



115487, Москва, ул. Нагатинская, 18/29
тел./факс: (495) 680-52-53, 116-15-48
e-mail: info@unitsky.ru
http: //www.unitsky.ru

Муниципальный заказчик:
Заместитель главы администрации
города Ставрополя
(директор комитета градостроительства)



В.А. Еличев
2006 г.

Заказчик:
Директор МУП города Ставрополя
«Стройинвест»

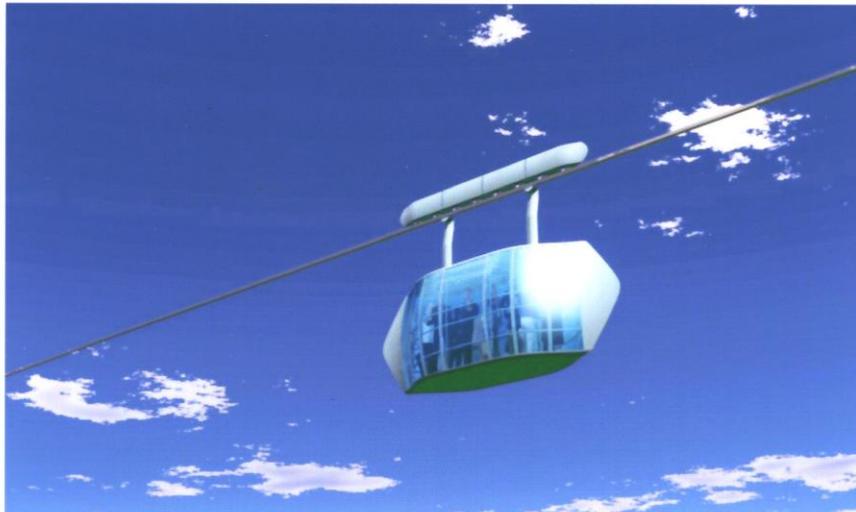


С.А. Горло
2006 г.

ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ на струнную путевую структуру для условий города Ставрополя

Муниципальный контракт № СТЮ-02/06 от 04.03.2006 г.

II этап: Разработка технических условий на струнную путевую структуру для условий
города Ставрополя



Исполнитель:
Генеральный директор -
генеральный конструктор
ООО «Струнный транспорт Юницкого»



А.Э. Юницкий
« 5 » мая 2006 г.

Москва 2006

Список основных исполнителей

Руководитель разработки,
генеральный конструктор СТЮ,
академик РАЕН, доктор технических наук

А.Э. Юницкий

Заместитель генерального конструктора
по путевой структуре СТЮ,
кандидат технических наук

И.П. Дубатовка

Главный инженер ООО «СТЮ»

А.В. Пархоменко

Исполнительный директор ООО «СТЮ»

Д.А. Юницкий

Ответственный исполнитель,
ведущий конструктор СТЮ

О.А. Трус

Содержание

1. Введение	4
2. Конструктивные особенности путевой структуры СТЮ	5
2.1. Общие сведения	5
2.2. Принципиальная схема СТЮ	6
2.3. Струнная путевая структура	8
2.4. Статика путевой структуры	11
2.5. Динамика путевой структуры	13
3. Расчетные положения	16
3.1. Нагрузки и воздействия	16
3.2. Определение усилий в элементах путевой структуры	29
3.3. Проверка прочности и выносливости	30
4. Материалы и изделия. Защита от коррозии	35
5. Эскизное проектирование	36
6. Расчет элементов путевой структуры моноСТЮ для условий г. Ставрополя	37
6.1. Исходные данные	37
6.2. Анализ результатов расчета	43
7. Выводы	48
8. Нормативная и справочная литература	55
9. Приложения	57
Приложение 1. Результаты расчета путевой структуры моноСТЮ для условий города Ставрополя	57
1.1. Сочетание 1 (при $T = + 20 \text{ }^\circ\text{C}$)	57
1.2. Сочетание 2 (при $T = +59,4 \text{ }^\circ\text{C}$)	65
1.3. Сочетание 3 (при $T = -26,4 \text{ }^\circ\text{C}$)	73
1.4. Изополя напряжений в корпусе рельса моноСТЮ от усилий предварительного натяжения, ветровых, температурных и вертикальных нагрузок	81
1.5. Контактные напряжения в паре «колесо — рельс-струна»	94
Приложение 2. Возможности программного комплекса «Лира-Windows»	109
Приложение 3. Сведения о проектной организации, привлекаемой ООО «СТЮ» к расчетам струнной путевой структуры (запроектированные и построенные объекты, выборочно)	114

1. Введение

Настоящие технические условия разработаны на однорельсовую струнную путевую структуру «Струнного транспорта Юницкого» (моноСТЮ) для условий строительства в городе Ставрополе, предназначенную для движения пассажирских подвесных «рельсовых автомобилей» (моно-юнибусов). МоноСТЮ относится к разновидности городского пассажирского электрического рельсового транспорта с неэлектрифицированной транспортной линией (движение моно-юнибусов осуществляется за счет бортовых электрических накопителей энергии, заряжаемых на станциях).

Конструкция струнной путевой структуры моноСТЮ является разновидностью висячих и вантовых мостов с «провисающей» предварительно напряженной вантой, зашитой в балку жесткости, которая одновременно является рельсовым ездовым полотном для колесных транспортных модулей (подвижного состава) на стальных двухребордных колесах.

При разработке проектной документации на моноСТЮ необходимо руководствоваться мостовыми нормами СНиП 2.05.03-84* «Мосты и трубы», которые распространяются на железнодорожные, автодорожные и пешеходные мосты, эстакады, путепроводы, виадуки, мосты для линий метрополитена и скоростного трамвая, а также на мосты, совмещенные под рельсовый и автомобильный транспорт.

Настоящие Технические Условия (далее ТУ) построены на основании действующих отечественных норм на проектирование мостов, исходных данных Заказчика и данных изготовителей транспортных модулей (моно-юнибусов). Кроме этого в ТУ использованы расчетные положения отечественных гражданских норм на проектирование стальных конструкций (СНиП II-23-81), отдельные положения Проекта Европейских Норм (ENV) и новых мостовых норм США (AASHTO). Принятые положения различных норм не противоречат и дополняют друг друга.

Основное назначение настоящих Технических Условий состоит в определении:

- типа и значения постоянных и временных нагрузок, действующих на конструкции струнной путевой структуры больших пролетов (1000 м и более);
- расчетных сочетаний нагрузок;
- значений коэффициентов надежности по нагрузкам;
- перечня требований к составлению расчетных схем трассы «второго уровня», которые обеспечивают необходимую точность расчетов;
- предельных усилий в элементах струнной путевой структуры при расчетах по первому предельному состоянию с указанием алгоритмов проверок прочности и

устойчивости;

- предельных значений размаха напряжений в элементах путевой структуры при расчетах по второму предельному состоянию с указанием алгоритмов оценок выносливости и предельных прогибов;

2. Конструктивные особенности путевой структуры СТЮ

2.1. Общие сведения

Выше отмечалось, что струнная путевая структура моноСТЮ является «вариантом» висячего и вантового моста.

Висячие мосты (рис. 1) являются системами распорными и потому более легкими, чем мосты балочные.

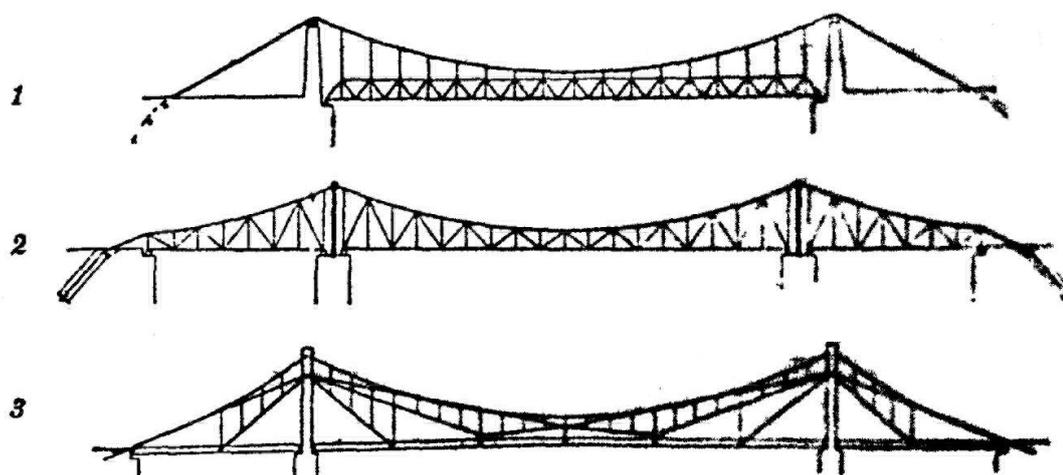


Рис. 1. Наиболее распространенные типы висячих мостов:

- 1 — комбинированный с балкой жесткости, 2 — жесткая висячая ферма,
3 — вантовая висячая ферма

Основные стержни висячих ферм работают только на растяжение, поэтому всегда устойчивы, что, наряду с применением высокопрочных материалов и отсутствием между ними связей, позволяет придавать им минимальные поперечные сечения. Поэтому малый вес пролетного строения есть основа идеи висячего моста. Но малый вес является не только основным преимуществом (возможность легкого перекрытия больших пролетов, портативность, легкость транспортировки, удобства сборки и усиления), но и основным недостатком — висячие мосты имеют малую жесткость. Кроме этого традиционные висячие

мосты весьма восприимчивы к колебаниям температуры и к опасности резонанса под подвижными и ветровыми нагрузками с потерей аэродинамической устойчивости, особенно из-за панельного флаттера (широкое ездовое полотно имеет большую площадь и высокую парусность).

Струнная путевая структура моноСТЮ включает в свою конструкцию те же основные элементы, что и висячие мосты: предварительно напряженный растянутый элемент — витой или невитой канат (струна), балка жесткости (головка рельса с корпусом), подвески (специальный наполнитель внутри корпуса), пилоны (при необходимости промежуточные поддерживающие опоры) и анкерные устройства (анкерные опоры).

Обладая всеми основными преимуществами висячих мостов, струнная путевая структура СТЮ полностью лишена их недостатков, указанных выше, благодаря тому, что предварительно напряженный элемент (струна) «защит» в балку жесткости, образуя с ней основной конструктивный элемент путевой структуры – прочный, жесткий и ровный рельс-струну. При этом рельс-струна моноСТЮ практически не обладает парусностью, т.к. его поперечные размеры будут на два порядка ниже, чем у висячих мостов (около 6×6 см), что позволяет перекрывать большие пролеты (2 км и более) без специальных мер по обеспечению аэродинамической устойчивости. Высокую устойчивость рельсового пути моноСТЮ под действием вертикальных (собственный вес, вес подвижного состава, льда или снега на головке рельса и др.) и горизонтальных нагрузок (ветровая нагрузка) обеспечивает и то, что путь в нем является однорельсовым с подвесным рельсовым автомобилем, который изначально, как и канатные дороги, не может потерять поперечную устойчивость.

2.2. Принципиальная схема СТЮ

На рис. 2 представлена линейная схема СТЮ в различных географических условиях: на равнинной местности, в горах и при пересечении рек или озер. СТЮ содержит струнную путевую структуру и три типа опор (высота 1—50 м и более): поддерживающие (через 20—50 м и более, а в моноСТЮ через 500 м и более), тормозные (через 0,5—1 км) и анкерные (через 1—10 км). На участках со сложным рельефом местности трасса может иметь безопорный пролет протяженностью до 2—3 км и более; прогиб пути при этом будет в пределах 0,005—0,05 от длины пролета. Последний тип струнной конструкции с одним рельсом на путь получил название моноСТЮ.

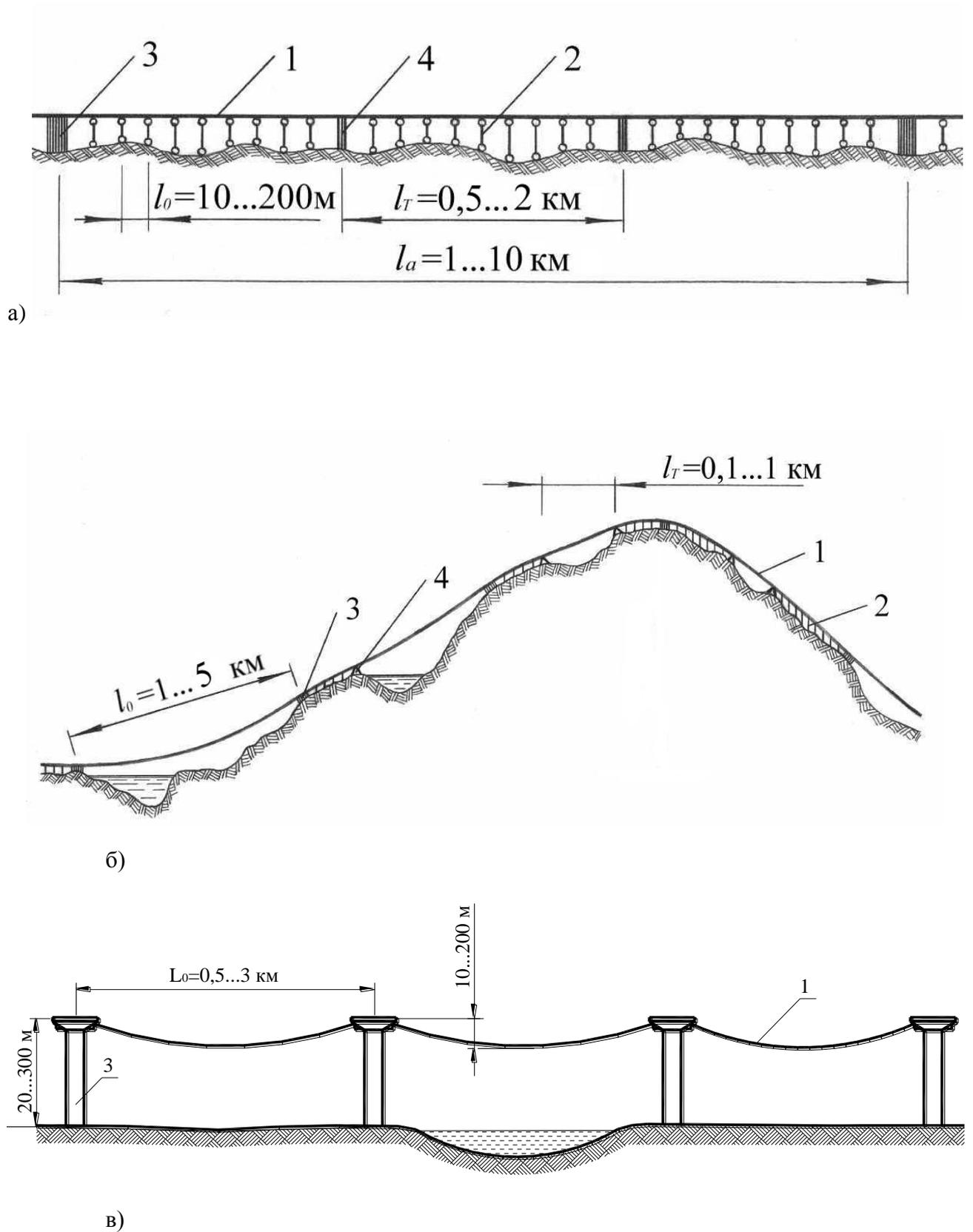


Рис. 2. Линейная схема СТЮ:

а) — равнинный участок; б) — горный; в) — моноСТЮ; 1 — струнная путевая структура; 2 — промежуточная (поддерживающая) опора; 3 — анкерная опора; 4 — тормозная опора

2.3. Струнная путевая структура

Струнная путевая структура может быть набрана из различного количества рельсов-струн (рис. 3): 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-струны, размещенных в горизонтальной плоскости (варианты 4—8 на рис. 3), а также однорельсовая схема (варианты 1—3) при большой длине пролетов (500 м и более), что и принято в моноСТЮ.

