

# СТРУННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ НА ЗЕМЛЕ И В КОСМОСЕ

## КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТС

Разработчиком СТС является фирма НТЛ (новые транспортные линии), созданная для этих целей в г. Минске в 1994 году, а патенто-обладателем — фирма “NTL Neue Transportlinien GmbH” (г. Берлин), созданная в Германии также в 1994 году с целью правовой защиты проекта. На принципиальную схему СТС и ее конструктивные особенности подана международная заявка на изобретение “Линейная транспортная система” (г. Женева, Швейцария) № PCT/IB 94/00065 от 08.04.94 г. и получен первый патент (Российская Федерация, патент № 94026782/11 от 26.09.94 г.). Переход на национальную стадию патентования в 40 странах мира будет осуществлен в 1996 г., поэтому конструктивные особенности СТС в настоящей работе могут быть раскрыты лишь в пределах международной заявки, хотя степень проработанности СТС в настоящий момент значительно выше.

### 2.1. Принципиальная схема СТС

Струнная транспортная система представляет собой конструкцию, имеющую большую протяженность, достигающую тысяч километров. Характеристики такой системы — надежность, долговечность, предельная скорость движения, стоимость строительства и эксплуатации и др. — будут зависеть не только от конструкции ее отдельных элементов, но и от их линейной компоновки. Такая компоновка для наиболее характерных участков трассы (равнинный, горный и морской участки) представлены на рис. 2.1.

Струнная гутевая структура  $l$  размещена на опорах, разделяющихся на три характерных типа: промежуточная (поддерживающая) опора 2, анкерная 3 и тормозная опора 4. Опоры установлены, соответственно, с шагом  $l_0 = 10...200$  м,  $l_a = 1...100$  км,  $l_m = 0,1...10$  км. Расстояние между опорами зависит от технологии строительства, рельефа местности, используемых материалов для несущих конструктивных элементов, особенно для струны, условий эксплуатации, массы и расчетной скорости движения транспортного модуля, усилий натяжения струны и других факторов.

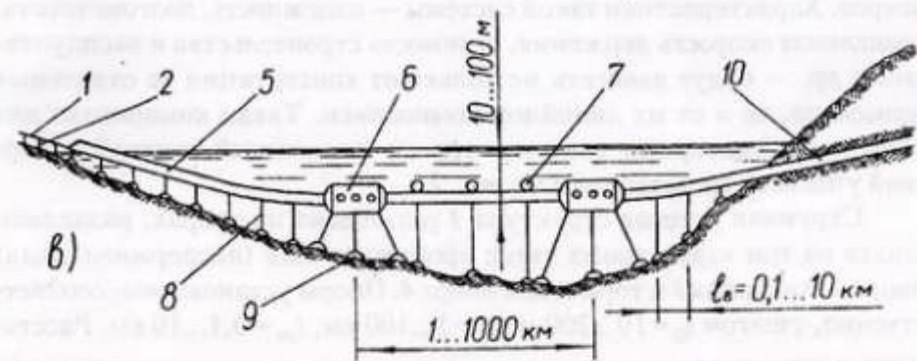
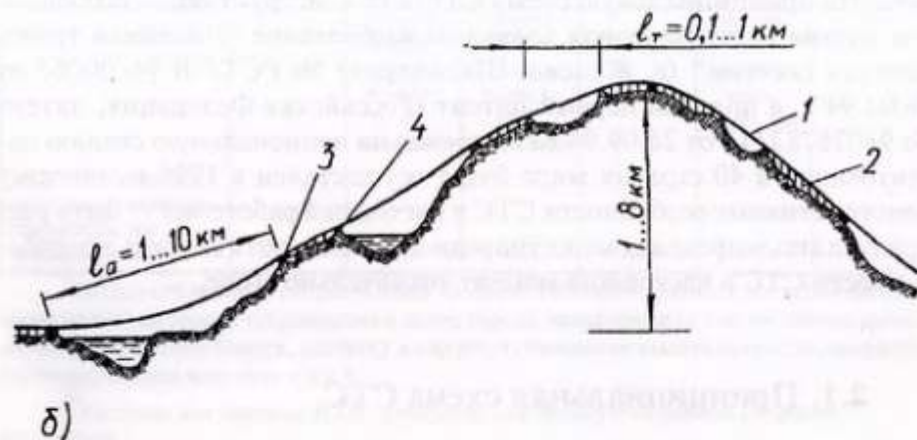
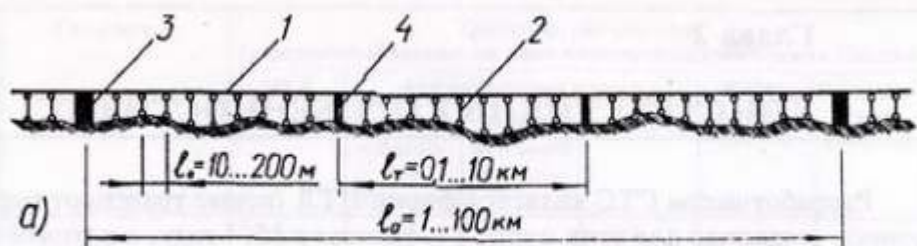


Рис. 2.1. Линейная схема СТС: а — равнинный участок; б — горный; в — морской; 1 — струнная путевая структура; 2 — промежуточная (поддерживающая) опора; 3 — анкерная опора; 4 — тормозная опора; 5 — труба-тоннель; 6 — подводная станция-поплавков; 7 — поддерживающий поплавков; 8 — якорная тяга; 9 — якорь; 10 — подземный тоннель.

На участках со сложным рельефом местности трасса может проходить расстояние  $l_m$  между соседними тормозными опорами одним пролетом длиной 0,1...1 км и более (без промежуточных опор). При этом параболический прогиб струнной путевой структуры под действием силы тяжести будет иметь значения  $(0,001...0,01)l_m$  и может быть плавно вписан в продольный профиль трассы (рис. 2.1, б). В аналогичных случаях СТС может проходить расстояние  $l_a$  между соседними анкерными опорами одним пролетом длиной до 10 км. Таким путем могут быть преодолены глубокие ущелья, проливы, расстояния между островом и материком, между вершинами соседних гор и другие препятствия. Параболический прогиб путевой структуры под действием силы тяжести не превысит в этом случае значения  $0,05l_a$ , что также позволяет плавно вписать его в продольный профиль трассы.

На морском участке трасса СТС размещена в подводной трубе-тоннеле 5, выполненной с нулевой плавучестью и размещенной на глубине 10...100 м и более. На такой глубине исключается воздействие разрушительных штормов. С целью обхода мощных морских течений тоннель может уходить на большую глубину. Для обеспечения избыточной плавучести, чтобы не допустить затопления трубы под воздействием подвижной нагрузки, служат поплавки 7, которые заякорены на дне моря. Учитывая низкую материалоемкость якорных тяг и их редкое размещение (через 0,1...10 км), глубина моря не имеет принципиального значения для стоимости СТС. Роль анкерных опор выполняют подводные станции-поплавки 6, изготовленные с высокой избыточной плавучестью. Промежуточные и тормозные опоры СТС, имеющие небольшие размеры, размещены внутри тоннеля. Труба-тоннель, выполненная из стали или предварительно напряженного железобетона, имеет внутренний диаметр 2,5...3 м и растянута в продольном направлении до усилия 1000 тс и выше. Поэтому она будет работать в СТС и как струна с пролетом  $l_p$ .

На основных участках СТС, т.е. на участках протяженностью  $l_0$  (между поддерживающими опорами 2), путевая структура не имеет прогибов (рис. 2.2, а), т.к. статический прогиб  $u_c$  струны 3 размещен ("спрятан") внутри ее конструкции. Нагрузка от веса путевой структуры и транспортного модуля передается на струну посредством прокладки 4, высота которой вдоль пролета изменяется от нуля (над опорой) до максимального значения  $u_c$  (в середине пролета). Поэтому головка 5 рельса, по которой движутся колеса транспортных модулей, в статике имеет ровную поверхность без прогибов и стыков. Возможно выполнение СТС, в которой рабочая поверхность головки рельса представляет собой волнистую линию (рис. 2.2, б). Ее форма является зеркальным отражением относительно прямой линии 8 динамического

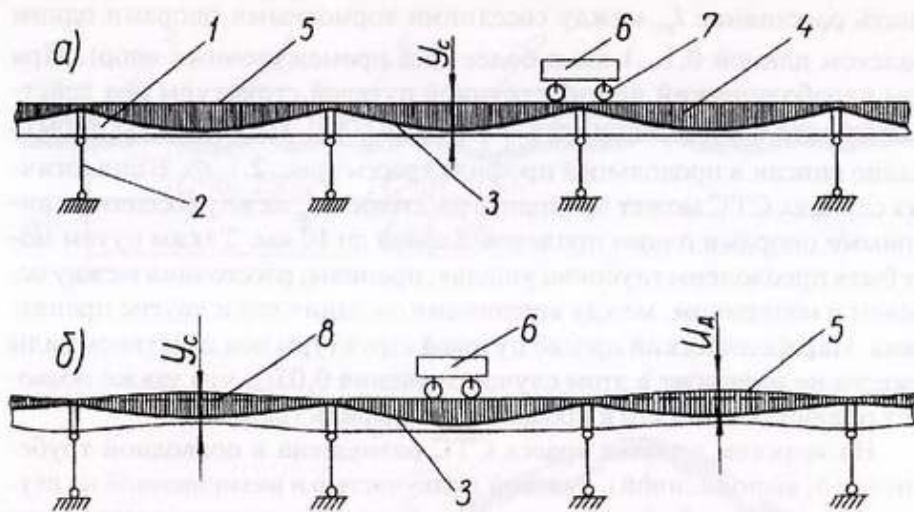


Рис. 2.2. Схема продольного сечения струнной путевой структуры: а — путевая структура без прогибов; б — с антипрогибом; 1 — путевая структура; 2 — промежуточная опора; 3 — струна; 4 — прокладка переменной высоты; 5 — головка рельса; 6 — транспортный модуль; 7 — колесо; 8 — прямая линия

прогиба  $u_d$  путевой структуры в момент прохождения транспортного модуля. В результате пролетное строение опускается до линии 8 и в каждый момент времени траектория движения модуля является прямой линией.

На рис. 2.3 представлены зависимости максимальных статических прогибов струны от погонной (линейной) массы  $\rho_1$  путевой структуры ( $y_c^{\max}$ ), а на рис. 2.4 — 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, имеющей параболический прогиб, и усилий  $T_0$  натяжений путевой структуры (кроме струн, в ней могут быть натянуты головка рельса, корпус и другие конструктивные элементы). Расчеты проводились по формулам, представленным в главе 4. Из графиков на рис. 2.3 следует, что значения  $y_c^{\max} \leq 10$  см достижимы при  $l_0 = 10 \dots 100$  м,  $T_c = 100 \dots 1000$  тс и  $\rho_1 = 50 \dots 500$  кг/м. Такой параболический прогиб может быть легко размещен, “спрятан” внутри путевой структуры, если высота поперечного сечения рельса будет в пределах  $10 \dots 25$  см.

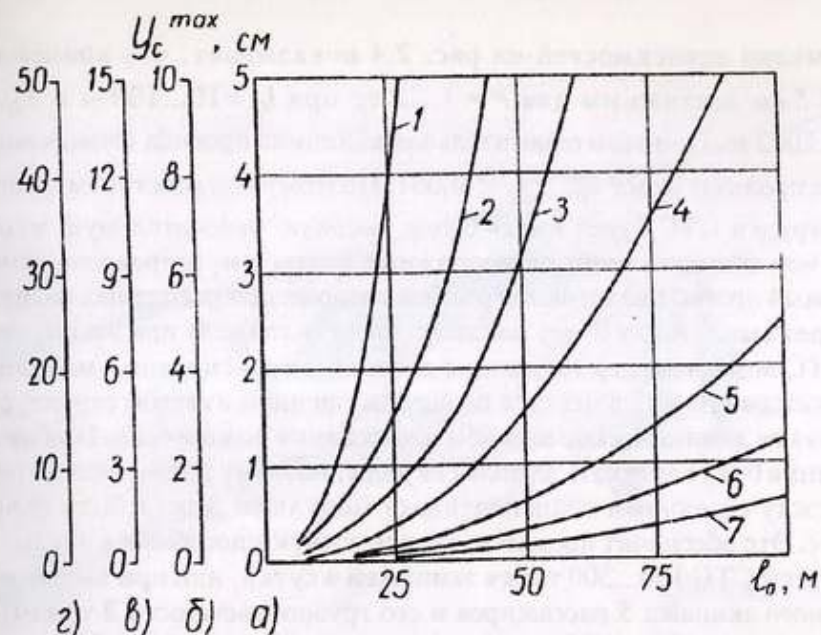


Рис. 2.3. Максимальный параболический прогиб струны под действием веса путевой структуры: а — для  $\rho_1 = 50$  кг/м; б — 100 кг/м; в — 150 кг/м; г — 500 кг/м; 1—7 соответственно при  $T_c = 100, 250, 500, 1000, 2500, 5000$  и  $10000$  тс

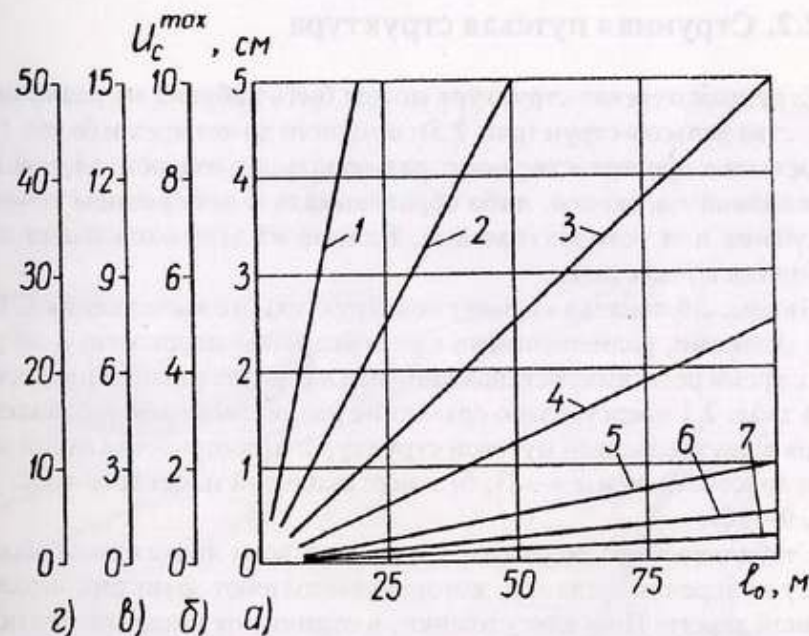


Рис. 2.4. Максимальный прогиб путевой структуры под действием одиночной нагрузки: а — для  $P = 1$  тс; б — 2 тс; в — 3 тс; г — 10 тс; 1—7 соответственно при  $T_0 = 100, 250, 500, 1000, 2500, 5000$  и  $10000$  тс

Анализ зависимостей на рис. 2.4 показывает, что значения  $u_c^{\max} \leq 5$  см достижимы для  $P = 1...3$  тс при  $l_0 = 10...100$  м и  $T_0 = 100...1000$  тс. При этом относительная величина прогиба (отнесенная к длине пролета) будет  $u_c^{\max}/l_0 < 0,001$ . Поэтому под действием полезной нагрузки СТС будет иметь более высокую относительную жесткость, чем существующие автодорожные мосты и путепроводы, относительный прогиб пролетных строений которых при расчетных нагрузках будет выше. А как будет показано ниже (в главе 4) при эксплуатации СТС возможны такие режимы движения транспортных модулей, когда каждый из них движется по невозмущенной путевой структуре, оставляя ее динамические прогибы и колебания позади себя. При этом колебания будут затухать за доли секунды, поэтому временной интервал между соседними транспортными модулями может быть равен 0,5...1 с. Это обеспечит предельную пропускную способность двухпутной трассы СТС 100...300 тысяч экипажей в сутки, или при вместимости одного экипажа 5 пассажиров и его грузоподъемности 2 тонны — соответственно 500...1500 тысяч пассажиров в сутки и 200...500 тысяч тонн грузов в сутки.



