



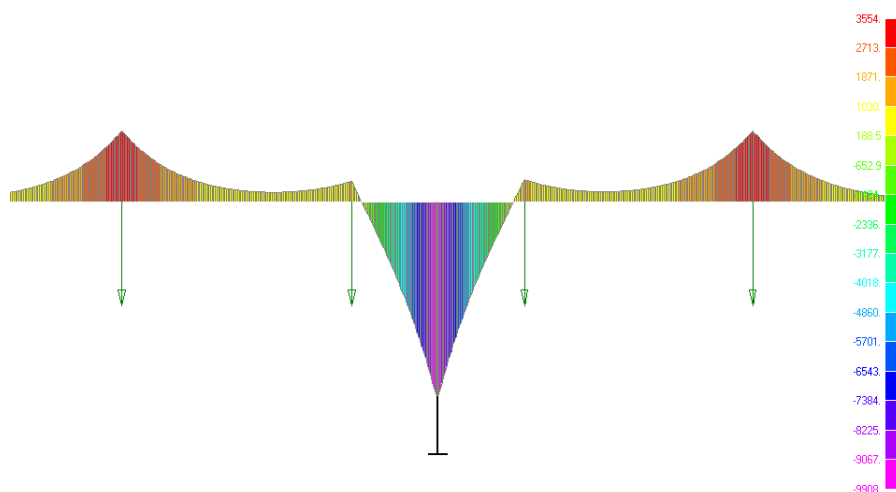
115487, Москва, ул. Нагатинская, 18/29  
тел./факс: (495) 680-52-53, (499) 616-15-48  
e-mail: info@unitsky.ru  
http: //www.unitsky.ru  
skype: Anatoly Unitsky

## Разработка технических условий (ТУ) на рельсо-струнную путевую структуру

Государственный контракт № 7у на разработку проекта «Генеральная транспортная стратегия применения и создания трасс струнного транспорта Юницкого (СТЮ) в Ханты-Мансийском автономном округе — Югре» от 31 мая 2007 г.

Этап 2. Проведение предпроектных расчетно-конструкторских работ

Подэтап 2.2. Разработка технических условий (ТУ)  
на рельсо-струнную путевую структуру



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


\_\_\_\_\_ А.Э. Юницкий  
«01» августа 2007 г.

## Список основных исполнителей


Ответственный исполнитель,  
главный инженер ООО «СТЮ»

  
А.В. Пархоменко

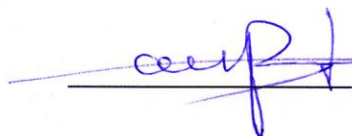
Исполнительный директор ООО «СТЮ»

  
Д.А. Юницкий


Заместитель генерального  
конструктора по подвижному составу,  
главный дизайнер ООО «СТЮ»

  
В.С. Жаркевич

Начальник конструкторского бюро  
«Юнибус» ООО «СТЮ»

  
В.В. Даньщиков

Первый заместитель начальника  
конструкторского бюро «Юнибус»  
ООО «СТЮ»

  
В.Ю. Акулов

Заместитель начальника конструкторского  
бюро «Юнибус» ООО «СТЮ» по  
производству и испытаниям

  
В.П. Николаев

Заместитель начальника конструкторского  
бюро «Юнибус» ООО «СТЮ» по  
перспективному проектированию

  
А.И. Лапцевич

Ведущий конструктор конструкторского  
бюро «Юнибус» ООО «СТЮ»

  
В.В. Добровольский

Ведущий конструктор конструкторского  
бюро «Юнибус» ООО «СТЮ»

  
А.Н. Синевич

## Содержание

Резюме .....	6
1. Технические условия на рельсо-струнную путевую структуру .....	10
1.1. Введение .....	10
1.2. Конструктивные особенности рельсо-струнной путевой структуры СТЮ .....	11
1.2.1. Общие сведения .....	11
1.2.2. Принципиальная схема СТЮ .....	12
1.2.3. Рельсо-струнная путевая структура .....	16
1.2.4. Статика путевой структуры .....	20
1.2.5. Динамика путевой структуры .....	22
1.3. Расчетные положения .....	26
1.3.1. Нагрузки и воздействия .....	26
1.3.2. Определение усилий в элементах путевой структуры .....	39
1.3.3. Проверка прочности и выносливости .....	41
1.4. Материалы и изделия. Защита от коррозии .....	47
1.5. Эскизное проектирование .....	48
2. Пример расчета рельсо-струнной путевой структуры высокоскоростной трассы СТЮ «Ханты-Мансийск — Сургут» .....	50
2.1. Цель работы и постановка задачи .....	50
2.2. Исходные данные о материалах .....	56
2.2.1. Материал струн .....	56
2.2.2. Материал головки рельса .....	57
2.2.3. Материал корпуса рельса .....	57
2.2.4. Материал заполнителя .....	58
2.3. Расчетная модель и этапы расчета .....	58
2.4. Расчетное исследование жесткости рельсо-струнной путевой структуры .....	59



2.4.1. Расчет вертикальных деформаций от собственного веса путевой структуры и при нагружении вертикальной силой от юнибуса .....	59
2.4.2. Расчет угла поворота и горизонтального перемещения рельса-струны при действии горизонтальных скручивающих сил .....	62
2.5. Расчет напряженного состояния струн. Расчет прочности струн .....	65
2.5.1. Расчет изменения усилий в струне (высокопрочной проволоке) от температурного перепада (от +55 °С летом до –55 °С зимой) .....	65
2.5.2. Расчет изменений напряжений в струнах от собственного веса рельсо-струнной путевой структуры и от проезда юнибуса .....	67
2.5.3. Расчет прочности струн .....	68
2.6. Расчет напряженного состояния головки рельса и корпуса рельса. Расчет прочности и оценка выносливости головки рельса и корпуса рельса .....	72
2.6.1. Расчет изменений напряжений растяжения (сжатия) от температурного перепада (от +55 °С летом до –55 °С зимой) в головке рельса и корпусе рельса .....	72
2.6.2. Расчет напряжений изгиба от собственного веса рельсо-струнной путевой структуры и при нагружении вертикальной силой от юнибуса .....	73
2.6.3. Расчет прочности и оценка выносливости рельса-струны .....	75
2.7. Расчет горизонтальных нагрузок на промежуточные опоры при торможении потока юнибусов .....	82
2.8. Расчет противовыгиба корпуса рельса-струны для повышения ровности пути .....	84
2.8.1. Жесткая заделка рельса на опоре .....	84
2.8.2. Шарнирное крепление рельса на опоре .....	92
2.8.3. Анализ ровности пути на пролете при движении юнибуса .....	99



2.9. Расчет контактных напряжений и оценка долговечности головки рельса-струны и сопротивления качению колеса юнибуса .....	99
3. Графические результаты расчетов .....	102
3.1. Схемы нагружения рельса-струны нагрузкой от подвижного состава .....	102
3.2. Эпюры продольных сил в струне .....	105
3.2.1. Эпюры продольных сил в струне, вызванных собственным весом струны и весом рельса-струны .....	105
3.2.2. Эпюры продольных сил в струне, вызванных весом рельса-струны и весом двух юнибусов .....	107
3.3. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в рельсо-струне .....	109
3.3.1. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в рельсо-струне, вызванных собственным весом .....	109
3.3.2. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в рельсо-струне от собственного веса путевой структуры и двух юнибусов .....	113
3.3.3. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в рельсо-струне от собственного веса путевой структуры и одного юнибуса .....	121
3.4. Анализ наиболее опасных положений юнибусов на пролете из условия обеспечения прочности рельса-струны на промежуточной опоре .....	129
3.4.1. Для жесткой заделки корпуса рельса-струны на промежуточной опоре .....	129
3.4.2. Для шарнирного закрепления корпуса рельса на промежуточной опоре .....	131
3.5. Результаты расчетов прочности и выносливости головки рельса, корпуса рельса и струны .....	133
4. Выводы .....	138
5. Нормативная и справочная литература .....	143

## Резюме

В генеральной транспортной стратегии применения и создания трасс струнного транспорта Юницкого (СТЮ) в Ханты-Мансийском автономном округе — Югре наиболее сложными и ответственными техническими решениями, с инженерной точки зрения, станут высокоскоростные трассы СТЮ (скорость 200 км/ч и выше), в частности «Ханты-Мансийск — Сургут». А наиболее ответственным элементом, определяющим все основные технико-экономические показатели такой транспортной системы «второго уровня», станет рельс-струна. Только от него, в частности, зависит надежность, долговечность и безопасность системы, ровность пути и комфортность движения высокоскоростных рельсовых автомобилей — юнибусов, технологичность монтажа и стоимость строительства и др.

Рельсы-струны, установленные пролетами по 30—40 м на промежуточных опорах и закрепленные в анкерных опорах, отстоящих друг от друга на расстоянии 1—5 км и более, отнесены к разновидности висячего моста, в котором растянутый элемент (струна) размещен внутри балки жесткости (корпуса рельса) и омоноличен с ней специальным бетоном. Это позволило определить в технических условиях (ТУ) методику статических и динамических расчетов рельсо-струнных пролетов в условиях ХМАО — Югры, максимальные и минимальные расчетные температуры (соответственно +55 °С и –55 °С), расчетные ветровые нагрузки на рельс-струну (74,5 кгс/м<sup>2</sup>) и юнибус (41 кгс/м<sup>2</sup>), а также — другие нагрузки и воздействия на путевую структуру и промежуточные опоры и их опасные сочетания.