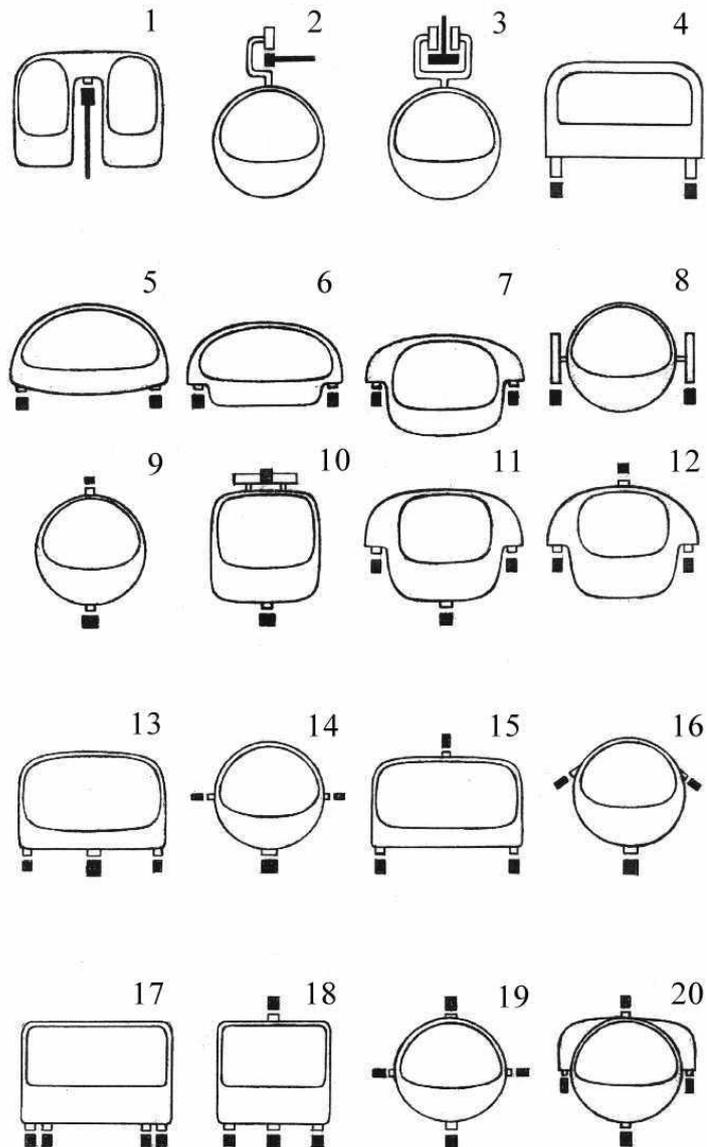


Рис. 3. Схемы размещения рельсов:

1, 2, 3 — СТЮ с одним рельсом (моноСТЮ); 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 двухрельсовой трассы обеспечивают поперечные планки (рис. 4), установленные через 20—50 м (в зависимости от усилия натяжения струн, жесткости рельсов, массы транспортного модуля и других факторов). При пролетах до 30—40 м поперечные планки могут не устраиваться, т.к. их функции выполняют промежуточные опоры. В моноСТЮ устойчивость рельса-струны обеспечивается тем, что путь имеет один рельс и этот рельс на пролете специально размещен с большим провисом (10—200 м).

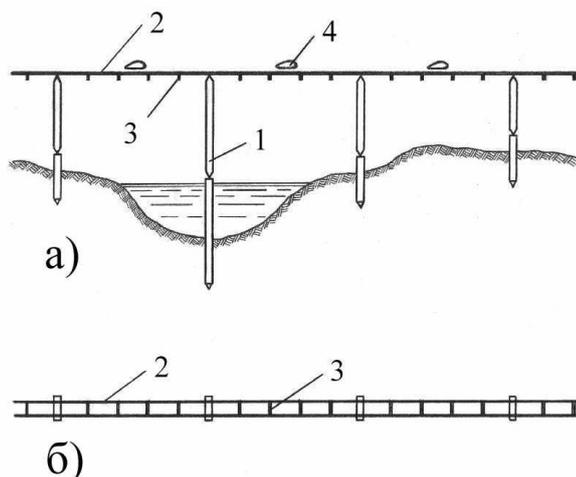


Рис. 4. Схема размещения поперечных планок по длине двухрельсового пути трассы СТЮ:

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. 5.

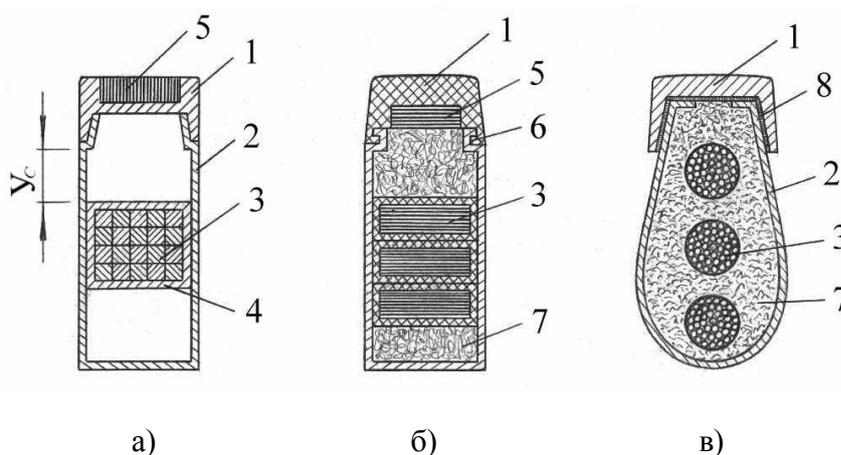


Рис. 5. Варианты конструкции рельса-струны:

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 — крепление; 7 — наполнитель; 8 — клеевой композит

Струна 3 (рис. 5) состоит из отдельных предварительно натянутых продольных элементов (проволок, нитей, прутков, витых или невитых канатов, лент или полос и др.), 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 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 напряженных элементов рельса. Благодаря такой особенности и тому, что напряжения в размещенной с небольшим провисом струне практически одинаковы при наличии или отсутствии подвижной нагрузки на пролете (напряжения в струне при воздействии подвижной нагрузки при пролетах до 50 м увеличиваются лишь на 0,1—0,5%), струна может быть предварительно натянута до значений, близких к пределу прочности материала [T_c]:

$$T_c \leq \bar{T}_c - \Delta T_t,$$

где:

ΔT_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 (относительно температуры $0 \text{ }^\circ\text{C}$) — к увеличению их зимой

(примерно на 1200 кгс/см^2 при $-50 \text{ }^\circ\text{C}$) и снижению летом (на 1200 кгс/см^2 при $+50 \text{ }^\circ\text{C}$). Поэтому максимальные значения прогиба струны 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). Это не отразится существенно на функционировании СТЮ (на ровности головки рельса в вертикальной плоскости), т. к. дополнительный подъем (зимой) и провис (летом) путевой структуры составят величину порядка $10^{-4} l_0$.

В моноСТЮ, из-за большого провиса рельса-струны (10 м и более), влияние подвижной нагрузки будет большим — рельсовый автомобиль увеличивает напряжения в струне на 3—5%. В то же время влияние температурных изменений будет значительно меньшим, в 2—3 раза (из-за большого относительного провиса рельса-струны, который зимой будет уменьшаться, а летом — увеличиваться): зимой напряжения увеличатся (относительно температуры $0 \text{ }^\circ\text{C}$) на 400—600 кгс/см^2 (при $-50 \text{ }^\circ\text{C}$), летом — уменьшатся на 400—600 кгс/см^2 (при $+50 \text{ }^\circ\text{C}$).

2.4. Статика путевой структуры

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 (что особенно проявляется в моноСТЮ из-за большого относительного провиса рельса-струны), в том числе при сезонных изменениях температуры и т.д.

Считаются известными: l_0 — длина пролета АВ (рис. 6, а); E — модуль упругости; F — площадь сечения; Q — вес. Определяются: форма струны y ; стрелка прогиба f ; длина растянутой струны L ; растяжение ΔL ; натяжение T , в том числе на опорах T_0 ; угол наклона α и на опорах α_0 .

Уравнения равновесия элемента струны имеют вид, рис. 6, б):

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

Интегрирование дает следующие зависимости:

$$T = T_0 \cos \alpha_0 / \cos \alpha; \quad \sin \alpha \left[\frac{e^{-bz} - e^{bz}}{2} \right] \left[\frac{e^{-bz} + e^{bz}}{2} \right], \quad (1)$$

где:

$$a = \left[\frac{+ \sin \alpha_0}{2} \right] \left[\frac{- \sin \alpha_0}{2} \right]; \quad b = Q / LT_0 \cos \alpha_0 = \ln a / l_0 .$$

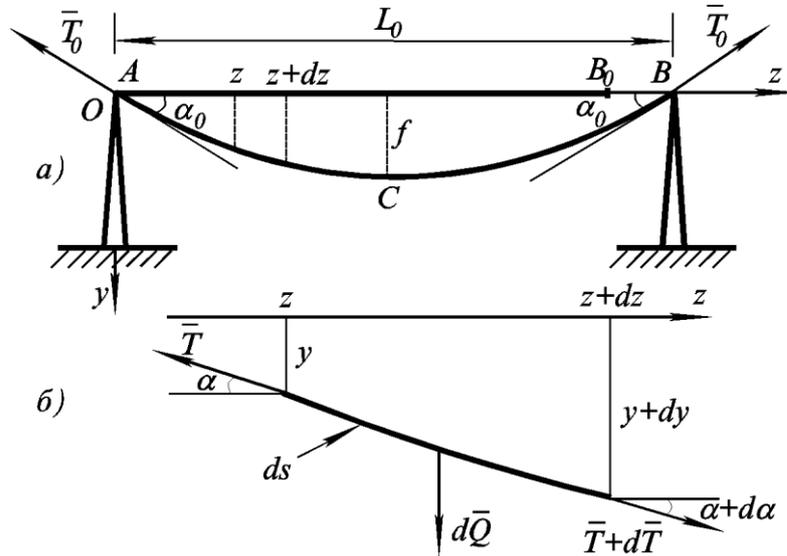


Рис. 6. Струнное пролётное строение:

а) пролёт в целом; б) элемент струны

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

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

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

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

Формой равновесия тяжелой упругой струны большой длины, каковой является рельсоструна моноСТЮ, является цепная линия $y \left[\frac{e^{bz} - 1}{2} \right] \left[\frac{e^{-bz} - 1}{2} \right] 2b\sqrt{a}$ (2). Растяжение ΔL находится с помощью закона Гука. Как следствие получаем определяющее статику струны соотношение:

$$2 \operatorname{tg} \alpha_0 - \left[\frac{e^{-1} - 1}{2} \right] \ln a = Q / EF . \quad (5)$$

Зададим начальное натяжение T_n ; из усредненного закона Гука определяем начальную

деформацию ε_0 , натуральную длину L_H и начальное (монтажное) удлинение $\Delta L_H = l_0 - L_H$:

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

Подставляя ε_0 в (5), получаем уравнение для α_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 моноСТЮ; для других значений t имеем:

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

где:

τ — коэффициент температурного расширения струны;

t_1, t_2 — экстремальные значения t в данном регионе.

Подставляя ε вместо ε_0 в (5), получаем уравнение для определения α_0 ; 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 веса груза, весовой нагрузки и т.д., — лежит в основе расчетов при монтаже моноСТЮ 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 моноСТЮ.

2.5. Динамика путевой структуры

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 рельсами-струнами, по которым движутся ТМ. Расчетная схема рельса СТЮ в поперечном разрезе представлена на рис. 7. ТМ представляет собой тележку, рис. 8, 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.

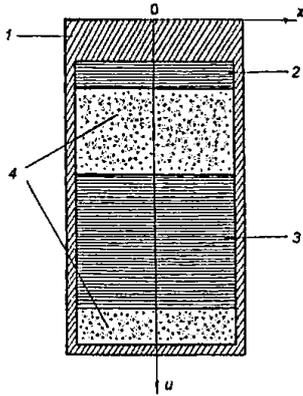


Рис. 7. Расчетная схема СТЮ:

- 1 — металлический корпус рельса;
- 2, 3 — предварительно натянутые струны; 4 — наполнитель.

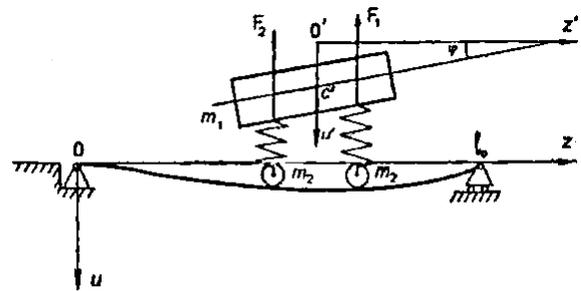


Рис. 8. Схема движения ТМ.

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

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

где:

σ и ε — нормальное напряжение и относительная деформация;

E и μ' — осредненные модуль Юнга и характеристика внутреннего трения.

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

Уравнения движения верхней и нижней частей струн имеют вид:

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

где:

y_i — прогибы струн,

ρ_i — их линейные плотности,

T_i — натяжения,

f_i — погонные внешние нагрузки,

R_{21} — реакция нижней струны на верхнюю.

Уравнения движения ТМ имеют вид:

$$m_1 \frac{d^2 U}{dt^2} = -F_1 - F_2 + m_1 g; \quad I_{c'} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = m_0 m_{c'} \overline{F_1} + m_0 m_{c'} \overline{F_2}, \quad (11)$$

где:

$U = O'C'$, φ — 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.

Для моноСТЮ расчеты выполняются аналогично, за исключением того, что вместо двух рассматривается один рельс-струна, а вместо навесного рельсового автомобиля — подвесной.

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 [7] подтверждают вывод о допустимости получаемых статических и динамических отклонений и быстрой затухаемости последних даже при малых расстояниях между опорами (20—30 м) и высокой скорости движения (более 50 м/с), когда частота следования опор под колесом модуля выше 2 Гц. При больших пролетах (более 1000 м) и невысокой скорости движения подвижного состава (менее 50 м/с), как в моноСТЮ, когда частота следования опор менее 0,02 Гц, динамика СТЮ практически ничем не отличается от ее статики.

3. Расчетные положения

3.1. Нагрузки и воздействия

Собственный вес конструкций пролетного строения моноСТЮ определяется на основании конструктивных решений, переданных в качестве исходных данных для проектирования и в дальнейшем уточняется на основании чертежей конструкторской документации, если расхождение превысит 5%. Коэффициенты надежности по нагрузке приведены в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициенты надежности по нагрузке

№	Источник	Вид нагружения	Коэффициент надежности γ_f	
			max	min
1.	СНиП 2.05.03-84* (таблица 8)	Собственный вес:		
		- стальных несущих и вспомогательных конструкций	1,1	0,9
		- железобетонных конструкций	1,1	0,9
2.	По аналогии с собственным весом несущих конструкций	Собственный вес верхнего строения пути	1,0	0,9

Подвижная нагрузка в моноСТЮ представляет собой подвесной рельсовый автомобиль (автомобиль на стальных колесах). Расчетная схема трассы моноСТЮ в г. Ставрополе и схема нагрузок от планируемой к использованию модели рельсового автомобиля (моно-юнибуса) показана на рис. 9. В качестве примера рассмотрен вариант однорельсового пролета моноСТЮ достаточно большой длины — 2000 м (любая трасса моноСТЮ в г. Ставрополе может быть пройдена пролетами менее 2000 м), а в качестве рельсового автомобиля — подвесной четырехколесный моно-юнибус массой 5000 кг. Рекомендуемая к использованию в г. Ставрополе конструкция рельса-струны для пролета 2000 м в моноСТЮ показана на рис. 10 в масштабе 1:1.

Согласно СНиП 2.05.03-84* (п.2.22 а) ф.18; п.2.23 г) ф.28) при расчетах прочности и устойчивости динамический коэффициент принимается равным $1 + \mu = 1 + \frac{18}{30 + \lambda} \geq 1,15$, а

$$\text{коэффициент надежности } \gamma_f = 1,3 \left(1 - \frac{\lambda}{10^3} \right) \geq 1,1.$$

При расчетах выносливости динамический коэффициент принят равным $1 + 2/3\mu$, а коэффициент надежности $\gamma_f = 1,0$.

При оценке перемещений динамический коэффициент принят равным $1 + \mu = 1,0$, а коэффициент надежности $\gamma_f = 1,0$.

В таблице 2 приведены расчетные нагрузки от давления колес заполненного пассажирами и пустого экипажа для расчета контактных напряжений в паре «колесо — рельс».

Таблица 2

Расчетные нагрузки от давления колес для расчета контактных напряжений

Расчеты пролетного строения					$\lambda = 200$		
№ позиции	Нагрузки	Единица измерения	Нормативные	Коэффициенты		Расчетные нагрузки	
				$1 + \mu$	γ_f	прочность	выносливость
Груженный рельсовый автомобиль							
1	Давление колеса	м	0,99	1,15	1,1	1,25	1,04

где λ — длина загрузки линии влияния (условно принята равной 200 м).