Рис.2.6. СТС с двумя рельсами, размещенными в вертикальной плоскости

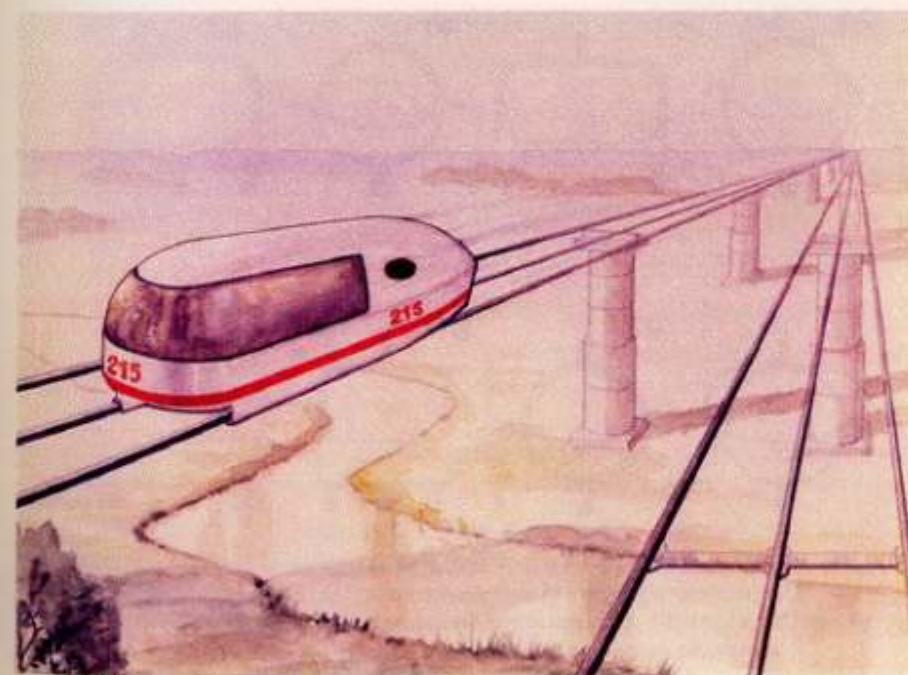


Рис.2.7. СТС с тремя рельсами, размещенными в горизонтальной плоскости

## 2.2. Струнная путевая структура

Струнная путевая структура может быть набрана из различного количества рельсов-струн (рис. 2.5): от одного до четырех и более. При этом рельсы в пространстве могут размещаться в горизонтальной или вертикальной плоскости, либо образовывать в поперечном сечении треугольник или четырехугольник. Каждая из этих схем имеет свои достоинства и недостатки.

На рис. 2.6 показан вариант конструктивного выполнения СТС с двумя рельсами, размещенными в вертикальной плоскости, а на рис. 2.7 — с тремя рельсами, установленными в горизонтальной плоскости.

В табл. 2.1 представлено сравнение различных схем размещения рельсов в двухрельсовой путевой структуре: а) в горизонтальной плоскости (рис. 2.5, схемы 4—8), б) в вертикальной плоскости (рис. 2.5, схемы 9—10).

Стабильность размера колеи трассы на всем протяжении обеспечивают поперечные планки, которые выполняют функции шпал на железной дороге. Поскольку планки, в отличие от шпал, не передают нагрузку от движущихся экипажей на основание, они могут быть установлены значительно реже, через 5...50 м. Этот шаг будет зависеть от усилия натяжения струн, жесткости рельсов, массы транспортного

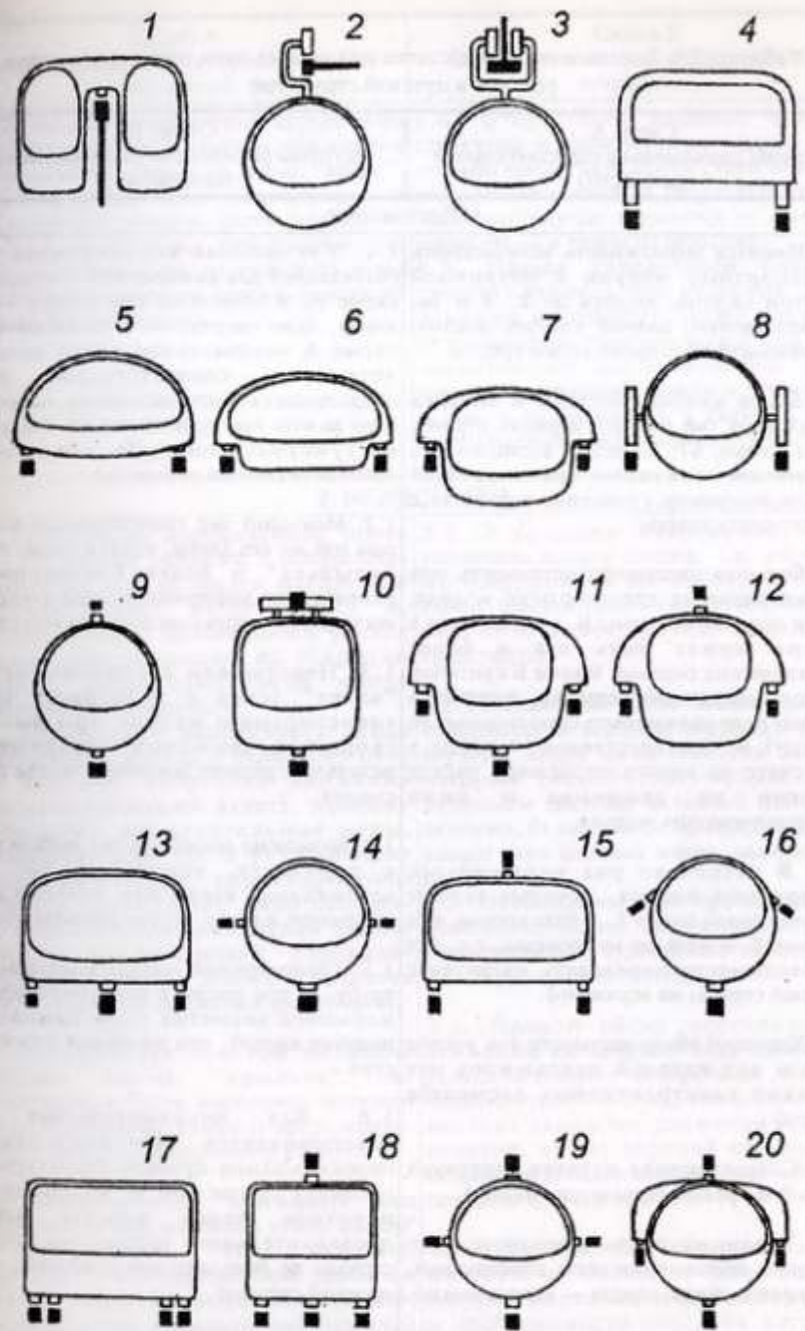


Рис. 2.5. Схемы размещения рельсов: 1, 2, 3 — СТС с одним рельсом; 4, 5, 6, 7, 8 — с двумя рельсами, размещенными по горизонтали; 9, 10 — с двумя рельсами, размещенными по вертикали; 11, 12, 13, 14, 15, 16 — с тремя рельсами; 17, 18, 19, 20 — с четырьмя рельсами

Таблица 2.1. Достоинства и недостатки различных схем размещения двух рельсов в путевой структуре

Схема А (струны размещены в горизонтальной плоскости)	Схема Б (струны размещены в вертикальной плоскости)
<b>1. Достоинства</b>	
1.1. Имеется возможность использовать транспортные модули с различной высотой салона, вплоть до 2...3 м (и, соответственно, разной комфортности), при неизменной ширине колеи трассы.	1.1. Улучшенная аэродинамика (нет обтекателей для размещения колес, как в схеме А, и возможны три колеса — два внизу, одно сверху, — в то время как в схеме А минимальное число колес — четыре) и, соответственно, выше предельная скорость движения, ниже шум (это важно при движении на воздухе, в вакуумированной трубе это не имеет принципиального значения).
1.2. Более удобная посадка и высадка пассажиров (не мешает верхняя струна, как в схеме Б); имеется возможность аварийной эвакуации транспортного модуля, например, с помощью вертолета, с любого места трассы.	1.2. Меньший вес транспортного модуля при той же его длине, что и в схеме А (нет "крыльев" и более благоприятное напряженно-деформированное состояние несущей конструкции корпуса модуля).
1.3. Большая пассажироместимость при тех же размерах транспортного модуля, т.к., в отличие от схемы Б, в одном ряду в салоне может быть два и более пассажирских сидений (схема Б критична к несимметричной загрузке, поэтому в каждом ряду должно быть одно сиденье, по центру) и, соответственно, меньше в пересчете на одного пассажира расход энергии на движение и ниже материалоемкость модуля.	1.3. Невозможен аэродинамический "взлет" (сход с рельсового пути) транспортного модуля при высоких скоростях движения, например, в результате резкого бокового порыва ветра, смерча.
1.4. В несколько раз меньший вес поперечных планок, которые задают ширину колеи (они в 2...3 раза короче, чем в схеме Б и меньше нагружены, т.к. нет необходимости передавать нагрузку с нижней струны на верхнюю).	1.4. Возможно движение под любым углом к горизонту, вплоть до 90°, т.е. вертикально вверх или отвесно вниз, например, в горах (путем распора колес).
1.5. Хороший обзор местности (на уровне глаз и над головой пассажиров нет никаких конструктивных элементов трассы).	1.5. Транспортный модуль вписывается в трубу (в том числе в вакуумированную) меньшего диаметра (при одинаковой ширине колеи), что удешевит строительство.
1.6. Симметричная путевая структура (левый и правый рельсы одинаковы).	1.6. Без дополнительных мер обеспечивается устойчивость от опрокидывания путевой структуры при пролетах свыше 100 м, например, при переходе через ущелье (путем предварительного натяжения верхней струны до больших напряжений, чем у нижней струны).
1.7. Традиционность компоновочного решения (привычная всем конструкция, как у автомобиля, поезда — колеса внизу).	1.7. Велосипедная (мотоциклетная) схема движения (два нижних несущих колеса), что при высоких скоростях движения обеспечит, с помощью электроники, устойчивое движение и без верхних, поддерживающих колес.
1.8. Не будет схода экипажа с рельсового пути даже в случае поломки одного или нескольких колес ("крылья" транспортного модуля будут работать в случае поломки колеса как лыжи).	

Схема А (струны размещены в горизонтальной плоскости)	Схема Б (струны размещены в вертикальной плоскости)
1.9. Возможно прохождение стрелочного перевода на большей скорости, чем в схеме Б (стрелочный перевод по схеме: "вверх", либо "вниз"), т.к. пассажиры и транспортный модуль легче переносят вертикальные нагрузки, чем боковые; это ускорит перевод на другой путь и не потребует торможения потока экипажей при подобных маневрах.	1.8. Отсутствует перекос путевой структуры и транспортного модуля из-за неодинакового натяжения струн в разных рельсах (например, в результате обрыва части растянутых элементов — лент или проволок — в одном из рельсов). 1.9. Проще стрелочный перевод, традиционность его решения (увод экипажа в сторону), ниже время на переключение стрелочного перевода в другое положение (для переключения достаточно перемещения рельса в сторону на 0,1 м, в то время как в схеме А такое перемещение вверх или вниз превысит 1 м).
<b>2. НЕДОСТАТКИ</b>	
2.1. Ухудшенная аэродинамика (из-за того, что корпус экипажа в поперечном сечении не может иметь идеальную круглую форму из-за колес) и, соответственно, повышенный расход энергии при движении на открытом воздухе (при одинаковой длине транспортных модулей).	2.1. В будущем невозможно будет увеличить высоту салона, т.е. улучшить его комфортность, без изменения высоты колеи трассы (как невозможно сегодня изменить колею железнодорожного транспорта).
2.2. Существует вероятность схода транспортного модуля с рельсового пути при высоких скоростях движения (аэродинамический взлет), поэтому необходимы дополнительные меры, увеличивающие вес и ухудшающие аэродинамические характеристики экипажа (антикрыло либо соответствующая аэродинамическая форма корпуса, исключая аэродинамический взлет при любых сочетаниях ветра и скоростей движения транспорта).	2.2. Повышенный износ боковых рабочих поверхностей верхней струны и реборд верхних колес из-за наличия боковых нагрузок (недостаток устраняется: а) введением системы активной центровки экипажа; б) введением на каждое верхнее колесо двух боковых колес, заменяющих реборды).
2.3. Большой вес при той же длине экипажа (из-за "крыльев", их обтекателей и более массивной несущей конструкции из-за худшего напряженно-деформированного состояния корпуса).	2.3. Необходимы при прочих равных условиях, более высокие опоры и, соответственно, будет более высокой, на 10...20%, стоимость опор.
2.4. Возможность движения без специальных мер лишь под углом 20...30° к горизонтали (что, впрочем, недостижимо для современных железных дорог и поездов на магнитном подвесе); при снабжении транспортных модулей боковыми колесами (они могут заменить реборды), благодаря их распору, возможно движение под углом к горизонту до 60°.	2.4. Плохой обзор местности при движении на воздухе (над головой — рельс, мелькание поперечных планок и верхних строений опор, что, впрочем, при высоких скоростях движения не будет заметно, кроме верхней струны, как незаметны лопасти во вращающемся винте самолета или вертолета).
	2.5. В несколько раз более высокая масса поперечных планок и более высокие нагрузки на них (из-за большей их длины и необходимости передачи нагрузки, примерно половины веса экипажа, с нижнего рельса на верхний с целью включения его в работу и разгрузки нижнего рельса).

