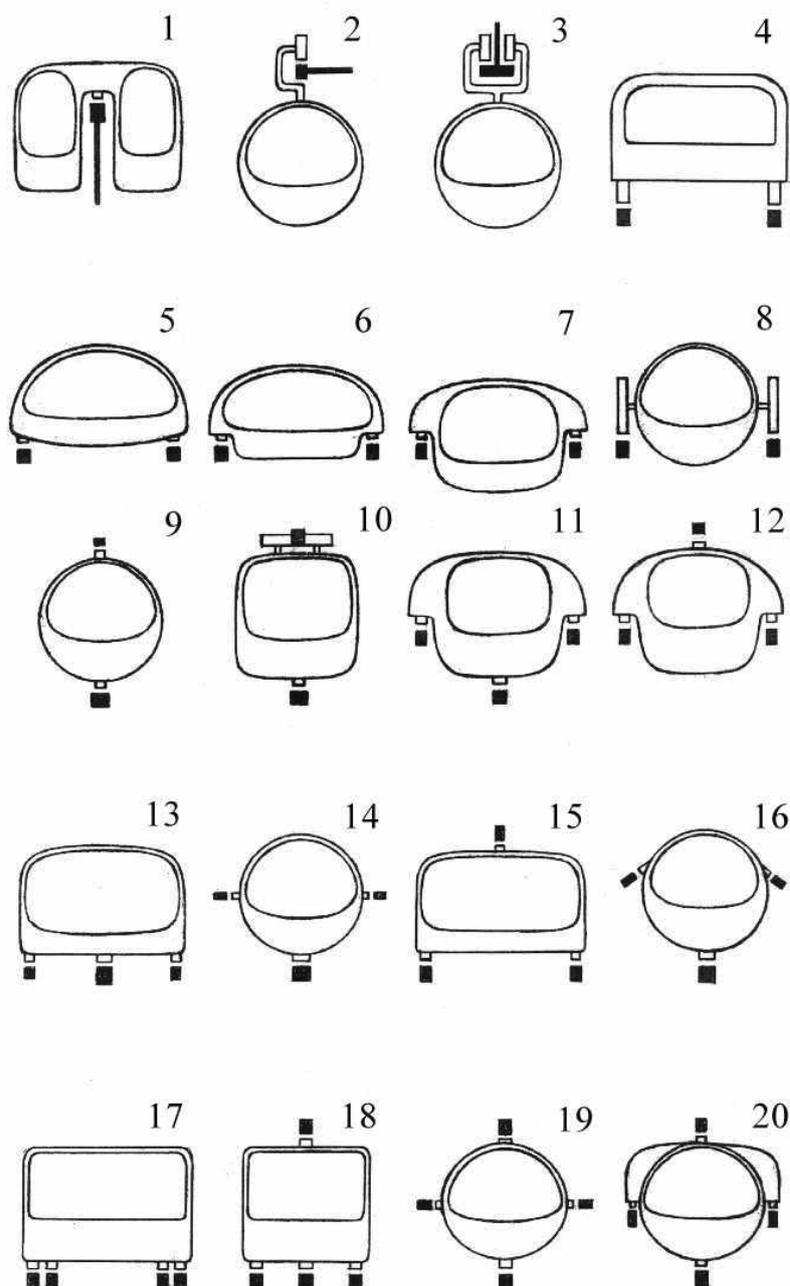


Рис. 7. Схемы размещения рельсов:

1, 2, 3 – СТЮ 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.

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).

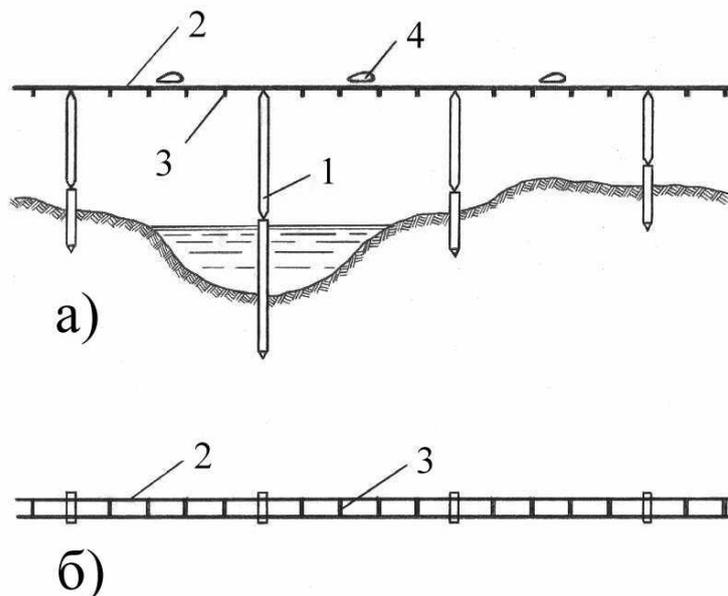


Рис. 8. Схема размещения поперечных планок по длине трассы: а) вид сбоку на СТЮ; б) вид сверху; 1 – поддерживающая опора; 2 – рельс; 3 – поперечная планка; 4 – транспортный модуль

Основным элементом путевой структуры СТЮ является рельс-струна, различные варианты исполнения которого показаны схематично на рис. 9.

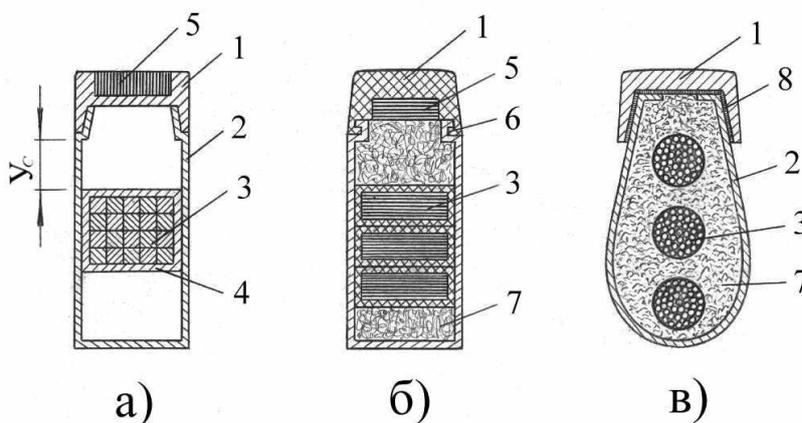


Рис. 9. Варианты конструкции рельса-струны: а) со струной из проволок; б) из лент; в) со струной-канатом; 1 – головка рельса; 2 – корпус; 3 – струна; 4 – защитная оболочка струны; 5 – дополнительная струна; 6 – замк-защелка; 7 – наполнитель; 8 – клей.

Струна 3 состоит из отдельных предварительно натянутых элементов (проволок, нитей, прутков, канатов, витых или невитых лент или полос), размещенных параллельно друг другу вдоль струны. Элементы струны могут быть заключены в защитную 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, прочность на растяжение которого превышает  $5000 \text{ кгс/см}^2$ : 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 омоноличены связующим, например, на основе цемента, эпоксидной смолы, специальным клеем, или могут быть плотно упакованы и разделены жидкой, консистентной или твердой смазкой. Наличие смазочной среды повысит долговечность струны, ее коррозионную устойчивость, а в случае обрыва отдельных элементов – проволок, лент – 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 одинаковы при наличии или отсутствии подвижной нагрузки (см. рис. 2 – напряжения в струне при воздействии подвижной нагрузки увеличивается лишь на 0,2%), струна может быть предварительно натянута до значений, близких к пределу прочности материала [ $T_c$ ]:

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

где  $\Delta T_t$  – изменение натяжения в струне, обусловленное её температурными деформациями.

Описанная особенность СТЮ 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 (на  $1000 \text{ кгс/см}^2$  при  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и снижению летом (на  $1000 \text{ кгс/см}^2$  при  $+50 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Поэтому максимальные значения прогиба струны  $U_c$  в течение года из-за изменения значения  $T_c$  будут колебаться в пределах 10...20% от первоначального значения (от  $-5 \dots -10\%$  до  $+5 \dots +10\%$  от проектного положения – см. рис. 4). Это не отразится существенно на функционировании СТЮ (на ровности головки рельса в вертикальной плоскости), т. к. дополнительная выпуклость (зимой) и провис (летом) путевой структуры составят величину порядка  $(10^{-4} \dots 10^{-5}) l_0$

Технологические этапы строительства трассы СТЮ показаны на рис. 10.

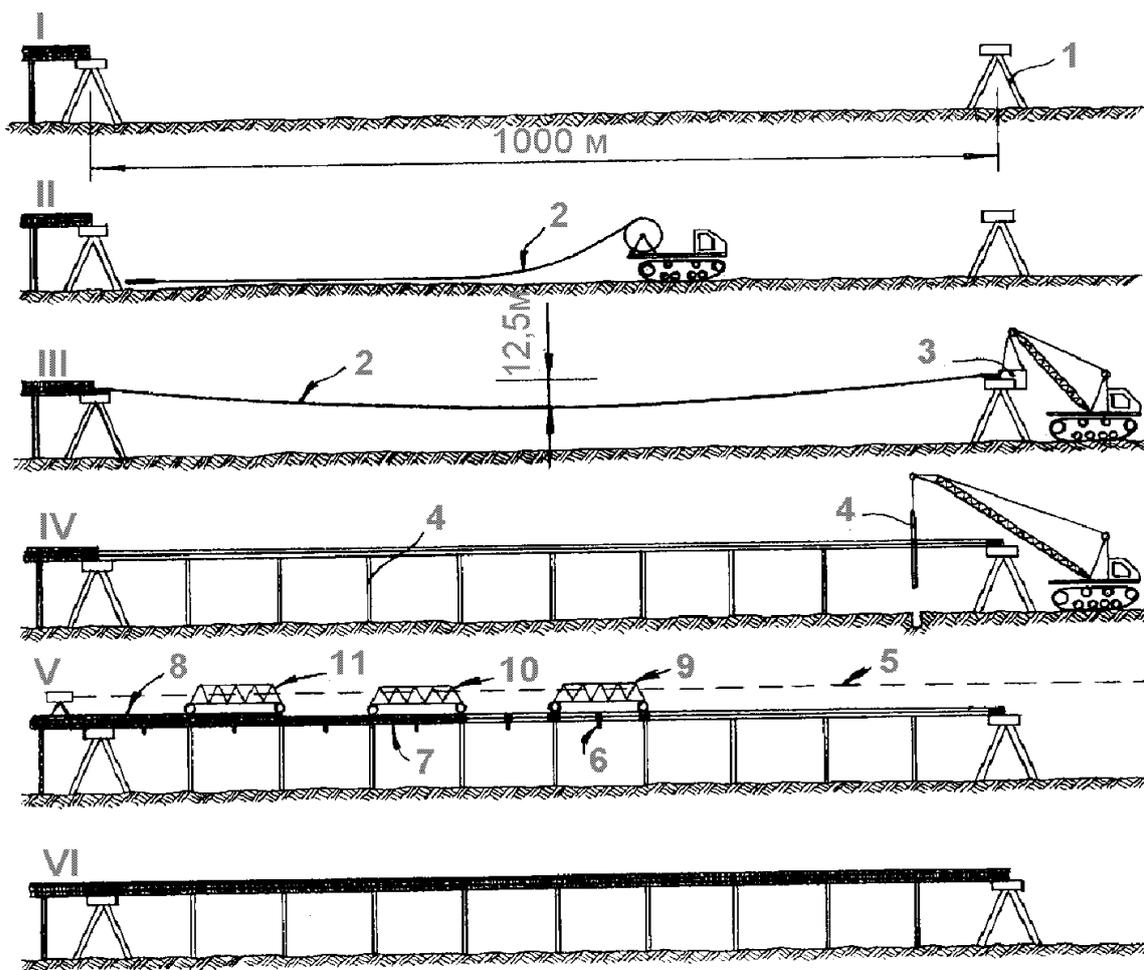


Рис. 10. Технология строительства трассы СТЮ:

1 – анкерная опора; 2 – канат (элемент струны); 3 – механизм натяжения каната; 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 канатов струны вдоль трассы; III – натяжение и анкеровка струны; IV – установка промежуточных опор; V – монтаж элементов рельса и путевой структуры; VI – готовый участок трассы.

### 2.2.3. Подвижной состав СТЮ

Движение экипажа по путевой структуре СТЮ осуществляется с помощью колес, через которые, при необходимости, может производиться торможением и запитка привода электрической энергией. Другие возможные варианты выполнения приводного агрегата показаны на рис. 11.

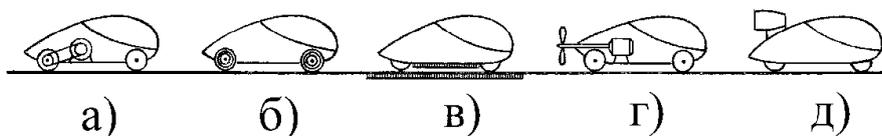


Рис. 11. Транспортный модуль с различными типами приводного агрегата: а), г) двигатель вращения с приводом на колесо и воздушный винт, соответственно; б) мотор-колесо; в) линейный электродвигатель; д) газовая турбина.

Вариант компоновочного решения четырехместного салона экипажа дальнего следования показан на рис. 12.