В качестве примера для расчета в ТУ взята рельсо-струнная путевая структура высокоскоростной трассы «Ханты-Мансийск — Сургут» колеей 1,5 м. Для этого разработана конструкция рельса-струны, удовлетворяющая требованиям ТУ, и выполнен комплексный расчет его напряженно-деформированного состояния, в том числе — определены наиболее опасные нагружения и максимальные напряжения конструкции при различных расчетных температурах: максимальной (+55 °С), минимальной (–55 °С) и температуре сборки (0 °С). Например, определено, что максимальный изгибающий момент и, соответственно, максимальные напряжения в

головке и корпусе рельса будут в сечении над опорой в момент нахождения колеса юнибуса на расстоянии 2,25 м от опоры (для одиночного юнибуса), либо когда сцепка из двух юнибусов будет находиться точно над опорой.

Размах напряжений в струне при максимальном расчетном нагружении (проезд двух юнибусов в сцепке) составит величину менее 0,1% от величины напряжений в струне (предварительных и температурных). Это означает, что нагрузка на струну — статическая и поэтому циклической составляющей можно пренебречь. Поэтому по любым существующим сегодня в России и за рубежом методикам расчета струна СТЮ обеспечит срок службы по выносливости не менее 100 лет.

Расчеты также показали, что максимальные горизонтальные тормозные усилия от потока юнибусов, передаваемые от рельсов-струн на верх промежуточных опор, невелики (около 50 кгс), поэтому опоры могут быть выполнены легкими, ажурными, без мощного фундамента и, соответственно, — недорогими.

Основную вертикальную жесткость под расчетной нагрузкой рельсо-струнного пролетного строения в СТЮ определяет не рельс (корпус и головка рельса, а также бетонный заполнитель), а — струна: соответственно 5—9% и 91—95%. Это отвечает названию транспортной системы — струнная (а не рельсовая). Соответственно, требуемая ровность пути на пролете (относительная неровность — не более 1/1500, или абсолютная — менее 20 мм на пролете 30 м) обеспечивается, в основном, также струной, а не рельсом. В свою очередь это обеспечит комфортные условия высокоскоростного движения не только для пассажиров (вертикальные ускорения в салоне юнибуса — до 0,5 м/с<sup>2</sup>), но и для колеса — максимальные вертикальные ускорения в опорной части обода колеса будут до 10 м/с<sup>2</sup>, а ступицы — до 2 м/с<sup>2</sup>.

В качестве элемента струны рекомендована высокопрочная оцинкованная стальная проволока диаметром 3 мм производства Волгоградского завода «ВолгоМетиз» с пределом текучести 19.690 кгс/см<sup>2</sup>. Высокая прочность проволок позволяет увеличить допустимые напряжения в струне до 15.750 кгс/см<sup>2</sup>. При этом, благодаря иной схеме работы струны в СТЮ в сравнении с напрягаемой арматурой в мостах, несмотря на увеличенные допустимые напряжения, запас прочности (примерно в 1.000 раз) струны по воздействию на нее подвижной нагрузки, будет беспрецедентно более высоким, нежели у несущей арматуры в любой другой известной строительной конструкции самого высокого уровня ответственности.

Струна может быть разрушена расчетной подвижной нагрузкой лишь при температуре  $-211\text{ }^{\circ}\text{C}$  (эта температура значительно ниже температуры жидкого азота), поэтому СТЮ может быть рекомендован к строительству в самых суровых природно-климатических условиях, в том числе на Крайнем Севере.

Отказ от железнодорожных стандартов — колесных пар, реборд на колесе, конуса на опорной части колеса и цилиндрической опорной поверхности головки рельса — снизил контактные напряжения в СТЮ в паре «цилиндрическое колесо — плоская головка рельса» по сравнению с железной дорогой в 10—15 раз. Это повысит в несколько раз долговечность рельса, уменьшит его износы, снизит шумы при качении колеса, улучшит его сцепление с рельсом, а также существенно снизит затраты энергии и мощность привода на преодоление сопротивления качению колес высокоскоростного подвижного состава.

В результате расчетов была уточнена конструкция рельса-струны: струна набрана из 220 высокопрочных проволок диаметром 3 мм, суммарное усилие предварительного натяжения которых 221,8 тс (при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). С учетом же преднапряжения головки и корпуса рельса суммарное усилие натяжения рельса-струны составит 259,0 тс. При этом поперечные размеры рельса-струны составят: ширина 100 мм, высота 223 мм, а его погонная масса будет равна 71,8 кг/м, из них: корпус рельса (с головкой) — 28,6 кг/м, струна — 12,2 кг/м, бетонный заполнитель корпуса — 30,8 кг/м, крепление струны к корпусу рельса — 0,2 кг/м, причем на сталь придется чуть больше половины массы — 41 кг/м.

Металлоемкость рельса-струны высокоскоростного СТЮ столь низка, что, например, из материала одного железнодорожного рельса Р-75 протяженностью 1 км можно построить однопутную рельсо-струнную путевую структуру такой же протяженности. При этом оставшихся 18 кг/м металла (около 25 кг/м стали на железной дороге дополнительно уходит на крепление одного рельса к шпалам — на подкладки, болты, пружины и т.д.) будет достаточно, чтобы поставить на этом же километре 33 стальные опоры СТЮ высотой 3—5 м. Поэтому при одинаковой исходной цене одних и тех же марок сталей, в серийном производстве и при том же уровне механизации, который достигнут сегодня в железнодорожном строительстве, строительство высокоскоростного СТЮ обойдется, в одних и тех же природно-климатических условиях, по меньшей мере в два раза дешевле, чем обычной (а не





высокоскоростной, которая в 20—30 раз дороже) железной дороги (ведь железной дороге еще необходимы шпалы, щебеночная и песчаная подушки, земляная насыпь, мосты, путепроводы, водопропускные трубы и т.п., в том числе — в 50—100 раз больший землеотвод).

# **1. Технические условия на рельсо-струнную путевую структуру**

## **1.1. Введение**

Настоящие Технические Условия (далее ТУ) разработаны на проектирование рельсо-струнной путевой структуры «Струнного транспорта Юницкого» (СТЮ) для условий строительства в ХМАО—Югре. СТЮ предназначено для движения специальных высокоскоростных «рельсовых автомобилей» — юнибусов.

Конструкция путевой структуры СТЮ является разновидностью висячих и вантовых мостов с «провисающей» предварительно напряженной вантой, защитой в балке жесткости, которая одновременно является ездовым полотном для юнибусов.

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

Настоящие Технические Условия построены на основании действующих отечественных норм на проектирование мостов, исходных данных Заказчика и данных изготовителей рельсовых автомобилей. 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, а дополняют друг друга.

Основное назначение настоящих Технических Условий состоит в определении:

- типа и значения постоянных и временных нагрузок, действующих на конструкции рельсо-струнной путевой структуры; расчетных сочетаний нагрузок;
- значений коэффициентов надежности по нагрузкам;

- значений динамических коэффициентов от воздействий транспортных модулей;
- перечня требований к составлению расчетных схем трассы, которые обеспечивают необходимую точность расчетов;
- предельных усилий в элементах путевой структуры при расчетах по первому предельному состоянию с указанием алгоритмов проверок прочности и устойчивости;
- предельных значений размаха напряжений в путевых элементах трассы при расчетах по второму предельному состоянию с указанием алгоритмов оценок выносливости и предельных прогибов;
- значений предельных неровностей пути, которые допустимы при комфортной езде с заданными скоростями, особенно с высокими скоростями — 200 км/ч и более.

## **1.2. Конструктивные особенности рельсо-струнной путевой структуры СТЮ**

### **1.2.1. Общие сведения**

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

Висячие мосты (рис. 1.1) являются системами распорными и потому более легкими, чем мосты балочные. Основные стержни висячих ферм работают только на растяжение, всегда устойчивы, что, наряду с применением высокопрочных материалов и отсутствием между ними связей, позволяет придавать им минимальные поперечные сечения.

Поэтому малый вес 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 — малая жесткость висячего моста. Кроме этого висячие мосты весьма восприимчивы к колебаниям температуры и к опасности резонанса под подвижными и ветровыми нагрузками с потерей аэродинамической устойчивости.

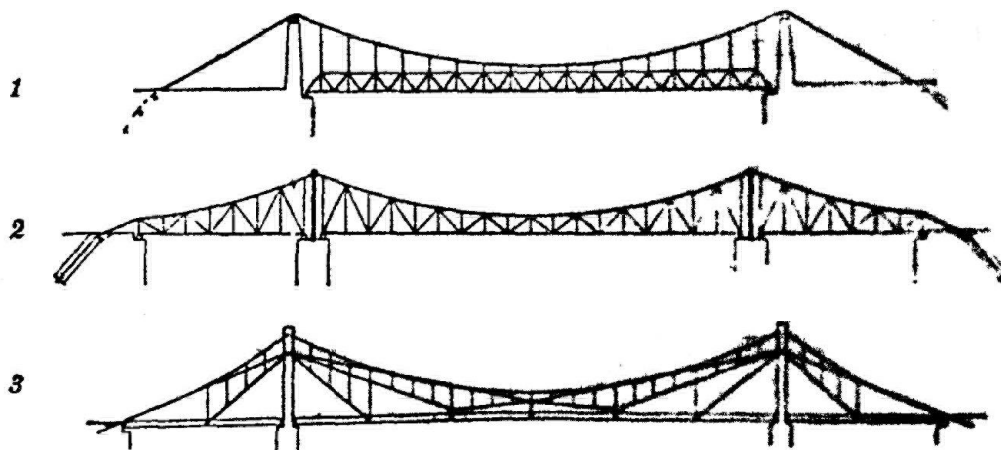


Рис. 1.1. Наиболее распространенные типы висячих мостов:

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

Рельсо-струнная путевая структура СТЮ включает в свою конструкцию те же основные элементы, что и висячие мосты: предварительно напряженный растянутый элемент — канат (струна), балка жесткости (головка рельса с корпусом), подвески (специальный наполнитель внутри корпуса рельса), пилоны (промежуточные поддерживающие опоры) и анкерные устройства (анкерные опоры). Обладая всеми основными преимуществами висячих мостов, рельсо-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.