Схема А (струны размещены в горизонтальной плоскости)	Схема Б (струны размещены в вертикальной плоскости)
2.5. Необходимо принятие дополнительных мер для обеспечения устойчивости от опрокидывания путевой структуры (пары рельсов) при пролетах свыше 100 м, например, при переходе через ущелье (путем снабжения нижерасположенным балластом, либо вышерасположенными вантами или параболической тросовой поддерживающей конструкцией).	2.6. Несимметричность решения путевой структуры — нижний рельс, как более нагруженный, отличается от верхнего (это увеличивает, хоть и незначительно, количество конструктивных элементов путевой структуры).
2.6. Возможен перекос путевой структуры и экипажа из-за разности в силе натяжения струн в левом и правом рельсах (например, из-за обрыва части предварительно растянутых элементов в одной из струн).	2.7. Нетрадиционность (непривычность) компоновочного решения (колеса снизу и колеса сверху, чего нет ни в одном из существующих видов транспорта).
	2.8. Более высокая вероятность электрического пробоя между рельсами через поперечные планки, т.к. планки в схеме Б связывают рельсы друг с другом с обеих сторон, а в схеме А — с одной, снизу.

модуля, силы бокового ветра и других факторов и должен обеспечивать поддержание колеи с точностью порядка 1 мм (основным средством обеспечения стабильности ширины колеи будут не поперечные планки, а высокие усилия натяжения струн).

Схемы размещения поперечных планок в путевой структуре СТС показаны на рис. 2.8 (по длине трассы) и рис. 2.9 (в поперечном сечении СТС).

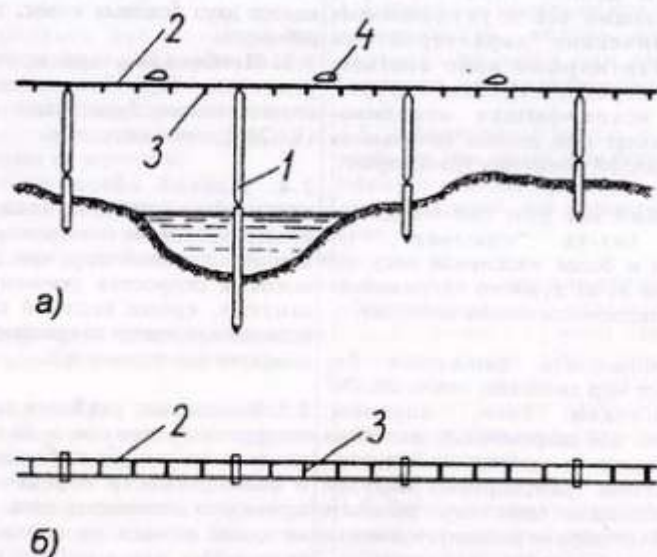


Рис. 2.8. Схема размещения поперечных планок по длине трассы: а — вид сбоку на СТС; б — вид сверху; 1 — поддерживающая опора; 2 — рельс; 3 — поперечная планка; 4 — транспортный модуль

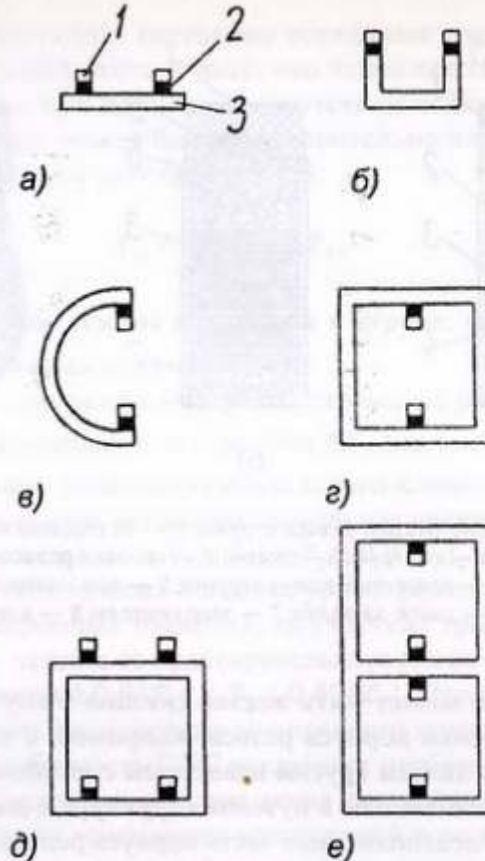


Рис. 2.9. Схемы размещения поперечных планок в путевой структуре СТС: а, б, в, г — одноярусная СТС; д, е — двухъярусная; 1 — рельс; 2 — электроизолятор; 3 — поперечная планка

Основным элементом путевой структуры СТС является рельс-струна, различные варианты исполнения которой показаны на рис. 2.10.

Струна 3 состоит из отдельных предварительно натянутых элементов (проволок или лент), размещенных параллельно друг другу вдоль струны и имеющих в поперечном сечении круглую, прямоугольную, шестиугольную или иную форму, определяемую технологическими и конструктивными особенностями конкретного варианта исполнения СТС. Элементы струны заключены в изоляционную оболочку 4, которая может быть выполнена металлической, полимерной, либо из композиционного материала. Защитная оболочка, как и корпус 2, может выполнять функции электроизоляции, теплоизоляции и демпфирования для гашения колебаний, передаваемой струне при движении транспортного модуля. Струна 3 (рис. 2.10, а) посредством за-

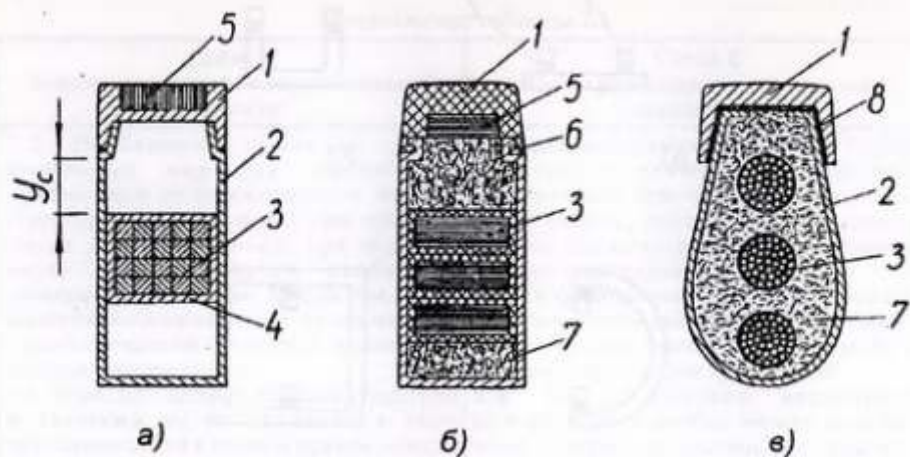


Рис. 2.10. Конструкция рельса-струны: а — со струной из проволок; б — из лент; в — со струной—тросом; 1 — головка рельса; 2 — корпус; 3 — струна; 4 — защитный кожух струны; 5 — дополнительная струна; 6 — замок-защелка; 7 — наполнитель; 8 — клей

щитной оболочки может быть жестко связана с внутренней боковой поверхностью стенки корпуса рельса, например, с помощью сварки, клея, заклепок и любым другим известным способом. Функцию прокладки переменной высоты в путевой структуре в данном случае выполняет верхняя незаполненная часть корпуса рельса, имеющая высоту  $y_c$ .

Струна может быть набрана из отдельных полос (лент), размещенных либо горизонтально (рис. 2.10, б), либо вертикально, либо комбинированным способом, и заключенных в несколько изоляционных оболочек, которые могут быть как жестко связанными друг с другом и боковой стенкой корпуса рельса, так и разделенными между собой смазкой.

Проволоки или ленты струны могут быть изготовлены из любого материала, прочность на растяжения 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 могут быть разделены жидкой, консистентной или твердой смазкой. Наличие смазочной среды повысит долговечность струны, ее коррозионную устойчивость, а в случае обрыва отдельных проволок в струне (например, из-за дефектов изготовления) — позволит им сократиться по длине без нарушения напря-

женно-деформированного состояния остальных элементов рельса. Благодаря такой особенности и тому, что напряжения в струне практически одинаковы при наличии и отсутствии подвижной нагрузки (см. главу 1), струна может быть предварительно натянута почти до предела ее прочности на растяжение  $[T_c]$ :

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

где  $\Delta T_t$  — изменение усилия натяжения в струне, обусловленное ее температурными деформациями.

При пределе прочности материала струны на растяжение  $[\sigma_c] > > 10000 \text{ кгс/см}^2$ , максимальные значения  $\Delta T_t$  для высокопрочной стали, даже в условиях резкоконтинентального климата, будут менее  $0,2 [T_c]$ . Поэтому усилие предварительного натяжения струны в СТС может находиться в пределах  $0,7 [T_c] < T_c < 0,9 [T_c]$ . В СТС, эксплуатирующихся при неизменных температурных режимах, например, в подземных или подводных тоннелях, на участках трасс с термостатированием струны, усилия ее предварительного натяжения могут быть увеличены до значений  $0,9 [T_c] < T_c < 0,99 [T_c]$ . Это позволит максимально использовать прочностные возможности материала струны.

Описанная особенность СТС исключает необходимость в температурных деформационных швах по длине путевой структуры, однако приведет к сезонному изменению напряжений в ее растянутых элементах — к увеличению их зимой и снижению летом. Поэтому максимальные значения параболического прогиба струны  $y_c$  (в середине пролета) в течение года из-за изменения значения  $T_c$  будут колебаться в пределах 10...20% от первоначального значения (от -5...-10% до +5...+10% от проектного положения — см. рис. 2.2). В более умеренном климате и при использовании более высокопрочных или менее жестких материалов значения  $y_c$  в течение года будут колебаться в пределах 1% от проектной величины. Это не отразится на функционировании СТС (на ровности головки рельса в вертикальной плоскости), так как дополнительная выпуклость (зимой) и провис (летом) путевой структуры составят величину порядка  $(10^{-4} \dots 10^{-5}) l_0$ .

Для повышения устойчивости путевой структуры под действием температурных напряжений все жесткие элементы рельса — головка рельса и его корпус — могут быть предварительно растянуты до напряжений порядка  $1000 \text{ кгс/см}^2$ . Тогда независимо от температуры окружающей среды все элементы рельса будут испытывать только напряжения растяжения, что исключает потерю продольной устойчивости. Хотя наличие в конструкции рельса струн, растянутых до усилий в



сотни тонн, допускает появление в отдельных элементах сжимающих напряжений без потери продольной устойчивости рельса.

Рельс может быть снабжен дополнительной струной 5 (рис. 2.10 а, б), размещенной вдоль головки параллельно ей (без провиса в середине пролета). Это обеспечит повышенную поперечную жесткость головки рельса под действием боковой нагрузки — ветровой, от колес проходящих модулей и др.

Головка рельса может быть выполнена из металла, керамики (металлокерамики), полимера (металлополимера), композиционного и иного высокопрочного, износостойкого и электропроводного материала, как однородного, так и многослойного, например, со специальным износостойким возобновляемым покрытием. При этом требования к материалу головки рельса СТС могут быть значительно снижены по сравнению с материалом традиционного железнодорожного рельса. В отличие от последнего, в СТС на порядок и более будут ниже значения следующих параметров: нагрузка на колесо (примерно при том же его диаметре и ширине контактной части); масса подрессоренной части (при более высокой ровности пути), определяющая динамические контактные нагрузки при высоких скоростях движения; плотность электрического тока, протекающего через контакт “рельс—колесо” и другие факторы.

Прокладка переменной высоты, обеспечивающая выравнивание параболического прогиба  $u_c$  струны, может быть выполнена в рельсе в виде специального заполнителя 7 в свободном пространстве пустотелого корпуса (рис. 2.10, б, в). При этом заполнитель будет выполнять несколько дополнительных функций: а) теплоизолятора (для теплоизоляции наиболее напряженного элемента — струны); б) электроизолятора (для изоляции, при необходимости, струны от токонесущей головки и корпуса); в) демпфера (для демпфирования взаимных колебаний головки рельса, корпуса и струны); г) защиты от механических повреждений струны извне (например, он должен выдержать выстрел из ружья). В качестве заполнителя могут быть использованы как монолитные, так и пористые (вспененные) полимерные материалы, металлы, керамические и композиционные материалы, а также различные волокнистые материалы как с замкнутыми порами, так и с сообщающимися друг с другом порами, заполненными специальными жидкими, консистентными или твердыми наполнителями. При использовании в качестве заполнителя монолитных жестких материалов, таких как бетон, по длине рельса в них должны быть выполнены температурные деформационные швы.

### 2.3. Опоры

Опоры СТС подразделяются на три характерных типа, отличающихся величиной горизонтальной (продольной) нагрузки, действующей на них в процессе строительства и эксплуатации трассы: а) промежуточная (поддерживающая) опора; б) тормозная; в) анкерная.