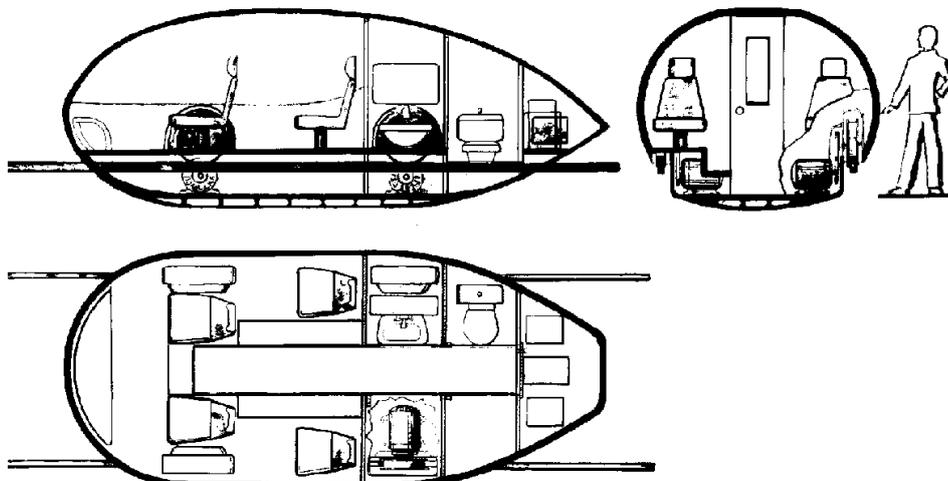


Рис. 12. Четырехместный экипаж дальнего следования.

Для уменьшения массы колеса и исключения прохождения оси колесной пары через салон экипажа, каждое колесо имеет независимую 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. 13) и обод либо реборды в нем имеют возможность поперечного (относительно рельса) перемещения.

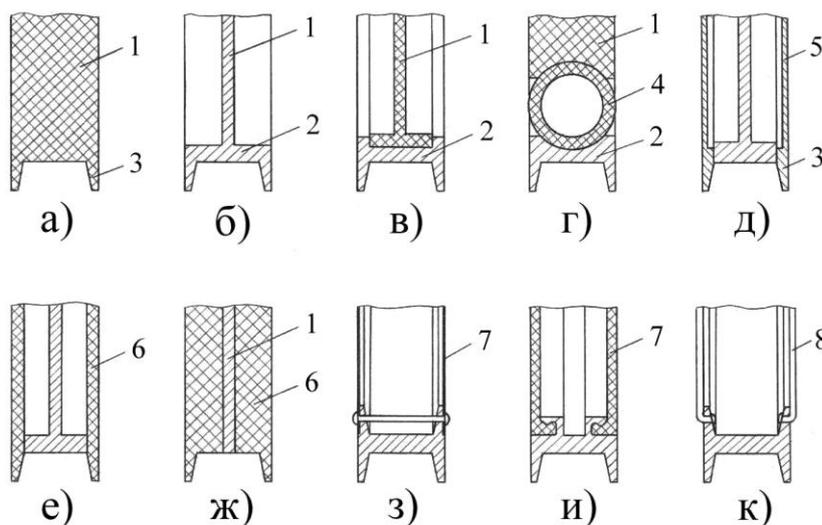


Рис. 13. Конструкция опорной части колеса:

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.

В случае приводного агрегата по вариантам *а), б)*, рис. 11, электропитание транспортного модуля осуществляется через контакт "колесо-рельс" (рис. 14). 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 (около  $5000 \text{ кг/см}^2$ ).

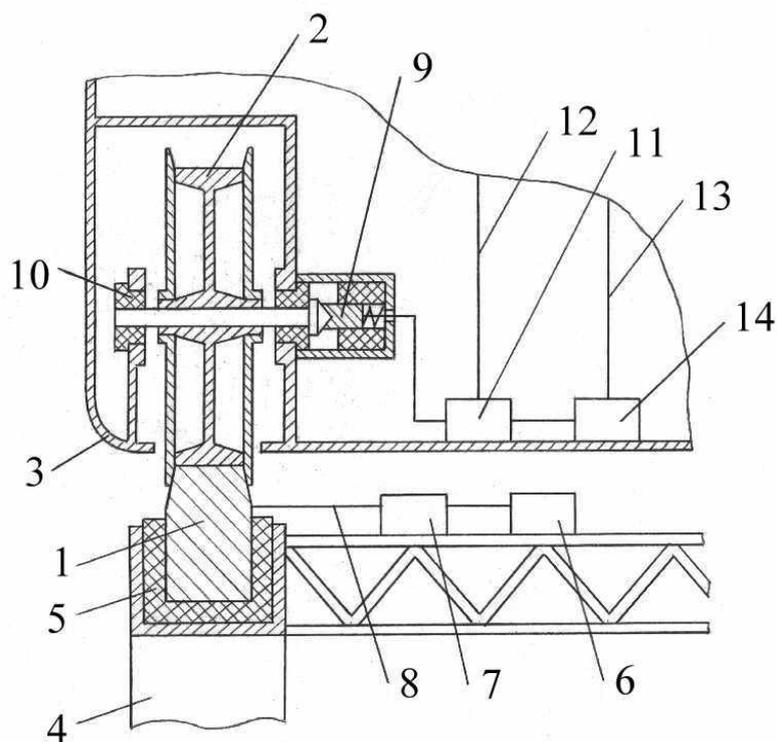


Рис. 14. Схема электропитания транспортного модуля:

1 – рельс; 2 – колесо; 3 – корпус модуля; 4 – опора СТЮ; 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).

Любое транспортное средство имеет устройство для восприятия силы веса, устройство для приведения его в движение (двигатель), а также источник механической энергии.

В подвижном составе СТЮ поддерживающим устройством является колесо, опирающееся на путевую структуру СТЮ. Колесо имеет жесткий обод, обычно стальной, с двумя ребрами, которые фиксируют его относительно рельса в боковом направлении. Поперечный профиль поверхности катания колеса и поперечное сечение рельса-струны подобраны таким образом, что при боковом смещении колеса относительно рельса возникает восстанавливающая боковая сила, которая прогрессивно увеличивается по мере смещения колеса. За счет этого обеспечивается высокий уровень стабилизации движения. Стальное колесо, катящееся по стальному же рельсу, имеет

весьма малые потери на качение, поэтому является наиболее целесообразным опорным устройством. В качестве движителя обычно используется также колесо, но может применяться воздушный винт, линейный электродвигатель или турбореактивный двигатель.

В качестве источника механической энергии могут применяться различные двигатели: электрический (вращательного движения или линейный), двигатель внутреннего сгорания (ДВС) с механической, электрической или гидрообъемной трансмиссией, гибридная силовая установка (ДВС, электрогенератор, накопитель энергии, тяговый электродвигатель), газотурбинный двигатель (с приводом на вал). На настоящее время наиболее целесообразен электрический двигатель или ДВС. При электрическом двигателе подвод энергии возможен или с помощью контактного рельса, или "от рельса до рельса" СТЮ, без специального третьего рельса.

Общая компоновка транспортных модулей СТЮ ("модулем" принято называть единицу подвижного состава СТЮ) определяется, прежде всего, его назначением, расчетной скоростью движения, параметрами трассы.

Важнейшей характеристикой транспортной системы является пропускная способность трассы, т.е. её производительность. Если принять среднюю скорость движения транспортной единицы по трассе условно постоянной, то производительность можно увеличить или повышением грузоподъемности транспортной единицы, или увеличением частоты следования транспортных единиц по трассе. При разработке подвижного состава СТЮ рассматривались оба способа. Целесообразность применения того или другого определяется конкретными особенностями трассы. Возможно также увеличение скорости движения, этот путь также эффективно используется многими транспортными системами, в том числе и СТЮ.

В качестве примера на рис. 15 показаны внешний вид и салон высокоскоростного пассажирского транспортного модуля.

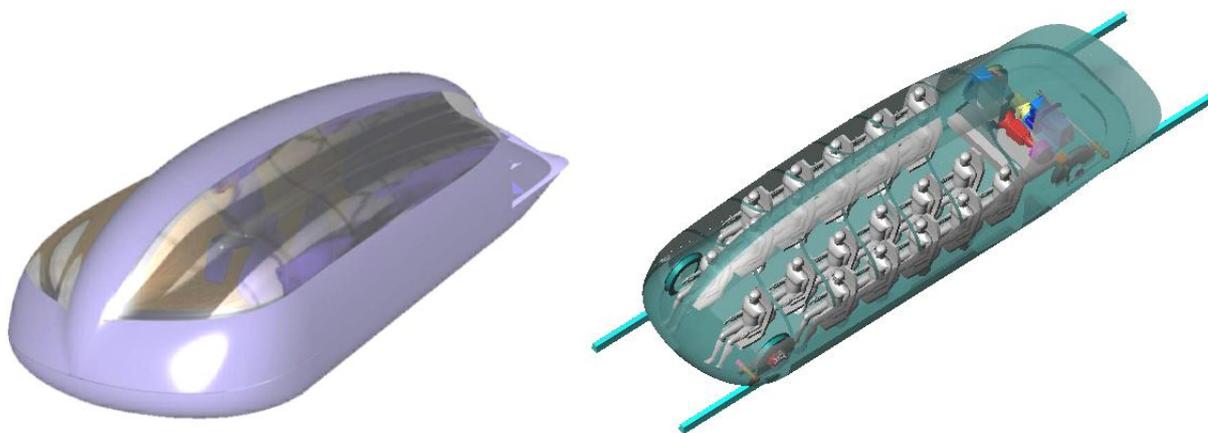


Рис. 15. Высокоскоростной пассажирский транспортный модуль.  
Пассажировместимость – до 50 человек, максимальная скорость 500 км/ч.

**Краткая техническая характеристика  
конкретного спроектированного высокоскоростного транспортного модуля:**

Корпус (из композитных материалов), несущий, с низким коэффициентом аэродинамического сопротивления ( $C_x = 0,08$ ). В задней части модуля, в агрегатном отсеке, размещается двигатель, узлы трансмиссии и другие устройства. Подвеска всех колес – независимая.

|   |        |
|---|--------|
| Число пассажирских мест                                   | 25     |
| Масса модуля, кг:   |        |
| снаряженная   | 3800   |
| полная  | 6000   |
| Габаритные размеры, мм:                                   |        |
| длина   | 10250  |
| ширина  | 2850   |
| высота (корпуса)  | 2200   |
| База (расстояние между осями передних и задних колес), мм | 6700   |
| Коэффициент аэродинамического сопротивления               | 0,08   |
| Двигатель (дизель) – мощность, кВт                        | до 450 |
| Максимальная скорость, км/ч                               | до 500 |

Использование единичного пассажирского модуля имеет ряд особенностей: высокая частота следования модулей по трассе требует весьма надежного диспетчерского управления (прототип – метрополитен) и полностью автоматического управления модулем.

При использовании составов повышается грузоподъемность транспортной единицы (в данном случае единица – состав). При соблюдении определенных ограничений по весовой нагрузке на ось и не слишком близкого расположения друг от друга осей, длина состава с точки зрения нагружения путевой структуры не ограничивается.

На рис. 16 и 17 показана общая компоновка модулей, входящих в состав для перевозки сыпучих грузов.

Поезд представляет собой сочлененное колесное транспортное средство, состоящее из отдельных модулей, соединенных между собой жесткой сцепкой. Поезд предназначен для перевозки руды, угля, гравия и других сыпучих грузов по струнной транспортной системе.

В передней части поезда располагается энергетический модуль, основная задача которого – снабжение энергией тяговых электродвигателей, приводящих поезд в движение. При значительном количестве грузовых модулей, входящих в поезд, количество энергетических модулей может быть больше одного. Для рассредоточения нагрузки, приходящейся на путевую структуру, колесная база модулей (расстояние между осями переднего и заднего колес) выбирается достаточно большой, а модули соединяются между собой длинными буксирными штангами, с таким расчетом, чтобы расстояние между осями всех колес ("шаг") было примерно одинаковым.