Рис. 9. Расчетная схема трассы моноСТЮ в г. Ставрополе (при +59,4 °С) и схема нагрузок экипажа (при +20 °С)

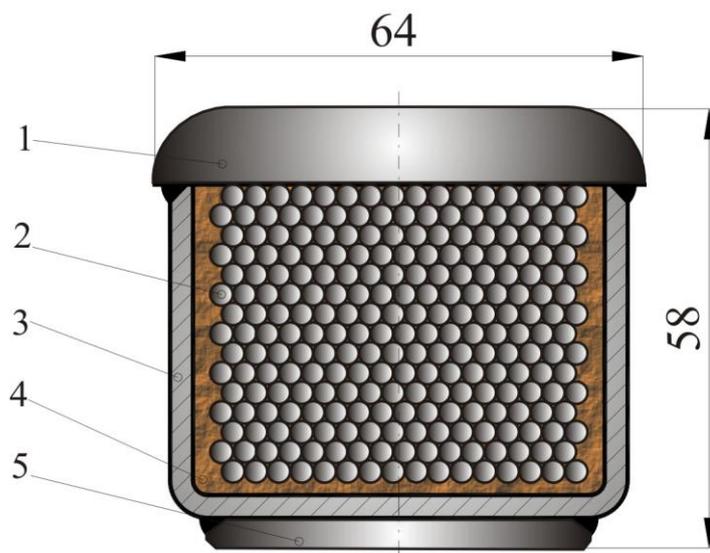


Рис. 10. Поперечный разрез рельса-струны моноСТЮ для пролета 2000 м (масштаб 1:1):

- 1 — головка рельса; 2 — струна (240 высокопрочных проволок диаметром 3 мм каждая);
 3 — стальной корпус; 4 — композит (на основе эпоксидной или кремнийорганической смол);
 5 — подложка корпуса (служит опорой для страховочного ролика).

Основные характеристики рельса-струны: расход стали — 22,4 кг/м; общая масса — 23,2 кг/м; суммарное предварительное натяжение струн, корпуса и головки рельса — 205,9 тс (при +20 °С).

При расчете усилий, напряжений и перемещений в элементах путевой структуры моноСТЮ «в целом» принимаются нормативные значения давления колес.

Коэффициенты надежности для временных нагрузок приведены в таблице 3.

Таблица 3

Коэффициенты надежности для временных нагрузок

№	Источник	Вид нагружения	Коэффициент надежности γ_f
1.	СНиП 2.05.03-84* Таблица 17	Ветровые нагрузки	
		- при эксплуатации	1,4
		- при строительстве	1,0
2.		Температурные воздействия	1,2
3.	СНиП 2.01.07-85 Нагрузки и воздействия	Нагрузка от гололеда	1,2
4.	СНиП 2.05.03-84*	Нагрузка от создания предварительного натяжения	1,1 (0,9)

Значение ветрового давления определяется для расчетов прочности элементов путевой структуры, рассматривая его совместно с прочими воздействиями. Нормативное значение ветрового давления равно сумме средней и пульсационной составляющих и вычисляется в соответствии со СНиП 2.05.03-84*, п.2.24:

$$W_n = W_m + W_p \quad (13)$$

Нормативное значение средней составляющей ветрового давления W_m определяется по формуле, в зависимости от уровня расположения над поверхностью земли (воды).

Принимается, что рельс-струна располагается на высоте 60 м над уровнем земли. Сечение рельса-струны принято условно в виде прямоугольника 60×60 (h) мм.

$$W_m = W_0 k \cdot C_w = 30 \cdot 1,3 \cdot 1,2 = 46,8 \text{ кг/м}^2, \quad (14)$$

где:

$W_0 = 30 \text{ кг/м}^2$ — нормативное значение ветрового давления для г. Ставрополя; принято на основании Карты 3 и таблицы 5 СНиП 2.01.07-85 как для II ветрового района;

$k = 1,3$ — коэффициент, учитывающий изменение давления по высоте для типа местности «В» по таблице 6 СНиП 2.01.07-85;

$C_w = 1,2$ — аэродинамический коэффициент; принят как для проводов и тросов, согласно схемы 14 приложения 4 СНиП 2.01.07-85, для расчетов прочности элементов трассы. На дальнейшей стадии проектирования аэродинамические коэффициенты следует при необходимости уточнять в результате отдельных исследований.

Нормативное значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки W_p определяется по формуле:

$$W_p = W_m \xi L_v, \quad (15)$$

где:

ξ — коэффициент динамичности определяется как для балки на двух опорах, в зависимости от параметра $\varepsilon = \frac{\sqrt{\gamma_f W_0}}{940 f_1}$ и логарифмического декремента затуханий

$\delta = 0,15$ по чертежу 2 СНиП 2.01.07-85. Частота собственных колебаний при первой форме примерно $f_1 = 2$ Гц (уточняется при разработке проекта). Коэффициент надежности $\gamma_f = 1,4$. Нормативное значение ветрового давления $W_0 = 0,30 \text{ Па}$. $\varepsilon = 0,015$. Коэффициент $\xi = 1,5$ (по графику черт. 2 пункт 6.7 СНиП 2.01.07-85).

Произведение L_v принято в соответствии со СНиП 2.05.03-84*, п.2.24 а):

$$L_v = 0,3,$$

$$W_p = W_m \xi L_v = 46,8 \cdot 1,5 \cdot 0,3 = 21,06 \text{ кг/м}^2.$$

Нормативные и расчетные значения ветровых давлений на элементы путевой структуры приведены в таблице 4 (с округлением в большую сторону).

Нормативные и расчетные значения ветровых давлений

Конструктивный элемент	Нормативные давления, кг/м ²			Расчетные давления, кг/м ²		
	W _m	W _p	W _n	W _m γ _f	W _p γ _f	W _n γ _f
Рельс-струна	47	21	68	66	30	96
Транспортное средство	35	35	70	49	49	98

Для экипажа принято $C_w = 1,5 \cdot 0,6 = 0,9$ (аэродинамический коэффициент для модуля с ездой по низу). При отсутствии данных пульсационную составляющую принимаем равной статической составляющей. Размер транспортного модуля (в метрах) принят равным: 6 (L) · 2,31 (b) · 2,1 (h).

Температурный режим путевой структуры и ее деформации зависят от многих факторов: от климата района расположения; от материала и толщины элементов трассы; от цвета их покраски; от интенсивности солнечной радиации; от ориентации конструкции относительно движения солнца. Однако, как показано выше (раздел 2.3), температура не оказывает определяющего влияния на напряженно-деформированное состояние путевой структуры моноСТЮ.

При расчете элементов струнной путевой структуры следует принимать следующие коэффициенты линейного температурного расширения:

$\alpha_s = 1,2 \cdot 10^{-5}$ — для стальных и сталежелезобетонных конструкций;

$\alpha_c = 1,0 \cdot 10^{-5}$ — для бетонных и железобетонных конструкций.

Линейные деформации оценивают в зависимости от минимальной и максимальной температуры, значения которой определяются по упрощенной методике согласно СНиП 2.05.03-84 и СНиП 23-01-99.

Основные климатические параметры г. Ставрополя принимаются по СНиП 23-01-99 «Строительная климатология» и сведены в таблицу 5.

При определении перемещений и усилий принимается, что температура элементов путевой структуры равна температуре наружного воздуха.

Основные климатические параметры г. Ставрополя

Характеристика	Средняя температура С° по месяцам																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12									
Значения из СНиП 23-01-99	-3,2	-2,3	1,3	9,3	15,3	19,3	21,9	21,2	16,1	9,6	4,1	-0,5	9,1	-31	40	27,4	-26	-23	-22	-19	83 дня
													Среднегодовая	Абсолютная минимальная	Абсолютная максимальная	Средняя макс. месяца	Наиболее холодных суток		Наиболее холодной пятидневки		Период с температурой < 0С°
																	0,98	0,92	0,98	0,92	

Нормативная температура $t_{n,T}$ воздуха в теплое время года:

$$t_{n,T} = t_{VII} + T = 21,9 + 9,8 = 31,7 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (16)$$

где:

$t_{VII} = 21,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ — средняя температура воздуха самого жаркого месяца (СНиП 23-01-99, табл. 3)

$T = 9,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ — среднесуточная амплитуда колебаний температуры (табл. 2 СНиП23-01-99).

Нормативная температура $t_{n,X}$ в холодное время года принимается равной температуре воздуха наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью:

0,92 — для бетонных и железобетонных конструкций или $-19 \text{ } ^\circ\text{C}$;

0,98 — для стальных конструкций или $-22 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Для оценки перемещений (деформаций) элементов пролетного строения приняты следующие нормативные и расчетные температуры, приведенные в таблице 6, при коэффициенте надежности по нагрузке, равном 1,2. При этом учтено повышение

температуры конструкций на 10 °С под влиянием солнечной радиации (см. п. 2.27* б СНиП 2.05.03-84*).

Таблица 6

Нормативные и расчетные температуры для г. Ставрополя

Конструктивный элемент	Нормативные температуры, °С		Расчетные температуры, °С	
	наибольшие	наименьшие	наибольшие	наименьшие
Стальные конструкции	41,7	-22	50,0	-26,4
Бетон (до 20 см)	41,7	-19	50,0	-22,8
Бетон (более 20 см)	31,7	-19	38,0	-22,8

Следует отметить, что реальный нагрев конструкций может существенно превысить 10 °С, как указано в СНиП 2.05.03-84*. Для более точной оценки температур пролетного строения необходимо пользоваться методикой, изложенной в СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия», в которой оценивается величина нагрева конструкции солнечными лучами.

При этом не следует забывать, что для конструкции, окрашенной светлыми цветами, возможны монтажные состояния пролетных строений, которые могут быть покрыты грунтами темного цвета, интенсивно поглощающими солнечные лучи.

В соответствии со СНиП 2.01.07-85 оценка средней нормативной температуры в теплое и холодное время по сечению элемента t_w и t_c , и значения перепадов температур по сечениям элементов \mathcal{G}_w и \mathcal{G}_c определяются по формулам:

$$t_w = t_{ew} + \theta_1 + \theta_4 \quad (17)$$

$$\mathcal{G}_w = \theta_5 \quad (18)$$

$$t_c = t_{ec} - 0.5 \cdot \theta_1 \quad (19)$$

$$\mathcal{G}_c = 0 \quad (20)$$

где:

t_{ew} и t_{ec} — средние суточные температуры наружного воздуха соответственно в теплое и в холодное время года, принимаемые по формулам 21 и 22:

$$t_{ew} = t_{VII} + \Delta_{VII} \quad (21)$$

$$t_{ec} = t_I - \Delta_I \quad (22)$$

где:

t_I , t_{VII} — многолетние средние месячные температуры воздуха в январе и июле, принимаемые по картам 5 и 6. Для Ставрополя температуры воздуха соответственно равны: $-3,2$ °С, и $+21,9$ °С;

Δ_I , Δ_{VII} — отклонения средних суточных температур от средних месячных, принимаемые соответственно по табл. 1, 2. Для Ставрополя, температуры соответственно равны: $-6,2$ °С, и $+9,8$ °С.

Для Ставрополя температуры в холодное и теплое время, вычисленные по формулам 21 и 22, равны: $t_{ec} = -9,4$ °С, $t_{ew} = +31,7$ °С.

θ_4 , θ_5 — приращение средних по сечению элемента температур и перепада температур от солнечной радиации, принимаемые по формулам 23 и 24:

$$\theta_4 = 0.05 \cdot \rho \cdot S_{max} \cdot k \cdot k_1 \quad (23)$$

$$\theta_5 = 0.05 \cdot \rho \cdot S_{max} \cdot k \cdot (-k_1) \quad (24)$$

где:

ρ — коэффициент поглощения солнечной радиации материалом наружной поверхности конструкции, принимаемый по СНиП II-3-79*:

- $\rho = 0,80$ — сталь темная;
- $\rho = 0,45$ — сталь светлая;
- $\rho = 0,70$ — бетонная поверхность.

S_{max} — максимальное значение суммарной (прямой и рассеянной) солнечной радиации МДж/м², принимаемый по СНиП 23-01-99*. Для широты Ставрополя, т.е. 44° северной широты, суммарное значение радиации, поступающее в июле:

- на горизонтальная поверхность: $S_{max} = 886$ МДж/м²;
- на вертикальную южную поверхность: $S_{max} = 343$ Дж/м²;
- на вертикальную восточно-западную поверхность: $S_{max} = 478$ Дж/м².

k — коэффициент, зависящий от ориентации поверхности:

- горизонтальная поверхность: $k = 1,0$;
- ориентированная на юг: $k = 1,0$;

– ориентированная на запад: $k = 0,9$;

– ориентированная на восток: $k = 0,7$,

k_1 — коэффициент, зависящий от материала конструкций:

– стальные: $k_1 = 0,7$;

– железобетонные до 15 см толщиной: $k_1 = 0,6$;

– железобетонные от 15 до 39 см толщиной: $k_1 = 0,4$;

– железобетонные более 39 см: $k_1 = 0,3$.

Следовательно, значения θ_4 и θ_5 , вычисленные, например, для горизонтальной поверхности из темной и светлой стали и железобетона толщиной до 39 см для Ставрополя, равны:

– темная сталь:

$$\theta_4 = 24,8 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_5 = 10,6 \text{ }^\circ\text{C},$$

– светлая (серебристая) сталь:

$$\theta_4 = 14,0 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_5 = 6,0 \text{ }^\circ\text{C},$$

– железобетон толщиной до 15 см:

$$\theta_4 = 18,6 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_5 = 12,4 \text{ }^\circ\text{C},$$

– железобетон толщиной 15—39 см:

$$\theta_4 = 12,4 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_5 = 18,6 \text{ }^\circ\text{C},$$

– θ_1 — приращение средних по сечению температур, зависящее от материала:

стальные: $\theta_1 = 8 \text{ }^\circ\text{C};$

железобетонные до 15 см толщиной: $\theta_1 = 8 \text{ }^\circ\text{C};$

железобетонные от 15 до 39 см толщиной: $\theta_1 = 6 \text{ }^\circ\text{C};$

железобетонные более 39 см: $\theta_1 = 2 \text{ }^\circ\text{C}.$

Ниже приведены нормативные температуры, вычисленные по формулам 17 и 19 для горизонтальной поверхности из темной и светлой стали и железобетона толщиной до 39 см для Ставрополя:

– темная сталь:

$$t_w = t_{ew} + \theta_1 + \theta_4 = 31,7 + 8 + 24,8 = 64,5 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (17)$$

$$t_c = t_{ec} - 0,5 \cdot \theta_1 = -9,4 - 0,5 \cdot 8 = -13,4 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (19)$$

– светлая сталь (серебристая):

$$t_w = t_{ew} + \theta_1 + \theta_4 = 31,7 + 8 + 14 = 53,7 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (17)$$

$$t_c = t_{ec} - 0,5 \cdot \theta_1 = -9,4 - 0,5 \cdot 8 = -13,4 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (19)$$

– железобетонные до 15 см толщиной:

$$t_w = t_{ew} + \theta_1 + \theta_4 = 31,7 + 8 + 18,6 = 58,3 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (17)$$

$$t_c = t_{ec} - 0,5 \cdot \theta_1 = -9,4 - 0,5 \cdot 8 = -14,4 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (19)$$

– железобетонные от 15 до 39 см толщиной

$$t_w = t_{ew} + \theta_1 + \theta_4 = 31,7 + 8 + 12,4 = 52,1 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (17)$$

$$t_c = t_{ec} - 0,5 \cdot \theta_1 = -9,4 + 0,5 \cdot 6 = -12,4 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (19)$$

В табл. 7 приведены нормативные и расчетные температуры для условий г. Ставрополя.

При вычислении расчетных температур коэффициент надежности по нагрузке согласно п. 8.7 СНиП 2.01.07-85* принят равным $\gamma_f = 1,1$.

Таблица 7

Нормативные и расчетные температуры

Конструктивный элемент	Нормативные температуры, °С		Расчетные температуры, °С	
	наибольшие	наименьшие	наибольшие	наименьшие
Белая стальная конструкция	+54	-14	+59,4	-15,4
Бетон (до 15 см)	+59	-14	+64,9	-15,4
Бетон (от 15 до 39 см)	+53	-13	+58,3	-14,3

Для дальнейших расчетов струнной путевой структуры моноСТЮ на температурные воздействия для условий Ставрополя принимаются наибольшая и наименьшая температуры, определенные по разным методикам (СНиП 2.05.03-84*, СНиП 2.01.07-85*) с учетом влияния солнечной радиации:

– наибольшая: **+59,4 °С**;

- наименьшая: **-26,4 °С**;
- расчетная температурная амплитуда: **85,8 °С**.