### 1.2.2. Принципиальная схема СТЮ

На рис. 1.2 представлена линейная схема СТЮ в различных географических условиях: на равнинной местности, в горах и при пересечении рек или озер. Она содержит рельсо-струнную путевую структуру и три типа опор (высота 1—50 м и более): поддерживающие (через 30—40 м), тормозные (через 0,5—1 км, только на наклонных участках грузонапряженных участков трассы) 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.

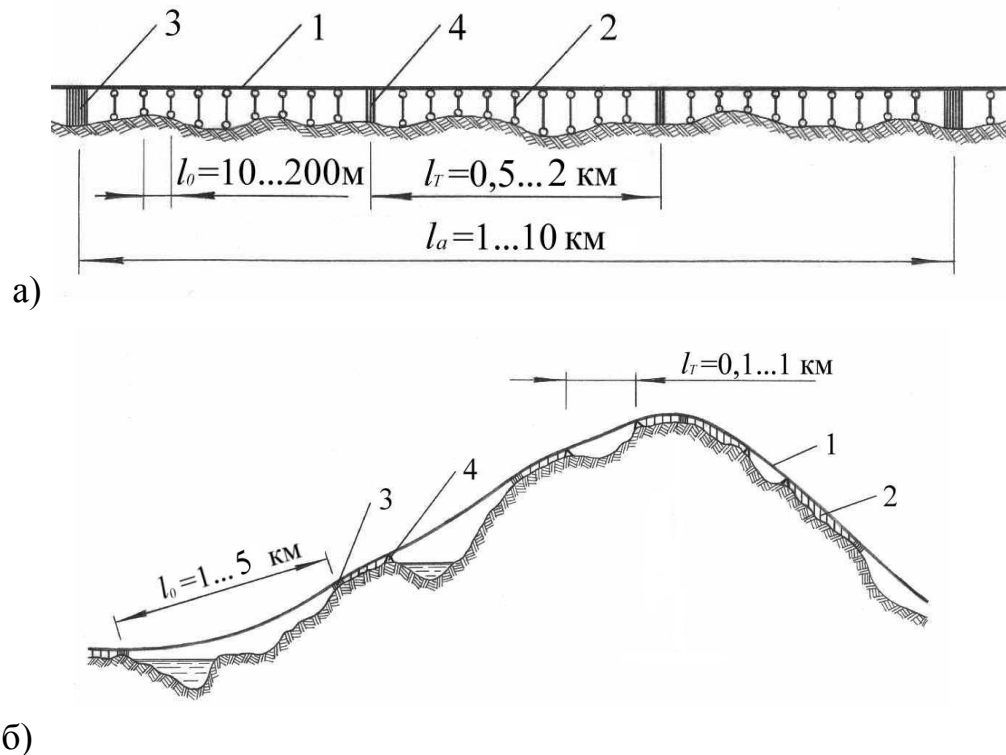


Рис. 1.2. Линейная схема СТЮ:

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

На основных участках СТЮ, т.е. в промежутке между поддерживающими опорами 2 (рис. 1.3), путевая структура не имеет прогибов, т.к. статический прогиб  $u_c$  струны 3 является монтажным и размещен внутри конструкции рельса.

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

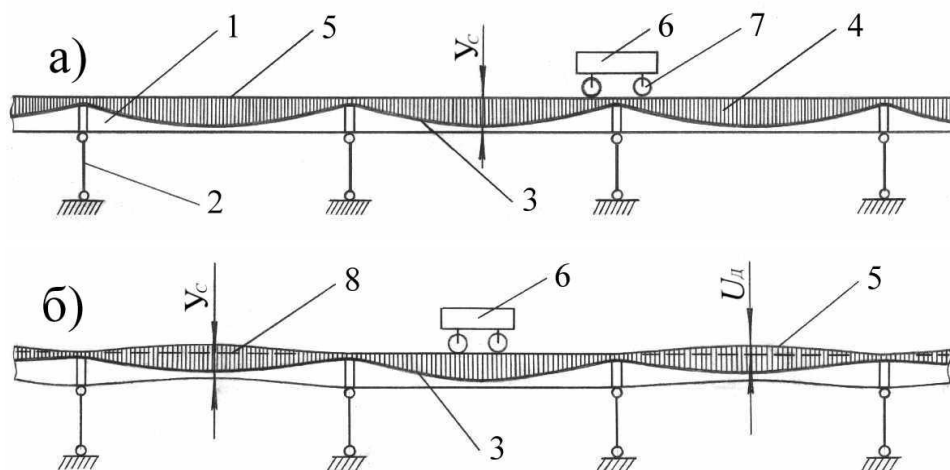


Рис. 1.3. Схема продольного сечения путевой структуры СТЮ:

- а) — путевая структура без прогибов; б) — с антипрогибом; 1 — путевая структура; 2 — промежуточная опора; 3 — струна; 4 — прокладка переменной высоты; 5 — головка рельса; 6 — транспортный модуль; 7 — колесо; 8 — прямая линия.

Для повышения ровности пути под подвижной нагрузкой, что особенно важно при высоких скоростях движения, путевая структура СТЮ имеет на пролете строительный подъем — антипрогиб (рис. 1.3.б), равный величине прогиба пролета под нагрузкой (строительный подъем является зеркальным отображением прогиба пролета при движении юнибуса с расчетной скоростью движения). Таким образом можно достичь высокой ровности пути, что обеспечит достижение скоростей в 300—350 км/ч, а в перспективе — 500 км/ч, и, соответственно, — комфортное движение пассажиров в юнибусе при этих скоростях.

На рис. 1.4 представлены зависимости максимальных статических прогибов струны от погонной (линейной) массы  $p_l$  путевой структуры ( $y_c^{max}$ ), а на рис. 1.5 — максимальных прогибов путевой структуры ( $u_c^{max}$ ) под действием одиночной нагрузки  $P$  (нагрузка и прогиб — в середине пролета) для различных значений усилий  $T_c$  натяжения струны и усилий  $T_0$  натяжений путевой структуры (кроме струн, в ней могут быть натянуты головка рельса, корпус и другие конструктивные элементы). Расчеты проводились по формулам, представленным в главе 4 монографии [7]. Из графиков на рис. 1.4 следует, что значения  $y_c^{max} \leq 10$  см достижимы при  $l_0 = 25—100$  м,  $T_c = 250—1000$  тс и  $\rho_l = 50—150$  кг/м. Такой прогиб может быть легко размещен внутри путевой структуры, если высота поперечного сечения рельса будет в пределах 20—25 см.

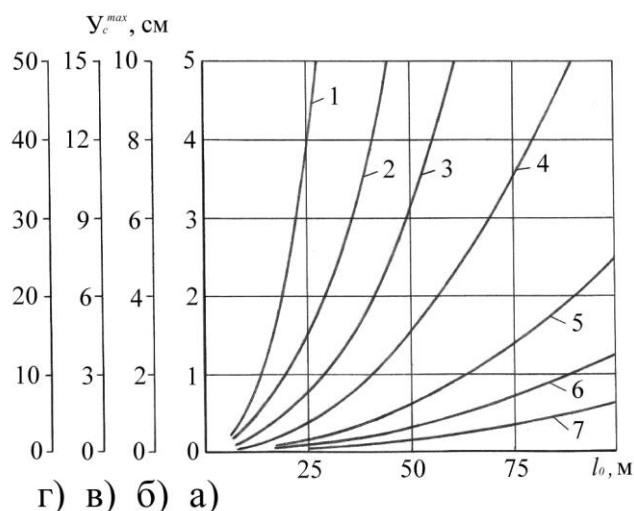


Рис. 1.4. Максимальный прогиб струны под действием веса путевой структуры:

а) для  $p_l=50$  кг/м; б) 100 кг/м; в) 150 кг/м; г) 500 кг/м;

1—7 соответственно при  $T_c=100, 250, 500, 1000, 2500, 5000$  и  $10000$  тс.

Анализ зависимостей на рис. 1.5 показывает, что значения  $u_c^{max} \leq 5$  см достижимы для  $P=1—6$  тс при  $l_0=20—50$  м и  $T_0=100—500$  тс. При этом относительная величина прогиба (отнесенная к длине пролета) будет  $u_c^{max}/l_0 < 1/800$ . Поэтому под воздействием полезной нагрузки рельсо-струнная путевая структура СТЮ может иметь более высокую относительную жесткость, чем существующие автодорожные и железнодорожные мосты и путепроводы, относительный прогиб пролетных строений которых при расчетных нагрузках имеет более высокое значение.