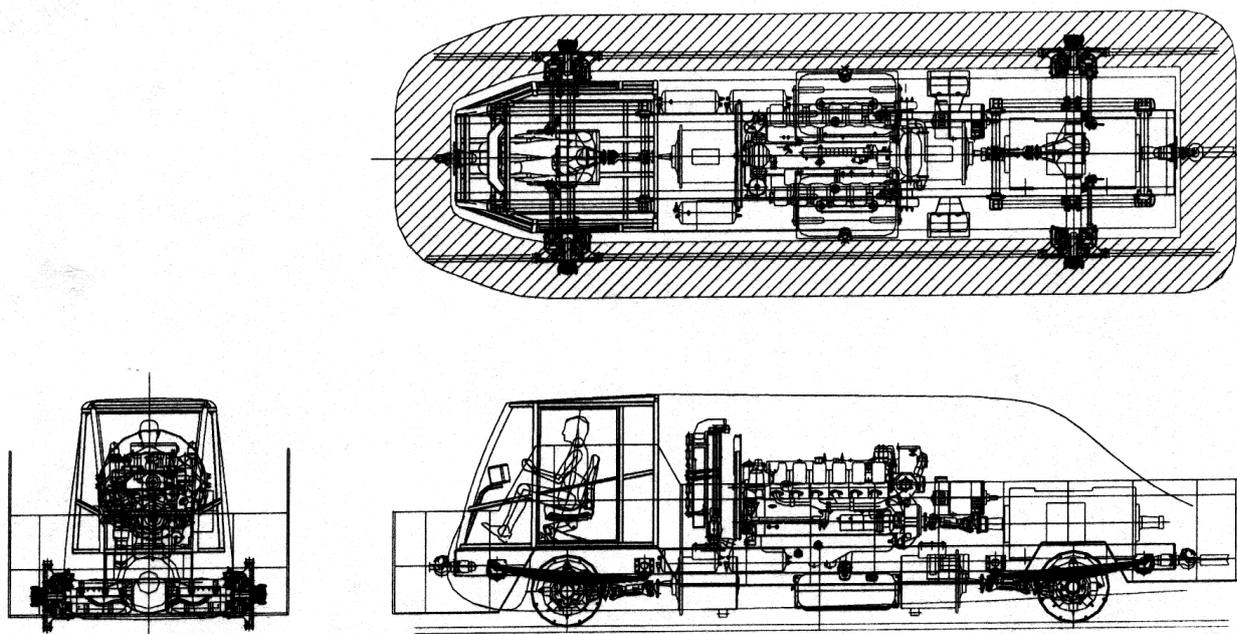


Рис. 16. Энергетический модуль для грузового поезда с дизель-генераторной установкой мощностью 120...450 кВт

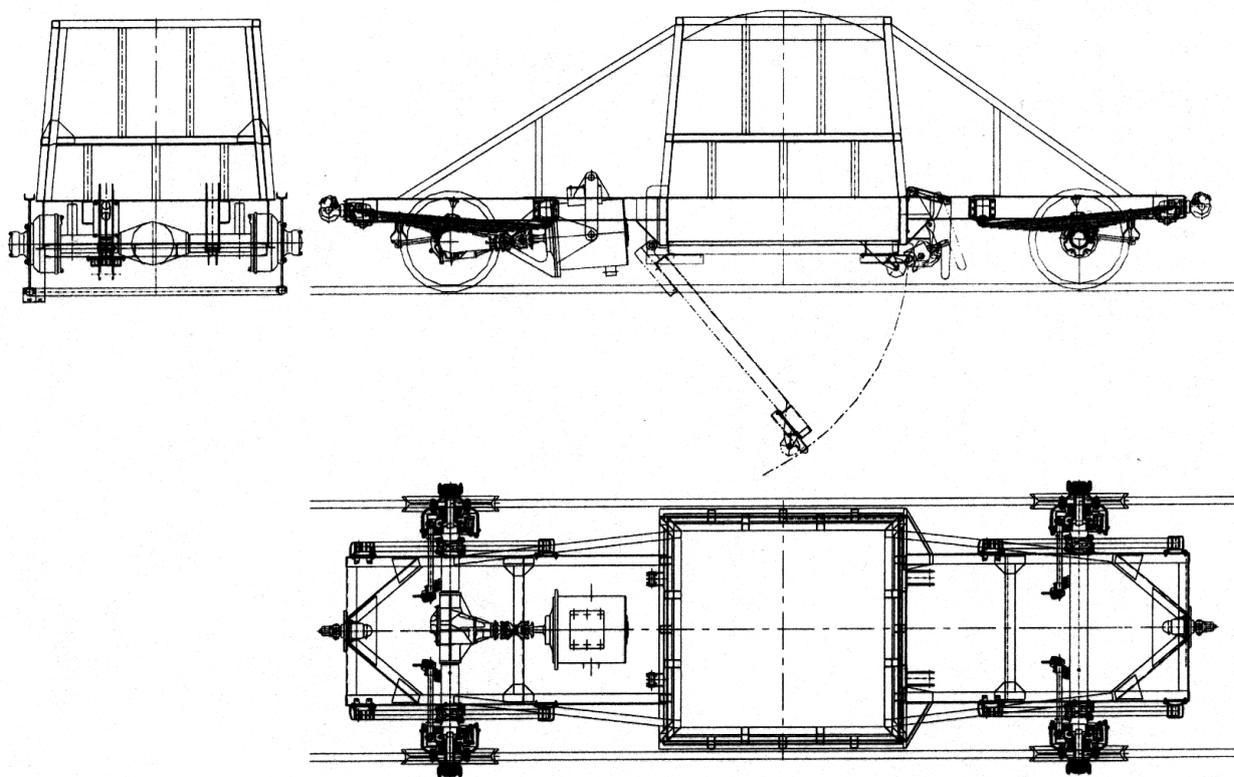


Рис. 17. Грузовой модуль для перевозки сыпучих грузов с донной разгрузкой. Грузоподъемность 6 т, полная масса 8 т.

На энергетическом модуле установлен дизель-генератор с обеспечивающими его работу системами, аппараты управления энергосистемой поезда, кабина водителя с органами управления. Энергетический модуль приводится в движение электродвигателями, соединенными карданными передачами с ведущими мостами. Мосты заимствованы от грузовых автомобилей ЗиЛ-5301 и ЗиЛ-4331, с необходимыми конструктивными изменениями. С несущей системой модуля (рамой) мосты соединяются с помощью автомобильных рессор, также от автомобиля ЗиЛ-5301.

Грузовой модуль имеет шасси, аналогичное шасси энергетического модуля, т.е. в нем также использованы автомобильные узлы. Если не предполагается эксплуатация поезда на трассах со значительными уклонами, на грузовом модуле применяется один унифицированный ведущий мост и один поддерживающий, который отличается от ведущего тем, что не имеет редуктора, дифференциала и привода колес. На сложных по рельефу трассах используются два ведущих моста, таким образом модуль становится полноприводным. Груз помещается в кузове, расположенном в середине модуля. Для уменьшения собственной массы модуль кузов выполняет также функции несущей системы, а отдельная рама имеется только по концам модуля.

Днище кузова выполнено открывающимся, в виде люка с простейшей кинематикой. В закрытом положении днище (люк) удерживается запорным механизмом, снабженным блокировочным устройством. Для разгрузки водитель заранее дистанционно отключает блокировку запора, при движении модуля приводной элемент запорного механизма взаимодействует с расположенным на путевой структуре специальным упором, запор освобождается, и под действие веса груза открывается днище. Для уменьшения вероятности примерзания влажного груза к кузову и облегчения разгрузки, форма кузова близка к форме куба, т.е. имеет благоприятное соотношение между объемом и поверхностью. Кроме того, кузов несколько расширяется книзу, что также облегчает высыпание груза. После высыпания груза модуль с небольшой скоростью продолжает движение, люк последовательно взаимодействует с несколькими расположенными на путевой структуре роликами, из которых первый размещен относительно низко, а последний – на максимально возможной высоте, которая гарантирует прохождение над ним ведущего моста. Этот последний ролик обеспечивает окончательное закрывание люка и запирает его запорным механизмом, после чего автоматически включается блокировка запорного механизма.

Грузовой модуль для перевозки сыпучих грузов может выполняться и с опрокидывающимся кузовом, как показано на рис. 18.

Подвеска грузового модуля такая же, как на энергетическом модуле.

Тормозные системы энергетического и грузового модулей идентичны. На высоких и средних скоростях движения торможение производится за счет перевода тяговых электродвигателей в генераторный режим. На средних и низких скоростях используются автомобильные колесные тормозные механизмы с пневматическим приводом, они же обеспечивают стояночный ре-

жим. Энергоемкость колесных тормозных механизмов достаточна для торможения поезда на любых скоростях, электродинамическое торможение с помощью тяговых электродвигателей используется для повышения долговечности тормозных колодок. В случае аварийного падения давления воздуха в тормозной системе срабатывают пружинные энергоаккумуляторы, и обеспечивается экстренное торможение. Все аппараты пневматического тормозного привода – автомобильные.

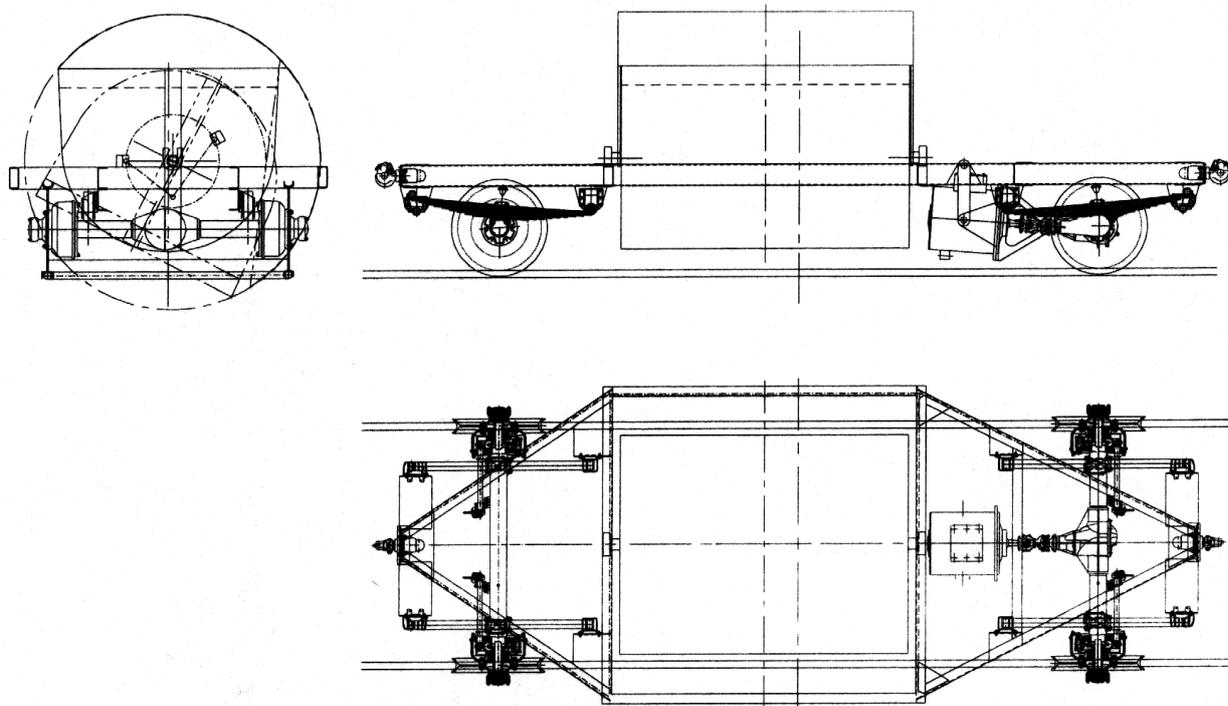
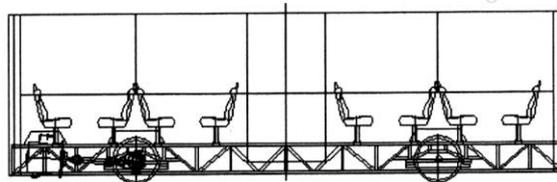
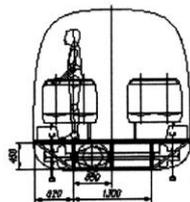
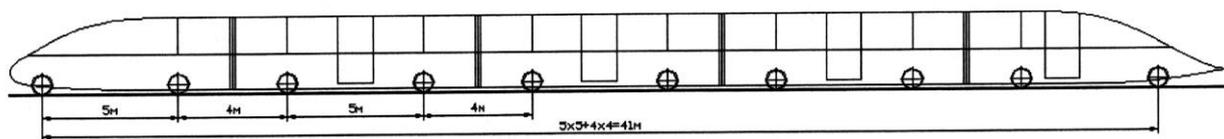


Рис. 18. Грузовой модуль для сыпучих грузов с опрокидывающимся кузовом. Грузоподъемность 6 т, полная масса 8 т.

Кроме грузового поезда, разработан пассажирский поезд, состоящий из нескольких секций. Кузов каждой секции – несущий, его основу составляет пространственный каркас, сваренный из стальных труб прямоугольного профиля. Крыша и некоторые боковые поверхности выполнены из тонкого стального листа, значительная часть периметра образована изогнутыми стеклянными панелями. В средней части кузова, по обеим его сторонам, имеются широкие раздвижные двери, что ускоряет процесс входа-выхода пассажиров, а также позволяет без затруднений въезжать пассажирам на инвалидных колясках. Внешние формы пассажирского поезда выполнены с учетом минимизации аэродинамического сопротивления, для чего концевые секции имеют специальную форму (рис. 19).

Для пассажирских перевозок на трассах с относительно небольшим пассажиропотоком целесообразно применять пассажирские сочлененные модули небольшой длины и пассажироместности. В зависимости от характера перевозок эти модули могут быть городскими и пригородными (рис. 20).



Вместимость: Сидячих мест – 32  
 Стоячих мест – 30  
 В сумме – 62

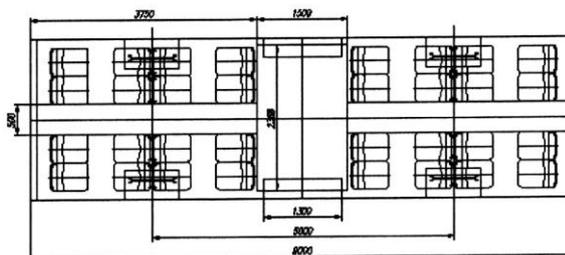


Рис. 19. Компоновочная схема пассажирского поезда СТЮ для междугородних городских и пригородных перевозок (вверху) и компоновочная схема одной из секций поезда (внизу). Скорость до 350 км/час, вместимость до 310 пассажиров.