При необходимости учета гололедных нагрузок следует руководствоваться указаниями раздела 7 СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия». Однако, в отличие от традиционных мостов и путепроводов, имеющих широкое ездовое полотно, лед и снег не может скопиться на головке рельса-струны моноСТЮ, имеющей ширину всего 6 см. Даже пленка льда, образованная между проездами моно-юнибусов на рабочей поверхности рельса, при первом же проходе колеса будет им раздавлена (до контакта сталь—сталь, т.к. контактные напряжения, превышающие 1000 кг/см^2 , значительно выше прочности льда) и сброшена вниз. Благодаря вибрации при каждом проходе колеса, снег и лед не смогут налипнуть также на нерабочих поверхностях (боковых и нижней) рельса. Поэтому гололед не представит опасности при эксплуатации моноСТЮ и может не учитываться при расчетах конструкций на прочность, кроме монтажных и ремонтных состояний, когда на трассе не будет эксплуатироваться подвижной состав.

Потеря величин предварительного натяжения в рельсе-струне должна быть учтена от расчетных значений величин ползучести. Величины конечной ползучести устанавливаются по данным заводов-изготовителей арматурных прядей (если они используются), либо по нормативным данным (для стальной проволоки). Высокопрочная стальная проволока, планируемая к использованию в моноСТЮ в г. Ставрополе, практически не подвержена ползучести (в отличие от арматурных прядей). Ползучесть проволок в струне за нормативный срок службы системы будет менее 0,1% (по релаксации предварительных напряжений растяжения), что может привести к увеличению провиса рельса-струны на пролете до 0,1 м. Это не отразится на функционировании моноСТЮ.

Величина погрешности при создании предварительного напряжения в проволоках струны не должна превысить значений $\pm 1\%$. При контроле натяжения по усилиям (динамометру, включенному в систему) должны быть учтены потери на перегибах проволок и прочие потери в системе.

Перечень нагрузок и воздействий на конструкции путевой структуры и их расчетные сочетания, используемые в дальнейших расчетах, приведены в таблице 8.

В связи с тем, что конструкция струнного пролетного строения испытывает деформации от температурного воздействия, эта нагрузка, в отличие от требований СНиП 2.05.03-84*, предусмотрена в расчетном сочетании 1.

Нагрузки и воздействия и их расчетные сочетания

Нагрузки и воздействия	Коэффициенты η при различных расчетных сочетаниях						
	Собственный вес конструкций	Воздействие усадки и ползучести	Временные нагрузки	Горизонтальная нагрузка от торможения	Ветровые воздействия	Температурные воздействия	Нагрузка от гололеда
1-е сочетание	1	1	1	—	—	1	—
2-е сочетание	1	1	0,8	0,7	0,25	0,7	0,25
3-е сочетание	1	1	—	—	1	—	—

Расчетное сочетание 2 соответствует табличному значению (таблица 8) Приложения 2* СНиП 2.05.03-84*, за исключением одной нагрузки — нагрузки от гололеда. Нагрузка от обледенения конструкций принята с той же вероятностью, что и ветровая.

Расчетное сочетание 3 относится к расчету рельса-струны на ветровую нагрузку при отсутствии временной нагрузки.

3.2. Определение усилий в элементах путевой структуры

3.2.1. Составление расчетных схем

Усилия и деформации следует определять, используя программы, реализующие МКЭ в нелинейной постановке. Рельс-струна по определению является жесткой нитью, для которой характерна геометрическая нелинейность, т.е. связь между напряжениями в ней и ее деформациями нелинейна.

Струнные элементы (канаты, арматурные пряди или стальная проволока) должны быть смоделированы стержневыми геометрически нелинейными элементами. Изгибной жесткостью отдельных струнных элементов (ввиду малости их поперечных размеров) можно пренебречь. Осевая жесткость струн должна быть принята по СНиП либо сертификатам завода-изготовителя. В случае отсутствия такой информации модуль деформации струнного элемента следует определить в результате эксперимента.

Изгибную жесткость корпуса рельса и струнных элементов следует учитывать при определении локальных деформаций под колесом, а также при оценке распределения поперечных напряжений в рельсе между струнами (канатами, арматурными прядями или

отдельными стальными проволоками) и заполнителем. Заполнитель планируется изготовить на основе полимерных смол (эпоксидной или кремнийорганической), обладающих хорошей адгезией к стали, поэтому проволоки струны и корпус рельса будут объединены заполнителем в одно целое (с учетом того фактора, что смола будет подана при монтаже в корпус рельса под давлением в несколько атмосфер).

Осевая жесткость рельса (корпуса, головки), струны и жесткость заполнения учитывается при вычислении усилий и перемещений от продольного торможения транспортных модулей.

3.2.2. Перечень необходимых расчетов

При расчетах определяются:

- наибольшие и наименьшие продольные усилия в струне от нормативных и расчетных нагрузок:
 - от собственного веса;
 - от преднапряжения;
 - от температуры;
 - от ползучести;
 - от ветра;
 - от проезда рельсового автомобиля
- наибольшие поперечные усилия, передаваемые от рельса к струнам в пролете от нормативных и расчетных нагрузок.

3.3. Проверка прочности и выносливости

Расчет несущих струн путевой структуры моноСТЮ может быть выполнен в предположении, что струнные элементы (канаты, арматурные пряди или арматурная проволока) отнесены к несущим элементам висячих и вантовых мостов.

Отечественные строительные нормы СНиП 2.05.03-84* разделяют подходы в оценке прочности автодорожных и железнодорожных мостов. Выше, в разделе нагрузок, для оценки коэффициентов надежности струнная эстакада моноСТЮ была отнесена к автодорожным мостам и мостам под трамвай и метрополитены.

Расчет прочности рельса-струны, образованного из растянутых арматурных прядей, может быть выполнен на основании методики расчета канатов по СНиП 2.05.03-84*, с

назначением коэффициента условий работы m и нового коэффициента m_2 по ниже приведенной формуле:

$$N_{t,Rd} = \frac{N_{b,\min}}{\gamma_m} \cdot m \cdot m_1 \cdot m_2 = \frac{N_{b,\min}}{1,6} \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,5 \cdot N_{b,\min} \quad (25)$$

где:

$N_{t,Rd}$ — наибольшее расчетное усилие в пряди;

$N_{b,\min}$ — минимальное разрывное усилие пряди в целом;

γ_m — коэффициент надежности по материалу прядей, принят равным 1,6, в соответствии с п. 4.33, $\frac{1}{1,6} = 0,625$;

m — коэффициент условий работы по таблице 60 [3]:

- принимается равным 0,8 — для висячих и вантовых мостов, а если мост не автодорожный, а пешеходный или железнодорожный, должен быть введен дополнительный коэффициент 0,9, тогда $m = 0,9 \cdot 0,8 = 0,72$,
- для прядей несущего пояса струнной эстакады, коэффициент m может быть принят равным:
 - 1) для проектирования опытного участка $m = 1,0$;
 - 2) на последующей стадии проектирования капитальной линии, коэффициент m следует определить на основании принятого уровня надежности сооружения и анализа работы прядей струны.

m_1 — а) учитывает работу проволок в анкере (если горячая заливка, то $m_1 = 0,95$; во всех остальных случаях $m_1 = 1$) по Приложению 14 СНиП;

m_1 — б) учитывает поперечное давление на отклоняющем устройстве или седле при соблюдении условий перегиба каната диаметром d_s (мм) на диаметре D .

Для пряди диаметром 15 мм $\frac{D}{d_s} \geq 0,7 \cdot 15,2 + 15 = 26$, т.е. радиус перегиба должен быть

больше 13 диаметров каната. В реальной конструкции моноСТЮ радиус перегиба принят больше 30 диаметров для витого каната и больше 1000 — для проволоки (для невитого каната, с параллельным размещением проволок).

Если поперечное давление менее 1 т/см каната пряди, или проволок, то $m_1 = 1$. Предполагаемое поперечное давление в седлах струнной путевой структуры моноСТЮ будет менее 1 т/см струны.

Коэффициенты m_1 , определенные по пунктам а) и б) перемножаются между собой.

Для случая струнной эстакады коэффициент m_1 принят равным 1,0.

m_2 — коэффициент, учитывающий неравномерность натяжения проволок в струне.

Для опытного участка эстакады проволоки предполагается натягивать поочередно (порядно). Контроль натяжения будет двоякий:

- по показаниям классного динамометра, включенного в систему полиспастов;
- по стрелкам провисания проволок в пролете.

При указанном контроле, для опытного участка моноСТЮ, коэффициент $m_2 = 1,0$.

Предельные усилия в канатных элементах прядей при расчетах по прочности допускается принять как для арматурных прядей высокопрочного армирования железобетонных конструкций автодорожных мостов:

$$N_{t,Rd} = 0,633 \cdot N_{b,min} , \quad (26)$$

где:

$N_{t,Rd}$ = расчетные наибольшие усилия от нагрузок по таблице 9 [3].

Ниже приведены предельные усилия в канатных элементах, нормируемые отечественными нормами и проектом европейских мостовых норм:

- $N_{t,Rd} = 0,6 \cdot N_{b,min}$ — для высокопрочных прядей арматуры железобетонных железнодорожных мостов по СНиП [3];
- $N_{t,Rd} = 0,633 \cdot N_{b,min}$ — для высокопрочных прядей арматуры железобетонных автодорожных мостов по СНиП [3];
- $N_{t,Rd} = 0,5 \cdot N_{b,min}$ — для канатных элементов стальных конструкций мостов по СНиП [3];
- $N_{t,Rd} = 0,56 \cdot N_{b,min}$ — для канатных элементов стальных конструкций мостов по европейским нормам ENV.

Расчет выносливости канатных элементов мостовых сооружений (вант, подвесок, оттяжек и т.п.) выполняется по формуле:

$$\sigma_{\max} \leq m_1 \gamma_{ws} R_{dh} m = \gamma_{ws} R_{dh}, \quad (27)$$

где:

m_1 — коэффициент условий работ, равный:

$m_1 = 0,83$ для вантовых и висячих мостов без индивидуального регулирования усилий в канатах;

$m_1 = 1,0$ для вантовых и висячих мостов с индивидуальным регулированием усилий в канатах;

$m = 1,0$ — коэффициент условий работ, принимается по таблице 60 СНиП 2.05.03-84*;

R_{dh} — расчетное сопротивление каната по п.4.33 СНиП 2.05.03-84*;

γ_{ws} — коэффициент, учитывающий переменность напряжений и определяемый по формуле:

$$\gamma_{ws} = \frac{0,15}{\zeta \cdot \vartheta \cdot [0,884 \cdot \beta_s - 0,387] - (0,884 \cdot \beta_s - 0,455) \cdot \rho} \leq 1,0 \quad (28)$$

где:

ζ, ϑ, ρ — коэффициенты, принимаемые согласно п.4.57* СНиП 2.05.03-84*;

β_s — эффективный коэффициент концентрации напряжений, значения которого принимаются по таблице 2 приложения 17* СНиП 2.05.03-84*;

$m = 1,0$ — коэффициент условий работ, принимается по таблице 60 СНиП 2.05.03-84*.

В проекте европейских норм оценка выносливости канатов заключается в сопоставлении величины размаха напряжений ($\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$) в проволоках каната с предельным допустимым значением.

Величина порога выносливости при 2 млн. циклов оценивается следующими значениями:

- для закрытых спиральных и мостовых канатов с анкерами с горячей заливкой величина размаха напряжений должна быть до 112 МПа;
- для канатов из параллельных проволок с холодной заливкой анкеров — до 160 МПа.

Усталостное разрушение канатных элементов струнной эстакады возможно в местах концентрации напряжений в проволоках. Это, в первую очередь, зоны закрепления проволок в клиновых анкерах анкерных опор, а также места перегибов струны на седлах опор.

Конструкция анкерения струн предполагает закрепление в анкерных стаканах при помощи заклинки цангами. Для уменьшения концентрации напряжений у анкера в месте перегиба и пластической деформации проволок, предполагается участок струны на длине не менее 3 м от анкера обетонировать специальным полимерным раствором. Полимерный раствор позволит обеспечить сцепление по контакту со струной не менее 40 кг/см², что на длине 3 м обеспечивает передачу необходимого усилия. В такой конструкции отсутствует концентратор.

Более сложная работа канатного элемента в седле. В струнной эстакаде предполагается устроить седла двух видов.

Опорное седло-сепаратор предназначено для разводки струн у мест анкерения. Принцип проектирования седла аналогичен седлам на промежуточных опорах, с той лишь разницей, что в опорном седле исключен поворот.

Рядовая опорная часть обеспечивает поворот рельса-струны. Поперечное давление от колеса рельсового автомобиля на струну не превышает значений 1 тс/см, что, в соответствии со СНиП 2.05.03-84*, позволяет не вводить понижающие коэффициенты.

Таким образом, отсутствие концентраторов позволяет принять следующие значения предельных напряжений при оценке выносливости.

Предельные напряжения для расчетов выносливости определены по формуле (27) и равны:

$$\sigma_{\max} \leq m_1 \gamma_{ws} R_{dh} m = \gamma_{ws} R_{dh}$$

$$R_{dh} = 10450 \text{ кг/см}^2 \quad (\text{ориентировочно});$$

$$\gamma_{ws} = \frac{0,15}{\zeta \cdot \vartheta \cdot [0,884 \cdot \beta_s - 0,387] - (0,884 \cdot \beta_s - 0,455) \cdot \rho} = 3,87 > 1,0;$$

где:

$$\vartheta = \nu - \xi \cdot \lambda = 1,51 - 0,0232 \cdot 30 = 0,814;$$

$$\zeta = 0,7;$$

$$\rho = 1,0;$$

$$\beta_s = 1,2 \text{ (для седел).}$$

Так как коэффициент $\gamma_{ws} > 1$, то устойчивость проверять не нужно. Усталостная прочность струн эстакады, при соблюдении выше перечисленных условий по анкерению и устройству седел, обеспечена.

Предельные горизонтальные и вертикальные ускорения пассажиров в экипаже при его движении по струнной эстакаде не должны превышать 0,15g.

4. Материалы и изделия. Защита от коррозии

Материалы для бетонных, железобетонных и стальных конструкций должны применяться в соответствии с указаниями глав СНиП 2.05.03-84*.

Ручная дуговая сварка выполняется металлическими, покрытыми защитной обмазкой электродами. Для сварки элементов конструкции рельса-струны (кроме проволок струны, сварка которых недопустима) применяют электроды с временным сопротивлением 410 – 490 МПа диаметрами, в основном 3 и 4 мм.

Рекомендуемые марки электродов для сварки конструкций из сталей с пределом текучести $R_{up} = 330—390$ МПа (стали марок 09Г2СД, 15ХСНД и 10ХСНД) приведены в таблице 9.

Таблица 9

Рекомендуемые марки электродов

Тип шва	Тип электрода по ГОСТ 9467-75	Марка электрода	Сопротивление металла шва, МПа (кг/см ²)	
			Временное R_{wun}	среза R_{wf}
Угловой, тавровый	Э42А	УОНИ-13/45	410 (4200)	180 (1850)
	Э46А	УОНИ-13/55 К	450 (4600)	200 (2050)
Стыковой	Э50А	УОНИ-13/55	490 (5000)	215(2200)

R_{wun} — временное сопротивление металла шва;

R_{wf} — расчетное сопротивление металла шва срезу.

Материалы для автоматической и полуавтоматической сварки под слоем флюса и полуавтоматической сварки в среде защитных газов следует назначать по ВСН 169-80 «Инструкция по технологии механизированной и ручной сварки при заводском изготовлении стальных конструкций мостов».

Защиту от коррозии путевой структуры и строительных конструкций следует предусматривать металлическими и лакокрасочными покрытиями в соответствии с указаниями СНиП 2.03.11-85 «Защита строительных конструкций от коррозии».

Защитные покрытия выполняются из грунтовочных слоев, промежуточных и верхних. Необходимым условием является сочетание слоев покрытия.

При назначении покрытия следует оценивать не только защитные свойства и стоимостные показатели, но и технологичность нанесения, время нанесения (средние температуры и влажность в период проведения работ), технологичность замены, ремонта и т.п.

Металлические непокрытые поверхности перед покрытием подготавливают в соответствии с требованиями 2-ой степени очистки поверхности согласно ГОСТ 9.402-80 «Покрытия лакокрасочные. Подготовка поверхностей перед окрашиванием».

5. Эскизное проектирование

В выборе наиболее целесообразного проектного решения для конкретных условий строительства и состоит задача эскизного проектирования, в процессе которого рождается основная идея сооружения, поэтому данный этап является самым ответственным.

Основными задачами эскизного проектирования являются сравнение вариантов и выбор окончательного решения с соответствующим технико-экономическим обоснованием. При этом сравнивают показатели, из которых одними из основных являются расход материалов и связанная с ним стоимость струнной путевой структуры. При разработке вариантов важно выбрать рациональные пропорции будущей трассы (высота над поверхностью земли, длина пролетного строения, количество путей, анкерных опор и поворотов).