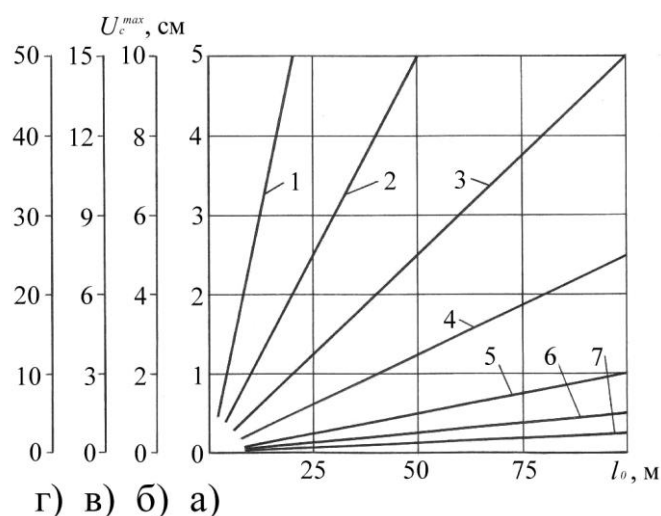


Рис. 1.5. Максимальный прогиб путевой структуры под действием одиночной нагрузки:

а) для  $P=1$  тс; б) 2 тс; в) 3 тс; г) 10 тс; 1—7 соответственно при  $T_0=100, 250, 500, 1000, 2500, 5000, 10000$  тс.

### 1.2.3. Рельсо-струнная путевая структура

Рельсо-струнная путевая структура может быть набрана из различного количества рельсов-струн (рис. 1.6): от одного до четырех. При этом рельсы в пространстве могут размещаться в горизонтальной или вертикальной плоскости, либо образовывать в поперечном сечении треугольник или четырехугольник. Наиболее целесообразна традиционная схема типа железнодорожной — два рельса, размещенных в горизонтальной плоскости (варианты 4—8 на рис. 1.6).

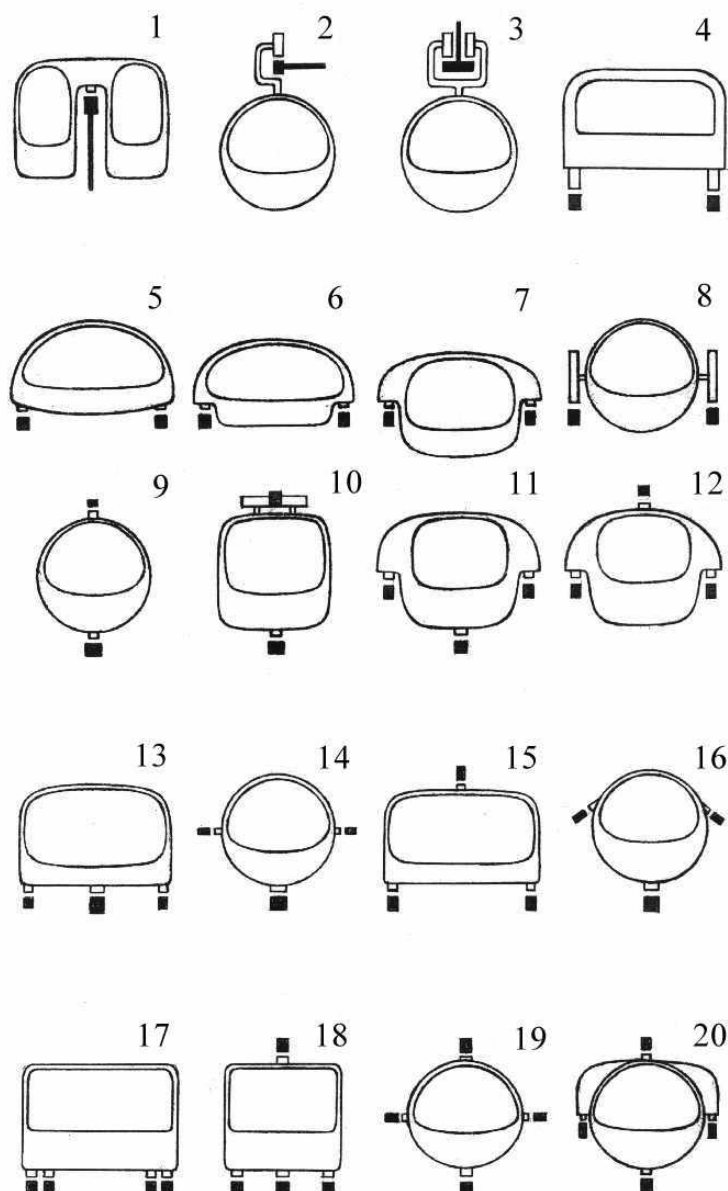


Рис. 1.6. Схемы размещения рельсов:

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



Стабильность размера колеи трассы на всем протяжении обеспечивают поперечные планки (рис. 1.7), установленные через 10—50 м (в зависимости от усилия натяжения струн, жесткости рельсов, массы транспортного модуля и других факторов). При пролетах до 25—35 м поперечные планки могут не устраиваться, т.к. их функции выполняют промежуточные опоры.

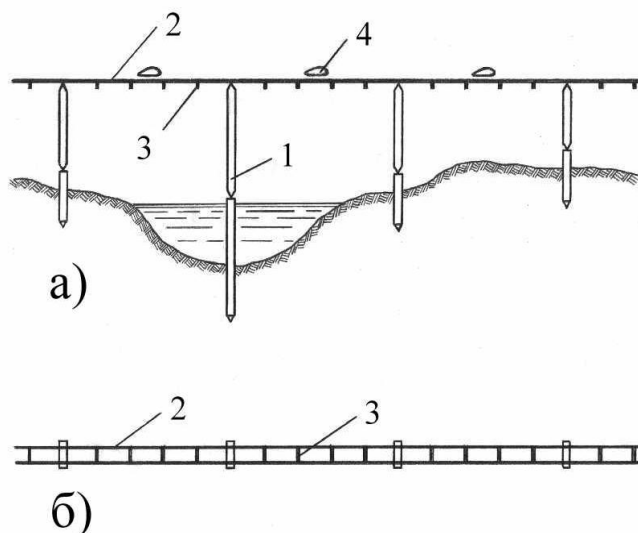


Рис. 1.7. Схема размещения поперечных планок по длине трассы:  
а) вид сбоку на СТЮ; б) вид сверху; 1 — поддерживающая опора; 2 — рельс;  
3 — поперечная планка; 4 — транспортный модуль

Основным элементом путевой структуры СТЮ является рельс-струна, различные варианты исполнения которого показаны схематично на рис. 1.8.

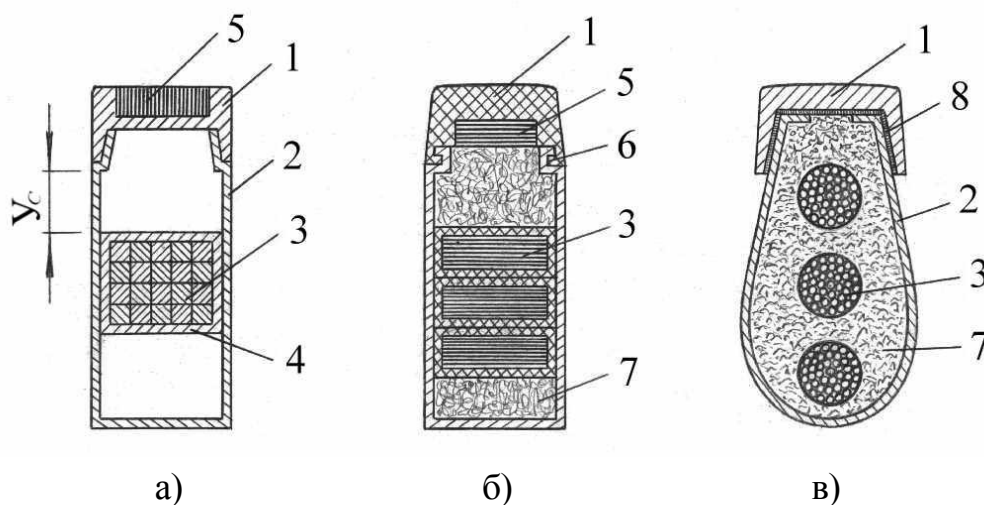


Рис. 1.8. Варианты конструкции рельса-струны:  
а) со струной из проволок; б) из лент; в) со струной-канатом; 1 — головка рельса;  
2 — корпус; 3 — струна; 4 — защитная оболочка струны; 5 — дополнительная струна;  
6 — крепление; 7 — наполнитель; 8 — клеевой композит.

Струна 3 (рис. 1.8.) состоит из отдельных предварительно натянутых элементов (проволок, нитей, прутков, витых или невитых канатов, лент или полос), размещенных параллельно друг другу вдоль струны. Элементы струны могут быть заключены в защитную оболочку 4. Защитная оболочка, как и корпус 2, может выполнять функции электроизоляции, теплоизоляции и демпфирования для гашения колебаний, передаваемых струне при движении транспортного модуля. Проволоки или ленты струны могут быть изготовлены из любого материала, прочность на растяжение которого превышает  $5000 \text{ кгс/см}^2$ : из высокопрочных сталей, алюминиевых или титановых сплавов, стекловолокна, углепластика, из волокон — борных, карбида кремния, оксида алюминия, углеродных, арамидных и других высокопрочных полимерных, керамических или композиционных материалов.