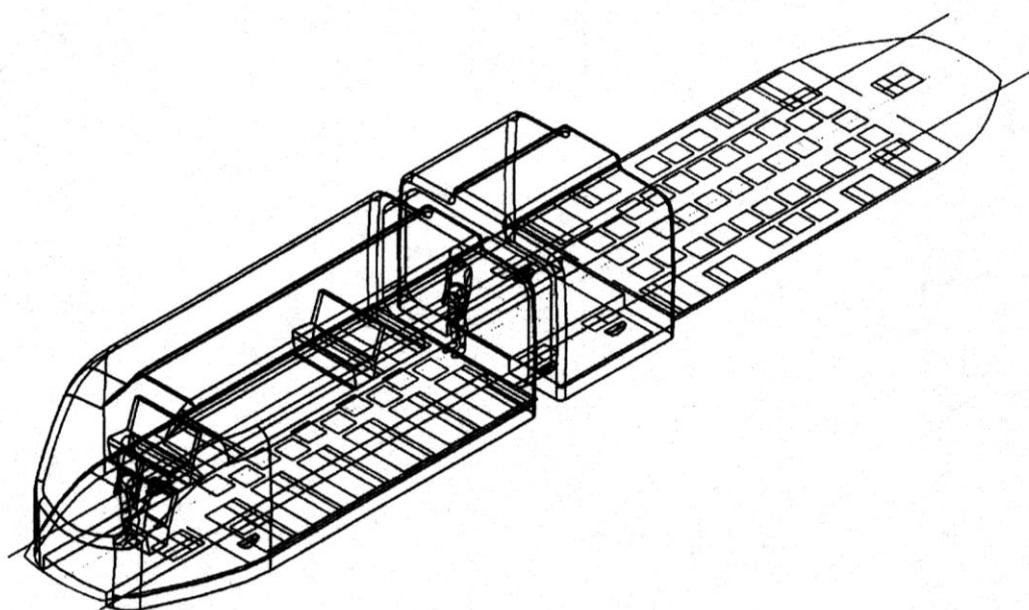
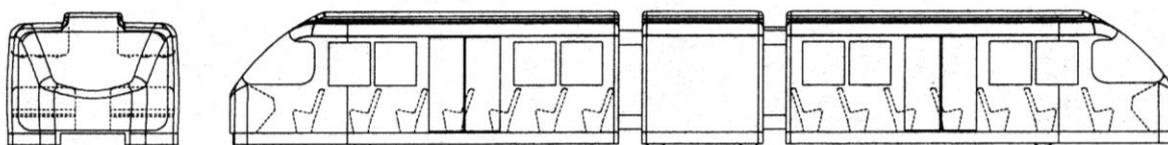


Рис. 20. Общая компоновка городского и пригородного пассажирского модуля на 60...145 человек, максимальная скорость 120...180 км/ч

Пассажи́рские секции (блоки) городского и пригородного модулей имеют одинаковую конструкцию, но различаются количеством дверей, количеством и размещением сидений, наличием (у городского модуля) накопительных площадок, а у пригородного модуля – наличием багажных полок. Несущая система пассажирского блока состоит из продольных элементов (лонжеронов, стрингеров) и поперечных (шпангоутов). Она может быть выполнена сборной из алюминиевых профилей, связанных обшивкой из алюминиевого листа, или формованной заодно с обшивкой из композитных материалов на основе трехслойных панелей ("сэндвич"). Конструктивно корпус пассажирского блока выполняется из поперечных секций, имеющих окна или дверные проемы. В зависимости от назначения модуля корпус набирается из различных комбинаций таких секций. Соединение секций между собой производится на шпангоутах. Концевые секции – передняя и задняя – собираются отдельно и также на шпангоутах соединяются со средней частью пассажирского блока. Внешние очертания концевых секций определяются соображениями аэродинамики и эстетики.

Под полом пассажирского блока нет никаких механизмов, что позволяет получить высоту пола 170 мм от головки рельса при клиренсе (дорожном просвете) 100 мм. Такая низкая высота пола позволяет организовать станции без перронов, облегчает и ускоряет вход-выход пассажиров. Для использования инвалидных колясок могут быть предусмотрены выдвигающиеся из-под пола короткие пандусы. Высота пола агрегатного блока от головки рельса – 420 мм, поэтому между полом пассажирского блока и агрегатного организованы наклонные пандусы с перепадом высот 250 мм. Подвеска модуля – пневматическая, с регулируемой высотой, что позволяет на остановках опускать весь модуль на 100 мм, что еще более облегчает вход-выход пассажиров.

В качестве двигательной установки может использоваться или дизельный двигатель с автоматической коробкой передач, или электрические двигатели. Поскольку мощности двигательных установок для городского и пригородного вариантов транспортного модуля должны быть разными в связи с различными значениями максимальной скорости, дизельные двигатели могут иметь мощность от 80 до 240 кВт. Устанавливается дизельный двигатель в агрегатном блоке продольно, у одной из боковых стенок. Над двигателем располагаются агрегаты охлаждения двигателя, системы питания, выхлопа, установка кондиционирования воздуха и т.п. Посредине агрегатного блока имеется достаточно широкий проход, соединяющий передний и задний пассажирские блоки. С другой стороны прохода могут располагаться вспомогательные помещения: туалеты (в пригородном модуле), багажный отсек, при специальном заказе может размещаться бар. При электрической силовой установке два электродвигателя по 40...60 кВт располагаются продольно, внизу, по бокам прохода. Каждый из электродвигателей приводит колеса своего борта. Для пригородного модуля, на котором требуется более мощная силовая установка, еще два электродвигателя по 40...60 кВт размещаются в кон-

цевых частях пассажирских блоков и приводят соответственно передние и задние колеса модуля, таким образом, суммарная мощность силовой установки составляет до 240 кВт. Несущая система агрегатного блока представляет собой сварную раму, на которой закрепляются все агрегаты, а также шарниры, соединяющие агрегатный блок с пассажирскими блоками.

Из приведенных примеров видно, что во многих случаях в шасси подвижного состава целесообразно использовать автомобильные узлы и агрегаты, поскольку нагрузка на каждую ось (мост) близка к соответствующей нагрузке у грузового автомобиля.

Проблема безопасности пассажиров решается следующим образом. Если при нештатной остановке модуля на трассе не возникает непосредственной угрозы жизни пассажиров, то они должны оставаться на местах и ждать прибытия специального ремонтно-эвакуационного средства, в ином случае – эвакуироваться с помощью спасательного рукава, который размещается на борту модуля. Эвакуация пассажиров в аварийной ситуации принципиально не отличается от других транспортных систем второго уровня (т.е. поднятых над землёй): монорельсовых и канатных дорог, поездов на магнитном подвесе.

### 3. Технико-экономическое обоснование СТЮ

Проведены всесторонние технико-экономические расчеты СТЮ и сравнение с показателями существующих и проектируемых средств скоростного транспорта.

Расход материалов и стоимость 1 км усредненной двухпутной высокоскоростной трассы СТЮ представлены в таблице 3. Параметры трассы: высота опор 10 м, расстояния между промежуточными опорами 25 м, анкерными – 2 км; ширина колеи 2 м; натяжение одной колеи 500 тс; размещение станций и площадок для аварийной остановки стоимостью 500 тыс. USD – через 10 км, расчётная скорость движения – до 500 км/час.

Таблица 3

Расход материалов и стоимость участка усредненной двухпутной высокоскоростной трассы СТЮ протяженностью 1 км

| Конструктивный элемент | Материал           | Расход на 1 км трассы |                       | Оценка стоимости, тыс. USD/км |
|------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|
|                        |                    | масса, т              | объём, м <sup>3</sup> |                               |
| 1. Рельс-струна, всего |                    |                       |                       | 390                           |
| 1.1. Головка           | Сталь              | 60                    | -                     | 120                           |
| 1.2. Корпус            | Сталь              | 40                    | -                     | 60                            |
| 1.3. Струна            | Стальная проволока | 80                    | -                     | 160                           |
| 1.4. Заполнитель       | Композит           | -                     | 45                    | 20                            |
| 1.5. Прочее            |                    | -                     | -                     | 30                            |

| Конструктивный элемент                          | Материал    | Расход на 1 км трассы |                       | Оценка стоимости, тыс. USD/км |
|---|-------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|
|   |             | масса, т              | объём, м <sup>3</sup> |                               |
| 2. Поперечные планки                            |             | -                     | -                     | 20                            |
| 3. Промежуточные опоры                          |             | -                     | -                     | 80                            |
| 3.1. Столбы                                     | Железобетон | -                     | 90                    | 30                            |
| 3.2. Перемычки, раскосы                         | Железобетон | -                     | 20                    | 8                             |
| 3.3. Верхнее строение опор                      | Сталь       | 8                     | -                     | 10                            |
| 3.4. Фундамент                                  | Железобетон | -                     | 48                    | 24                            |
| 3.5. Прочее                                     |             | -                     | -                     | 8                             |
| 4. Анкерные опоры                               |             | -                     | -                     | 85                            |
| 4.1. Тело опоры                                 | Железобетон | -                     | 50                    | 20                            |
| 4.2. Фундамент                                  | Железобетон | -                     | 120                   | 40                            |
| 4.3. Металлоконструкции                         | Сталь       | 2                     | -                     | 5                             |
| 4.4. Анкерное крепление                         | Сталь       | 2                     | -                     | 10                            |
| 4.5. Прочее                                     |             | -                     | -                     | 10                            |
| 5. Земляные работы                              |             | -                     | -                     | 20                            |
| 6. Системы контроля, управления, прочие расходы |             | -                     | -                     | 105                           |
| <b>ВСЕГО:</b>                                   |             |                       |                       | <b>700</b>                    |

Из сравнения с показателями других видов наземного транспорта следует, что СТЮ имеет преимущества:

- расход основных материалов меньше в 2...5 и более раз;
- объем земляных работ меньше в 10...20 раз и более;
- сроки строительства снижаются в 2...3 раза;
- стоимость трассы с инфраструктурой ниже в 2...3 раза (по сравнению с поездами на магнитном подвесе – в 40...70 раз, высокоскоростной железной дорогой – в 20...30 раз, монорельсовой дорогой – в 8...30 раз);
- расход энергии при высокоскоростном движении (в сопоставимых единицах) меньше в 2...3 раза (по сравнению с авиацией – в 10...15 раз);
- стоимость подвижного состава на одно посадочное место ниже в 2...3 раза (по сравнению с авиацией – в 50...100 раз);
- себестоимость проезда пассажира (или тонны груза) меньше в 2...3 раза (по сравнению с авиацией – в 5...10 раз);
- сроки окупаемости трассы уменьшаются в 2...3 раза.

Если учесть намного меньшие показатели отчуждения земли (в 10...100 раз), экологического загрязнения (до 10 раз), гораздо более щадящий режим по отношению к природе, городским застройкам и т.д., то со всей определенностью следует вывод: СТЮ является наиболее оптимальным видом наземного скоростного пассажирского и грузового транспорта.

Отметим, что при общем снижении всех расходов возрастает доля расходов, связанных с инфраструктурой, средствами контроля, управления, услуг и

т.д. Это указывает на более высокий общий, в том числе информационный уровень СТЮ, что вполне согласуется с тенденцией развития технологии XXI века.

Необходимо также отметить, что сравнение СТЮ с другими транспортными системами можно назвать корректным только при сравнении с высокоскоростными системами: высокоскоростной железной дорогой (15...20 млн. USD/км) и поездом на магнитном подвесе (30...50 млн. USD/км). Например, некорректно сравнивать наземные дороги: железную дорогу (0,5...2 млн. USD/км), автомагистраль (2...5 млн. USD/км) с дорогой второго уровня (корректным будет сравнение СТЮ с автомобильными и железными дорогами в эстакадном варианте их исполнения, при котором их цена возрастет до 20...50 млн. USD/км). Так же, как и сравнивать низкоскоростные системы: канатные дороги (0,5...2 млн. USD/км, скорость 10...30 км/час), монорельсовые дороги (5...20 млн. USD/км, скорость до 80 км/час) с СТЮ, т.к. стоимость низкоскоростных СТЮ может быть снижена в 3...4 раза (до 150...250 тыс. USD/км).

#### 4. Статика СТЮ

Стабильность работы СТЮ с учетом сложных географических и климатических условий, при этом с максимальной экономией материальных и финансовых ресурсов, – потребовали определения соотношений, наиболее полно связывающих физико-механические, конструктивные, силовые и др. параметры ее элементов. Это позволило исследовать статику струны – основного элемента СТЮ – с учетом ее весомости, упругой растяжимости, переменности натяжения вдоль пролета, в том числе при сезонных изменениях температуры и т.д.

Считаются известными:  $l_0$  – длина пролета АВ, рис. 21, а;  $E$  – модуль упругости;  $F$  – площадь сечения;  $Q$  – вес. Определяются: форма струны  $y$ ; стрелка прогиба  $f$ ; длина растянутой струны  $L$ ; растяжение  $\Delta L$ ; натяжение  $T$ , в том числе на опорах  $T_0$ ; угол наклона  $\alpha$  и на опорах  $\alpha_0$ .