Для составления технико-экономического обоснования (ТЭО) основными этапами при выборе проектного решения являются:

- сбор исходной технической информации (район строительства, климатология, инженерно-геологические условия площадки, рельеф местности);
- предварительное согласование условий инженерного обеспечения;
- проведение предварительной трассировки магистралей;
- предварительный выбор технических решений;
- проведение предпроектных проработок.

Предпроектные проработки по путевой структуре моноСТЮ для условий г. Ставрополя должны включать:

- построение расчетной схемы моноСТЮ с приложением нагрузок;
- определение влияния дополнительных нагрузок (температура, ветер, оледенение) на напряженно-деформированное состояние рельса-струны при движении подвижного состава;
- определение и анализ внешних и аварийных нагрузок;
- моделирование и расчет контактных напряжений в паре «колесо — рельс»;
- моделирование и расчет вариантов анкерных опор и фундаментов, определение их влияния на долговечность и напряженно-деформированное состояние рельса-струны;
- определение параметров колебаний системы «юнибус-рельс»;
- конструктивные расчеты сварных швов, проверка прочности, выносливости и устойчивости;
- определение влияния массово-габаритных параметров и скорости движения подвижного состава на напряженно-деформированное состояние рельса-струны;
- анализ технологичности выбранных схем, материалов и заготовок;
- предварительная проработка технологического оборудования, оснастки и приемов по изготовлению и монтажу струнной путевой структуры;
- оптимизация конструкций путевой структуры по условиям надежности, долговечности, безопасности, технологичности и стоимости.

6. Расчет элементов путевой структуры моноСТЮ для условий г. Ставрополя

6.1. Исходные данные

Расчетная схема путевой структуры моноСТЮ с нагрузками от пассажирского модуля, приведенная на рис. 9, включает в себя анкерные опоры и рельс-струну, состоящую из корпуса рельса, пучка из 240 стальных оцинкованных проволок диаметром 3 мм и заполнителя на основе эпоксидной смолы, передающего вертикальные и горизонтальные нагрузки с корпуса рельса на предварительно напряженную струну-пучок из параллельных и предварительно напряженных стальных высокопрочных проволок. Анкерные опоры в качестве расчетного примера размещены друг от друга на достаточно большом расстоянии в условиях г. Ставрополя — 2000 м.

Нагрузка от веса груженого модуля (5 тс) приложена в середине пролета при температурных режимах: +20 °С; +59,4 °С (максимальная температура); –26,4 °С (минимальная температура). Геометрические и физические характеристики рельса-струны приведены на рис. 11 и 12, до и после объединения композитом в единое сечение струны и корпуса рельса.

Расчеты выполнялись на программном комплексе «Лира-Windows» версии 9.2 (см. приложение 2), в основу которого положен метод конечных элементов в перемещениях.

В расчетную схему включены следующие типы элементов:

- тип 310. Геометрически нелинейный универсальный пространственный стержневой конечный элемент (нить),
- тип 308. Геометрически нелинейный специальный двухузловой конечный элемент для моделирования предварительного натяжения.

Учтены следующие расчетные нагрузки:

- собственный вес рельса-струны — 23,2 кг/мп (с учетом заполнителя);
- предварительное натяжение (при температуре наружного воздуха +20 °С, с учетом собственного веса):
 - струны — 192,825 тс;
 - корпуса рельса — 13,137 тс;
- вес транспортного модуля:
 - груженный модуль — 5 тс;
- температура:
 - максимальная +59,4 °С;
 - минимальная –26,4 °С;
- поперечное ветровое давление на юнибус (с учетом пульсации), приходящееся на одно колесо — 0,309 тс;
- поперечное ветровое давление на корпус рельса (с учетом пульсации) — 0,0056 т/м.п.;
- температурные изменения усилий и напряжений в струне и рельсе – относительно температуры +20°С.

ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЧЕНИЯ КОРПУСА РЕЛЬСА

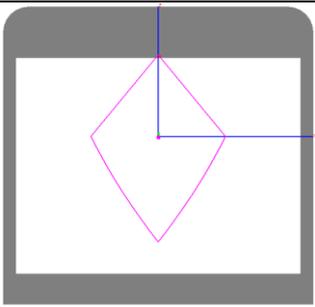
	Наименование	Обозначение	Значение	Ед. изм.	
	ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ				
	Модуль упругости	E		2.1e+007	тс/м ²
	Коэффициент Пуассона	ν		0.3	
	Модуль сдвига	G		8.07692e+006	тс/м ²
Плотность материала	ρ		7.85	тс/м ³	
ЯДРОВЫЕ РАССТОЯНИЯ					
Максимальная абсцисса	Y+		0.0130124	м	
Минимальная абсцисса	Y-		0.0130124	м	
Максимальная ордината	Z+		0.0158791	м	
Минимальная ордината	Z-		0.0205496	м	
Наименование	Обозначение	Значение	Ед. изм.		
ЖЕСТКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ					
Осевая жесткость	EF		24335.3	тс	
Изгибная жесткость относительно оси Y	EI_y		12.643	тс*м ²	
Изгибная жесткость относительно оси Z	EI_z		9.49978	тс*м ²	
Жесткость на кручение	GI_t		5.29612	тс*м ²	
Секториальная жесткость	EI_w		0.000782588	тс*м ⁴	
Сдвиговая жесткость относительно оси Y	GF_y		6141.4	тс	
Сдвиговая жесткость относительно оси Z	GF_z		2028.11	тс	
Погонная масса	g		0.00909676	тс	
ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ					
Габариты сечения:	b		0.06	м	
	h		0.058	м	
Координаты центра тяжести относительно системы координат U ₀ O ₀ V ₀ :	U_{oc}		0.03	м	
	V_{oc}		0.0327181	м	
Периметр внешнего контура	P_{ext}		0.231663	м	
Периметр внутренних контуров	P_{int}		0.194	м	
Площадь	F		0.00115882	м ²	
Момент инерции относительно оси U	I_u		6.02047e-007	м ⁴	
Момент инерции относительно оси V	I_v		4.52371e-007	м ⁴	
Центробежный момент инерции относительно системы координат UOV	I_{uv}		-1.20618e-014	м ⁴	
Угол поворота главных осей инерции	Fi		0	°	
Главный момент инерции относительно оси Y	I_y		6.02047e-007	м ⁴	
Главный радиус инерции относительно оси Y	R_y		0.0227933	м	
Главный момент инерции относительно оси Z	I_z		4.52371e-007	м ⁴	
Главный радиус инерции относительно оси Z	R_z		0.0197578	м	
Момент сопротивления изгибу относительно оси Y (Z+)	W_{y+}		2.38134e-005	м ³	
Момент сопротивления изгибу относительно оси Y (Z-)	W_{y-}		1.8401e-005	м ³	
Момент сопротивления изгибу относительно оси Z (Y+)	W_{z+}		1.5079e-005	м ³	
Момент сопротивления изгибу относительно оси Z (Y-)	W_{z-}		1.5079e-005	м ³	
ПАРАМЕТРЫ КРУЧЕНИЯ					
Координаты центра кручения относительно системы координат Y ₀ Z ₀ :	Y_t		0	м	
	Z_t		0.000515265	м	
Момент инерции на кручение	I_t		6.5571e-007	м ⁴	
Секториальный момент инерции	I_w		3.72661e-011	м ⁶	
Момент сопротивления кручению	W_t		1.15603e-005	м ³	
Секториальный момент сопротивления	W_w		9.35521e-008	м ⁴	
ПАРАМЕТРЫ СДВИГА					
Координаты центра сдвига относительно системы координат Y ₀ Z ₀ :	Y_s		0	м	
	Z_s		-0.000198305	м	
Сдвиговая площадь относительно оси Y	F_y		0.000760363	м ²	
Сдвиговая площадь относительно оси Z	F_z		0.000251099	м ²	
Момент сопротивления сдвигу относительно оси Y	WQ_y		0.000533656	м ²	
Момент сопротивления сдвигу относительно оси Z	WQ_z		0.000187976	м ²	
ПЛАСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ					
Координаты точки пересечения нейтральных осей относительно системы координат Y ₀ Z ₀ :	Y_{pl}		0.000208332	м	
	Z_{pl}		0.0155088	м	
Пластический момент сопротивления относительно оси Y	W_{y,pl}		2.35069e-005	м ³	
Пластический момент сопротивления относительно оси Z	W_{z,pl}		2.0115e-005	м ³	

Рис. 11. Геометрические и физические характеристики корпуса рельса

ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЧЕНИЯ РЕЛЬСА-СТРУНЫ

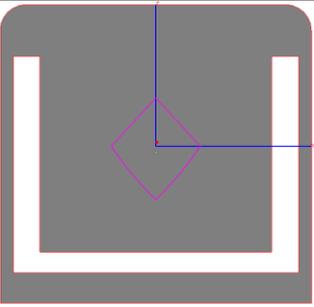
	Наименование	Обозначение	Значение	Ед. изм.	
	ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ				
	Модуль упругости	E	2.1e+007	тс/м ²	
	Коэффициент Пуассона	ν	0.3		
	Модуль сдвига	G	8.07692e+006	тс/м ²	
Плотность материала	ρ	7.85	тс/м ³		
ЯДРОВЫЕ РАССТОЯНИЯ					
Максимальная абсцисса	Y+	0.00857116	м		
Минимальная абсцисса	Y-	0.00857116	м		
Максимальная ордината	Z+	0.00936348	м		
Минимальная ордината	Z-	0.0103914	м		
Наименование	Обозначение	Значение	Ед. изм.		
ЖЕСТКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ					
Осевая жесткость	EF	59966	тс		
Изгибная жесткость относительно оси Y	EI _y	17.1305	тс*м ²		
Изгибная жесткость относительно оси Z	EI _z	15.4193	тс*м ²		
Жесткость на кручение	GI _t	9.44251	тс*м ²		
Секториальная жесткость	EI _w	0.000443867	тс*м ⁴		
Сдвиговая жесткость относительно оси Y	GF _y	14586.6	тс		
Сдвиговая жесткость относительно оси Z	GF _z	4341.94	тс		
Погонная масса	g	0.0224159	тс		
ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ					
Габариты сечения:	b	0.06	м		
	h	0.058	м		
Координаты центра тяжести относительно системы координат U ₀₀ O ₀ V ₀ :	U _{oc}	0.03	м		
	V _{oc}	0.0305089	м		
Периметр внешнего контура	P _{ext}	0.231664	м		
Периметр внутренних контуров	P _{int}	0.27	м		
Площадь	F	0.00285553	м ²		
Момент инерции относительно оси U	I _u	8.15737e-007	м ⁴		
Момент инерции относительно оси V	I _v	7.34255e-007	м ⁴		
Центробежный момент инерции относительно системы координат UOV	I _{uv}	-1.72102e-014	м ⁴		
Угол поворота главных осей инерции	Fi	0	°		
Главный момент инерции относительно оси Y	I _y	8.15737e-007	м ⁴		
Главный радиус инерции относительно оси Y	R _y	0.0169018	м		
Главный момент инерции относительно оси Z	I _z	7.34255e-007	м ⁴		
Главный радиус инерции относительно оси Z	R _z	0.0160354	м		
Момент сопротивления изгибу относительно оси Y (Z+)	W _{y+}	2.96728e-005	м ³		
Момент сопротивления изгибу относительно оси Y (Z-)	W _{y-}	2.67377e-005	м ³		
Момент сопротивления изгибу относительно оси Z (Y+)	W _{z+}	2.44752e-005	м ³		
Момент сопротивления изгибу относительно оси Z (Y-)	W _{z-}	2.44752e-005	м ³		
ПАРАМЕТРЫ КРУЧЕНИЯ					
Координаты центра кручения относительно системы координат Y0Z:	Y _t	0	м		
	Z _t	-0.0012394	м		
Момент инерции на кручение	I _t	1.16907e-006	м ⁴		
Секториальный момент инерции	I _w	2.11365e-011	м ⁶		
Момент сопротивления кручению	W _t	2.27317e-005	м ³		
Секториальный момент сопротивления	W _w	5.45653e-008	м ⁴		
ПАРАМЕТРЫ СДВИГА					
Координаты центра сдвига относительно системы координат Y0Z:	Y _s	0	м		
	Z _s	-0.00122703	м		
Сдвиговая площадь относительно оси Y	F _y	0.00180596	м ²		
Сдвиговая площадь относительно оси Z	F _z	0.000537574	м ²		
Момент сопротивления сдвигу относительно оси Y	W _{Qy}	0.000780025	м ²		
Момент сопротивления сдвигу относительно оси Z	W _{Qz}	0.000284638	м ²		
ПЛАСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ					
Координаты точки пересечения нейтральных осей относительно системы координат Y0Z:	Y _{pl}	0.000206713	м		
	Z _{pl}	0.0007535	м		
Пластический момент сопротивления относительно оси Y	W _{y,pl}	4.15669e-005	м ³		
Пластический момент сопротивления относительно оси Z	W _{z,pl}	3.90545e-005	м ³		

Рис. 12. Геометрические и физические характеристики рельса-струны

Определение усилий в элементах путевой структуры выполнено для следующих сочетаний нагрузок:

Сочетание 1.

1. Предварительное натяжение при $T = +20$ °С;
2. Собственный вес рельса-струны;
3. Грузенный модуль в центре пролета ($P_r = 5$ тс);
4. Ветровое давление ($P_{\text{колесо}} = 0,309$ т, $g_{\text{струна}} = 0,0056$ т/м.п.)

Сочетание 2.

1. Предварительное натяжение при $T = +59,4$ °С;
2. Собственный вес рельса-струны;
3. Грузенный модуль в центре пролета ($P_r = 5$ тс);
4. Ветровое давление ($P_{\text{колесо}} = 0,309$ т, $g_{\text{струна}} = 0,0056$ т/м.п.)

Сочетание 3.

1. Предварительное натяжение при $T = -26,4$ °С;
2. Собственный вес рельса-струны;
3. Грузенный модуль в центре пролета ($P_r = 5$ тс);
4. Ветровое давление ($P_{\text{колесо}} = 0,309$ т, $g_{\text{струна}} = 0,0056$ т/м.п.)

Результаты расчетов приведены в приложении 1 и ниже сведены в сводные таблицы соответственно для струны (табл. 10) и корпуса рельса (табл. 11). При этом приняты условные обозначения:

X — продольная ось (направлена по ходу движения модуля),

Y — поперечная (горизонтальная) ось (направлена по направлению действия поперечного ветра),

Z — вертикальная ось (направлена вверх),

M — изгибающий момент,

Q — перерезывающая (поперечная) сила,

N — продольное усилие (вдоль оси X),

M_y — изгибающий момент относительно оси Y (т.е. в вертикальной плоскости от подвижной нагрузки и собственного веса),

M_z — изгибающий момент относительно оси Z (т.е. в горизонтальной плоскости от ветровой нагрузки),

Q_y — усилие поперек трассы (от ветровой нагрузки),

Q_z — усилие в вертикальном направлении (от подвижной нагрузки и собственного веса),

- σ — напряжение растяжения (+) или сжатия (-),
- $\sigma_{\text{в}}$ — напряжение растяжения (сжатия) на верхней грани корпуса рельса (в головке рельса),
- $\sigma_{\text{н}}$ — напряжение растяжения (сжатия) на нижней грани корпуса рельса,
- P_{Γ} — вес груженого модуля,
- $P_{\text{колесо}}$ — горизонтальная ветровая нагрузка, приходящаяся на одно колесо (вдоль оси Y),
- $g_{\text{струна}}$ — горизонтальная ветровая нагрузка, приходящаяся на 1 м.п. рельса-струны (вдоль оси Y).

Таблица 10

Сводная таблица результатов расчета моноСТЮ в г. Ставрополе

Максимальные усилия и напряжения в струне на пролете 2000 м

Условия эксплуатации при температуре, °С	Вертикальная нагрузка	Коэффициент линейного расширения, α	Изменение усилий в струне от вертикальной нагрузки (под колесом модуля), $N_{\text{в}}, T$	Изменение усилий в струне от температуры (относит. $t = +20^{\circ}\text{C}$) $N_{\text{т}}, T$	Суммарные усилия в струне (под колесом модуля), N, T	Изменение напряжения в струне от вертикальной нагрузки (главные напряжения под колесом модуля)*, $\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	Изменение напряжений в струне от температуры $\sigma_{\text{т}}, \text{МПа}$	Суммарные напряжения* в струне $\sigma, \text{МПа}$	Максимальный вертикальный провис рельса-струны (в центре пролета), м	
									под действием сил тяжести (без ветра)	под действием сил тяжести и бокового ветра
+59,4	Собств. вес рельса	$1,2 \times 10^{-5}$	—	-6,897	185,928	—	-39,869	1074,79	-61,5	
	Собств. вес рельса + модуль 5 т		+10,937	-6,765	196,997	-16,50 +75,50	-39,280	1058,88 1150,88	-68,0	-65,6
+20	Собств. вес рельса	$1,2 \times 10^{-5}$	—	—	192,825	—	—	1114,66	-58,0	-55,5
	Собств. вес рельса + модуль 5 т		+10,937	—	203,762	-16,50 +75,50	—	1098,16 1190,16	-64,5	-62,4
-26,4	Собств. вес рельса	$1,2 \times 10^{-5}$	—	+9,053	201,878	—	+52,332	1166,99	-54,0	
	Собств. вес рельса + модуль 5 т		+10,937	+8,795	212,557	-16,50 +75,50	+50,841	1149,00 1241,00	-60,5	-58,6

* в числителе указаны напряжения в верхнем ряду проволок струны, в знаменателе — в нижнем ряду проволок струны

$N_0 = 192,825 \text{ т}$ — усилие предварительного натяжения струны (с учетом собственного веса) при $+20^{\circ}\text{C}$,

$\sigma_0 = 1114,66 \text{ МПа}$ — напряжение, возникающее от предварительного натяжения струны (при $+20^{\circ}\text{C}$),

$E_{\text{струна}} = 2,1 \times 10^7 \text{ т/м}^2$ — модуль упругости для струны.