Поддерживающая опора установлена с шагом  $l_0 = 10 \dots 200$  м и рассчитана в основном на вертикальную нагрузку от веса путевой структуры и транспортного потока. Для однопутной линии с линейной массой путевой структуры  $\rho_{nc} = 100$  кг/м,  $l_0 = 50$  м и массе транспортного модуля  $m_{т.м} = 2000$  кг вертикальная нагрузка на опору с учетом динамического нагружения будет в пределах 10 тс. Поэтому опоры могут быть выполнены достаточно легкими и ажурными (рис. 2.11—2.13). По высоте опоры подразделяются на четыре типа: а) малой высоты (до 10 м); б) средней высоты (10—25 м); в) высокие (25—50 м); г) сверхвысокие (50...100 м и выше). По конструкции поддерживающие опоры могут быть однопутными, двухпутными, одноярусными или много-

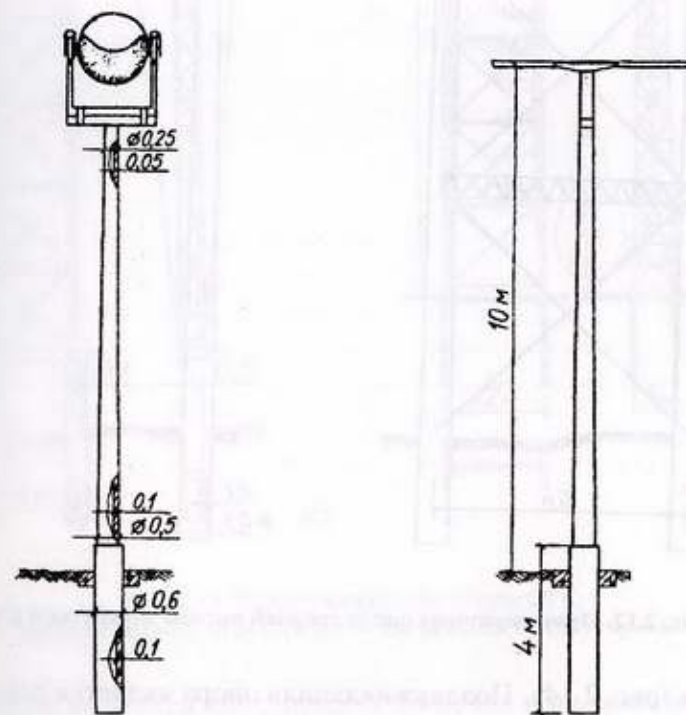


Рис. 2.11. Промежуточная опора малой высоты однопутной СТС

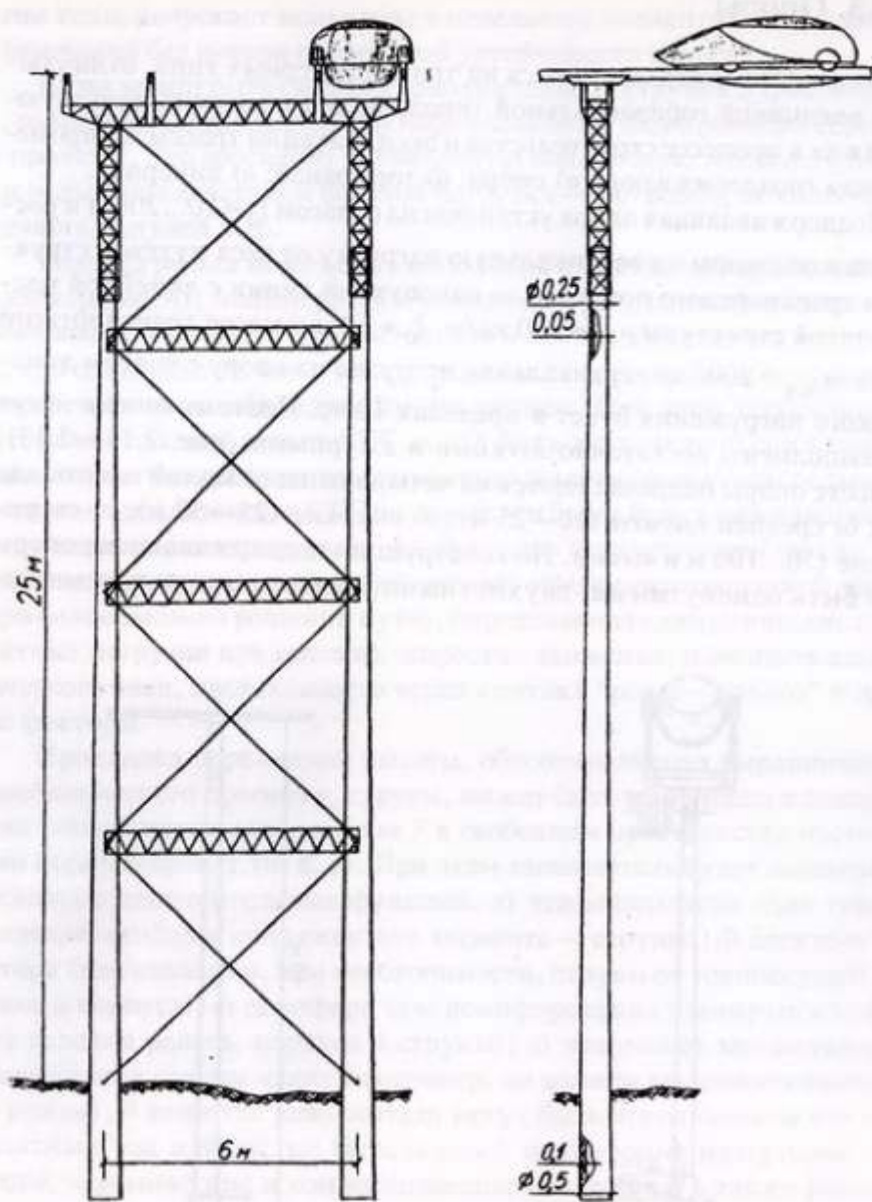


Рис. 2.12. Промежуточная опора средней высоты двухпутной СТС

ярусными (рис. 2.14). Поддерживающая опора является основным типом опор в СТС и задает длину расчетного пролета  $l_0$ , динамику колебаний струнной путевой структуры, величину полезной нагрузки и основную стоимость опорной части транспортной линии. Опора должна воспринимать также горизонтальную поперечную нагрузку, действу-

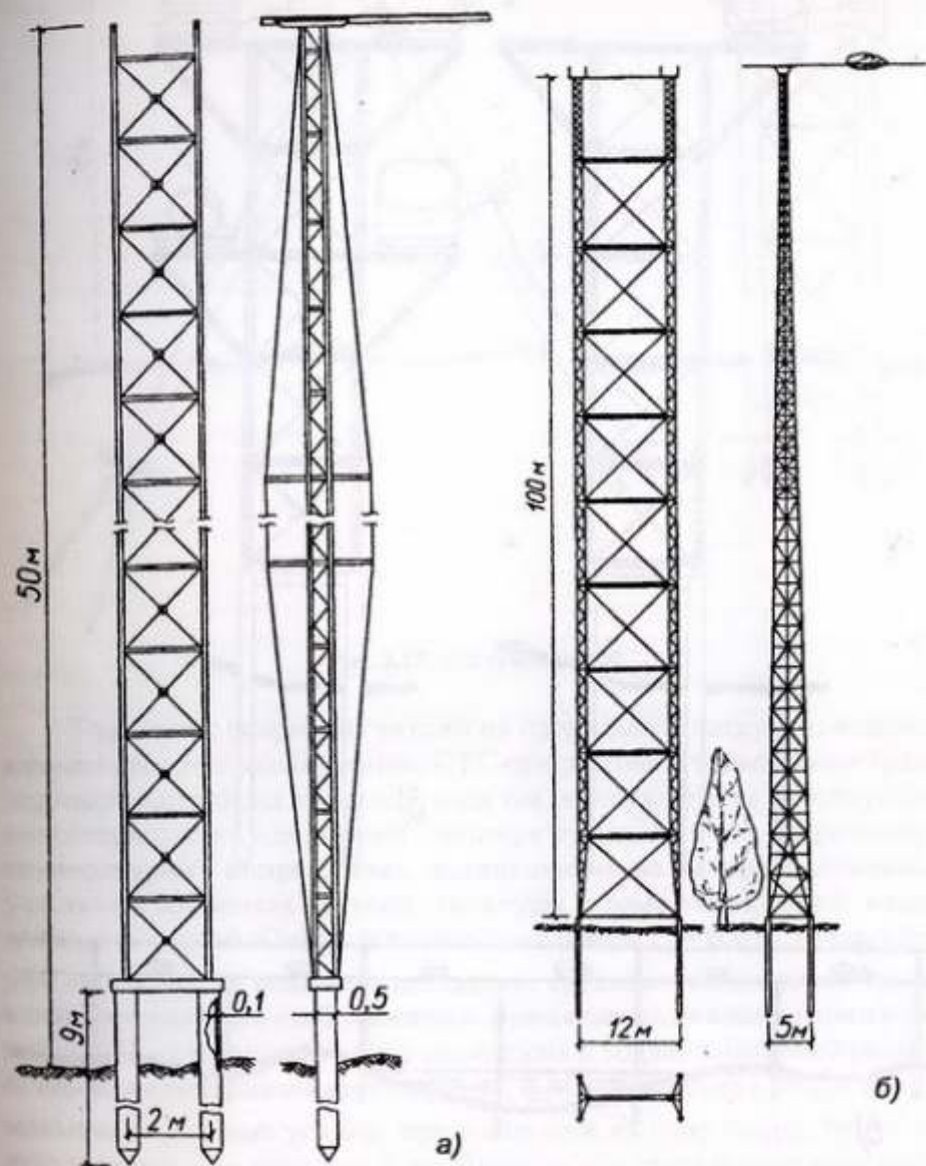


Рис. 2.13. Поддерживающие опоры СТС:  
 а — высокие (однопутная СТС); б — сверхвысокие (двухпутная СТС)

ющую как на элементы конструкции СТС, так и на транспортный поток, единичные модули которого обладают не только определенной парусностью, но и при высокой скорости движения работают как крыло, имеющее горизонтальную составляющую аэродинамических сил.

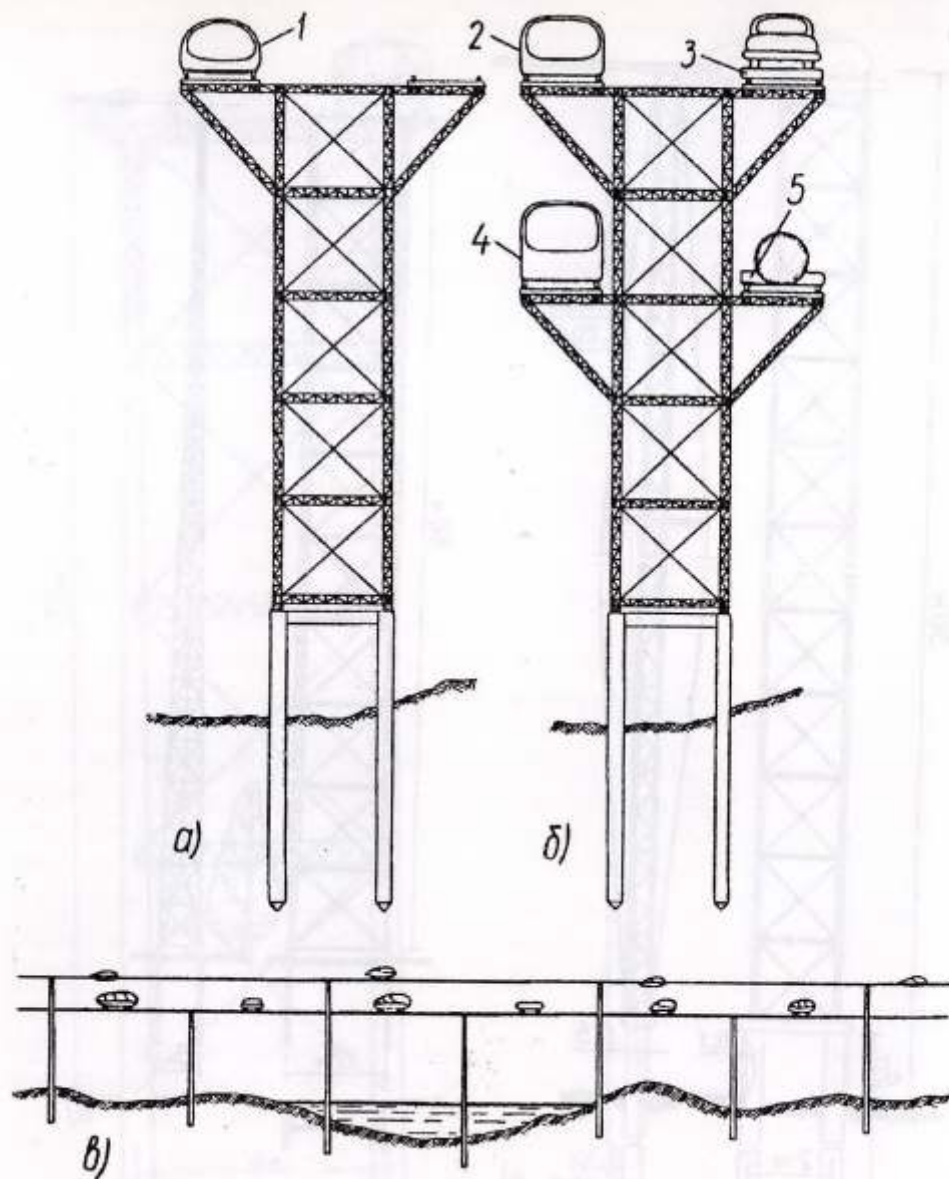


Рис. 2.14. Многоярусная поддерживающая опора: а — 1-ый этап строительства (однойярусная опора для скоростного пассажирского транспорта); б — 2-ой этап (добавлен второй ярус для грузового транспорта и пассажирского общественного транспорта); в — вид на двухъярусную опору сбоку; 1—5 — транспортные модули, соответственно: для индивидуального пользования; типа “микроавтобус”; платформа для перевозки габаритных грузов, например, легковых автомобилей; типа “автобус”; платформа для перевозки контейнеров (для сыпучих, жидких и штучных грузов)