Уравнения равновесия элемента струны имеют вид, рис. 21, б:

$$dT = T \operatorname{tg} \alpha d\alpha; \quad T d\alpha = -Q dz / L$$

Интегрирование дает следующие зависимости:

$$T = T_0 \cos \alpha_0 / \cos \alpha; \quad \sin \alpha = \frac{e^{-bz} - e^{bz}}{e^{-bz} + e^{bz}}, \quad (1)$$

где  $a = \frac{1 + \sin \alpha_0}{1 - \sin \alpha_0}$ ;  $b = Q / LT_0 \cos \alpha_0 = \ln a / l_0$ .

Для формы, прогиба, длины, удлинения и натяжения имеем:

$$y = \frac{e^{bz} - 1}{b} - \frac{e^{-bz} - 1}{b} \frac{1}{2b\sqrt{a}}; \quad f = l_0 \frac{1 - \cos \alpha_0}{2} \ln a \cdot \cos \alpha_0; \quad (2)$$

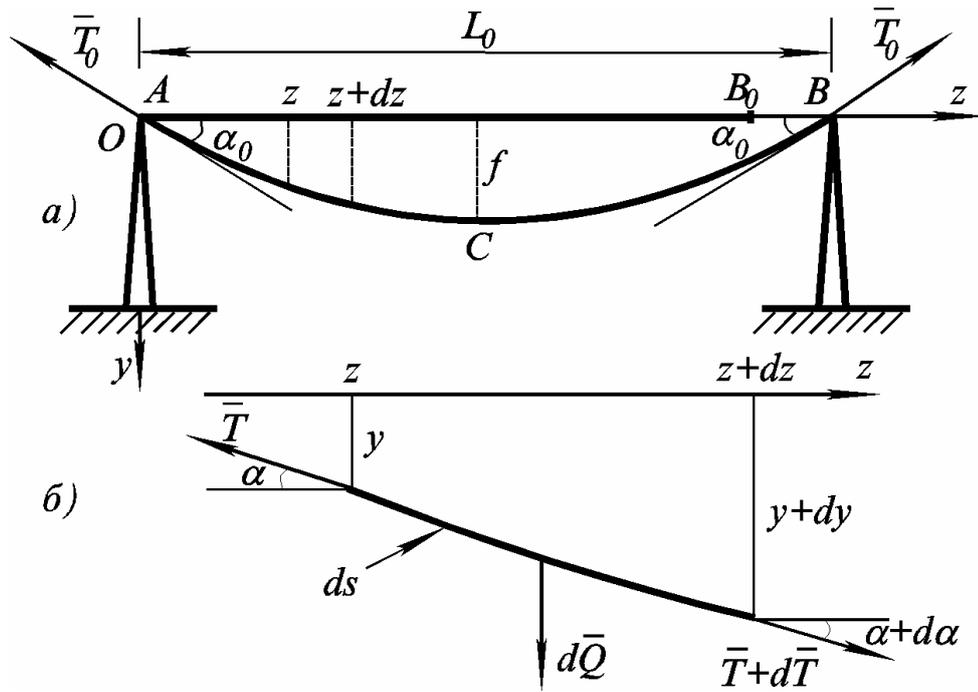


Рис. 21. Струнное пролётное строение: а) пролёт в целом; б) элемент струны.

$$L = l_0 \left( 1 - \frac{1}{2} \ln a \cdot \sqrt{a} \right); \quad \Delta L = LT_0 \cos \alpha_0 / EF; \quad (3)$$

$$T(z) = T_0 \cos \alpha_0 \left( e^{-bz} + e^{bz} \right) / 2\sqrt{a}; \quad T_0 = Q/2 \sin \alpha_0. \quad (4)$$

Формой равновесия тяжелой упругой струны является цепная линия  $y(z)$ .  
 (2). Растяжение  $\Delta L$  находится с помощью закона Гука; как следствие получаем определяющее статику струны соотношение:

$$2tg\alpha_0 - \left( 1 - \varepsilon_0 \right) \ln a = Q/EF. \quad (5)$$

Зададим начальное натяжение  $T_H$ ; из усредненного закона Гука определяем начальную деформацию  $\varepsilon_0$ , натуральную длину  $L_H$  и начальное (монтажное) удлинение  $\Delta L_H = l_0 - L_H$ :

$$\varepsilon_0 = T_H / EF; \quad L_H = l_0 / \left( 1 + \varepsilon_0 \right); \quad \Delta L_H = \varepsilon_0 L_H. \quad (6)$$

Подставляя  $\varepsilon_0$  в (5), получаем уравнение для  $\alpha_0$  и из (1) – (4) находим параметры статического состояния струны.

В конечной форме получены решения задач о статике струны с разновысокими опорами и с учетом действия сосредоточенного груза.

Этим же методом исследуется статика струны при сезонных изменениях температуры. Считаем, что соотношения (6) записаны для температуры  $t_0$  в период монтажа СТЮ; для других значений  $t$  имеем:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 - \tau(\varepsilon_0)(t - t_0), \quad t_1 \leq t \leq t_2, \quad (7)$$

где  $\tau$  – коэффициент температурного расширения струны;

$t_1, t_2$  – экстремальные значения  $t$  в данном регионе.

Подставляя  $\varepsilon(t)$  вместо  $\varepsilon_0$  в (5), получаем уравнение для определения  $\alpha_0(t)$ ; из соотношений (1) – (4) находим соответствующие значения остальных параметров.

Полученное (в параметрическом виде) решение задачи о равновесии струны, при этом с изменением температуры, в случаях с разновысокими опорами, с учетом действия груза и т.д., – лежит в основе расчетов при монтаже СТЮ в различных географических условиях и ее эксплуатации в различные сезоны года. С другой стороны – эти результаты служат в качестве начальных условий при решении задач динамики СТЮ.

## 5. Динамика СТЮ

В центре аналитических исследований стоит проблема динамического поведения СТЮ при прохождении по ней одиночных транспортных модулей (ТМ) или потока ТМ. Рассмотрена горизонтальная СТЮ с числом пролетов  $N_0$ , длиной каждого пролета  $l_0$  и двумя параллельными колеями, по которым движутся ТМ. Расчетная схема рельса СТЮ в поперечном разрезе представлена на рис. 22. ТМ представляет собой тележку, рис. 23, имеющую платформу массой  $2m_1$  и четыре колеса массой  $m_2$  каждое. Амортизаторы моделируются пружинами и параллельно включенными демпферами с усилием, пропорциональным скорости изменения длины пружины.

Считаем, что для корпуса и заполнителя имеет место обобщенный закон Гука:

$$\sigma = E \left( \varepsilon + \mu' \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right), \quad (8)$$

где  $\sigma$  и  $\varepsilon$  – нормальное напряжение и относительная деформация;

$E$  и  $\mu'$  – осредненные модуль Юнга и характеристика внутреннего трения.

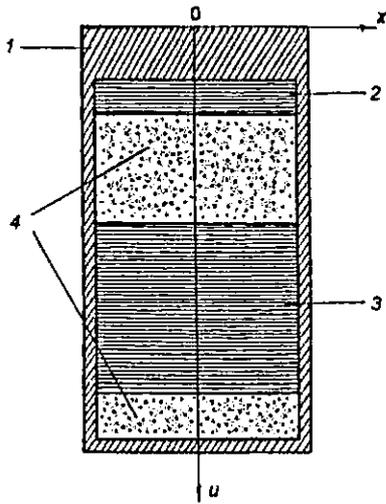


Рис. 22. Расчетная схема СТЮ:  
1 – металлический корпус рельса; 2, 3 – предварительно натянутые струны; 4 – наполнитель.

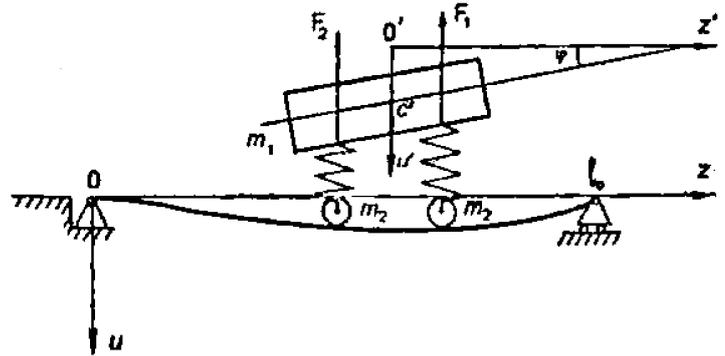


Рис. 23. Схема движения ТМ.

В предположении малости динамических отклонений элементов СТЮ от статического состояния получено линейное уравнение поперечных колебаний корпуса с наполнителем:

$$E \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left[ I \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left( u + \mu' \frac{\partial u}{\partial t} \right) \right] + \rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = f(\zeta, t) + R_1 + R_2 + \rho_0 g. \quad (9)$$

Здесь  $u(\zeta, t)$  – динамический прогиб,  $I(\zeta)$  – момент инерции поперечного сечения,  $\rho_0(\zeta)$  – линейная плотность корпуса с наполнителем,  $f(\zeta, t)$  – погонная внешняя нагрузка на корпус,  $R_1(\zeta, t)$ ,  $R_2(\zeta, t)$  – погонные реакции струн,  $g$  – ускорение свободного падения.

Уравнения движения верхней и нижней струн имеют вид:

$$\rho_i \frac{\partial^2 y_i}{\partial t^2} - T_i \frac{\partial^2 y_i}{\partial z^2} = f_i(\zeta, t) - R_i \pm R_{21} + \rho_i g, \quad (\zeta = 1, 2), \quad (10)$$

где  $y_i$  – прогибы струн,

$\rho_i$  – их линейные плотности,

$T_i$  – натяжения,

$f_i$  – погонные внешние нагрузки,

$R_{21}$  – реакция нижней струны на верхнюю.

Уравнения движения ТМ имеют вид:

$$m_1 \frac{d^2 U}{dt^2} = -F_1 - F_2 + m_1 g; \quad I_{c'} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \text{mom}_{c'} \overline{F_1} + \text{mom}_{c'} \overline{F_2}, \quad (11)$$

где  $U = O'C'$ ,  $\varphi$  – угол наклона платформы,

$I_{c'}$  – момент инерции платформы относительно центра масс  $C'$ ,

$\overline{F_1}, \overline{F_2}$  – реакции амортизаторов.

Методом разложения в тригонометрические ряды проведены исследования полученной системы уравнений и большого числа частных случаев, при этом как для одиночного ТМ, так и группы ТМ, движущихся с постоянной скоростью  $v$ . Определено, что формой возмущенного движения СТЮ являются колебания с некоторым спектром амплитудно-частотных параметров, при этом основной динамической характеристикой СТЮ является скорость распространения волны деформации вдоль рельса (скорость "звука"):

$$a = \sqrt{\frac{I_1 + T_2}{\rho_1 + \rho_2}}. \quad (12)$$

1. Случай  $V > a$ : при скорости  $V$ , близкой к  $a$ , максимальный динамический прогиб рельса  $u^{max}$  в два раза превышает максимальный статический прогиб; при увеличении  $V$  максимальный динамический прогиб убывает.

2. Случай  $\frac{a}{2} \leq V \leq a$ : при уменьшении скорости  $V$  от  $a$  до  $a/2$  прогиб  $u^{max}$  уменьшается в 9/8 раз и т.д.

Определен также динамический прогиб при движении потока нагрузок по жесткой СТЮ с разрезным корпусом над опорами и при движении по бесконечной сплошной СТЮ. Проведен анализ времени затухания длинных и коротких волн после схода ТМ с пролета; получены условия резонанса при движении потока ТМ со сплошным и разрезным корпусом, когда возмущения от очередного ТМ попадают в унисон с предыдущими. Кроме отношения скоростей  $V$  и  $a$  большую роль здесь играет отношение расстояний  $l_0$  и  $l'$  – между соседними ТМ. Исследовано большое число частных случаев; основные результаты:

1) при  $l' > l_0$  и определенных значениях физико-механических, конструктивных, демпфирующих параметров резонанс не возникает, поскольку колебания пролета гаснут до прихода очередного ТМ; 2) при движении одиночного ТМ по разрезному корпусу колебания быстро затухают, при этом  $u^{max}$  для  $l_0 = 50$  м не превышает 1,5 см; 3) при движении потока ТМ по неразрезному корпусу  $u^{max}$  находится в пределах 0,7 – 1,3 см; относительный прогиб уменьшается с увеличением пролета  $l_0$ ; 4) при движении потока ТМ по сплошному корпусу  $u^{max}$  меньше, чем в предыдущем случае; отсутствуют угловые точки над опорами.

Использование метода конечных элементов (МКЭ) показало хорошие результаты в задачах статики и динамики СТЮ с учетом геометрической нелинейности, т.е. допущении конечности динамических возмущений. Результаты расчета конкретных схем путевой структуры в диапазоне скоростей ТМ до 150 м/с [3] подтверждают вывод о допустимости получаемых статических и динамических отклонений и быстрой затухаемости последних.