Сводная таблица результатов расчета моноСТЮ в г. Ставрополе

Максимальные напряжения, возникающие в корпусе рельса на пролете 2000 м

Условия эксплуатации при температуре, °С	Вертикальная нагрузка	Напряжение в корпусе рельса от предварительного натяжения σ_0 , МПа	Изменение напряжений в корпусе рельса от температуры (относит. $t = +20^\circ\text{C}$)		Изменение напряжений в корпусе рельса от вертикальной нагрузки (главные напряжения под колесом модуля)		Изменение напряжений в корпусе рельса от бокового ветра (главные напряжения)	Суммарные напряжения в корпусе рельса от всех нагрузок (главные напряжения под колесом модуля)*	
			$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{\text{н}}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{\text{н}}$, МПа		σ , МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа
+59,4	Собств. вес	111,16	-39	-39	—	—	-11 ... +33	61,16	61,16
	Модуль 5 т	111,16	-39	-39	-41	+100		105,16	105,16
+20	Собств. вес	111,16	—	—	—	—	-11 ... +33	20,16	161,16
	Модуль 5 т	111,16	—	—	-41	+100		64,16	205,16
-26,4	Собств. вес	111,16	—	—	—	—	-11 ... +33	100,16	100,16
	Модуль 5 т	111,16	—	—	-41	+100		144,16	144,16
-26,4	Собств. вес	111,16	+50	+50	—	—	-11 ... +33	59,16	200,16
	Модуль 5 т	111,16	+50	+50	-41	+100		103,16	244,16
-26,4	Собств. вес	111,16	+50	+50	—	—	-11 ... +33	150,16	150,16
	Модуль 5 т	111,16	+50	+50	-41	+100		194,16	194,16
-26,4	Собств. вес	111,16	+50	+50	—	—	-11 ... +33	109,16	250,16
	Модуль 5 т	111,16	+50	+50	-41	+100		153,16	294,16

* суммарные главные напряжения показаны под колесом модуля для угловых точек сечения корпуса рельса с учетом воздействия бокового ветра на рельс-струну и транспортный модуль: в числителе — в левом углу, в знаменателе — в правом

$N_0 = 13,1372$ т — усилие предварительного напряжения корпуса рельса (с учетом собственного веса) при $+20^\circ\text{C}$,

$\alpha = 1,2 \times 10^{-5}$ — коэффициент линейного расширения для корпуса рельса,

$E_{\text{корпус}} = 2,1 \times 10^7$ т/м² — модуль упругости для корпуса рельса.

Примечания:

$\sigma_{\text{в}}$ — напряжение на верхней грани корпуса рельса (в головке рельса),

$\sigma_{\text{н}}$ — напряжение на нижней грани корпуса рельса.

6.2. Анализ результатов расчета

6.2.1. Струна (см. табл. 10)

1). В штатном режиме эксплуатации трассы (груженный модуль массой 5 т) усилия (напряжения) в струне изменяются (относительно $T = +20^\circ\text{C}$) при наиболее неблагоприятных

температурных воздействиях от $-3,4\%$ (снижение при $T = +59,4\text{ }^{\circ}\text{C}$) до $+4,3\%$ (увеличение при $T = -26,4\text{ }^{\circ}\text{C}$). При этом $38,2\text{—}44,5\%$ изменений приходится на воздействие температуры и $55,5\text{—}61,8\%$ — за счет воздействия веса подвижной нагрузки.

2). Максимальное изменение напряжений в струне для штатного режима составляет $\Delta\sigma = 166,21\text{ МПа}$ (один раз в течение календарного года в цикле «лето — зима» с вероятностью один раз в 100 лет). При этом $54,5\%$ изменений напряжений приходится на статическую составляющую (т.е. на воздействие температуры, что не влияет на усталостные явления в материале конструкции и, соответственно, на ее долговечность) и $45,5\%$ изменений напряжений ($75,5\text{ МПа}$) — на динамическую составляющую (напряжения, возникающие при дополнительном растяжении струны и при изгибе рельса-струны под колесом юнибуса).

3). Максимальные напряжения в струне под колесом модуля при $T = -26,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляют $\sigma_{\max} = +1241,0\text{ МПа}$, что сопоставимо с допустимыми напряжениями в высокопрочной гладкой проволоке В-II диаметром 3 мм в городских мостах, равных $+1180\text{ МПа}$ (см. табл. 31 СНиП 2.05.03-84*). Превышение составляет $5,2\%$, что лежит в нормируемых пределах и может быть снижено за счет предварительного натяжения струны до более низких напряжений или применения проволоки с более высокими физико-механическими характеристиками, чем предусмотрено СНиПом. Из этих напряжений $1114,66\text{ МПа}$ ($89,8\%$) приходятся на предварительное натяжение струны (при $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$), $50,84\text{ МПа}$ ($4,1\%$) — на изменение температуры (от $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-26,4\text{ }^{\circ}\text{C}$) и $75,5\text{ МПа}$ ($6,1\%$) — на воздействие подвижной нагрузки (груженный модуль массой 5 т).

4). Максимальная разность продольных усилий в струне от перепада температур $\Delta T = 85,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (от $+59,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-26,4\text{ }^{\circ}\text{C}$) составляет $15,95\text{ тс}$, при этом разность напряжений в струне составит $92,2\text{ МПа}$ (без учета провиса, для прямой проволоки, разность в температурных напряжениях для данного случая составила бы $216,2\text{ МПа}$, т.е. была бы в 2,3 раза большей).

5). Минимальные напряжения в струне будут при $+59,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (с учетом подвижной нагрузки): $\sigma_{\min} = +1058,88\text{ МПа}$.

6.2.2. Корпус рельса

1). Максимальные напряжения от подвижной нагрузки (с учетом ветра) на верхней грани корпуса рельса (в головке рельса) находятся в пределах от $\sigma_e = +20,16\text{ МПа}$ (растяжение при $T = +59,4\text{ }^{\circ}\text{C}$) до $\sigma_e = +194,16\text{ МПа}$ (растяжение при $T = -26,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и отсутствии подвижной нагрузки).

2). Максимальные напряжения на нижней грани корпуса рельса без подвижной нагрузки находятся в пределах от $\sigma_{\epsilon} = +61,16$ МПа (растяжение при $T = +59,4$ °С) до $\sigma_{\epsilon} = +294$ МПа (растяжение при $T = -26,4$ °С).

6.2.3. Усилия

Максимальные усилия в однорельсовой струнной путевой структуре и анкерных опорах моноСТЮ:

1) продольное усилие (вдоль оси X):

- в струне: $N_c^x = +217,1$ тс (растяжение) у анкерной опоры при $T = 26,4$ °С и нахождении в центре пролета длиной 2000 м груженого моно-юнибуса весом 5 тс;
- в корпусе рельса: $N_{к.р.}^x = +29,7$ тс (растяжение) при $T = -26,4$ °С и нахождении в центре пролета моно-юнибуса;
- в рельсе-струне (суммарное усилие): $N_{р.с.} = +246,8$ тс при $T = -26,4$ °С и нахождении в центре пролета моно-юнибуса;
- на верху анкерной опоры (горизонтальное усилие): $N_{а.о.} = +244,7$ тс при $T = -26,4$ °С и нахождении в центре пролета моно-юнибуса; это создает в фундаменте анкерной опоры опрокидывающий момент, например, при высоте опоры в 60 м, равный 14.680 т×м;
- боковая расчетная ветровая нагрузка, действующая на путевую структуру и подвижной состав, за счет дополнительного выгиба рельса-струны в сторону, увеличивает усилия и, соответственно, напряжения в струне и корпусе рельса. Например, при температуре $+20$ °С это увеличение для струны составит: $\Delta N_c = 206,95 - 203,76 = 3,19$ тс (увеличение на 1,6%), для корпуса рельса: $\Delta N_{к.р.} = 23,77 - 13,14 - 3,47 = 7,16$ тс (увеличение на 43%);

2) поперечное усилие:

- вдоль оси Z: в корпусе рельса $Q_{к.р.}^z = \pm 3$ тс у анкерных опор и $\pm 0,5$ тс под колесом моно-юнибуса при $T = -26,4$ °С (возникает под действием веса моно-юнибуса; вес рельса-струны на пролете, равный 46,4 тс, воспринимается струной и через специальные седла передается в виде вертикальной нагрузки на анкерные опоры);
- вдоль оси Y: в корпусе рельса $Q_{к.р.}^y = \pm 1,1$ тс у анкерных опор и $\pm 0,2$ тс под колесом моно-юнибуса при $T = -26,4$ °С (возникает под действием расчетной боковой ветровой нагрузки на подвижной состав);

3) изгибающий момент:

- вокруг оси Y: в корпусе рельса-струны $M_{к.п.}^Y = 0,2 \text{ т}\times\text{м}$ под колесом моно-юнибуса при $T = +59,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (возникает под действием веса подвижной нагрузки);
- вокруг оси Z: в корпусе рельса-струны $M_{к.п.}^Z = 0,05 \text{ т}\times\text{м}$ под колесом моно-юнибуса при $T = +59,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (возникает под действием расчетной боковой ветровой нагрузки на подвижной состав).

6.2.4. Перемещения

Максимальные поперечные перемещения рельса-струны в центре пролета однорельсовой путевой структуры моноСТЮ:

1) вертикальное перемещение (максимальный провис рельса-струны вдоль оси Z): $U_{п.с.}^Z = -68,0 \text{ м}$ при $T = +59,4 \text{ }^\circ\text{C}$ и нахождении в центре пролета длиной 2000 м груженого моно-юнибуса весом 5 тс (возникает под действием веса рельса-струны и подвижной нагрузки; без подвижной нагрузки, под действием только веса рельса-струны, провис при $T = +59,4 \text{ }^\circ\text{C}$ равен $-61,5 \text{ м}$);

2) горизонтальное перемещение (боковой выгиб рельса-струны вдоль оси Y): $\Delta_{п.с.}^Y = +23,3 \text{ м}$ при $T = +59,4 \text{ }^\circ\text{C}$ и нахождении в центре пролета длиной 2000 м груженого моно-юнибуса весом 5 тс (возникает под действием расчетной боковой ветровой нагрузки на рельс-струну и подвижной состав).

Минимальные поперечные перемещения рельса-струны:

1) вертикальное перемещение (минимальный провис рельса-струны вдоль оси Z): $U_{п.с.}^Z = -60,5 \text{ м}$ при $T = -26,4 \text{ }^\circ\text{C}$ и нахождении в центре пролета моно-юнибуса (возникает под действием веса рельса-струны и подвижной нагрузки; без подвижной нагрузки, под действием только веса рельса-струны, провис при $T = -26,4 \text{ }^\circ\text{C}$ равен $-54,0 \text{ м}$);

2) горизонтальное перемещение (боковой выгиб рельса-струны вдоль оси Y): $\Delta_{п.с.}^Y = +20,8 \text{ м}$ при $T = -26,4 \text{ }^\circ\text{C}$ и нахождении в центре пролета груженого моно-юнибуса (возникает под действием расчетной боковой ветровой нагрузки на рельс-струну и подвижной состав).

При воздействии расчетной боковой ветровой нагрузки за счет дополнительного выгиба рельса-струны в сторону, увеличиваются усилия натяжения в нем, что приводит к уменьшению вертикального провиса рельса-струны (по сравнению с состоянием без ветра):

- для рельса струны при отсутствии подвижного состава на пролете, например, при температуре +20 °С: $\delta = -55,5 - (-58,0 \text{ м}) = +2,5 \text{ м}$;
- для рельса-струны с модулем в центре пролета, например, при температуре -26,4 °С: $\delta = -58,6 - (-60,5) = 1,9 \text{ м}$.

6.2.5. Жесткость путевой структуры

Дополнительный провис рельса-струны под действием веса рельсового автомобиля (6,5 м) практически не зависит от температуры, поэтому и жесткость путевой структуры в штатном режиме эксплуатации будет неизменной и составит $f/L = 1/308$.

Траектория движения моно-юнибуса на пролете 2000 м представляет собой:

- в вертикальной плоскости соответствует цепной линии (линии провиса рельса-струны с учетом движущейся сосредоточенной нагрузки от веса модуля), имеющей радиусы кривизны 6—9 км (радиус зависит от температуры и места нахождения модуля);
- в горизонтальной плоскости соответствует параболе (линии изгиба рельса-струны от ветра с учетом сосредоточенной нагрузки от ветровой нагрузки на движущийся моно-юнибус), имеющей радиусы кривизны 20—25 км; при меньшей скорости ветра (до 100 км/час) радиусы кривизны параболы будут в пределах 40—50 км (радиус зависит не только от силы ветра, но и от температуры и места нахождения модуля);

Под колесом модуля, за счет изгиба рельса-струны, локальный радиус кривизны пути составляет примерно 100 м (длина локальной зоны с уменьшенным радиусом кривизны пути, движущейся вместе с модулем, составляет около 2 м, по 1 м в каждую сторону от колеса).

6.2.6. Контактные напряжения

Контактные напряжения в паре «стальное двухребордное колесо — стальная головка рельса-струны моноСТЮ» показаны в приложении 1 для случая, когда колесо моно-юнибуса находится в пролете, т.е. когда рельс-струна свободно подвешен по цепной линии (а не находится на упругом основании на шпалах, как железнодорожный рельс). Контактные напряжения определены при нагрузке на одно колесо 1,6 тс (для динамического коэффициента 1,28).

Пятно контакта имеет ярко выраженный линейный характер: ширина пятна (поперек рельса) — 51 мм, длина (вдоль рельса) — до 1 мм, усредненные контактные напряжения —

около 310 МПа.

Пиковые главные напряжения возникают в среднем слое головки рельса-струны по центру пятна контакта и достигают значений 749 МПа на участке длиной до 0,4 мм (вдоль рельса) и шириной до 47 мм (поперек рельса).

7. Выводы

1. Основным несущим элементом в путевой структуре СТЮ является струна (пучок из параллельных и предварительно напряженных высокопрочных проволок), поэтому надежность и долговечность струны будет определять и срок службы всей струнной транспортной системы. Запас прочности струны в штатном режиме эксплуатации (при воздействии подвижной нагрузки весом 5 тс и использовании высокопрочной проволоки диаметром 3 мм), при котором система за срок службы испытает десятки миллионов циклов нагружения, составит:

- относительно нормативного сопротивления растяжению струны:

$$K_1 = (1490 \text{ МПа} - 1241 \text{ МПа}) / 75,5 \text{ МПа} = 3,3;$$

- относительно предела прочности струны:

$$K_2 = (1895 \text{ МПа} - 1241 \text{ МПа}) / 75,5 \text{ МПа} = 8,7.$$

Таким образом, струна в СТЮ имеет довольно высокий запас прочности, который является избыточным, т.к. подобный запас прочности не используется даже в традиционных мостах. Поэтому при создании серийных трасс моноСТЮ целесообразно увеличить расчетные напряжения (по сравнению с требованиями к мостам согласно СНиП 2.05.03-84*), например, для высокопрочной гладкой проволоки В-II диаметром 3 мм до 1350—1400 МПа (в мостах допустимое значение — 1180 МПа). Это позволит уменьшить расход высокопрочной проволоки на 14—18% и, соответственно, снизить стоимость путевой структуры СТЮ. Даже при таких увеличенных, в сравнении с традиционными мостами, напряжениями в высокопрочной проволоке (струне), срок службы струны составит не менее 100 лет.

2. Долговечность любой конструкции при циклическом воздействии нагрузок определяется максимальным размахом напряжений, возникающим в каждом цикле. Для мостов он должен быть не более 160 МПа, что обеспечивает требуемую долговечность мостовых сооружений (50—100 лет) из условий усталостного разрушения конструкции.