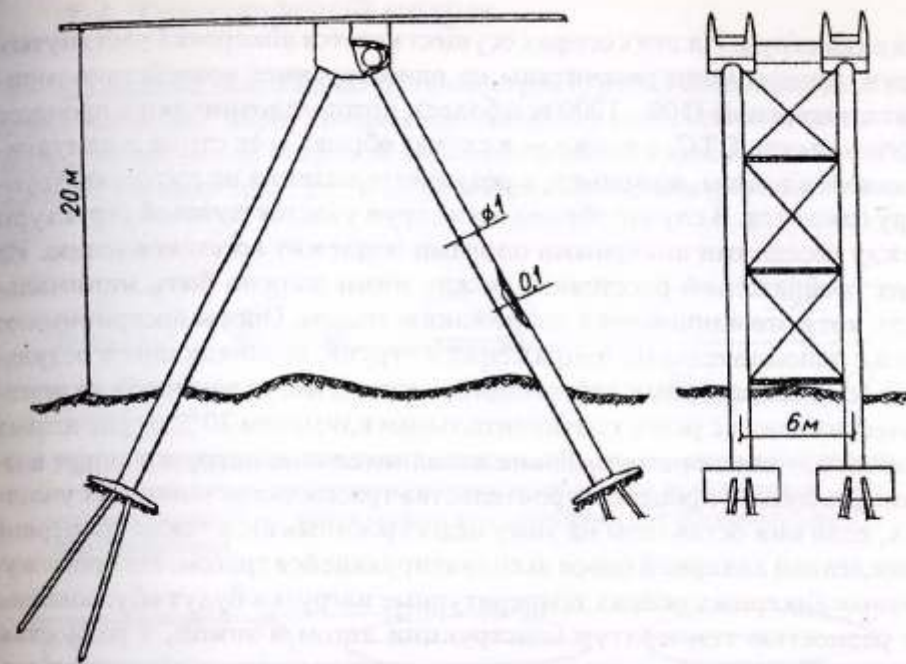


Рис. 2.15. Анкерная опора

Тормозные опоры рассчитаны на продольную нагрузку, возникающую в процессе эксплуатации СТС при разгоне и торможении транспортных модулей, на продольную составляющую от веса конструкции, возникающую на наклонных участках трасс, а также на разницу в температурных напряжениях, возникающих на близрасположенных участках в элементах путевой структуры (кроме напряжений, возникающих в струне). Опоры установлены с шагом  $l_m = 0,01 \dots 10$  км, который определяется рельефом местности, грузонапряженностью трассы и конструктивными особенностями, принятыми для конкретного варианта СТС: а) тормозная опора совмещена с поддерживающей опорой; б) опоры не совмещены друг с другом. В первом случае  $l_m = l_0$  и максимальные тормозные усилия, приходящиеся на одну опору, будут незначительны — в пределах 1 тс. Поэтому все типы поддерживающих опор, показанные на рис. 2.11—2.13 будут являться и тормозными. При этом локальные тормозные усилия через натянутые струны будут перераспределяться на большое количество опор, в том числе и на анкерные. Этому будет способствовать и некоторая податливость опор в направлении движения транспорта.

Анкерные опоры в СТС (рис. 2.15) установлены с шагом  $l_a = 1 \dots 100$  км, который определяется технологией строительства струнной путевой структуры, рельефом местности и расчетным усилием на-

тяжения струн. На этих опорах осуществляется анкеровка растянутых струн, поэтому они рассчитаны на одностороннее воздействие горизонтальной силы (100...1000 тс и более), которые возникают в процессе строительства СТС, а также — в случае обрыва всех струн эксплуатирующейся трассы, например, в результате падения на путевую структуру самолета. В случае обрыва всех струн участок путевой структуры между соседними анкерными опорами подлежит восстановлению. Из этих соображений расстояние между ними должно быть минимальным, хотя это и приведет к удорожанию трассы. Опоры воспринимают также дополнительные напряжения в струне, возникающие в результате ее температурных деформаций, которые могут достигать в климатических зонах с резко континентальным климатом 20% от расчетных усилий натяжения струн. Такие дополнительные нагрузки могут возникнуть лишь в процессе строительства трассы (на ее конечных участках, если они оставлены на зиму недостроенными), а также на первой и последней анкерной опоре эксплуатирующейся трассы. На промежуточных анкерных опорах температурные нагрузки будут обусловлены не разностью температур конструкции летом и зимой, а разностью температур соседних участков трассы, один из которых, например, может находиться на солнце, а другой — в тени. В качестве анкерных опор могут использоваться как существующие, так и специально построенные здания и сооружения. Часть анкерных опор может быть совмещена с вокзалами (рис. 2.16).

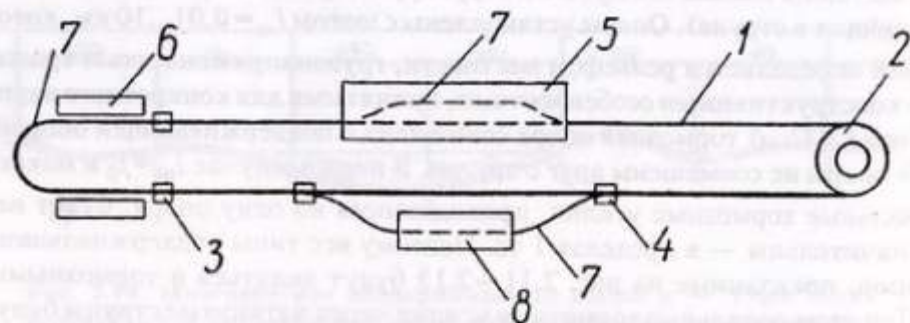


Рис. 2.16. Схема размещения специализированных анкерных опор: 1 — трасса СТС; 2, 3, 4, 5 — анкерные опоры, соответственно: кольцевая конечная, выполненная в виде вокзала; обычная конечная; промежуточная со стрелочным переходом; промежуточная в виде здания (вокзала); 6 — платформа; 7 — участок трассы с путевой структурой, выполненной из обычных рельсов (типа железнодорожных); 8 — промежуточная станция

## 2.4. Транспортный модуль

Движение экипажа по путевой структуре СТС осуществляется с помощью колес, через которые производится токообразование и запитка привода электрической энергией. Приводной агрегат экипажа может быть выполнен в виде (рис. 2.17): а) двигателя вращения (роторного электродвигателя); б) мотор-колеса; в) линейного электродвигателя; г) газовой турбины.



Рис. 2.17. Транспортный модуль с различными типами приводного агрегата: а, г — двигатель вращения с приводом на колесо и воздушный винт, соответственно; б — мотор-колесо; в — линейный электродвигатель; д — газовая турбина

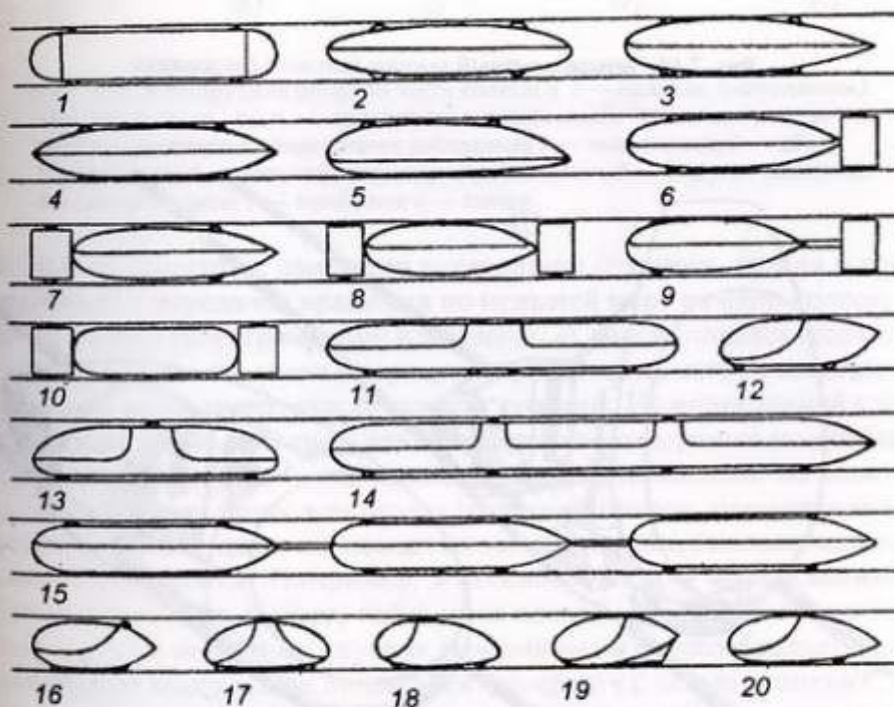


Рис. 2.18. Модели форм корпуса экипажа и компоновка колес для СТС с двумя вертикально расположенными рельсами: 1, 2, 4, 11, 13, 17 — с симметричным корпусом; 3, 5, 12, 16, 18, 20 — с ассиметричным корпусом; 6, 7, 8, 9, 10, 19 — с колесами, вынесенными за пределы корпуса; 14 — экипаж-поезд; 15 — поезд из отдельных экипажей, связанных друг с другом механической сцепкой

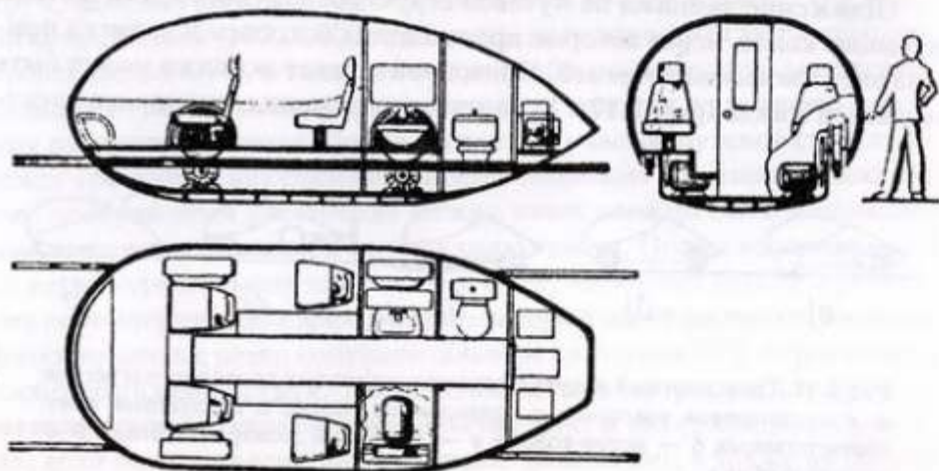


Рис. 2.19. Четырехместный экипаж дальнего следования

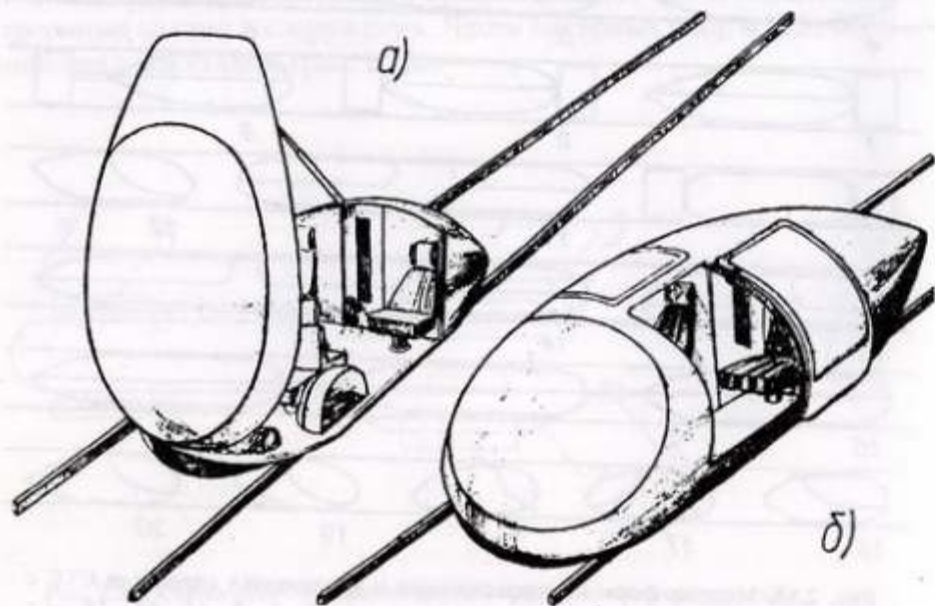


Рис. 2.20. Схема размещения разъемов в корпусе экипажа:  
*a* — в продольном направлении (корпус-раковина); *б* — с поперечными разъемыми (с дверью в корпусе)

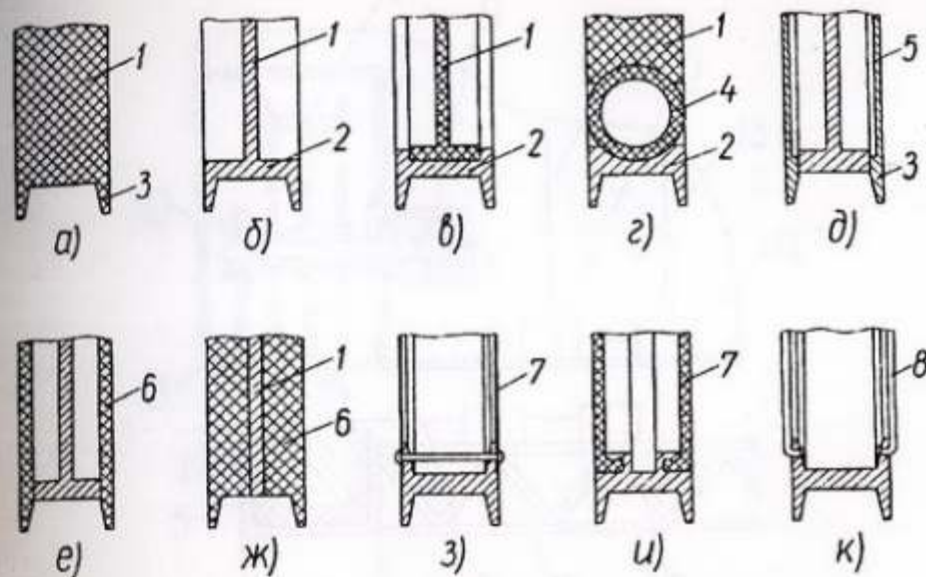


Рис. 2.21. Конструкция опорной части колеса: *a, б* — цельное (монокристаллическое) колесо; *в, г, з, и, к* — составное с подвижным ободом; *д, е, ж* — комбинированное с подвижными ребрами; 1 — тело колеса; 2 — обод; 3 — ребра; 4 — упругий торроидальный элемент; 5 — упругая пластина; 6 — упругий диск; 7 — мембрана; 8 — спица

рического двигателя, двигателя внутреннего сгорания, дизеля и тому подобных) с передачей вращения по меньшей мере на одно колесо; *б*) мотор-колеса (электрического или иного); *в*) линейного электродвигателя; *г*) воздушного винта с передачей вращения на него от электрического или иного двигателя; *д*) газовой турбины. Из приведенной классификации видно, что лишь один тип приводного агрегата может быть чисто электрическим — это линейный электродвигатель. Во всех остальных случаях возможен неэлектрический привод, применение которого будет определяться исходя из экологических, экономических и иных соображений. Например, в неосвоенных или малоосвоенных районах (пустыни, тундра, тайга, зона вечной мерзлоты, горные массивы и т.п.) в отдельных случаях экономически целесообразнее будет вместо прокладки новых линий электропередач с целью запитки СТС использовать транспортные модули с двигателем внутреннего сгорания или дизелем.