## **6. Апробация проекта СТЮ, международное сотрудничество, публикации, реализация**

### **6.1. Основные результаты реализации проекта**

Основные результаты научных и конструкторских разработок по СТЮ докладывались автором и обсуждались:

- на Международной выставке и симпозиуме "Городские транспортные системы" (2003 г., г.Триполи);
- на X Международной конференции "Технология, оборудование и сырьевая база горных предприятий промышленности строительных материалов" (2002 г., г.Минск);
- на круглом столе "Транспортный комплекс России в приоритетах XXI века: экономика, геополитика, безопасность" шестого Петербургского экономического форума: "Россия, Содружество независимых государств на пути устойчивого развития. Проблемы управления" (2002 г., г.Санкт-Петербург);
- на совместном заседании научно-технических советов Министерства транспорта и МПС Российской Федерации (2002 г., г.Озёры Московской области);
- на конференции "Модернизация промышленного транспорта и безопасность его эксплуатации", проводимой в рамках выставки "Пром-ТрансЭкспо-2002" (г.Москва);
- на Международной научно-практической конференции "Градоформирующие технологии XXI века" (2001 г., г.Москва);
- на международной конференции по транспортному коридору "Париж – Берлин – Варшава – Минск – Москва" (1997 г., г.Минск);
- в Комитетах по экологии и по проблемам северных территорий Государственной Думы России (1997 г., г.Москва);
- на экспертном научно-техническом Совете при Президенте Беларуси (1997 г., г.Минск);
- на учёном Совете Петербургского государственного университета путей сообщения (1996 г., г.Санкт-Петербург);
- на Международной научно-практической конференции "Ресурсо- и энергосберегающие технологии на транспортном и строительном комплексе" (1995 г., г.Гомель).

Модели транспортного модуля (масштаб 1:5) были исследованы в аэродинамической трубе Центрального научно-исследовательского института им. ак. А.Н. Крылова (С.-Петербург, 1996...2001 г.г., всего было осуществлено более 10 продувок). Работа экспонировалась (в виде действующей модели масштаба 1:5) на двух Лейпцигских ярмарках (март и апрель 1995 г.) и Ганноверской промышленной ярмарке (апрель 1996 г.), на выставках достижений Академии Наук Республики Беларусь (Минск, 1995 и 1996 г.г.).

За период с 1995 по 2002 г.г. разработчик СТЮ представляли свою экспозицию на следующих выставках:

- на международной выставке "Транспорт для городов, курортов и зон отдыха" в Москве (НАМИ), 2002 г;
- на международной специализированной выставке городского транспорта "СитиТрансЭкспо-2002" в Москве (культурно-выставочный комплексе "Сокольники");
- на международной выставке "Спецтранспорт-2001" в Москве ("Экспоцентр" на Красной Пресне);
- на 6-й национальной выставке-ярмарке "Технологии из России-2001" в Москве (ВВЦ);
- на международной выставке "Промышленность и транспорт: кооперация и сотрудничество - 2001", посвящённой десятилетию СНГ и десятилетию Международного Конгресса промышленников и предпринимателей (г.Москва);
- на международной выставке "Дорога-99" в Москве;
- на международной выставке "Спецтранспорт-99" в Москве;
- на выставках, проходивших в Государственной Думе России (1997 и 1998 г.г.);
- на выставках достижений Академии Наук Беларуси в 1995, 1996 и 1997 г.г. (г.Минск);
- на Ганноверской промышленной ярмарке в 1996 г.;
- на двух Лейпцигских ярмарках в 1995 г.

По результатам выставок проект СТЮ был награждён почётными наградами и дипломами (более двадцати).

Автор СТЮ – А.Э. Юницкий – в 2000 г. избран действительным членом (академиком) Российской Академии Естественных Наук, Русской Академии и Академии Нового Мышления. Награждён почётным званием и знаком "Рыцарь науки и искусств" Российской Академии Естественных Наук, двумя золотыми медалями "Лауреат ВВЦ" и медалью "Российская Марка".

В ноябре 2000 г. проект СТЮ получил одобрение и поддержку от Администрации Московской области. С Администрацией Красноярского Края в 2001 г. заключен договор на создание опытного участка СТЮ. Активную поддержку проекту СТЮ оказывает Министерство транспорта РФ и Госстрой России. В 2002 г. заключён протокол о намерении строительства грузопассажирской трассы с администрацией г. Анапа.

В феврале 2002 года губернатор Московской области подписал распоряжение о создании межведомственной рабочей группы для координации деятельности по созданию транспортного кольца, связывающего аэропорты Московского авиационного узла между собой и Москвой, с использованием струнной транспортной системы (распоряжение № 116-РГ от 15.02.2002).

12 апреля 2002 года в г. Озеры Московской области на испытательном полигоне СТЮ состоялось совместное выездное заседание научно-технических советов Министерства транспорта РФ и Министерства путей сообщения РФ. Оба министерства были представлены первыми заместителями министров. На заседании присутствовали также представители более чем 50-ти ведущих транспортных организаций России, научно-исследовательских институтов и правительственных структур. По итогам заседания струнная транспортная система была признана родившимся новым видом транспорта и получила поддержку и одобрение.

## **6.2. Международное сотрудничество**

Проект создания струнной транспортной системы "Париж – Москва" обсуждался на международной конференции по развитию коммуникационной системы "Париж – Берлин – Варшава – Минск – Москва", Минск, 1997 г. [15].

25-29 сентября 2000 г. разработчик СТЮ в составе российской делегации принял участие во Всемирном форуме по городской окружающей среде, проводимом Центром ООН по населённым пунктам (Хабитат) и Программой ООН по окружающей среде (ЮНЕП) в г. Кейптаун, Южно-Африканская республика. В ходе работы форума по приглашению Заместителя Генерального секретаря ООН г-на К.Тепфера и мэра г. Кейптауна г-на Бантома была проведена презентация действующих моделей СТЮ для представителей правительства провинции ЮАР "Западный Кейп".

В 1998...2000 гг. в Российской Федерации выполнялся проект Центра ООН по населённым пунктам (Хабитат) № FS-RUS-98-S01 "Устойчивое развитие населённых пунктов и улучшение их коммуникационной структуры с использованием струнной транспортной системы". Реализация этого проекта позволила определить базовые критерии для внедрения СТЮ в условиях городских, пригородных и междугородных транспортных перевозок на примере г.Сочи.

В результате работы подготовлен бизнес-план использования СТЮ в регионе г. Сочи, транспортная сеть которого находится в кризисе в связи с чрезвычайной загруженностью автотранспортом. Строительство трассы СТЮ "Сочи – Адлер – Красная Поляна – Энгельмановы Поляны" включено в Федеральную целевую программу "Социально-экономическое развитие города-курорта Сочи на период до 2010 года". Для реализации программы администрация Сочи выделила земельные участки; работа тормозится из-за отсутствия инвестиций.

20-21 апреля 1999 г. в г.Сочи состоялся Международный семинар по реализации вышеуказанного проекта Центра ООН по населённым пунктам (Хабитат). В работе семинара приняли участие: Исполнительное бюро Хабитат в Москве, Администрация г. Сочи, Региональный общественный фонд содействия развитию линейной транспортной системы (г. Москва), Исследовательский центр "Юнитран" (Беларусь), Академия Нового Мышления (г.Москва), Сочинский Государственный университет и Центр "Красная Поляна" (г.Сочи). В семинаре участвовали 49 российских специалистов из Москвы, Нижнего Новгорода, Сочи и 6 иностранных специалистов: 4 – из Республики Беларусь, 1 – Украины, 1 – Кении (Штаб-квартира ЦООННП Хабитат, г.Найроби).

Результаты реализации проекта ООН были представлены на выставке, приуроченной к Глобальному форуму министров по окружающей среде в г. Мальме, Швеция, которая проходила 29-31 мая 2000 г. Министры 11 стран, членов Совета Управляющих Программы ООН по окружающей среде, отметили перспективность применения СТЮ для междугородних, пригородных и городских пассажирских и грузовых перевозок. Отдельно была выделена возможность применения СТЮ в курортно-туристических центрах, национальных парках и в зонах выдающейся природы.

В 2001 г. в рамках Программы сотрудничества Госстроя России с Центром ООН по населенным пунктам (Хабитат) на 2002...2003 гг. подписан проект № FS-RUS-02-S03 "Обеспечение устойчивого развития населенных пунктов и защита городской окружающей среды с использованием струнной транспортной системы", разработанный с учетом рекомендаций 25-й специальной сессии Генеральной Ассамблеи ООН "Стамбул +5".

В декабре 2001 г. на Международной выставке "Промышленность и транспорт: кооперация и сотрудничество – 2001" технология СТЮ и проекты пассажирского и грузового модулей отмечены тремя Золотыми знаками качества "Российская марка" (присуждается Национальной Программой продвижения лучших российских товаров, услуг и технологий "Российская марка").

### **6.3. Научные труды по тематике СТЮ**

Научные труды по тематике СТЮ опубликованы в трех монографиях [1...3], 22-х статьях [4...25], результаты научно-технических разработок защищены 26-ю патентами [26...52]. Научно-популярных статей опубликовано пятнадцать, в том числе информационных материалов шесть; публикаций в прессе – статей, очерков, корреспонденций – более сорока.

Имеются положительные заключения четырнадцати экспертиз, в том числе Сибирского отделения Российской академии транспорта Госстроя РФ, Министерств экономики и транспорта РФ, Российской инже-

нерной Академии, Ученого Совета Петербургского Государственного университета путей сообщения и др.

#### 6.4. Текущие работы по проекту

Для реализации программы СТЮ в Москве в 1998 г. создан Региональный общественный фонд содействия развитию линейной транспортной системы, а в 1999 г. – Фонд "Юнитран" содействия развитию струнной транспортной системы, где разработаны конструкции основных элементов СТЮ: рельсов с опорой на предварительно натянутые струны, при этом нескольких модификаций; опор, в частности, анкерных; транспортных пассажирских (с рекордно низким коэффициентом аэродинамического сопротивления), грузовых и специализированных модулей; отдельных узлов и агрегатов этих конструкций. Заключены договора на опытное производство этих разработок с рядом предприятий Москвы и РФ, а также Белоруссии.

В 2001 г. в г. Озёры Московской области построены первые 150 м струнной транспортной линии с высотой опор до 15 м и длиной пролётов до 48 м (рис. 24, 25). В качестве транспортного модуля используется переоборудованный автомобиль марки ЗИЛ–131 массой 7 т, грузоподъемностью 5 т (общая масса 12 т). Экспериментальные испытания с полной нагрузкой подтвердили правильность как самой концепции СТЮ, так и всех расчетов по прогибам, натяжениям и прочности СТЮ в статике и динамике (до 40 км/час). При этом относительная жёсткость максимального струнного пролёта (48 м) под расчётной нагрузкой составила 1/1600 (прогиб в середине пролёта составил 30 мм). Суммарное натяжение струн в однопутной трассе при + 20 °С составило 410 тс, расход стали на путевую структуру – 120 кг/м.



Рис. 24, 25. Опытный участок СТЮ в г.Озёры Московской области, октябрь 2001 г.

В настоящее время проводится работа по созданию опытного участка СТЮ в г.Сочи протяженностью около 1 км с включением его после сертификации в участок трассы СТЮ "Адлер – Красная Поляна" (первый этап, протяженность 11 км).

## 7. Перспективы программы СТЮ

### 7.1. Альтернативные варианты использования технологии СТЮ

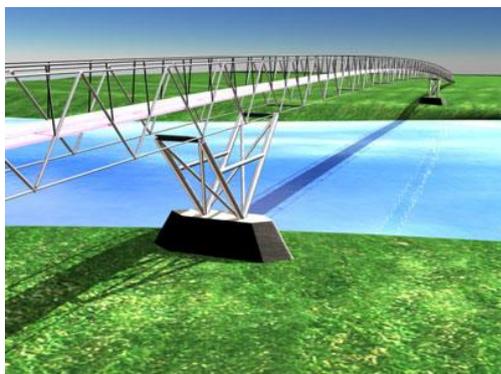


Рис. 26. Струнный пешеходный мост через водное препятствие

Кроме пассажирских и грузовых СТЮ возможно значительное расширение области применения технологии СТЮ, а именно строительство быстро возводимых и дешевых мостов (рис. 26) и путепроводов для любых видов транспорта, паромных (без контакта с водой или льдом) переправ длиной до 1 км, ненасыпных искусственных островов на шельфе морей, портовых сооружений, кранов и т.д.

### 7.2. Разработанные проекты трасс СТЮ

Разработаны проекты и заключены предварительные соглашения о создании конкретных трасс СТЮ: Москва – Нижний Новгород, Красноярск – Норильск, Большой Утриш – Анапа – Благовещенская, Москва – Калининград и др.

Рассматривались международные проекты сооружения СТЮ в Крыму, на Тайване, в Китае, Малайзии, ОАЭ, ЮАР и т.д., в том числе специализированных для вывоза на экспорт полезных ископаемых Западной Сибири. Предложено использовать технологию СТЮ на основных направлениях "Критских" транспортных коридоров для связи Западной Европы с Восточной Европой и с развитыми регионами Ближнего и Среднего Востока, в частности коридора № 2 "Екатеринбург – Москва – Минск – Варшава – Берлин – Брюссель – Париж (Лондон)".

Страны Черноморского Экономического сотрудничества заинтересованы в создании вокруг Черного моря скоростной магистрали XXI века. Она свяжет между собой все черноморские курорты, увеличит приток туристов и отдыхающих, повысит их активность и мобильность при более высоком уровне предоставляемых услуг, усилит деловые и торговые отношения между семью странами региона.