Натянутые элементы в струне омоноличены связующим, например, на основе цемента, эпоксидной смолы, специальным клеем, или могут быть плотно упакованы и разделены жидкой, консистентной или твердой смазкой. Наличие смазочной среды повысит долговечность струны, ее коррозионную устойчивость, а в случае обрыва отдельных элементов — проволок, лент — в струне (например, из-за дефектов изготовления) позволит им сократиться по длине без нарушения напряженно-деформированного состояния остальных напряженных элементов рельса. Благодаря такой особенности и тому, что напряжения в струне практически одинаковы при наличии или отсутствии подвижной нагрузки на пролете (напряжения в струне при воздействии подвижной нагрузки увеличиваются лишь на 0,1—0,5%), струна может быть предварительно натянута до значений, близких к пределу прочности материала  $[T_c]$ :

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

где:

$\Delta T_t$  — изменение натяжения в струне, обусловленное ее 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  $1200 \text{ кгс/см}^2$  при  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и

снижению летом (на  $1200 \text{ кгс/см}^2$  при  $+50 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Поэтому максимальные значения прогиба струны  $U_c$  в течение года из-за изменения значения  $T_c$  будут колебаться в пределах 10—20% от первоначального значения (от  $-5\dots-10\%$  до  $+5\dots+10\%$  от проектного положения — см. рис. 1.3). Это не отразится существенно на функционировании СТЮ (на ровности головки рельса в вертикальной плоскости), т.к. дополнительная выпуклость (зимой) и провис (летом) путевой структуры составят величину порядка  $10^{-4} l_0$

Технологические этапы одного из возможных вариантов строительства трассы СТЮ показаны на рис. 1.9.

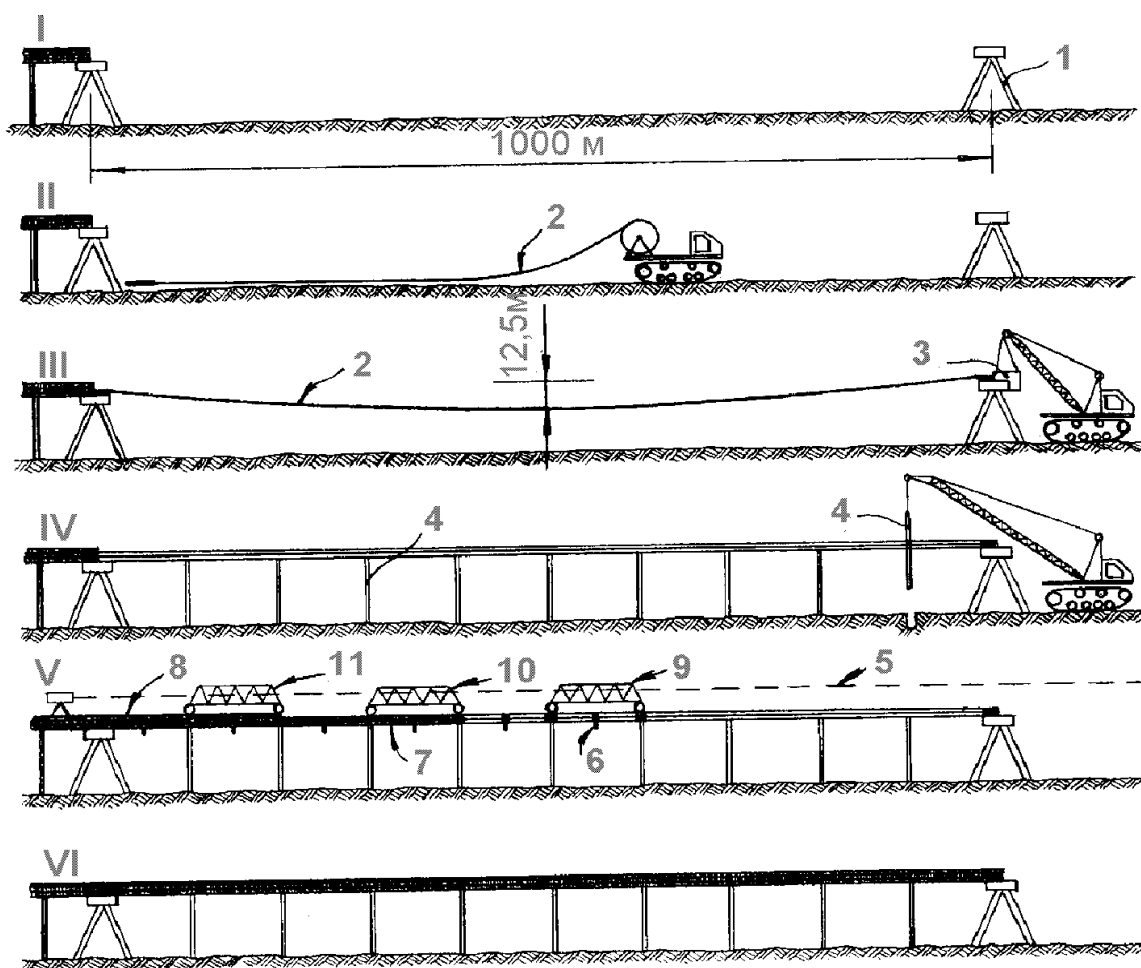


Рис. 1.9. Технология строительства трассы СТЮ (вариант):

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

### 1.2.4. 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 рельса-струны — основного элемента СТЮ — с учетом его весомости, упругой растяжимости, переменности натяжения вдоль пролета, в том числе при сезонных изменениях температуры и т.д.

Считаются известными:  $l_0$  — длина пролета АВ, рис. 1.10.а;  $E$  — модуль упругости;  $F$  — площадь сечения;  $Q$  — вес. Определяются: форма струны  $y(z)$ ; стрелка прогиба  $f$ ; длина растянутой струны  $L$ ; растяжение  $\Delta L$ ; натяжение  $T(z)$ , в том числе на опорах  $T_0$ ; угол наклона  $\alpha(z)$  и на опорах  $\alpha_0$ .

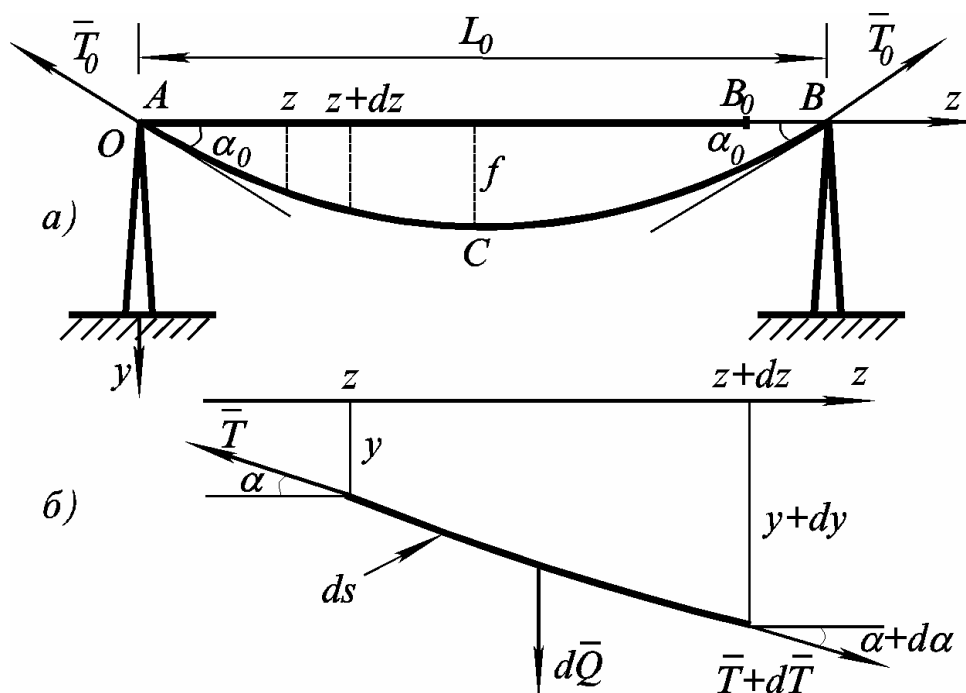


Рис. 1.10. Струнное пролетное строение:  
 а) пролет в целом; б) элемент струны.

Уравнения равновесия элемента струны имеют вид, рис. 1.10.б:

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

Интегрирование дает следующие зависимости:

$$T = T_0 \cos \alpha_0 / \cos \alpha; \quad \sin \alpha \left( \int_0^z e^{-bz} - e^{bz} \right) \left( \int_0^z e^{-bz} + e^{bz} \right) \quad (1.1)$$

где:

$$a = \left( + \sin \alpha_0 \right) \left( - \sin \alpha_0 \right); \quad b = Q / L T_0 \cos \alpha_0 = \ln a / l_0 .$$

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

$$y \left( \int_0^z e^{bz} - 1 \right) \left( \int_0^z e^{-bz} - 1 \right) 2b \sqrt{a}; \quad f = l_0 \left( - \cos \alpha_0 \right) \ln a \cdot \cos \alpha_0; \quad (1.2)$$

$$L = l_0 \left( - 1 \right) \ln a \cdot \sqrt{a}; \quad \Delta L = L T_0 \cos \alpha_0 / EF; \quad (1.3)$$

$$T \left( \int_0^z e^{-bz} + e^{bz} \right) 2 \sqrt{a}; \quad T_0 = Q / 2 \sin \alpha_0 . \quad (1.4)$$

Формой равновесия тяжелой упругой струны является цепная линия  $y \left( \int_0^z \right)$  (1.2).