Компоновка колес транспортных модулей с различной формой корпуса — симметричной (для двухстороннего движения) и ассиметричной (для одностороннего движения) — для СТС с двумя вертикально расположенными рельсами представлена на рис. 2.18. Вариант ком-

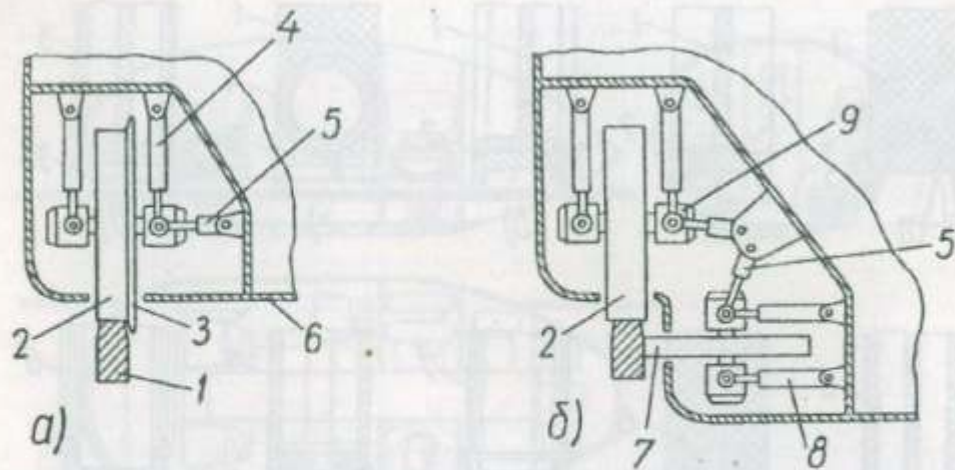


Рис. 2.22. Конструкция подвески колеса: *a* — колесо с одной ребордой; *b* — без реборд; 1 — рельс; 2 — основное колесо; 3 — реборда; 4 — подвеска; 5 — демпфер; 6 — корпус транспортного модуля; 7 — дополнительное (боковое) колесо; 8 — подвеска дополнительного колеса; 9 — подшипниковый узел — токосъем

повоночного решения четырехместного салона экипажа дальнего следования показан на рис. 2.19. При высоких скоростях движения (выше 300 км/ч) основные энергетические потери в СТС будут определяться аэродинамикой, т.е. аэродинамическим совершенством формы корпуса транспортного модуля. Этого легко добиться, т.к. корпус не имеет выступающих частей, кроме узких колес, выдвинутых на 5—10 см. По этой же причине целесообразнее все стыки и разъемы в корпусе выполнять продольными, по направлению обтекания воздухом, чтобы исключить его завихрения. Поэтому для скоростных транспортных модулей предпочтение необходимо отдавать конструкции, в которой корпус раскрывается по принципу раковины (рис. 2.20).

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 экипажа очень важно уменьшить динамические нагрузки, обусловленные микронеровностями рельсового пути и его колебаниями. Для этого колесо может быть выполнено составным (рис. 2.21) и обод либо реборды в нем имеют возможность поперечного (относительно рельса) перемещения. Возможно также выполнение колеса с одной ребордой или без реборд (рис. 2.22).

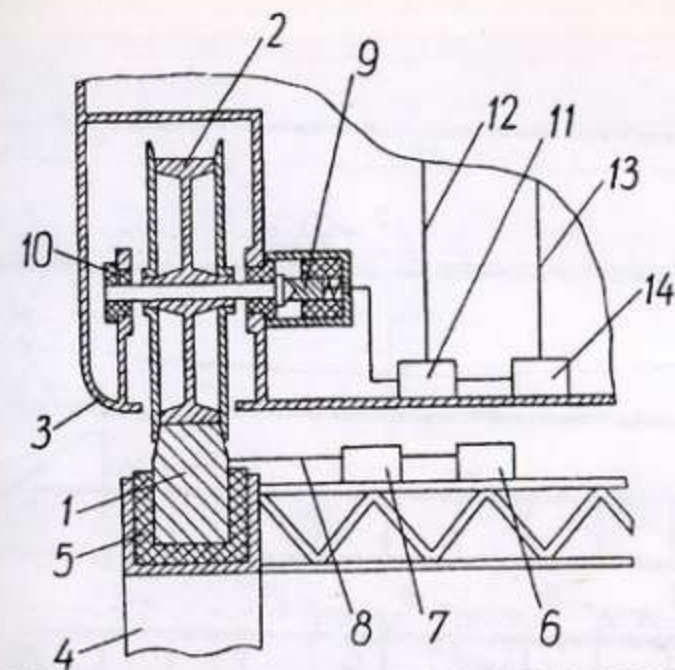


Рис. 2.23. Схема электропитания транспортного модуля: 1 — рельс; 2 — колесо; 3 — корпус модуля; 4 — опора СТС; 5 — электронизолятор рельса; 6 — источник электрической энергии; 7 — преобразователь; 8 — электрическая сеть для запитки рельса; 9 — токосъем с оси колеса; 10 — подшипниковый узел; 11 — распределительное устройство; 12 — высоковольтная сеть; 13 — низковольтная сеть; 14 — низковольтный источник энергии (аккумулятор)

Электропитание транспортного модуля осуществляется через контакт “колесо-рельс” (рис. 2.23). Оно будет эффективным даже при высоких скоростях движения, т.к. этот контакт не является скользким, а в самом пятне контакта будут достаточно высокие усилия прижима колеса к рельсу.

## 2.5. Технология строительства СТС

Заранее изготовленную струну растягивают с помощью технологического оборудования до заданного значения (в качестве контрольного параметра используют усилие натяжения или удлинение струны при растяжении) и жестко прикрепляют ее концы известным способом, например, сваркой, к анкерным опорам. Если расстояние между анкерными опорами превышает длину проволок в струне, их последовательно стыкуют друг с другом в торец, например, сваркой с наклад-

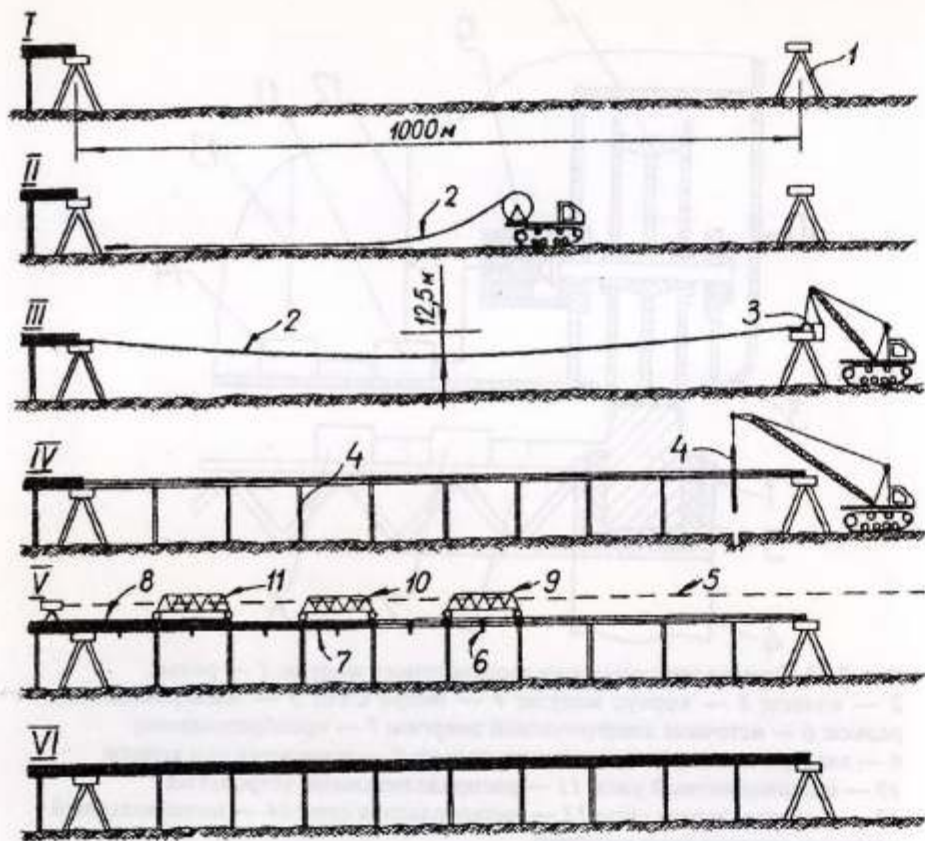


Рис. 2.24. Технология строительства трассы СТС: 1 — анкерная опора; 2 — трос (элемент струны); 3 — механизма натяжения троса; 4 — промежуточная опора; 5 — визирная линия; 6 — поперечная планка; 7 — корпус рельса; 8 — головка рельса; 9, 10, 11 — технологические платформы для установки, соответственно: поперечных планок, корпуса рельса и головки рельса; I — строительство анкерной опоры; II — раскладка тросов струны вдоль трассы; III — натяжение и анкеровка струны; IV — установка промежуточных опор; V — монтаж элементов рельса и путевой структуры; VI — готовый участок трассы

кой на стык. Для получения бездефектной струны указанные стыки разнесены по длине струны таким образом, чтобы в ее произвольном поперечном сечении было не более одного стыка.

Тормозные и промежуточные (поддерживающие) опоры устанавливают предварительно, либо в процессе натяжения струны, либо после натяжения. На рис. 2.24 показан вариант технологических этапов строительства трассы СТС, а на рис. 2.25—2.28 изображены двухпутная трасса и основные этапы ее строительства. Струну натягивают либо целиком вместе с изоляционной оболочкой, либо последовательно



Рис. 2.25. Двухпутная трасса



Рис. 2.26. Натяжение струны на анкерную опору

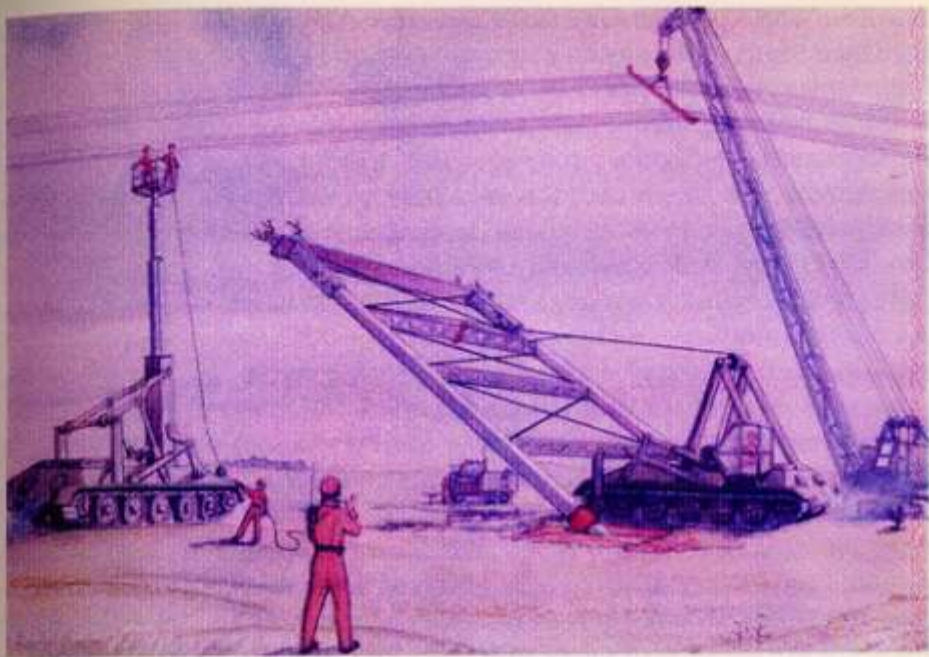


Рис.2.27. Установка промежуточной опоры

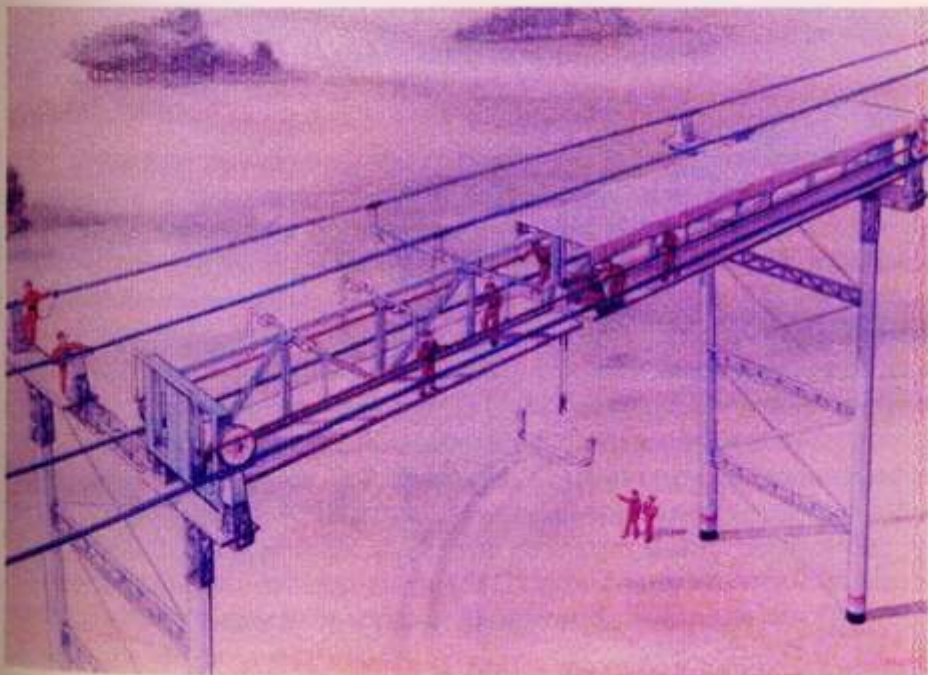


Рис.2.28. Технологическая платформа для монтажа струнной путевой структуры

по одному или несколько элементов струны (проволок или лент). После установки промежуточных опор и натяжения струн по ним пускают технологическую платформу, которая может самостоятельно перемещаться и жестко фиксировать свое положение относительно опор. С помощью платформы последовательно, пролет за пролетом, устанавливают полый корпус рельса, фиксируют его в проектное положение, заполняют заполнителем, устанавливают головку рельса, поперечные планки и выполняют другие работы, необходимые по устройству путевой структуры. Все эти работы легко поддаются механизации и автоматизации и могут выполняться круглосуточно в любую погоду. Благодаря этому будет обеспечена высокая скорость поточного строительства трассы СТС, его низкая трудоемкость и себестоимость. Для устранения микронеровностей и микроволнистости рабочих поверхностей смонтированной головки рельса и ее поперечных беззазорных стыков возможна их сошлифовка по всей длине транспортной системы.