В струне путевой структуры моноСТЮ максимальный размах напряжений в штатном режиме эксплуатации (движение модуля массой 5т) составляет 75,5 МПа, что ниже

допустимых значений более чем в 2 раза и, соответственно, обеспечит срок службы струны не менее 100 лет.

В корпусе рельса максимальный размах напряжений от подвижной нагрузки (без учета ветра, т.к. расчетная ветровая нагрузка, которая бывает крайне редко, один раз за весь срок службы системы, не влияет на усталостные явления в рельсе-струне) для штатного режима равен на нижней грани корпуса $\Delta\sigma_n = 100$ МПа. Таким образом, корпус рельса удовлетворяет требованиям к долговечности и обеспечит необходимый срок службы.

3. Максимальные напряжения растяжения возникают при $T = -26,4$ °С в одном из углов нижней грани корпуса рельса $\sigma_n = +294,16$ МПа (с учетом воздействия расчетной ветровой нагрузки). Эти напряжения могут быть снижены до 250 МПа при снижении усилий предварительного натяжения корпуса рельса при $T = +20$ °С с +111,16 МПа до +67 МПа. Поэтому для изготовления корпуса рельса-струны пригодны традиционные низколегированные марки сталей, используемые в традиционном мостостроении.

4. Общую деформативность рельса-струны под нагрузкой и, соответственно, жесткость и ровность струнной путевой структуры на пролете при движении подвижного состава определяет, в основном, усилие натяжения струн (при предварительном или температурном натяжении головки и корпуса рельса они также будут выполнять функции струн). Влияние изгибной жесткости корпуса рельса и находящегося в нем заполнителя на общий прогиб рельса-струны на пролете минимально, поэтому ею при инженерных расчетах можно пренебречь.

5. Ровность головки рельса под колесом транспортного средства зависит от натяжения в рельсе-струне (определяет деформативность пути на пролете) и изгибной жесткости стального корпуса рельса и наполнителя (определяет радиус изгиба рельса-струны под колесом модуля). Без учета жесткости рельса, поскольку проволоки струны практически не имеют изгибной жесткости, радиус кривизны (изгиба) пути под колесом был бы равен радиусу колеса, т.е. $R_{изг.} = 0,2$ м. Однако, благодаря изгибной жесткости рельса радиус его изгиба под колесом (около 100 м) увеличивается примерно на три порядка, поэтому движение подвижного состава будет плавным и безударным.

При скорости движения 130 км/час (36,1 м/с) колесо модуля и сам моно-юнибус будут испытывать вертикальные ускорения в центре пролета (при радиусе кривизны $R = 7,4$ км), равные $0,18$ м/с². Это настолько низкие ускорения для колеса (например, в поезде на магнитном подвесе «Трансрапид», Германия, даже в пассажирском салоне допустимы вертикальные ускорения до 3 м/с²), что по такому ровному пути юнибус сможет двигаться с

отключенной подвеской, т.к. вертикальные ускорения для пассажиров в этом случае будут значительно ниже допустимых.

6. В балочных мостах жесткость пролетного строения в целом (на пролете) и жесткость балки под колесом транспортного средства обеспечиваются за счет изгибной жесткости балки. В СТЮ эти функции разделены: жесткость на пролете путевой структуры обеспечивается за счет натяжения струны в рельсе, а жесткость рельса-струны под колесом транспортного средства обеспечивается за счет изгибной жесткости корпуса рельса и его заполнителя. Это позволило примерно в 1000 раз снизить высоту рельса-струны в моноСТЮ по сравнению с балкой (на том же пролете длиной 2000 м и для этой же расчетной нагрузки высота уменьшается с 40—60 м до 5—6 см) и, соответственно, уменьшить во столько же раз материалоемкость и стоимость* путевой структуры «второго уровня», например, в сравнении с монорельсовой дорогой. При этом напряжения в корпусе рельса, несмотря на значительный пролет, не возросли, т.к. изгибающий момент в струнном пролете незначительный (примерно 0,2 т×м) и концентрируется только под колесом модуля, не распространяясь на весь пролет (на расстоянии 1 м от колеса изгибающий момент практически равен нулю).

7. Наибольшее влияние на напряженно-деформированное состояние элементов струнной путевой структуры оказывает не повышение массы подвижной нагрузки, а напряжения, возникающие от предварительного натяжения рельса-струны на стадии монтажа. Поэтому и долговечность струнной путевой структуры будет определять не ее напряженно-деформированное состояние в штатном режиме эксплуатации, а другие внешние факторы и воздействия: защищенность струны и корпуса рельса от коррозии и износостойкость головки рельса под воздействием колеса моно-юнибуса.

8. Контактные напряжения в моноСТЮ в паре «стальное двухребордное колесо — стальная головка рельса-струны» будут в 3—3,5 раза ниже аналогичных напряжений в железнодорожных рельсах**, поэтому износ головки рельса-струны под колесом моно-юнибуса будет в несколько раз менее интенсивным, чем на традиционной железной дороге, а

* Например, построенный в Японии мост длиной 3 км с центральным пролетом около 2 км обошелся налогоплательщикам почти в 10 млрд. долл. США.

** Контактные напряжения в железнодорожных рельсах, возникающие при взаимодействии с колесной парой, достигают, с учетом касательных напряжений под воздействием сил тяги или торможения, значений 2300 МПа, что превышает предел текучести рельсовой стали, однако, в связи с тем, что контактная площадка зажата со всех сторон рельсовым металлом, разрушения рельса в этой зоне при однократном нагружении не происходит; при этом колесо опирается на рельс на площади около 1,5 см², имеющей форму эллипса, близкую к кругу [18].

срок службы, соответственно, — выше. Поскольку на железных дорогах Европы износ головки рельса (по вертикали) составляет около 1 мм на 100 млн. тонн поездной нагрузки, то при пропуске за весь срок службы по моноСТЮ 3 млрд. пассажиров (или около 500 млн. тонн подвижного состава) износ головки рельса-струны составит не более 3—4 мм. При этом износ, в отличие от износа железнодорожного рельса, будет равномерным и симметричным по ширине головки, поэтому, заложив на стадии строительства увеличенную на 5—6 мм толщину головки, можно будет гарантировать 100-летнюю эксплуатацию моноСТЮ (по износу рельса).

Повышению долговечности головки рельса-струны будет способствовать и та особенность моноСТЮ, что его путь расположен высоко над землей, поэтому рельс не будет подвержен абразивному износу (железнодорожные рельсы, а в особенности — трамвайные, расположены непосредственно у поверхности земли, что способствует попаданию на рабочую поверхность песка, пыли, грязи и др. и повышенному ее абразивному износу).

Свободно подвешенный бесстыковой рельс-струна, представляющий собой жесткую нить или разновидность упругой рессоры (масса рельса-струны — 23,2 кг/м — ничтожно мала по сравнению с массой модуля — 5000 кг), имеющий идеально ровную головку рельса, вытянутую под действием сил тяжести в плавную (с радиусами кривизны 6—9 тыс. м) цепную линию, практически исключит появление ударных нагрузок и вероятность разрушения рельса-струны из-за контактно-усталостных дефектов*.

9. Снижение длины пятна контакта (в направлении движения) с 12—15 мм (у железнодорожного колеса с конической поверхностью катания) до 0,8—1 мм (у колеса моно-юнибуса с цилиндрической поверхностью катания) снизит сопротивление качению колеса и по этому показателю подвижной состав моноСТЮ будет более экономичным, чем железнодорожный подвижной состав. Уменьшение длины пятна контакта в 10—15 раз в направлении движения подвижного состава значительно снизит уровень шумов, генерируемых в зоне качения колеса упругим сжатием материалов стального колеса и стальной головки рельса (в сравнении с трамваем и железной дорогой — в несколько раз), а снижение величины контактных напряжений уменьшит частоту генерируемых звуковых волн. Значительному снижению шумов в моноСТЮ, создаваемых при качении стального колеса, будет способствовать отсутствие температурных швов по всей длине трассы,

* Известно, что с увеличением его поперечного сечения традиционного железнодорожного рельса, т.е. с повышением его изгибной жесткости, возрастает доля выхода рельсов из строя по контактно-усталостным дефектам (рельсов Р50 — 75%, Р65 — 80%, Р75 — 94%) [18].

задемпфированность головки рельса относительно струны и промежуточных опор, а также наличие резиновой прослойки между бандажом и ступицей колеса моно-юнибуса.

10. Для увеличения срока службы головки рельса-струны (по износу) контактные напряжения в моноСТЮ, при необходимости, могут быть уменьшены в сравнении с приведенными данными в 3—5 раз, в том числе за счет:

- в 1,1—1,2 раза за счет увеличения диаметра колеса (с 400—500 мм до 550—600 мм);
- в 1,5 раза за счет увеличения ширины головки рельса-струны (плоскую часть головки можно увеличить с 40 мм до 60 мм);
- в 2—3 раза за счет перехода со стального бандажа колеса на бронзовый (бронзовый бандаж дополнительно уменьшит износ головки рельса-струны).

Уменьшению износа рельса в моноСТЮ способствует и тот факт, что при штатном режиме эксплуатации в пятне контакта отсутствуют сдвиговые усилия, обусловленные силами тяги (при разгоне) и тормозными силами (при торможении), т.к. и разгон (на спуске) и торможение (на подъеме) подвижного состава в моноСТЮ осуществляются в основном только силами гравитации (по своей сути наличие большого провиса рельса-струны на пролете заменяет и двигатель и тормозную систему модуля).

11. Для увеличения срока службы струнной путевой структуры (по коррозии) целесообразно использовать оцинкованную высокопрочную стальную проволоку для струны, а для корпуса и головки рельса использовать нержавеющие стали. Для полной защиты от коррозии наиболее ответственного элемента моноСТЮ — струны — целесообразно в качестве заполнителя использовать композиты на основе полимерных смол (эпоксидная и кремнийорганическая).

12. При расчетной боковой ветровой нагрузке (98 кгс/м^2 для модуля и 96 кгс/м^2 — рельса-струны, для чего скорость ветра должна превышать 250 км/час), путь моноСТЮ будет иметь двойную кривизну: около 7.000 м в вертикальной плоскости (под действием сил тяжести) и около 20.000 м — в горизонтальной (под действием боковой ветровой нагрузки). Благодаря большим радиусам кривизны пути движение моно-юнибуса будет комфортным даже при ураганном ветре, когда объявляют штормовое предупреждение и когда большинство других известных транспортных систем эксплуатироваться не будет.

В реальности максимальный боковой выгиб пути под действием ветра будет значительно меньшим, т.к. ветровая нагрузка будет в 3—4 раза ниже расчетной (до $20\text{—}30 \text{ кгс/м}^2$), коэффициент аэродинамического сопротивления рельса-струны будет не $C_w = 1,2$, как принято в расчетах, а не более $C_w = 0,5\text{—}0,6$ (а с аэродинамическими обтекателями,

которыми может быть снабжен рельс-струна — не более $C_w = 0,2$), поэтому ветер практически не отразится на функционировании моноСТЮ.

13. Почти десятикратный запас прочности струнной путевой структуры, исключаящий ее обрыв; двухребордные стальные ходовые колеса со страховочными роликами под рельсом-струной, исключаящие сход моно-юнибуса с пути; четыре мотор-колеса, когда при выходе из строя любого из них транспортная система будет функционировать; отсутствие помех на пути, в том числе в виде снега и льда; отсутствие перекрестков, пешеходных переходов, переездов, встречных полос движения и т.п., сделают моноСТЮ самым безопасным видом городского скоростного пассажирского транспорта.

14. Опрокидывающий момент, создаваемый в высотной анкерной опоре моноСТЮ натяжением рельса-струны, составляет 15—30 тыс. т×м (в зависимости от высоты опоры и количества путей). При совмещении анкерной опоры с высотным зданием (жилым, офисным, торговым и т.п.) вес здания будет компенсировать указанный опрокидывающий момент тем сильнее, чем тяжелее будет здание (его вес может достигать 10—20 тыс. тонн и более). Компенсация может быть достигнута за счет удлинения плиты фундамента здания на 1—2 м в сторону действия нагрузки, либо путем установки 10—15 дополнительных свай, например, свай РИТ (полученных по разрядно-импульсной технологии; например, одна висячая свая РИТ длиной 20—25 м и диаметром 300 мм имеет несущую способность по грунту до 300 тс — см. рис. 13).

15. Трасса моноСТЮ может эксплуатироваться в г. Ставрополе в штатном режиме независимо от погоды, температуры воздуха и ветра, а также при любых, самых неблагоприятных их сочетаниях в течение 100 лет. При этом напряженно-деформированное состояние путевой структуры и анкерных опор будет в пределах допустимых значений, определяемых мостовыми нормативами РФ, ЕС и США.

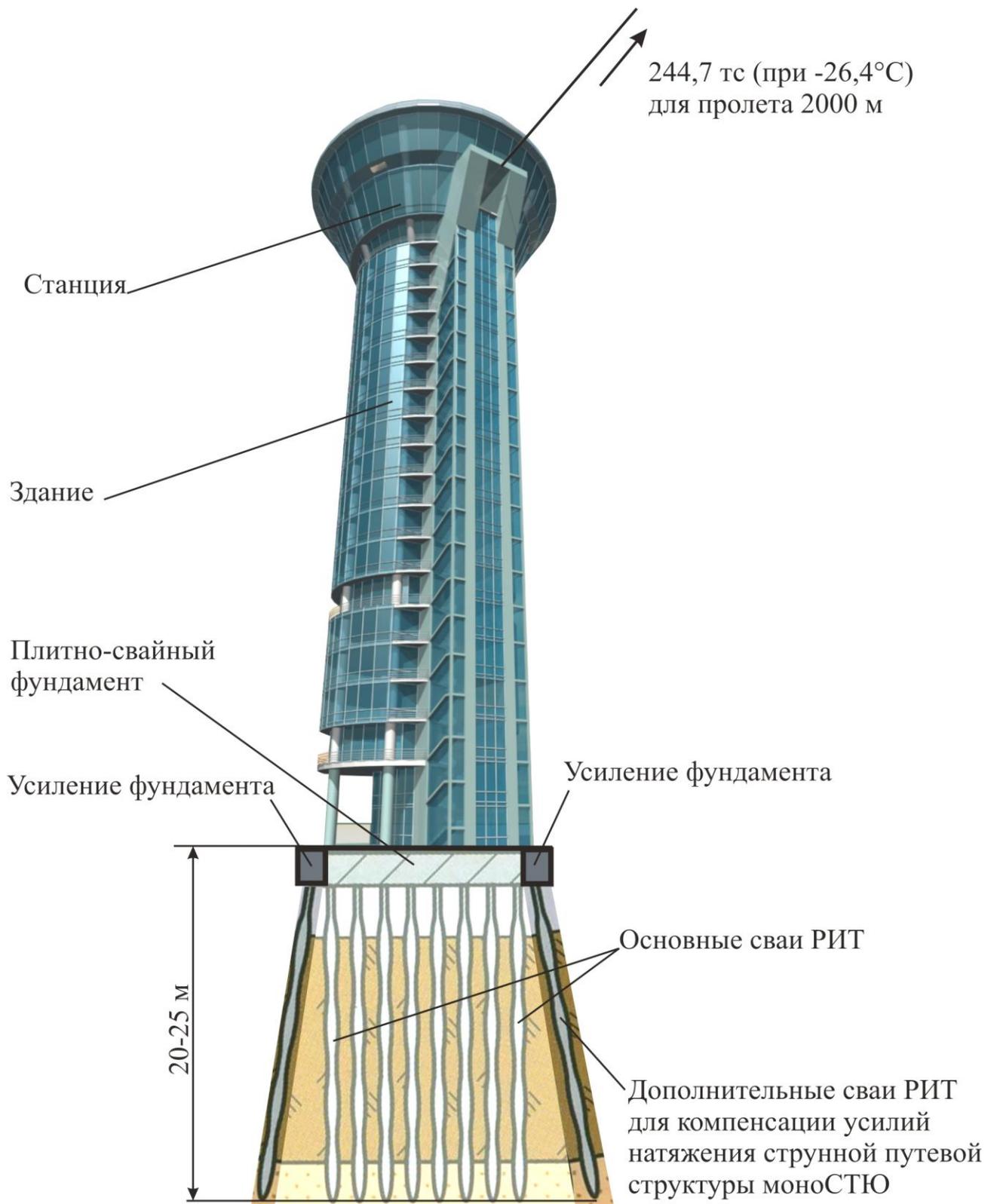


Рис. 13. Общий вид анкерной опоры моноСТЮ и ее фундамента, совмещенных с высотным зданием

8. Нормативная и справочная литература

1. СНиП 23-01-99 «Строительная климатология».
2. СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия».
3. СНиП 2.05.03-84* «Мосты и трубы».
4. СНиП II-23-81* «Стальные конструкции».
5. СНиП 2.03.11-85 «Защита строительных конструкций от коррозии».
6. Мосты и трубы. Проектирование, строительство и приемка в эксплуатацию. 2-я редакция. М.: Госстрой России, 2001
7. Юницкий А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в космосе. — Гомель: Инфотрибо, 1995. — 337 с.: ил.
8. ENV 1993-1 EUROCODE 3: Desing of Мосты и трубы. Проектирование, строительство и приемка в эксплуатацию. 2-я редакция. М.: Госстрой России, 2001steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings (Проектирование стальных конструкций. Общие правила и правила для строений.)
9. ENV 1992-2 EUROCODE 3: Desing of steel structures. Part 2: Steel Bridges (Проектирование стальных конструкций. Часть 2. Стальные мосты.)
10. AASHTO LRFD Bridge Design Specification, Published by American Association of State Highway and Transportation Officials, First Edition, 1996 (Нормы США по проектирования автодорожных мостов)
11. prEN 1993-1-11: Design of structures with tension components made of steel, 3 September 2002. (пред-Евро Нормы - Проектирование конструкций с растянутыми элементами, выполненными из стали).
12. Юницкий А.Э.Струнная транспортная система (варианты), способ изготовления и монтажа пролетного отрезка струнной рельсовой нити (3 изобретения). Евразийский патент №005017, Кл. Е 01 В 25/24, 2003.
13. Юницкий А.Э. Отчет по проекту Программы ООН по населенным пунктам (ООН-ХАБИТАТ) № FS-RUS-02-S03 «Обеспечение устойчивого развития населенных пунктов и защита городской окружающей среды с использованием струнной транспортной системы». – М.: Федеральное агентство по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству (Госстрой России), 2004. – 155 с.
14. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. – Киев: издательство «Факт», 2005. – 340 с.