Растяжение  $\Delta L$  находится с помощью закона Гука; как следствие получаем определяющее статику струны соотношение:

$$2 \operatorname{tg} \alpha_0 - \left( - \varepsilon_0 \right) \ln a = Q / EF . \quad (1.5)$$

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

$$\varepsilon_0 = T_H / EF; \quad L_H = l_0 / \left( + \varepsilon_0 \right); \quad \Delta L_H = \varepsilon_0 L_H . \quad (1.6)$$

Подставляя  $\varepsilon_0$  в (1.5), получаем уравнение для  $\alpha_0$  и из (1.1)—(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 (1.6) записаны для температуры  $t_0$  в период монтажа СТЮ; для других значений  $t$  имеем:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \tau(-\varepsilon_0) - t_0, \quad t_1 \leq t \leq t_2, \quad (1.7)$$

где:

$\tau$  — коэффициент температурного расширения струны;

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

Подставляя  $\varepsilon$  вместо  $\varepsilon_0$  в (1.5), получаем уравнение для определения  $\alpha_0$ ; из соотношений (1.1)—(1.4) находим соответствующие значения остальных параметров.

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

### 1.2.5. 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 рельсо-струнная путевая структура 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. 1.11. ТМ представляет собой тележку (рис. 1.12), 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.

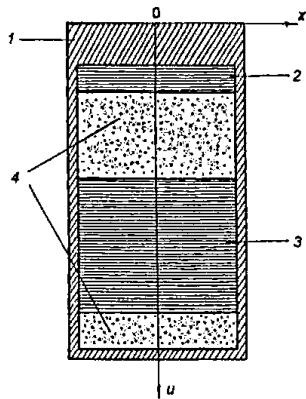


Рис. 1.11. Расчетная схема СТЮ:

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

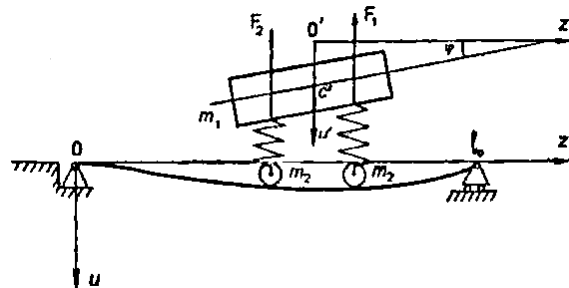


Рис. 1.12. Схема движения ТМ

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

$$\sigma = E \left( \varepsilon + \mu' \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right), \quad (1.8)$$

где:

$\sigma$  и  $\varepsilon$  — нормальное напряжение и относительная деформация;

$E$  и  $\mu'$  — 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:

$$E \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left[ I \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left( u + \mu' \frac{\partial u}{\partial t} \right) \right] + \rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = f(\xi, t) + R_1 + R_2 + \rho_0 g. \quad (1.9)$$

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 струн имеют вид:

$$\rho_i \frac{\partial^2 y_i}{\partial t^2} - T_i \frac{\partial^2 y_i}{\partial z^2} = f_i \left( \overline{t} \right) - R_i \pm R_{21} + \rho_i g, \quad i = 1, 2, \quad (1.10)$$

где:

$y_i$  — прогибы струн,

$\rho_i$  — их линейные плотности,

$T_i$  — натяжения,

$f_i$  — погонные внешние нагрузки,

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

Уравнения движения ТМ имеют вид:

$$m_1 \frac{d^2 U}{dt^2} = -F_1 - F_2 + m_1 g; \quad I_{c'} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = m_1 \overline{F_1} + m_2 \overline{F_2}, \quad (1.11)$$

где:

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

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

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

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

$$a = \sqrt{\left[ T_1 + T_2 \right] \left[ \rho_1 + \rho_2 \right]}. \quad (1.12)$$

1. Случай  $V > a$ : при скорости  $V$  движения юнибусов, близкой к  $a$ , т.е. к скорости «звука» в рельсе-струне, максимальный динамический прогиб рельса  $u^{\max}$  в



два раза превышает максимальный статический прогиб; при увеличении  $V$  максимальный динамический прогиб убывает.

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

3. Случай  $0 < V \leq \frac{1}{3}a$ , т.е. при относительно невысоких скоростях движения: динамический прогиб минимален и отличается от статического прогиба не более чем на 10—15%.

Из приведенных данных можно сделать важный вывод: для повышения ровности пути при высоких скоростях движения (200 км/ч и выше) необходимо таким образом проектировать рельсо-струнную путевую структуру, в которой скорость «звука» превышала бы скорость движения модулей в 2—3 раза и более. Такую конструкцию можно рассматривать в статике, т.к. динамические характеристики будут отличаться от статических только на 5—15%. В такой конструкции за весь срок эксплуатации не возникнут резонансные явления, т.к. резонансы могут возникнуть только при скоростях движения юнибусов 700—800 км/ч и более.

Определен также динамический прогиб при движении потока нагрузок по жесткому СТЮ с разрезным корпусом над опорами и при движении по бесконечному сплошному СТЮ (корпус и головка рельса сварены в одну длинную плеть, от одной анкерной опоры до другой анкерной опоры). Проведен анализ времени затухания длинных и коротких волн после схода ТМ с пролета; получены условия резонанса при движении потока ТМ со сплошным и разрезным корпусом, когда возмущения от очередного ТМ попадают в унисон с предыдущими. Кроме отношения скоростей  $V$  и  $a$  большую роль здесь играет отношение расстояний  $l_0$  и  $l'$  — между соседними ТМ. Исследовано большое число частных случаев; основные результаты:

- при  $l' > l_0$  и определенных значениях физико-механических, конструктивных, демпфирующих параметров резонанс не возникает, поскольку колебания пролета гаснут за 0,1—0,5 с до прихода очередного ТМ;
- при движении одиночного ТМ по разрезному корпусу колебания быстро затухают (менее чем за 1 с), при этом  $u^{\max}$  для  $l_0 = 30$  м не превышает 1,5 см;

- при движении потока ТМ по неразрезному корпусу  $u^{\max}$  находится в пределах 0,7—1,3 см; относительный прогиб уменьшается с увеличением пролета  $l_0$  ;
- при движении потока ТМ по сплошному корпусу  $u^{\max}$  меньше, чем в предыдущем случае; отсутствуют также угловые точки над опорами.

Использование метода конечных элементов (МКЭ) показало хорошие результаты в задачах статики и динамики СТЮ с учетом геометрической нелинейности, т.е. допущении конечности динамических возмущений (см. пример расчета далее в п. 2). Результаты расчета конкретных схем рельсо-струнной путевой структуры в диапазоне скоростей ТМ до 500 км/ч [7] подтверждают вывод о допустимости получаемых статических и динамических отклонений и быстрой затухаемости последних.

### 1.3. Расчетные положения

#### 1.3.1. Нагрузки и воздействия

Собственный вес конструкций пролетного строения определяется на основании конструктивных решений, переданных в качестве исходных данных для проектирования и в дальнейшем уточняется на основании чертежей КД, если расхождение превысит 5%. Коэффициенты надежности по нагрузке приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Коэффициенты надежности по нагрузке

№	Источник	Вид нагружения	Коэффициент надежности $\gamma_f$	
			max	min
1	СНиП 2.05.03-84 Таблица 8*	Собственный вес: - стальных несущих и вспомогательных конструкций - 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 высокоскоростном СТЮ колеи 1,5 м представляет собой специальный двухосный рельсовый автомобиль (автомобиль на стальных колесах, названный юнибус), схема нагрузок которого показана на рис. 1.13.

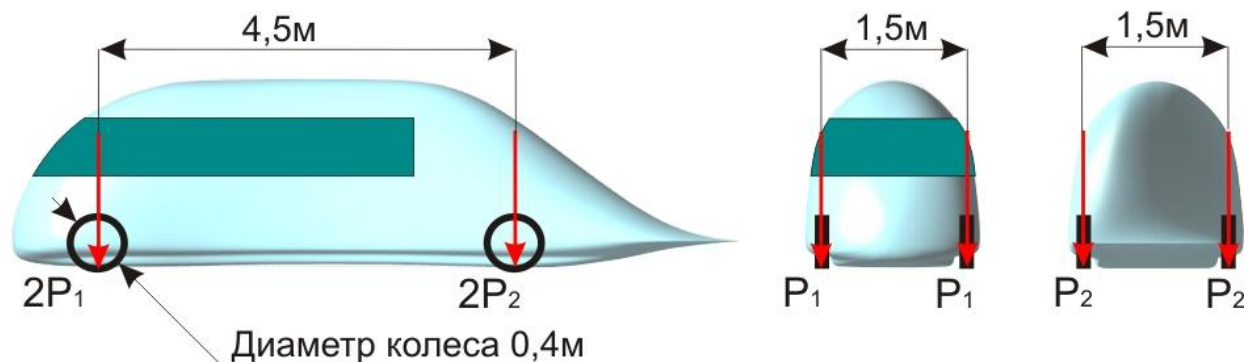


Рис. 1.13. Схема нагрузок высокоскоростного юнибуса колеи 1,5 м

В табл. 1.2 представлены расчетные нагрузки от давления колес заполненного пассажирами и пустого юнибуса при определении усилий в элементах путевой структуры.

Таблица 1.2

Расчетные нагрузки от давления колес заполненного и пустого высокоскоростного юнибуса колеи 1,5 м

Расчеты пролетного строения					$\lambda = 90.00$		
№ поз	Нагрузки	Ед. изм.	Норм.	коэффициент		Расчетные нагрузки	
				$1+\mu$	$\gamma_i$	прочность	выносливость
Груженный рельсовый автомобиль							
1	Давление колеса передней оси $P_1$	тс	0,54	1,15	1,183	0,625	0,639
2	Давление колеса задней оси $P_2$	тс	0,54	1,15	1,183	0,625	0,639
Пустой рельсовый автомобиль							
3	Давление колеса передней оси $P_1$	тс	0,40	1,15	1,183	0,460	—
4	Давление колеса задней оси $P_2$	тс	0,40	1,15	1,183	0,460	—

где  $\lambda$  — длина загрузки линии влияния.