Строительство СТС может осуществляться также с помощью специального строительного комбайна, когда струна и другие нагружаемые элементы рельса натягиваются не на анкерную опору, а на комбайн. Комбайн, двигаясь вдоль трассы с помощью шагающих ног-опор, оставит после себя смонтированные промежуточные опоры с готовым рельсовым путем, который при достижении анкерных опор прочно соединит с ними.

## 2.6. Техничко-экономическое сравнение транспортных систем

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

Во всех случаях технико-экономических сравнений большое значение должно придаваться удельному расходу электроэнергии на перевозку. Транспортные модули СТС имеют сравнительно низкий расход энергии. Это обусловлено целым рядом причин, основные из которых приведены в табл. 2.2. Высокий КПД двигателя, низкие потери энергии на движение (высокие аэродинамические качества и низкие механические потери при движении жесткого колеса по ровному жесткому пути) сделают транспорт СТС самым экономичным из всех существующих видов скоростного транспорта, имеющих такую же скорость движения.



Особенно следует учитывать изменение аэродинамического сопротивления с ростом скорости движения транспортных средств. При скорости 200 км/ч оно достигает 50%, а при 500 км/ч — превышает 90% общего сопротивления движению, тогда как при скорости 30 км/ч составляет примерно 5%, а остальные 95% — механические сопротивления. Полный расход электроэнергии экипажами СТС в открытой ат-

Таблица 2.2. Сравнительный анализ аэродинамических и других энергетических качеств различных скоростных транспортных средств

Транспортное средство	Причины, вызывающие ухудшение аэродинамического качества транспортного средства	Другие причины, вызывающие потери энергии
Транспортный модуль СТС	Колеса, выступающие из корпуса (ширина колеса до 10 см, выступает из корпуса на 5—10 см — остальная часть колеса находится в закрытом пространстве). Удельная площадь внешней поверхности модуля, контактирующей с воздухом: 2—3 м <sup>2</sup> /пасс., 5—10 м <sup>2</sup> /(1 т груза).	Деформация рельсовой струнной путевой структуры под действием подвижной нагрузки (максимальная относительная стрела прогиба пути равна 10 <sup>-3</sup> —10 <sup>-4</sup> ). Потери энергии в подвеске колес (благодаря высокой ровности рельсового пути амплитуда колебаний подвески будет в пределах 1—3 см). Удельная масса конструкции модуля**: 0,2—0,4 т/пасс.; 0,5—1 т/(1 т груза). КПД привода: до 80—90%.
Самолет	Большое количество выступающих конструктивных элементов: крылья, закрылки, вертикальные и горизонтальные рули, двигатели и т.п. Большое число поперечных стыков на внешней поверхности из-за наличия лючков, иллюминаторов, дверей, стыков отдельных листов в обшивке, заклепок и т.п. Удельная площадь внешней поверхности самолета: 5—10 м <sup>2</sup> /пасс., 20—50 м <sup>2</sup> /(1 т груза).	Необходимость иметь подъемную силу, на создание которой тратится много энергии. Необходимость, с целью создания импульса, отбрасывать назад с высокой скоростью и в большом количестве воздух или продукты горения топлива, что приводит к значительным потерям энергии (и создает серьезные экологические проблемы, особенно при движении в разреженных слоях атмосферы, где в основном и пролегают авиатрассы). Необходимость нести с собой топливо на весь путь движения (масса топлива превышает вес перевозимых пассажиров и соизмерима с весом транспортируемого груза), на что тратится значительная часть этого же топлива. Необходимость подниматься на высоту порядка 10 км, что требует дополнительного расхода энергии. Удельная масса конструкции самолета: 0,3—0,5 т/пасс., 2—5 т/(1 т груза). КПД привода: до 30—40%.

\* Характеризует удельные потери энергии экипажа на аэродинамическое сопротивление.

\*\* Характеризует удельные потери энергии на разгон экипажа, торможение, подъем на высоту и др.

Транспортное средство	Причины, вызывающие ухудшение аэродинамического качества транспортного средства	Другие причины, вызывающие потери энергии
Автомобиль	Большое число выступающих конструктивных элементов: широкие колеса, полностью открытые для набегающего потока воздуха, подвеска, привод на колеса, зеркала для бокового и заднего обзора, элементы охлаждающего радиатора, на которые должен набегать поток воздуха, "дворники" на лобовом стекле и др. Большое количество поперечных стыков на внешней поверхности из-за наличия: капота, дверей, багажника, фар, передних, задних и боковых стекол и др. Удельная площадь внешней поверхности автомобиля: 3—5 м <sup>2</sup> /пасс., 10—20 м <sup>2</sup> /(1 т груза).	Деформации шины (относительная величина деформации достигает значения 10 <sup>-1</sup> ). Деформация дорожного полотна под колесом (относительная стрела прогиба под грузовым автомобилем равна 10 <sup>-3</sup> —10 <sup>-4</sup> ). Потеря энергии в подвеске колес (колебания подвески, даже на ровной дороге, достигают 5—10 см). Близость поверхности полотна к днищу автомобиля, что при высокой скорости вызывает эффект экрана, приводящий к увеличению потерь энергии. Удельная масса конструкции автомобиля: 0,2—0,5 т/пасс., 1—2 т/(1 т груза). КПД привода: до 40—50%.
Скоростной поезд	Большое число крупногабаритных выступающих элементов: колесные пары, их подвеска, полностью открытые для набегающего воздушного потока и др. Значительное количество поперечных стыков на внешней поверхности из-за наличия: зазоров между вагонами, окон, дверей и др. Удельная площадь внешней поверхности поезда: 3—6 м <sup>2</sup> /пасс., 5—10 м <sup>2</sup> /(1 т груза).	Деформация рельсов и полотна под действием подвижной нагрузки (относительная стрела прогиба составляет 10 <sup>-3</sup> —10 <sup>-4</sup> ). Значительные потери энергии в подвеске колесных пар из-за большой массы поддрессоренной части. Удельная масса конструкции поезда: 0,5—1 т/пасс., 0,5—1 т/(1 т груза). КПД привода электропоезда: до 70—80%.
Экипаж на магнитном подвесе	Необходимость систем магнитного подвешивания экипажа к эстакаде, имеющих большие размеры, развитую поверхность и малые зазоры с полотном, в которые с высокой скоростью втягивается воздух. Большое число поперечных стыков на внешней поверхности из-за наличия: систем магнитного подвешивания и линейного электродвигателя, окон, дверей и др. Удельная площадь внешней поверхности экипажа: 4—8 м <sup>2</sup> /пасс., 10—20 м <sup>2</sup> /(1 т груза).	Необходимость иметь магнитное подвешивание, на создание которого затрачивается значительное количество энергии. Большие потери энергии в системе магнитного подвешивания из-за изменения воздушных зазоров в процессе движения (КПД системы подвешивания критично к воздушному зазору). Удельная масса конструкции экипажа: 0,5—1 т/пасс., 2—5 т/(1 т груза). Возникновение реактивных электромагнитных сил сопротивления движению, значительно снижающих КПД привода (до 40—50%).**

\* При скорости 500—600 км/ч из-за аэродинамического сопротивления "дворники" возьмут на себя до 5 кВт мощности двигателя, выступающее зеркало — до 10 кВт. Столь же велико влияние поперечных стыков, уступов, щелей и зазоров на внешней поверхности корпуса из-за срыва потока набегающего воздуха на них и возникающих при этом завихрений.

\*\* Потери мощности на экипаж грузоподъемностью 40 т достигают 2400 кВт [2]. Такой мощности достаточно для 20 транспортных модулей СТС, которые способны перевести 100 пассажиров).

мосферной среде составит 0,05—0,12 кВт·ч/(пасс.-км), т.к. в пятиместном экипаже, размеры которого составят 4×2×1,5 м, двигатель мощностью 50 кВт обеспечит скорость 200 км/ч, мощностью 100 кВт — скорость 300 км/ч, 300 кВт — 500 км/ч. Это снизит потребление электроэнергии по сравнению со скоростными железными дорогами в том же измерении в 2,5 раза, в 2 раза в сравнении с поездами на магнитном подвесе и в 11 раз в сравнении с реактивными самолетами [2]. В разреженной атмосфере (при движении в трубе, из которой откачан воздух) этот показатель может быть улучшен на порядок, до 0,005—0,01 кВт·ч/(пасс.-км), т.е. в 110 раз в сравнении с самолетами.

При всей важности экономии энергетических затрат относительная стоимость электроэнергии среди других расходов в известных видах скоростного транспорта, например, для поездов на магнитном подвесе, достигает лишь 7,5%. Основная часть затрат в них приходится на обустроенную путевую структуру со станциями и достигает значений в десятки миллионов долларов за километр. Поскольку в СТС транспортная линия в 10 и более раз дешевле скоростных железных дорог и обустроенной путевой структуры транспорта на магнитном подвесе, доля стоимости электрической энергии в приведенных затратах будет доминировать в сравнении с другими затратами.

Расход материалов и стоимость двухпутной трассы СТС представлены в табл. 2.3. Данные приведены для трассы со следующими параметрами: средняя высота опор 20 м; расстояние между промежуточными опорами 25 м, анкерными — 1 км; усилие натяжения одной струнной путевой структуры (два рельса) 320 тс; ширина колеи 2 м; расстояние между осями путевых структур 6 м; размещение станций и площадок для аварийной остановки: стоимостью 100 тыс. долл. — через 10 км, стоимостью 1 млн. долл. — через 100 км, стоимостью 50 млн долл. — через 1000 км.

Анализ данных, приведенных в табл. 2.3, позволяет сделать следующие выводы.

Трасса СТС имеет низкую материалоемкость. Например, стали, с учетом сопутствующих систем, необходимо около 150 кг/м для двухпутной трассы и 75 кг/м — для однопутной. Таков примерно вес одного погонного метра рельса современных железных дорог. Таким образом, из одного рельса железной дороги длиной 1000 км (его вес составит 75 тыс. т) можно построить всю однопутную трассу СТС такой же длины.

Для строительства опорной части СТС потребуется небольшое количество железобетона — 221 м<sup>3</sup>/км. А с учетом его расхода на станции и сопутствующие системы, количество железобетона составит около 500 м<sup>3</sup>/км. Для сравнения: расход железобетона на ограждение скоростных железных дорог и трасс поездов на магнитном подвесе достигает 750 м<sup>3</sup>/км [2].

Из такого ограждения протяженностью 1 км можно построить трехкилометровый участок опорной части двухпутной СТС, или 1,5 км полностью обустроенной трассы.

Затраты на выполнение земляных работ и, соответственно, их объем также невелики. Трасса СТС может пройти без насыпей и выемок по любой местности. Земляные работы будут иметь локальный характер (бурение посадочных выемок под опоры), а их объем будет в пределах 100—200 м<sup>3</sup>/км. Для сравнения: объем перемещаемого грунта при строительстве километра современной автотрассы и железной

Таблица 2.3. Расход материалов и стоимость участка двухпутной трассы СТС протяженностью 1 км

№ п.п.	Конструктивный элемент СТС	Материал	Расход материалов на 1 км трассы		Ориентировочная стоимость*, тыс. USD/км
			масса, т	объем, м <sup>3</sup>	
1.	РЕЛЬСЫ, всего	—	—	—	160
	В том числе:				
1.1.	Головка	Сталь, прокат	24	—	36
1.2.	Корпус	Алюминиевый лист толщиной 1 мм	4	—	18
1.3.	Струна	Сталь, проволока диаметром 1 мм	47	—	70
1.4.	Наполнитель	Композиционный материал	—	32	16
1.5.	Клеевая мастика	Мастика	1	—	2
1.6.	Защитная оболочка струны	Полимер	2	—	8
1.7.	Гидроизоляция струны	Полимер	1	—	6
1.8.	Прочее	—	—	—	4
2.	ПОПЕРЕЧНЫЕ ПЛАНКИ, всего	—	—	—	10
3.	ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ОПОРЫ, всего	—	—	—	90
	В том числе:				
3.1.	Столбы	Железобетон	—	160	32
3.2.	Перемычки, раскосы	Сталь, прокат	24	—	24
3.3.	Верхнее строение опор	Сталь, прокат	30	—	30
3.4.	Прочее	—	—	—	4

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

№ п.п.	Конструктивный элемент СТС	Материал	Расход материалов на 1 км трассы		Ориентировочная стоимость, тыс. USD/км
			масса, т	объем, м <sup>3</sup>	
4.	АНКЕРНЫЕ ОПОРЫ, всего	—	—	—	25
	В том числе:				
4.1.	Тело опоры	Железобетон	—	45	9
4.2.	Свайное основание	Железобетон	—	16	4
4.3.	Металлоконструкции	Сталь, прокат	2	—	2
4.4.	Элементы анкерного крепления	Сталь	1	—	2
4.5.	Прочее	—	—	—	8
5.	ЗЕМЛЯНЫЕ РАБОТЫ	—	—	—	5
6.	СИСТЕМА ЭЛЕКТРОЗАПИТКИ РЕЛЬСА	—	—	—	50
7.	СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЗА СОСТОЯНИЕМ ОПОР И ПУТЕВОЙ СТРУКТУРЫ	—	—	—	10
8.	СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЗА ДВИЖЕНИЕМ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА	—	—	—	20
9.	СИСТЕМА АВАРИЙНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ	—	—	—	10
10.	СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА (СТРЕЛОЧНЫЕ ПЕРЕВОДЫ И Т.П.)	—	—	—	20
11.	ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ СТАНЦИИ И ПЛОЩАДКИ ДЛЯ АВАРИЙНОЙ ОСТАНОВКИ	—	—	—	70
12.	ПРОЕКТНО-ИЗЫСКАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ	—	—	—	5
13.	СТОИМОСТЬ ОТВОДА ЗЕМЛИ И ЕЕ ПОДГОТОВКИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА	—	—	—	10
14.	ПРОЧИЕ РАСХОДЫ	—	—	—	15
	ВСЕГО				500

дороги, особенно в пересеченной местности, равен объему земляных работ при строительстве трассы СТС протяженностью 100—1000 км.