15. Барабаш М.С., Гензерский Ю.В., Марченко Д.В., Титок В.П. ЛИРА 9.2. Примеры расчета и проектирования. Учебное пособие. – Киев: издательство «Факт», 2005. – 140 с.
16. Городецкий А.С., Шмуклер В.С., Бондарев А.В. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций. Учебное пособие. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 889 с.
17. ЛИРА Версия 9.0. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций. Справочно-теоретическое пособие под ред. А.С.Городецкого. – Москва – Киев: издательство «Факт», 2003. – 464 с.
18. Железнодорожный транспорт: Энциклопедия / Гл. редактор Н.С.Конарев. – М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия», 1994. – 559 с.

**Результаты расчета путевой структуры моноСТЮ
для условий города Ставрополя**

Сочетание 1 (при $T = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

**Результаты расчета путевой структуры моноСТЮ
для условий города Ставрополя**

Сочетание 2 (при $T = +59,4$ °C)

**Результаты расчета путевой структуры моноСТЮ
для условий города Ставрополя**

Сочетание 3 (при $T = -26,4$ °C)

**Результаты расчета путевой структуры моноСТЮ
для условий города Ставрополя**

**Изополя напряжений в корпусе рельса моноСТЮ
от усилий предварительного натяжения,
ветровых, температурных и вертикальных нагрузок**

**Результаты расчета путевой структуры моноСТЮ
для условий города Ставрополя**

Контактные напряжения в паре «колесо — рельс-струна»

Возможности программного комплекса «Лира-Windows»

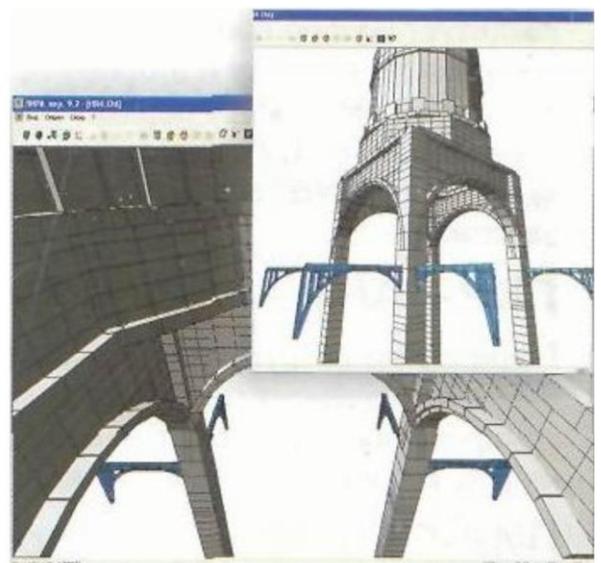
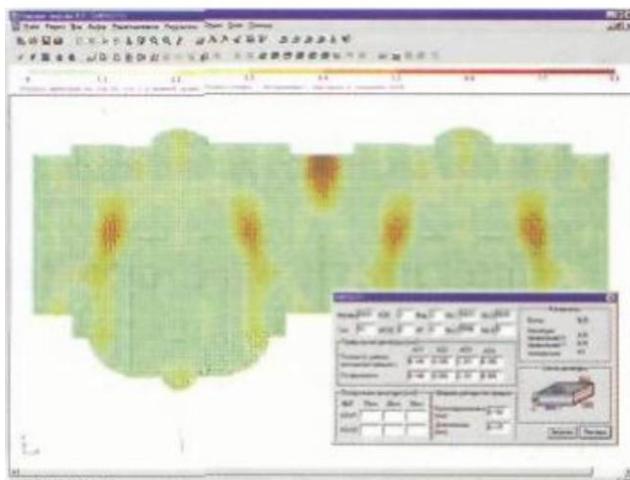
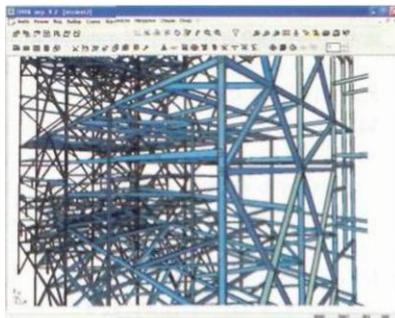
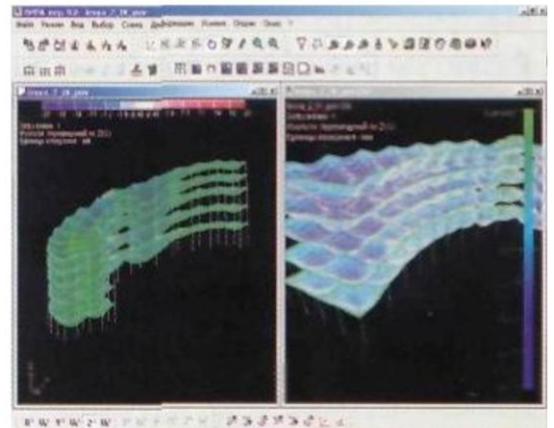
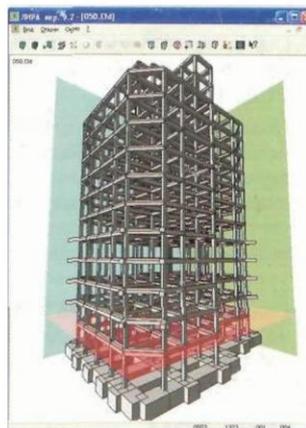
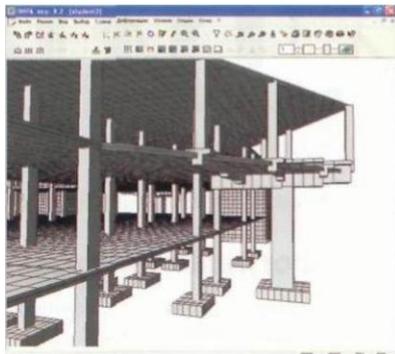
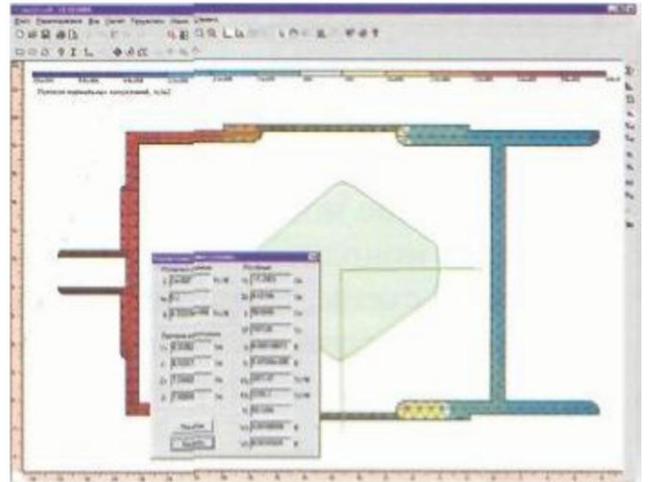
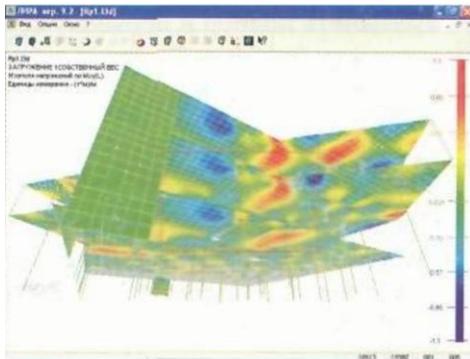


ЛИРА™

Сертификат соответствия № РОСС УА.СП11.Н00080
Лицензия УК №01296

Программный комплекс для
расчета и проектирования строительных
и машиностроительных конструкций
различного назначения

Реализация современных концепций автоматизированного проектирования в среде Windows 98/ME/2000/XP



Вычисление эквивалентных напряжений

В таблице приведены характеристики известных реализованных теорий прочности.

Таблица

№ п/п	Наименование теории (критерий прочности)	Формула	Геометрическая интерпретация	Примечания
1	Наибольших главных напряжений	$\sigma_3 = \sigma_1$ $\sigma_2 = \sigma_3$	Куб с центром, смещенным в сторону гидростатического сжатия	
2	Наибольших главных деформаций	$\sigma_3 = \sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)$ $\sigma_2 = \sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)$	Равносторонний косоугольный параллелепипед, равно наклоненный к осям координат	
3	Наибольших касательных напряжений	$\sigma_3 = \sigma_1 - \sigma_3$	Правильная шестигранная призма, равно наклоненная к осям координат	
4	Энергетическая (Губер-Генки-Мизес)	$\sigma_3 = \sigma_i$	Круговой цилиндр, равно наклоненный к осям координат	
5	О. Мора	$\sigma_3 = \sigma_1 - \chi \cdot \sigma_3$ $\sigma_2 = \lambda \cdot \sigma_1 - \sigma_3$	Шестигранная равно наклоненная к осям пирамида	Однородный материал с разными пределами сопротивления
6	Ягна-Бужинского	$\sigma_3 = 3 \left(-\chi \sigma_0 + \frac{1}{\sigma_0} \cdot [\sigma_i^2 - \phi \psi - 3] \cdot [\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1] \right)$	Равно наклоненная к осям поверхность вращения	—"

№ п/п	Наименование теории (критерий прочности)	Формула	Геометрическая интерпретация	Примечания
7	Баландина	$\sigma_3 = 3 \left(-\chi \bar{\sigma}_0 + \sigma_i^2 / \sigma_0^+ \right)$	Параболоид вращения, равно наклоненный к осям координат	
8	Миролюбова	$\sigma_3 = 3 \left(-\chi \bar{\sigma}_0 + \frac{1}{2} \left(+\chi \bar{\sigma}_i \right) \right)$	Круговой конус	
9	Друккера-Прагера	$\sigma_3 = \left(\frac{1+\chi}{1+\sqrt{\chi}} \right)^2 \cdot \sigma_i + 6 \cdot \sigma_0 \frac{\sqrt{\chi}-\chi}{1+\sqrt{\chi}} - 9 \cdot \frac{\sigma_0^2}{\sigma_0^+} \cdot \left(\frac{1-\sqrt{\chi}}{1+\sqrt{\chi}} \right)^2$	Двуполостной параболоид вращения, равно наклоненный к осям координат	Рекомендуется для пластичных материалов при $\chi = 0.3$
10	Волкова	$\sigma_3 = 2 / \chi_s [c \cdot \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} - 2\nu \left(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1 \right) + \beta \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \lambda_k \cdot \sigma_0 \right) + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}]$ Не исследован		
11	Писаренко - Лебедева - 1	$\sigma_3 = \chi \sigma_i + \left(-\chi \right) \sigma_1$	Коническая поверхность	Однородный материал
12	Писаренко - Лебедева - 2	$\sigma_3 = \chi \sigma_i + \left(-\chi \right) \sigma_1 \cdot A \left(\frac{1-3\sigma_0}{\sigma_i} \right)$	Равно наклоненная к осям поверхность с криволинейным треугольником в октаэдрическом сечении	Неоднородный материал $A = 0.7 \div 0.8$

σ_0 — гидростатическое давление
 σ_i — интенсивность напряжений
 σ_0^+ — предельное напряжение при одноосном растяжении
 σ_0^- — то же, при сжатии
 τ_0 — то же, при чистом сдвиге (кручении)
 $\chi = \sigma_0^+ / \sigma_0^-$
 $\lambda = 1 / \sigma_0^-$
 $\varphi = \sigma_0^+ / \tau_0$
 $\psi = \sigma_0^- / \tau_0$

Результаты расчета

Результаты, оформленные таблично, маркируются следующим образом. В шапке указывается номер элемента. Для стержней указывается номер сечения и номер точки. Для плит и оболочек указывается еще и тип поверхности по отношению к направлению оси $Z1$, для идентификации которого используются следующие обозначения:

E — нижняя поверхность;

I — верхняя поверхность;

M — срединная поверхность.

Для идентификации напряжений используются следующие обозначения:

$N1, N2, N3$ — главные напряжения;

$TETA, PSI, FI$ — углы Эйлера;

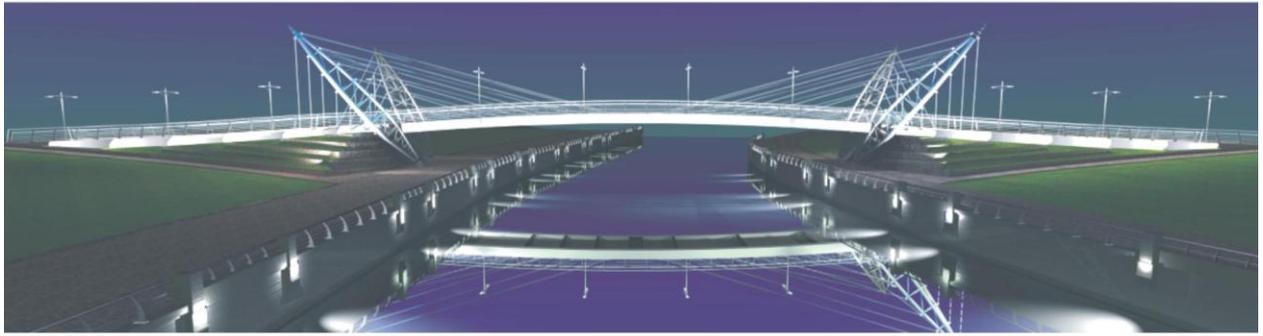
MU — коэффициент Лоде — Надаи;

NE_{xx} — эквивалентное напряжение (приведенное к эквивалентному растяжению) по теории прочности с номером xx ;

NS_{xx} — эквивалентное напряжение (приведенное к эквивалентному сжатию) по теории прочности с номером xx .

Для плоскостных и объемных элементов в системе ЛИР-ВИЗОР отображаются мозаики и изополя главных и эквивалентных напряжений, а также направления главных площадок.

**Сведения о проектной организации,
привлекаемой ООО «СТЮ» к расчетам струнной путевой структуры
(запроектированные и построенные объекты, выборочно)**



Республика Беларусь,
220092, г. Минск,
ул. Бельского, 15, к. 231/1
E-mail: Monorakurs@bip.by
тел./факс (+37517)201 42 78
Тел. (+37517)207 17 76



Жилые дома по ул. Белорусской в г. Минске



Жилой комплекс в квартале ул. Некрасова-Богдановича в г. Минске.



Жилой дом в г. Светлогорске Калининградской обл. РФ.



Жилой комплекс "БАТУС" в г. Батуми



Республика Беларусь,
220092, г. Минск,
ул. Бельского, 15, к. 231/1
E-mail: Monorakurs@bip.by
тел./факс (+37517)201 42 78
Тел. (+37517)207 17 78

НАУЧНО-ПРОЕКТНОЕ
ПРЕДПРИЯТИЕ