### 7.3. Доставка природной питьевой воды

Использование СТЮ позволяет решить еще одну насущную проблему современности – проблему питьевой воды. Автор предлагает организовать снабжение – с помощью специализированных СТЮ – наиболее заселенных и бедных водными ресурсами регионов Европы, Азии, возможно

Африки и даже Северной Америки наиболее чистой и живой (в смысле состава, вкуса, полезных свойств) в мире водой российских озер Байкал, Таймыр и др. [2]. Торговля этим возобновляемым, фактически неиссякаемым продуктом, в том числе в виде пищевого природного льда, с учетом всех расходов на добычу и транспортировку, но без всякой обработки, намного более выгодна – при полном отсутствии конкуренции и возрастающем спросе, – чем торговля нефтью. Тем более, что пора уже позаботиться об экономном расходе нефти и другого органического сырья ввиду ограниченности их запасов. При этом достигим объем продаж в 100 млрд. USD в год (200 млн. тонн пищевого льда по цене 0,5 USD/кг), что превышает в несколько раз сегодняшний российский экспорт невозобновляемых сырьевых ресурсов – нефти и газа.

#### 7.4. Проект "Линейный город"

Для решения транспортных и других проблем больших городов, в том числе экологических, предлагается проект "Линейный город" [2]. Зоны коттеджной застройки образуют прямоугольники шириной 100...200 м (рис. 27), расположенные вдоль линий СТЮ, где в качестве анкерных опор с пролетом 200...500 м используются многоэтажные производственные, административные, культурные, торговые и др. здания и сооружения.

Расположение в шахматном порядке таких жилых зон с размером клеток 1×1 км (рис. 28), озелененных внутри и ограниченных по периметру транспортными коммуникациями двух перпендикулярных направлений, позволяет заселить любую площадь и при этом обеспечить 500-метровую пешеходную достижимость станций СТЮ для каждого жителя, что уменьшает необходимость иметь автомобиль или другие виды транспорта. Поездка с одной пересадкой позволяет быстро достичь любой точки такого города, удаленного аэропорта или другого города.

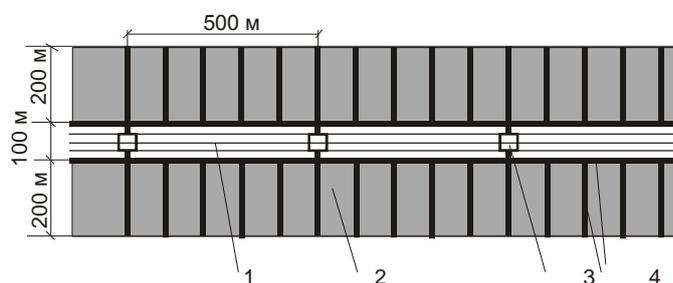


Рис. 27. Линейный город:

1 – многопутные скоростные "зелёные" трассы (прямые, обратные, запасные); 2 – зона коттеджной застройки; 3 – высотные офисные, производственные здания и сооружения, культурные, торговые, оздоровительные и др. центры; 4 – пешеходные дорожки.

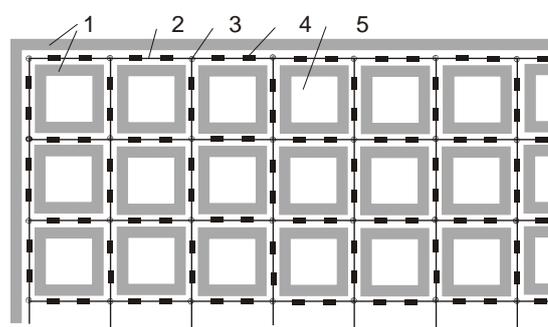


Рис. 28. Зелёный (шахматный) мегаполис:

1 – зона застройки линейного города; 2 – "зелёные" скоростные транспортные коммуникации; 3 – станции пересадки пассажиров; 4 – станции посадки-высадки пассажиров; 5 – природный парк.

Ненарушенная экология, большая озелененность и близость к природе придают городу черты сельского поселения, вплоть до возможности занятий в аграрном секторе, в то же время не отнимая городских удобств, услуг, разнообразной работы, культурного досуга и т.д.

Уже сложившиеся города и мегаполисы могут быть соединены с городами-спутниками линейными поселениями радиальной (рис. 29) и кольцевой (рис. 30) формы, что решает проблемы пригородного сообщения и позволяет уменьшить плотность заселения центра и его перенасыщенность наземными средствами транспорта.

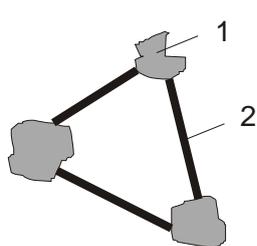


Рис. 29. Линейный город в системе городов: 1 – существующий город; 2 – линейный город; 3 – существующий мегаполис; 4 – город-спутник (аэропорт)

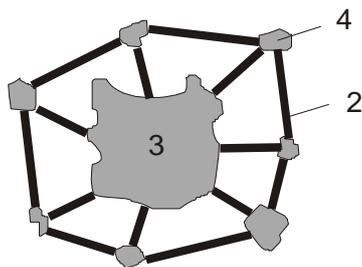
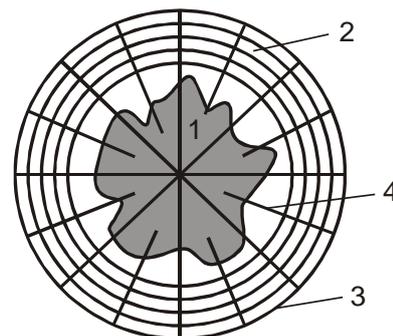


Рис. 30. Линейный кольцевой город: 1 – существующий город; 2 – кольцевой линейный город; 3 – кольцевая скоростная трасса СТЮ; 4 – радиальная трасса СТЮ.



## 7.5. Создание новой отрасли

Внедрение струнного транспорта приведёт к образованию новой транспортной отрасли (рис. 31), что позволит создать дополнительные рабочие места, построить заводы по строительству подвижного состава, путевой структуры, опор, элементов инфраструктуры, обеспечить заказами существующие производственные предприятия, организовать специальные учебные заведения для подготовки кадров. В конечном счёте, СТЮ станет той налогооблагаемой базой, которая приведёт к увеличению притока налогов в федеральный и местные бюджеты Российской Федерации.

Существующая наземная общемировая транспортная сеть (преимущественно эту сеть составляют автомобильные и железные дороги) потребляет огромное количество материалов, как на стадии строительства, так и на стадии эксплуатации, и требует большого расхода топлива. В то время как в XXI веке многие ресурсы будут исчерпаны, а на те ресурсы, которые будут истощены – резко возрастет цена, в том числе и на землю, занятую дорогами.

На рис. 32 показана динамика развития основных видов мирового наземного транспорта в IXX...XX столетиях и прогноз на XXI столетие. На планете с 2010 г. начнется постепенное замещение наземных путей сообщения (железных и автомобильных дорог) дорогами второго уровня, подняты-



а)



б)



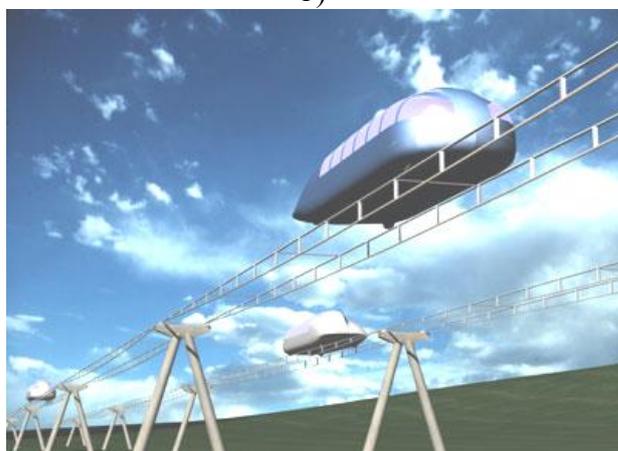
в)



г)



д)



е)

Рис. 31. Варианты выполнения транспортных модулей и трасс СТЮ:

а) шестиместный высокоскоростной пассажирский модуль на однопутной трассе СТЮ, проложенной по морскому шельфу; б) десятиместный высокоскоростной пассажирский модуль на однопутной трассе СТЮ, проложенной в условиях пересечённой местности; в) грузовой эшелон для перевозки наливных грузов на двухпутной трассе СТЮ; г) грузовой эшелон для перевозки насыпных грузов на однопутной трассе СТЮ (грузоподъёмностью до 1000 т); д) высокоскоростной пассажирский поезд для междугородних, пригородных и городских перевозок на двухпутной трассе СТЮ (вместимость до 500 чел.); е) высокоскоростной пассажирский модуль для междугородних перевозок "юни-лёт" на двухпутной трассе СТЮ (вместимость до 50 чел.).

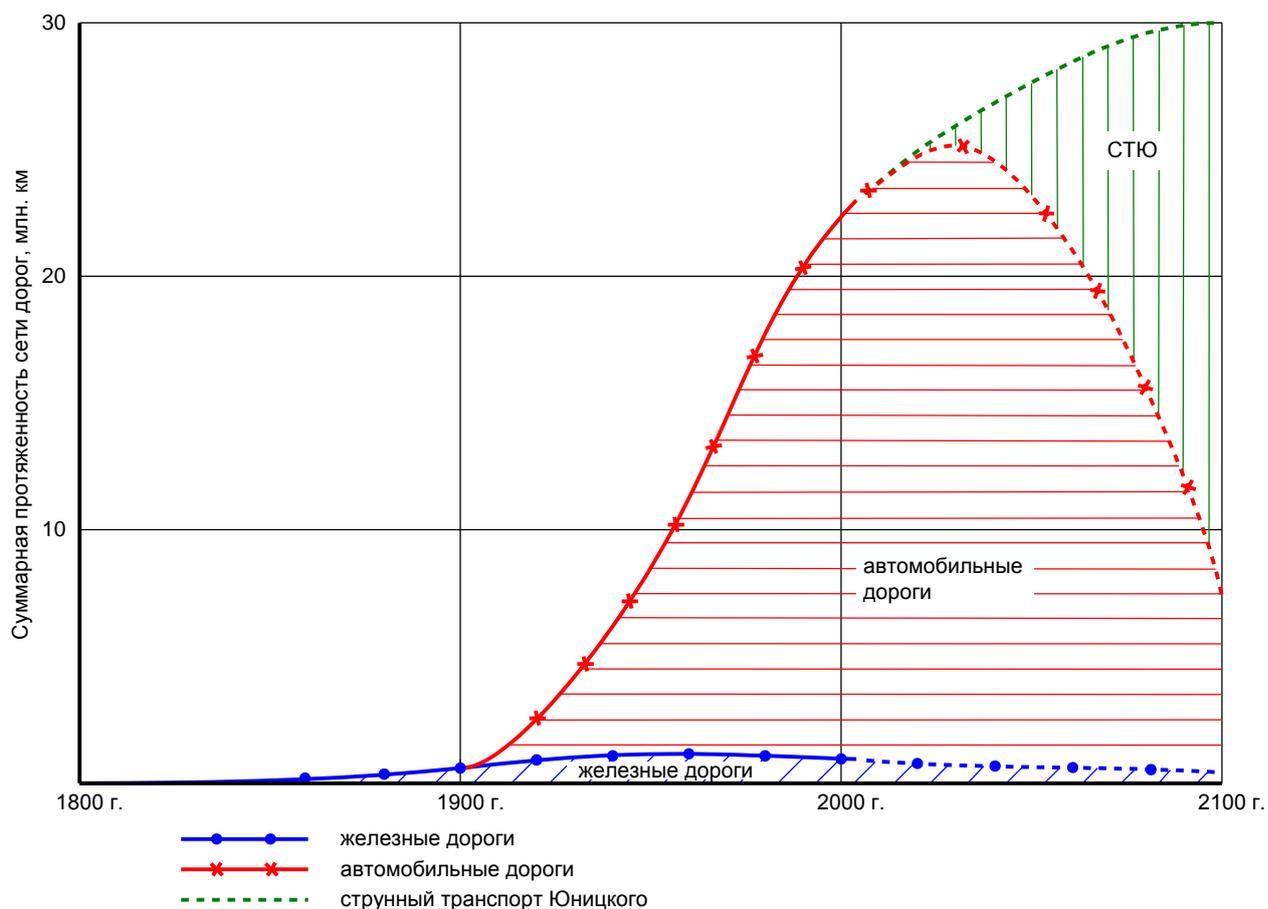


Рис. 32. Динамика развития основных видов мирового наземного транспорта в XIX...XXI столетиях

ми на высоту 10...20 м и более, где доминировать будут трассы СТЮ. В течение XXI века это даст экономический эффект, превышающий 100 триллионов USD. Рассмотрим три основные составляющие этого экономического эффекта (имеется большое число других, менее значимых факторов):

1) Сегодня стоимость освоенных земель (там, где проходят дороги) от 100 тыс. USD/га до 10 млн. USD/га (в городе). В среднем – около 200 тыс. USD/га. При инфляционном росте стоимости земли 3...5% в год, в середине XXI века эта земля будет стоить около 1 млн. USD/га. Тогда земля, занятая под сегодняшними дорогами, будет стоить около 40 триллионов USD (около 2 млн. USD/км). Поэтому, если будет предложена надземная высокоскоростная транспортная система 2-го уровня, требующая в 50...100 раз меньшего землеотвода и стоящая (с инфраструктурой) менее 1 млн. USD/км, то экономически будет выгодно постепенно демонтировать в течение XXI века существующую плоскостную транспортную систему (по мере износа и старения – например, срок службы асфальтобетонного покрытия составляет 15...20 лет), возведя вместо неё более дешёвую, экологичную, безопасную, скоростную, долговечную и более обширную общемировую транспортную сеть, размещённую на втором уровне.