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

$$1 + \mu = 1 + \frac{18}{30 + \lambda} \geq 1,15, \text{ а коэффициент надежности } \gamma_f = 1,3 \left( 1 - \frac{\lambda}{10^3} \right) \geq 1,0.$$

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  $\gamma_f = 1,0$

Длина линии влияния, согласно СНиП 2.05.03-84\* для неразрезной системы, принимается равной длине загружаемых пролетов.

Коэффициенты надежности для временных нагрузок приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Коэффициенты надежности для временных нагрузок

№	Источник	Вид нагружения	Коэффициент надежности $\gamma_f$
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\*:

$$W_n = W_m + W_p \quad (1.13)$$

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

Принимается с запасом, что рельс-струна располагается на высоте до 10 м над уровнем земли. Сечение рельса-струны — прямоугольник, 80×220 (h) мм.

$$W_m = W_o k \cdot C_w = 48 \cdot 0,65 \cdot 1,1 = 34,32 \text{ кг/м}^2, \quad (1.14)$$

где:

$W_o = 48 \text{ кг/м}^2$  — нормативное значение ветрового давления для Сургута и Ханты-Мансийска, принято на основании Карты 3 и таблицы 5 СНиП 2.01.07-85 как для IV ветрового района;

$k = 0,65$  — коэффициент, учитывающий изменение давления по высоте для типа местности «В» по таблице 6 СНиП 2.01.07-85;

$C_w = 1,1$  — аэродинамический коэффициент принят как для перильных ограждений мостов, согласно п. 9 приложения 9 СНиП 2.05.03-84, 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:

$$W_p = W_m \xi L v, \quad (1.15)$$

где:

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

затуханий  $\delta = 0,15$  по чертежу 2 СНиП 2.01.07-85.

Частота собственных колебаний при первой форме примерно  $f_1 = 2 \text{ Гц}$  (уточняется при разработке проекта).

Коэффициент надежности  $\gamma_f = 1,4$ .

Нормативное значение ветрового давления  $W_o = 0,48 \text{ Па}$ .

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\gamma_f w_o}}{940 f_1} = \frac{\sqrt{1,4 \cdot 48}}{940 \cdot 2} = 0,004$$

Коэффициент  $\xi = 1,06$  (по графику черт. 2 пункт 6.7 СНиП 2.01.07-85).

Произведение  $L_v$  принято в соответствии с 2.24\* а):

$$L_v = 0,55 - 0,15\lambda / 100 = 0,55 - 0,15 \cdot 30 / 100 = 0,5 > 0,3$$

$$W_p = W_m \xi L_v = 34,32 \cdot 1,06 \cdot 0,5 = 18,2 \text{ кг/м}^2.$$

Нормативные и расчетные значения ветровых давлений на элементы путевой структуры приведены в табл. 1.4 (с округлением в большую сторону).

Таблица 1.4

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

Конструктивный элемент	Нормативные давления, кг/м <sup>2</sup>			Расчетные давления, кг/м <sup>2</sup>		
	$W_m$	$W_p$	$W_n$	$W_m \gamma_f$	$W_p \gamma_f$	$W_n \gamma_f$
Рельс-струна	35	18,2	53,2	49	25,5	74,5
Транспортное средство	19	10	29	26,6	14	41

Для экипажа принято  $C_w = 0,6$  (аэродинамический коэффициент бокового сопротивления). При отсутствии данных пульсационную составляющую принимаем равной статической составляющей. Размер транспортного модуля (в метрах) принят равным: 7,8 (L) · 1,9 (b) · 2,0 (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, температура не оказывает определяющего влияния на напряженно-деформированное состояние путевой структуры СТЮ.

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

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

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

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.г. Сургута и Ханты-Мансийска принимаются по СНиП 23-01-99 «Строительная климатология» и сведены в табл. 1.5.

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

Таблица 1.5

Основные климатические параметры г.г. Сургут и Ханты-Мансийск

г. Ханты-Мансийск	г. Сургут	Характеристика	Средняя температура по месяцам, С°													
			январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь		
-21,7	-22,0															
-19,4	-19,6															
-9,8	-13,3															
-1,3	-3,5															
6,4	4,1															
13,1	13,0															
17,8	16,9															
13,3	14,0															
8,0	7,8															
-1,9	-1,4															
-10,7	-13,2															
-17,1	-20,3															
-1,9	-3,4															
-49	-55															
34	34															
22,6	21,7															
-47	-48															
-45	-47															
-45	-45															
-41	-43															
192	200															

### Температуры для г. Сургута

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

$$t_{n,T} = t_{VII} + T = 16,9 + 9,7 = +26,6 \text{ }^\circ\text{C} \quad (1.16.1)$$

где:

$t_{VII} = +16,9 \text{ }^\circ\text{C}$  — средняя температура воздуха самого жаркого месяца (СНиП 23-01-99, табл. 3);

$T = 9,7 \text{ }^\circ\text{C}$  — среднесуточная амплитуда колебаний температуры (табл.2 СНиП 23-01-99).

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

0,92 — для бетонных и железобетонных конструкций или  $-43 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

0,98 — для стальных конструкций или  $-45 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Температуры для г. Ханты-Мансийска

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

$$t_{n,T} = t_{VII} + T = 17,8 + 9,2 = +27 \text{ }^\circ\text{C} \quad (1.16.2)$$

где:

$t_{VII} = +17,8 \text{ }^\circ\text{C}$  — средняя температура воздуха самого жаркого месяца (СНиП 23-01-99, табл. 3);

$T = 9,2 \text{ }^\circ\text{C}$  — среднесуточная амплитуда колебаний температуры (табл.2 СНиП 23-01-99).

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

0,92 — для бетонных и железобетонных конструкций или  $-41 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

0,98 — для стальных конструкций или  $-45 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для оценки перемещений (деформаций) элементов рельсо-струнного пролетного строения приняты следующие нормативные и расчетные температуры, приведенные в табл. 1.6.1 и 1.6.2, 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 1.6.1

Нормативные и расчетные температуры при коэффициенте надежности по нагрузке 1,2  
(г. Сургут)

Конструктивный элемент	Нормативные температуры, °С		Расчетные температуры, °С	
	наибольшие	наименьшие	наибольшие	наименьшие
Стальные конструкции	36,6	-45	44	-54
Бетон (до 20 см)	36,6	-43	44	-51,6
Бетон (более 20 см)	26,6	-43	32	-51,6

Таблица 1.6.2

Нормативные и расчетные температуры при коэффициенте надежности по нагрузке 1,2  
(г. Ханты-Мансийск)

Конструктивный элемент	Нормативные температуры, °С		Расчетные температуры, °С	
	наибольшие	наименьшие	наибольшие	наименьшие
Стальные конструкции	37	-45	44,4	-54
Бетон (до 20 см)	37	-41	44,4	-47,2
Бетон (более 20 см)	27	-41	32,4	-47,2

Следует отметить, что реальный дополнительный нагрев конструкций солнечным излучением 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  $\mathcal{G}_c$  определяется по формулам:

$$t_w = t_{ew} + \theta_1 + \theta_4; \quad (1.17)$$

$$g_w = \theta_5; \quad (1.18)$$

$$t_c = t_{ec} - 0.5 \cdot \theta_1; \quad (1.19)$$

$$g_c = 0, \quad (1.20)$$

где:

$t_{ew}$  и  $t_{ec}$  — средние суточные температуры наружного воздуха соответственно в теплое и в холодное время года, принимаемые по формулам (1.21) и (1.22):

$$t_{ew} = t_{VII} + \Delta_{VII}; \quad (1.21)$$

$$t_{ec} = t_I - \Delta_I; \quad (1.22)$$

$t_I$ ,  $t_{VII}$  — многолетние средние месячные температуры воздуха в январе и июле, принимаемые по картам 5 и 6.

Для Сургута температуры воздуха соответственно равны:  $-22$  °С, и  $+16,9$  °С.

$\Delta_I$ ,  $\Delta_{VII}$  — отклонения средних суточных температур от средних месячных, принимаемые соответственно по таблицам.

Для Ханты-Мансийска температуры воздуха соответственно равны:  $-21,7$  °С, и  $+17,8$  °С.

$\Delta_I$ ,  $\Delta_{VII}$  — отклонения средних суточных температур от средних месячных.

Для Сургута температуры соответственно равны:  $-9,7$  °С, и  $+9,7$  °С. Для Ханты-Мансийска температуры соответственно равны:  $-8,7$  °С, и  $+9,2$  °С.

Для г. Сургута температуры в холодное и теплое время, вычисленные по формулам (1.21) и (1.22), равны:  $t_{ec} = -31,7$  °С  $t_{ew} = +26,6$  °С.

Для г. Ханты-Мансийска температуры в холодное и теплое время, вычисленные по формулам (1.21) и (1.22), равны:  $t_{ec} = -30,4$  °С  $t_{ew} = +27$  °С.