Столь же невелико и использование других конструкционных материалов для путевой структуры и опор СТС, в качестве которых будут использоваться недорогие и доступные материалы, выпускаемые промышленностью.

Стоимость подвижного состава в СТС можно оценить в сравнении с легковыми автомобилями, которые наиболее близки как по габаритам, так и конструктивно.

Серийно выпускаемые электродвигатели мощностью порядка 100 кВт в 1,5—2 раза дешевле двигателя внутреннего сгорания такой же мощности, надежнее, долговечнее и проще в эксплуатации и обслуживании.

Корпус транспортного модуля СТС будет дешевле корпуса автомобиля такого же размера благодаря более простой конструкции (отсутствие радиатора, дверей, багажника, капота, фар, габаритных, тормозных и других фонарей, стеклоочистителя, механизмов подъема стекол и т.д.).

Ходовая часть и подвеска экипажа СТС будет также проще и дешевле, чем у автомобиля (отсутствие ненадежных и дорогих резиновых шин, механизмов поворота колес, упрощение подвода вращающего момента к неповоротным колесам, отсутствие требований к проходимости по плохим дорогам и т.д.).

Система управления оборотами двигателя и вращающим моментом на колесе в обоих транспортных средствах примерно равны по стоимости и сложности (в СТС это блок управления оборотами двигателя, в автомобиле — коробка передач, сцепление, система управления подачей топлива в двигатель и др.).

Система управления движением экипажа будет значительно проще и дешевле, чем у автомобиля, т.к. управляемых параметров будет немного: скорость движения, расстояние до ближайших экипажей и местонахождение (координата) экипажа на линии. О сложности управления автомобилем говорит хотя бы тот факт, что, несмотря на расцвет компьютерной техники, на сегодняшний день с этой задачей может справиться только мозг водителя (поэтому фактор водителя необходимо учитывать в системе управления автомобилем и в определении ее стоимости: сегодня во всем мире ежедневно отдают управлению автомобилем несколько часов — и это при нехватке времени у людей — сотни миллионов человек). Поэтому с задачей управления экипажем СТС справится недорогой контроллер с зашитой в него программой управления, который будет контролироваться и управляться линейными компьютерами, объединенными в сеть. В систему же управления автомобилем кроме исполнительных механизмов (руль, рулевая колонка,

механизм поворота колес, педали газа, тормоза, сцепления, механизм переключения скоростей и др.) входит и целая система визуализации информации, необходимой для управления, которая отсутствует в СТС: стеклоочиститель на лобовом стекле с механизмами приведения в движение и подачи моющей жидкости (обеспечивают чистоту стекла и, соответственно, видимость дороги), фары, подфарники, габаритные огни, приборная панель, зеркала, звуковой сигнал и т.п.

Интерьер и экстерьер салона экипажа СТС и автомобиля будут примерно одинаковы и будут изменяться в широких пределах в зависимости от вкусов заказчика.

Кроме этого, в экипаже СТС и в самой транспортной системе отсутствуют такие элементы, как бак для горючего (и, соответственно, цепочка сопутствующих элементов: заправочные станции по трассе, нефтеперерабатывающие заводы, выпускающие бензин и дизельное топливо, нефтяные скважины); система отвода, глушения и дожигания выхлопных газов (например, ужесточение экологических требований к автомобилю в последнее время привело к значительному его удорожанию).

С учетом приведенных аргументов можно спрогнозировать, что при серийном производстве экипаж СТС будет в 1,5—2 раза дешевле легкового автомобиля такой же вместимости и при интерьере среднего класса будет стоить порядка 10 тыс. долл. США (для сравнения: выпускаемая в мелкосерийном производстве пара кресел в аэробусе А-340 в салоне первого класса стоит 25 тыс. долл.). Таким образом, для перевозки 500 пассажиров (такова примерно вместимость перспективных аэробусов и поездов скоростных железных дорог) потребуется 100 пятиместных экипажей общей стоимостью 1 млн. долл. Для сравнения: стоимость аэробуса — порядка 100 млн. долл., современного железнодорожного пассажирского вагона (вместимость 50—100 человек) — около 1 млн. долл., одного вагона поезда на магнитном подвесе (вместимость 50—100 человек) — 4 млн. долл.

Издержки по эксплуатации трасс СТС можно проанализировать в сравнении со скоростными железными дорогами, транспортных модулей — в сравнении с автомобилем. Ежегодные эксплуатационные расходы будут зависеть как от провозной способности трассы, так и от расчетной скорости движения по ней. Техничко-экономические показатели двухпутной линии СТС приведены в табл. 2.4, а приведенные затраты пассажирских и грузовых перевозок соответственно в табл. 2.5 и 2.6 (затраты приведены для характеристик транспортной линии и экипажей, представленных в табл. 2.4).

Приведенные в табл. 2.5 и 2.6 данные следует рассматривать как частный случай, т.к. при их определении использовались жесткие требования к сроку окупаемости транспортной линии и экипажей (5 лет),

Таблица 2.4. Техничко-экономические показатели двухпутной линии СТС

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

Таблица 2.5. Затраты на пассажирские перевозки по транспортной линии СТС протяженностью 1000 км

Показатель	Объем пассажирских перевозок, тыс. пасс./сутки (млн. пасс./год)					
	Однопутная линия			Двухпутная линия		
	1 (0,365)	2,5 (0,913)	5 (1,825)	10 (3,65)	50 (18,25)	100 (36,5)
1. Приведенные затраты для СТС, долл. на 1000 пасс.-км	266,37	108,16	55,42	55,42	13,23	7,95
В том числе:						
1.1. Издержки по транспортной линии, всего	263,69	105,48	52,49	52,74	10,55	5,27
В том числе:						
- амортизационные отчисления	37,67	15,07	7,53	7,53	1,51	0,75
- эксплуатационные издержки	75,34	30,14	15,07	15,07	3,01	1,51
- отчисления на прибыль	150,68	60,27	30,14	30,14	6,03	3,01
1.2. Издержки по подвижному составу, всего	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68
В том числе: амортизационные отчисления — 0,12 долл./пасс., эксплуатационные издержки — 0,12 долл./пасс., отчисления на прибыль — 0,24 долл./пасс., стоимость электроэнергии — 2,2 долл./пасс. (из расчета стоимости электроэнергии 0,02 долл./кВт·ч)						
2. Количество экипажей, обслуживающих линию, шт.	44	110	220	440	2200	4400
3. Стоимость подвижного состава, млн. долл.	0,44	1,1	2,2	4,4	22	44
4. Средний интервал между соседними экипажами в транспортном потоке (на одной линии):						
- во времени, с	432	173	86,4	86,4	17,3	8,64
- в расстоянии, км	60	24	12	12	2,4	1,2

была взята высокая стоимость электрической энергии (0,02 долл./кВт·ч) и других показателей. Их оптимизация позволит снизить приведенные затраты в 1,5—2 раза. Тем не менее, при объеме пассажирских перевозок в 50 и 100 тысяч пассажиров в сутки стоимость проезда одного пассажира (соответственно 13,23 и 7,95 долл.) на расстояние 1000 км будет дешевле проезда по железной дороге в 2—5 раз.

По мере роста объема перевозок возрастает доля стоимости электрической энергии в приведенных затратах. Например, если при объеме пассажирских перевозок 5 тыс. пасс. в сутки доля электроэнергии

Таблица 2.6. Затраты на грузовые перевозки по транспортной линии СТС протяженностью 1000 км

Показатель	Объем грузовых перевозок, тыс. т/сутки (млн. т/год)					
	Однопутная линия			Двухпутная линия		
	5 (1,825)	10 (3,65)	25 (9,125)	50 (18,25)	100 (36,5)	250 (91,25)
1. Приведенные затраты для СТС, долл. на 1000 т·км	60,80	34,43	18,60	18,60	13,33	10,17
В том числе:						
1.1. Издержки по транспортной линии, всего	52,74	26,37	10,54	10,54	5,27	2,11
В том числе:						
- амортизационные отчисления	7,53	3,77	1,51	1,51	0,75	0,30
- эксплуатационные издержки	15,07	7,53	3,01	3,01	1,51	0,60
- отчисления на прибыль	30,14	15,07	6,02	6,02	3,01	1,21
1.2. Издержки по подвижному составу, всего	8,06	8,06	8,06	8,06	8,06	8,06
В том числе: амортизационные отчисления — 0,20 долл./т, эксплуатационные издержки — 0,20 долл./т, отчисления на прибыль — 0,40 долл./т, стоимость электроэнергии — 7,26 долл./т						
2. Количество транспортных модулей, обслуживающих линию, тыс. шт.	0,73	1,47	3,66	7,33	14,7	36,6
3. Стоимость подвижного состава, млн. долл.	3,67	7,35	18,3	36,7	73,5	183
4. Средний интервал между соседними модулями в транспортном потоке (на одной линии):						
- во времени, с	25,9	13,0	5,18	5,18	2,59	1,04
- в расстоянии, км	3,6	1,8	0,72	0,72	0,36	0,14

составляет всего 4%, то при 100 тыс. пасс./сутки — уже 27,7%. Еще выше доля стоимости энергии в грузовых перевозках — при 10 и 250 тыс. т/сутки соответственно 21,1 и 71,4%. Поэтому грузовые перевозки целесообразнее осуществлять в диапазоне более низких скоростей движения (100—250 км/ч), где ниже потери энергии на аэродинамику, и следует строить для них более дешевые специальные грузовые трассы.

В табл. 2.7 приведены затраты на перевозки со сниженной скоростью движения: 300 км/ч для пассажирских и 200 км/ч для грузовых

Таблица 2.7. Затраты на перевозки по транспортной линии СТС со сниженной скоростью движения: 300 км/ч для пассажирских и 200 км/ч для грузовых транспортных модулей (длина трассы 1000 км)

Показатель	Объем перевозок			
	пассажирские, тыс. пасс./сутки (млн. пасс./год)		грузовые, тыс. т/сутки (млн. т/год)	
	5* (1,825)	100** (36,5)	10* (3,65)	250** (91,25)
1. Приведенные затраты для СТС, долл. на 1000 пасс.-км	29,02	3,87	—	—
долл. на 1000 т·км	—	—	16,66	3,81
В том числе:				
1.1. Издержки по транспортной линии, всего	27,95	2,80	13,97	1,12
В том числе:				
- амортизационные отчисления	6,99	0,70	3,49	0,28
- эксплуатационные издержки	6,99	0,70	3,49	0,28
- отчисления на прибыль	13,97	1,40	6,99	0,56
1.2. Издержки по подвижному составу, всего	1,07	1,07	2,69	2,69
В том числе: для пассажирских (грузовых) перевозок: амортизационные отчисления — 0,13 долл./пасс. (0,32 долл./т), эксплуатационные издержки — 0,13 долл./пасс. (0,32 долл./т), отчисления на прибыль — 0,13 долл./пасс. (0,32 долл./т), стоимость электроэнергии — 0,68 долл./пасс. (1,73 долл./т)				
2. Количество экипажей, обслуживающих линию, тыс. шт.	0,23	4,65	2,33	58,2
3. Стоимость подвижного состава, млн. долл.	2,3	46,5	11,6	291
4. Средний интервал между соседними экипажами в транспортном потоке (на одной линии):				
- во времени, с	86,4	8,64	13,0	1,04
- в расстоянии, км	7,2	0,72	0,72	0,057

\* Однопутная трасса.

\*\* Двухпутная трасса.

транспортных модулей. Для определения влияния других факторов использовались следующие параметры СТС: а) для транспортной линии: коэффициент развития линии — 1,02, годовые эксплуатационные издержки — 5% от стоимости линии (25 тыс. долл./км), норма

прибыли — 10%; б) для экипажа: коэффициент использования — 0,7, резерв парка подвижного состава — 15%, годовой пробег — 1,6 млн. км для пассажирского и 1,07 млн. км для грузового экипажей, среднечасовая скорость — соответственно 300 км/ч и 200 км/ч, норма прибыли — 10%, удельные энергозатраты — соответственно 0,067 кВт·ч/пасс.-км и 0,17 кВт·ч/т·км, стоимость электроэнергии — 0,01 долл./кВт·ч. Остальные параметры СТС соответствуют данным табл. 2.4.

Из табл. 2.7 следует, что для указанных данных затраты на перевозку пассажиров и грузов могут быть снижены в 2,1—2,7 раза до значений, соответственно, 3,87 долл./ (1000 пасс.-км) и 3,81 долл./ (1000 т·км). Столь низкие расценки позволят увеличить тарифы на перевозки в 1,5—2 раза и поднять норму прибыли по трассе до 30%, по подвижному составу — до 50%. Это сделает проект СТС весьма привлекательным для инвесторов, а также для тех строительных и машиностроительных компаний, которые будут разрабатывать и осуществлять реализацию проекта.