2) Хотя человеческая жизнь бесценна и неповторима, тем не менее она страхуется на случай смерти и несчастного случая. Если взять страховые нормы цивилизованных стран, то при сохранении сегодняшнего уровня травматизма на автомобильном транспорте (на самом деле травматизм будет расти, т.к. на дорогах увеличивается количество автомобилей и растёт мощность двигателей и скоростей движения), человечеству будет нанесён ущерб транспортной системой в XXI столетии на уровне 100 триллионов USD (из расчёта: человеческая жизнь – 500 тыс. USD, инвалидность – 100 тыс. USD; ущерб:  $500.000 \text{ USD/жизнь} \times 950.000 \text{ жизней/год} \times 100 \text{ лет} + 100.000 \text{ USD/инвалидность} \times 5.000.000 \text{ инвалидов/год} \times 100 \text{ лет} = 97.500.000.000.000 \text{ USD}$ ). Ущерб на самом деле будет значительно выше, т.к. ценность человеческой жизни в XXI веке возрастет, а среди безвременно погибших неизбежно окажутся люди уровня Ньютона, Ломоносова, Эйнштейна, Чайковского, вклад которых в развитие земной цивилизации не поддаётся экономическим оценкам. СТЮ будет более безопасным, чем авиационный транспорт сегодня (2000...3000 жертв авиационных катастроф в год), т.к. не будет иметь не только автомобильных причин катастроф (наезд на пешехода, гололёд, лопнувшая шина, выезд на встречную полосу движения и т.п.), но и авиационных (попадание птицы в турбину двигателя, остановка двигателя, удар молнии, сильный туман, снегопад и т.п.).

3) Если существующий транспорт сделать высокоскоростным (скорость более 300 км/час), то перерасход топлива составит около 500 тонн в год на одно высокоскоростное транспортное средство типа автобуса (ёмкость 25...50 пасс., коэффициент использования 0,5; см. раздел 2.1). Если в высокоскоростной парк перевести, например, к 2020 г., только 2% существующего автопарка (т.е. примерно 10 миллионов транспортных средств), перерасход топлива с 2020 по 2100 г. по сравнению с СТЮ составит 400 миллиардов тонн общей стоимостью около 200 триллионов USD.

## 8. 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 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 составных элементов струнных транспортных систем: опор (анкерных, промежуточных и тормозных),

рельса-струны, путевой структуры, подвижного состава - пассажирского, грузового и грузопассажирского.

3. Разработана и испытана форма корпуса высокоскоростного 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.

Определена в аналитической форме зависимость параметров нагруженной струны от температуры окружающей среды; показано, что в диапазоне ее экстремальных значений ( $-50^{\circ}\text{C}$ ,  $+50^{\circ}\text{C}$ ) изменения параметров СТЮ находятся в приемлемых границах.

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 рельс-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 СТЮ;
- определены условия, при которых обеспечивается, путем подбора конструктивных параметров СТЮ и режимов движения экипажей, движение потока нагрузок по невозмущенному полотну (колебания остаются позади каждого экипажа и затухают через  $0,1 \dots 0,5$  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 СТЮ с разрезным над опорами корпусом, т.к. динамический прогиб такого пролета будет меньше, 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.

9. Получены следующие практические результаты:

- создаётся научно-производственная база в г.Сочи;
- построен экспериментальный 150-метровый участок СТЮ в г.Озёры Московской области; ведётся работа по его удлинению до 10 км с проведением динамических испытаний СТЮ, транспортного модуля, их узлов и агрегатов;
- разработан проект полномасштабного строительства 105-километровой трассы СТЮ "Озёры – Москва" и проведения всесторонних динамических испытаний в режиме пассажирских и грузовых перевозок;
- разработаны конструкции пассажирских модулей дальнего следования, пригородного и городского сообщения;
- разработаны конструкции грузовых модулей различных модификаций для перевозки контейнерных, жидких, сыпучих грузов;
- представлены проекты оригинальных систем быстрой погрузки и выгрузки транспортных модулей;
- спроектирован высокоскоростной транспортный модуль (юнилёт), по экономичности (в частности, по аэродинамическим качествам), не имеющий аналогов в мире;
- разработаны конструкции элементов СТЮ: опор, рельса и их узлов; сделаны заказы на опытное производство всех составных элементов СТЮ;
- разработки защищены 26-ю патентами;
- результаты исследований опубликованы в 3-х монографиях, 25 статьях, докладах и т.д.

10. Проект СТЮ имеет международную поддержку:

- реализуются две программы регионального Центра ООН "Хабитат"; в частности, по одной из них составлен бизнес-план строительства СТЮ в городе-курорте Сочи;
- технология СТЮ рекомендована для реализации программы "Критских" транспортных коридоров, соединяющих скоростным наземным транспортом развитые регионы Западной Европы с Восточной Европой, Ближним Востоком и Средней Азией; в дальнейшем эти коридоры могут быть продлены до Китая, Японии и Юго-Восточной Азии;
- находит поддержку программа автора "Чистая вода России", решающая одну из острейших проблем – проблему снабжения человечества качественной природной питьевой водой;
- глобальный характер имеет программа "Линейный город", решающая транспортные, экологические, градостроительные и др. проблемы городов и мегаполисов.

## 9. Список основных публикаций по тематике СТЮ

### Монографии

1. String Transportation System in questions, answers and projects / A.E.Unitsky – Moscow, 2000. – 99 p.
2. СТЮ-программа в вопросах, ответах и документах. / А.Э.Юницкий. – Москва, 1999. – 96 с.
3. Струнные транспортные системы: на Земле и в космосе. / А.Э.Юницкий. – Гомель, 1995. – 337 с.

### Основные научные и научно-популярные статьи

4. Юницкий А.Э. Струнная транспортная система – ноосферный транспорт XXI века. / Драчев П.Т. и другие. Ноосферный путь устойчивого развития России и Мира. Байкальский регион как модельная территория, 2002 г.
5. Юницкий А.Э. Перспективные виды скоростного транспорта. / Сборник "Московский авиационный узел", 2002 г.
6. Юницкий А.Э. Использование струнной транспортной системы в горной промышленности. / Сборник докладов X Международной конференции "Технология, оборудование и сырьевая база горных предприятий промышленности строительных материалов", 2002 г.
7. А.Э. Юницкий, В.Г. Соколов, В.А. Власов. Инвестиционный авант-проект создания в Новосибирске высокоскоростной струнной транспортной магистрали "Речной вокзал – Академгородок". Журнал "Сибирская финансовая школа", № 1, 2002 г.
8. Юницкий А.Э. Струнная транспортная система – транспорт будущего. Журнал "Промышленное и гражданское строительство", № 1, 2002 г.
9. Юницкий А.Э. Струнная транспортная система. / Тезисы докладов и сообщений Международной научно-практической конференции "Градоформирующие технологии XXI века", секция: "Транспорт, дороги, мосты, тоннели и коммуникации", 2001 г.
10. Юницкий А.Э. Струнная транспортная система. Журнал "Наука и технологии в промышленности", № 3, 2001 г.
11. Юницкий А.Э. Струнный транспорт Юницкого. / Проект "Ноосферные транспортные системы Сибири и Дальнего Востока", 2000 г.
12. Юницкий А.Э. Инновационный проект "Струнная транспортная система". Журнал "Конверсия в машиностроении", № 2, 2000 г.
13. Юницкий А.Э. Струнная дорога в XXI век. Газета "Транспорт России", № 52, 27 – 31 декабря 1999 г.
14. Юницкий А.Э. Транспорт грядущего века. Журнал "Логистика", № 2, 1999 г.
15. Юницкий А.Э. Создание струнной транспортной системы "Париж – Москва". / Материалы международной конференции по развитию коммуни-

- кационной системы "Париж – Берлин – Варшава – Минск – Москва", 1998 г.
16. Юницкий А.Э. Высокоскоростной наземный транспорт СТЮ. / Тезисы докладов международной научно-практической конференции "Ресурсо- и энергосберегающие технологии на транспорте и строительном комплексе", 1995 г.
  17. Юницкий А.Э., Савчук В.П., Савенков В.А., Варьвильская О.Н. Анализ колебаний пролётных строений струнной транспортной системы. / Тезисы докладов Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике "Механика-95", 1995 г.
  18. Юницкий А.Э., Савчук В.П., Савенков В.А., Варьвильская О.Н. К динамике струнной транспортной системы. / Тезисы докладов Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике "Механика-95", 1995 г.
  19. Junitzky A. Ein Verkehrsmittel der Zukunft – know-how der Firma "Unitran". Magazin "Weibrubland & Unternehmen", № 6, 1993.
  20. Юницкий А.Э. Транспорт будущего – ноу-хау фирмы "Юнитран". Журнал "Дело (Восток + Запад)", № 1 – 2, 1993 г.
  21. Юницкий А.Э. Экомир. Геокосмические транспортные альтернативы. / Сборник "Проект земного шара будущего", 1990 г.
  22. Юницкий А.Э. Озоновый слой: щит сегодня, саван – завтра? / Приложение к вестнику Агентства Печати Новости "Советская панорама", № 13, 1988 г.
  23. Юницкий А.Э. В космос - без ракеты. Журнал "Техника и наука", № 4, 1987 г.
  24. Юницкий А.Э. В космос на колесе. Журнал "Техника молодёжи", № 6, 1982 г.
  25. Юницкий А.Э. Пересадочная, космическая, кольцевая. Журнал "Изобретатель и рационализатор", № 4, 1982 г.

#### Основные патенты

26. Юницкий А.Э. Высокоскоростной транспортный модуль. Евразийский патент № 003535 от 30.07.2002 г.
27. Юницкий А.Э. Высокоскоростной транспортный модуль. Евразийский патент № 003534 от 30.07.2002 г.
28. Юницкий А.Э. Высокоскоростной транспортный модуль. Евразийский патент № 003533 от 30.07.2002 г.
29. Юницкий А.Э. Высокоскоростной транспортный модуль. Евразийский патент № 003490 от 30.07.2002 г.
30. Юницкий А.Э. Рельс транспортной системы Юницкого. Евразийский патент № 003485 от 13.02.2002 г.
31. Юницкий А.Э. Рельс транспортной системы Юницкого. Евразийский патент № 003484 от 13.02.2002 г.

32. Юницкий А.Э. Транспортная система. Патент РФ № 2211890 от 13.12.2001 г.
33. Юницкий А.Э. Рельс транспортной системы Юницкого. Патент РФ № 2204640 от 13.12.2001 г.
34. Юницкий А.Э. Рельс транспортной системы Юницкого и способ его изготовления. Патент РФ № 2204639 от 13.12.2001 г.
35. Юницкий А.Э. Рельс транспортной системы Юницкого. Патент РФ № 2204638 от 13.12.2001 г.
36. Юницкий А.Э. Рельс транспортной системы Юницкого, способ его изготовления и монтажа. Патент РФ № 2204637 от 13.12.2001 г.
37. Юницкий А.Э. Рельс транспортной системы Юницкого. Патент РФ № 2204636 от 13.12.2001 г.
38. Юницкий А.Э. Высокоскоростной транспортный модуль транспортной системы Юницкого. Патент РФ № 2217339 от 03.08.2001 г.
39. Юницкий А.Э. Высокоскоростной транспортный модуль транспортной системы Юницкого. Патент РФ № 2211781 от 03.08.2001 г.
40. Юницкий А.Э. Высокоскоростной транспортный модуль транспортной системы Юницкого. Патент РФ № 2203195 от 03.08.2001 г.
41. Юницкий А.Э. Высокоскоростной транспортный модуль транспортной системы Юницкого. Патент РФ № 2203194 от 03.08.2001 г.
42. Юницкий А.Э. Высокоскоростной транспортный модуль транспортной системы Юницкого. Патент РФ № 2201369 от 03.08.2001 г.
43. Юницкий А.Э. Высокоскоростной транспортный модуль транспортной системы Юницкого. Патент РФ № 2201368 от 03.08.2001 г.
44. Юницкий А.Э. Рельс транспортной системы Юницкого. Патент РФ № 2208675 от 05.03.2001 г.
45. Юницкий А.Э. Рельс транспортной системы Юницкого (варианты). Патент РФ № 2201482 от 05.03.2001 г.
46. Юницкий А.Э. Транспортное средство для струнных транспортных систем. Патент РФ на промышленный образец № 45722 от 18.10.1996 г.
47. Юницкий А.Э. Рельс для струнных транспортных систем. Патент РФ на промышленный образец № 45523 от 18.10.1996 г.
48. Anatoly E. Yunitsky. Linear transport system. Letters patent Republic of South Africa № 95/2888, 07.04.1995.
49. Юницкий А.Э. Рельс для струнных транспортных систем. Патент Республики Беларусь на промышленный образец № 221 от 18.10.1996 г.
50. Юницкий А.Э. Транспортное средство для струнных транспортных систем (2 варианта). Патент Республики Беларусь на промышленный образец № 220 от 18.10.1996 г.
51. Юницкий А.Э. Линейная транспортная система. Патент РФ № 2080268 от 08.04.1994 г.