$\theta_4$ ,  $\theta_5$  — приращение средних по сечению элемента температур и перепада температур от солнечной радиации, принимаемые по формулам (1.23) и (1.24):

$$\theta_4 = 0.05 \cdot \rho \cdot S_{max} \cdot k \cdot k_1 ; \quad (1.23)$$

$$\theta_5 = 0.05 \cdot \rho \cdot S_{max} \cdot k \cdot (-k_1) \quad (1.24)$$

$\rho$  — 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/м<sup>2</sup>, принимаемый по СНиП 23-01-99\*. Для широты г. Сургута и г. Ханты-Мансийска, т.е. 60° северной широты, суммарное значение радиации, поступающей в июле составит:

- на горизонтальную поверхность:  $S_{max} = 856 \text{ Дж/м}^2$ ;
- на вертикальную южную поверхность:  $S_{max} = 546 \text{ Дж/м}^2$ ;
- на вертикальную восточно-западную поверхность:  $S_{max} = 554 \text{ Дж/м}^2$ .

$k$  — 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 толщиной  $k_1 = 0,3$ .

Следовательно, значения  $\theta_4$  и  $\theta_5$ , вычисленные, например, для горизонтальной поверхности из темной и светлой стали и железобетона толщиной до 39 см для Сургута и Ханты-Мансийска, равны:

темная сталь:

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

- $\theta_5 = 10,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

светлая (серебристая) сталь:

- $\theta_4 = 13,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

- $\theta_5 = 5,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

железобетон толщиной до 15 см:

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

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

железобетон толщиной 15—39 см:

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

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

$\theta_1$  — приращение средних по сечению температур, зависящее от материала:

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

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

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

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

Ниже приведены нормативные температуры, вычисленные по формулам (1.17) и (1.19) для горизонтальной поверхности из темной и светлой стали и железобетона толщиной до 39 см для Сургута:

- темная сталь

$$t_w = t_{ew} + \theta_1 + \theta_4 = 26,6 + 8 + 24 = 58,6 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_c = t_{ec} - 0,5 \cdot \theta_1 = -31,7 - 0,5 \cdot 8 = -35,7 \text{ }^\circ\text{C},$$

- светлая сталь (серебристая)

$$t_w = t_{ew} + \theta_1 + \theta_4 = 26,6 + 8 + 13,5 = 48,1 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_c = t_{ec} - 0,5 \cdot \theta_1 = -31,7 - 0,5 \cdot 8 = -35,7 \text{ }^\circ\text{C},$$

- железобетонные до 15 см толщиной

$$t_w = t_{ew} + \theta_1 + \theta_4 = 26,6 + 8 + 18 = 52,6 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_c = t_{ec} - 0,5 \cdot \theta_1 = -31,7 - 0,5 \cdot 8 = -35,7 \text{ }^\circ\text{C},$$

- железобетонные от 15 до 39 см толщиной

$$t_w = t_{ew} + \theta_1 + \theta_4 = 26,6 + 8 + 12 = 46,6 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_c = t_{ec} - 0,5 \cdot \theta_1 = -31,7 - 0,5 \cdot 6 = -34,7 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Ниже приведены нормативные температуры, вычисленные по формулам (1.17) и (1.19) для горизонтальной поверхности из темной и светлой стали и железобетона толщиной до 39 см для Ханты-Мансийска:

- темная сталь

$$t_w = t_{ew} + \theta_1 + \theta_4 = 27 + 8 + 24 = 59 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_c = t_{ec} - 0.5 \cdot \theta_1 = -30,4 - 0.5 \cdot 8 = -34,4 \text{ }^\circ\text{C},$$

- светлая сталь (серебристая)

$$t_w = t_{ew} + \theta_1 + \theta_4 = 27 + 8 + 13,5 = 48,5 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_c = t_{ec} - 0.5 \cdot \theta_1 = -30,4 - 0.5 \cdot 8 = -34,4 \text{ }^\circ\text{C},$$

- железобетонные до 15 см толщиной

$$t_w = t_{ew} + \theta_1 + \theta_4 = 27 + 8 + 18 = 53 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_c = t_{ec} - 0.5 \cdot \theta_1 = -30,4 - 0.5 \cdot 8 = -34,4 \text{ }^\circ\text{C},$$

- железобетонные от 15 до 39 см толщиной

$$t_w = t_{ew} + \theta_1 + \theta_4 = 27 + 8 + 12 = 47 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_c = t_{ec} - 0.5 \cdot \theta_1 = -30,4 - 0.5 \cdot 6 = -33,4 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Нормативные и расчетные температуры для г. Сургута представлены в табл. 1.7.1.

Таблица 1.7.1

Нормативные и расчетные температуры для г. Сургута

Конструктивный элемент	Нормативные температуры, °С		Расчетные температуры, °С	
	наибольшие	наименьшие	наибольшие	наименьшие
Белая стальная конструкция	+48,1	-35,7	+53	-40
Бетон (до 15 см)	+52,6	-35,7	+58	-40
Бетон (от 15 до 39 см)	+46,6	-34,7	+55,4	-38,2

Нормативные и расчетные температуры для г. Ханты-Мансийска представлены в табл. 1.7.2.

Таблица 1.7.2

Конструктивный элемент	Нормативные температуры, °С		Расчетные температуры, °С	
	наибольшие	наименьшие	наибольшие	наименьшие
Белая стальная конструкция	+48,5	-34,4	+53,4	-37,8

Конструктивный элемент	Нормативные температуры, °С		Расчетные температуры, °С	
	наибольшие	наименьшие	наибольшие	наименьшие
Бетон (до 15 см)	+53	–34,4	+58,3	–37,8
Бетон (от 15 до 39 см)	+47	–33,4	+51,7	–36,8

При вычислении расчетных температур в табл. 1.7.1. и 1.7.2 коэффициент надежности по нагрузке согласно п. 8.7 СНиП 2.01.07-85\* принят равным  $\gamma_f = 1,1$ .

Для дальнейших расчетов путевой структуры СТЮ на температурные воздействия для условий г. Ханты-Мансийска и г. Сургута 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: +53,4 °С;
- наименьшая: –54 °С;
- расчетная температурная амплитуда: 107,4 °С.

При необходимости учета гололедных нагрузок следует руководствоваться указаниями раздела 7 СНиП 2.01.07-85\* «Нагрузки и воздействия».

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).

Величина погрешности при создании предварительного напряжения струнных элементов не должна превысить значений  $\pm 3\%$ . При контроле натяжения по усилиям (динамометру, включенному в систему) должны быть учтены потери на перегибах проволок и прочие потери в системе.

При внезапном выбывании опоры изменение усилий в элементах путевой структуры (например, при разрушении промежуточной опоры) может быть оценено по методике, приведенной ENV [8]. Ее суть заключается в оценке напряженного состояния с опорой и без опоры. Удвоенная разность между указанными напряженными состояниями характеризует воздействие от удаления опоры.

Перечень нагрузок и воздействий на конструкции путевой структуры и их расчетные сочетания, используемые в дальнейших расчетах, приведены в табл. 1.8.

Нагрузки и воздействия на конструкции путевой структуры СТЮ и их расчетные сочетания, используемые в дальнейших расчетах

Нагрузки и воздействия	Коэффициенты $\eta$ при различных расчетных сочетаниях							
	Собственный вес конструкций	Воздействие усадки и ползучести	Временные нагрузки	Горизонтальная нагрузка от торможения	Ветровые воздействия	Температурные воздействия	Нагрузка от гололеда	Внезапное выбывание опоры эстакады
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	—	—	—
4-е сочетание	1	1	—	—	—	—	—	1

В связи с тем, что конструкция рельсо-струнного пролетного строения испытывает напряжения и деформации от температурного воздействия, эта нагрузка, в отличие от требований СНиП 2.05.03-84\*, предусмотрена расчетным сочетанием 1.

Расчетное сочетание 2 соответствует табличному значению (таблица 9) 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.

Расчетное сочетание 4 относится к расчету рельса-струны при случайном воздействии — выбывании одной из опор. Разрушение опоры СТЮ может наступить в результате наезда наземного транспорта, например, тяжелого трактора, или террористического акта.

### 1.3.2. Определение усилий в элементах путевой структуры

#### Составление расчетных схем

Усилия и деформации следует определять, используя программы, реализующие метод конечных элементов (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 пренебрегать. 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, его заполнителя и струнных элементов следует учитывать при определении локальных деформаций под колесом юнибуса и на опоре, а также при оценке распределения поперечных напряжений рельса между струнами (канатами, арматурными прядями или отдельными стальными проволоками) и заполнителем.

Осевая жесткость оболочки и жесткость заполнения учитывается при вычислении усилий и перемещений от продольного торможения транспортных модулей.

## 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 одного рельсового автомобиля;
  - от проезда двух рельсовых автомобилей (при буксировке);
- наибольшие поперечные усилия, передаваемые от рельса к струнам в пролете от нормативных и расчетных нагрузок:
  - от проезда стальных колес рельсового автомобиля;



- наибольшие поперечные усилия, передаваемые от рельса к струнам в седле на промежуточной опоре от нормативных и расчетных нагрузок:
  - от собственного веса;
  - от проезда стальных колес рельсового автомобиля.

### 1.3.3. Проверка прочности и выносливости

Расчет несущих струн рельсо-струнной путевой структуры СТЮ 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 рельсо-струнная эстакада СТЮ была отнесена к автодорожным мостам и мостам под трамваи и метрополитены.

Расчет прочности рельса-струны, образованной 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.

$$N_{t,Rd} = \frac{N_{b,\min}}{\gamma_m} \cdot m \cdot m_1 \cdot m_2 = \frac{N_{b,\min}}{1,6} \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,5 \cdot N_{b,\min} \quad (1.25)$$

где:

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

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

$\gamma_m$  — 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:  $D/d_s \geq 0,7 \times 15,2 + 15 = 26$ , т.е. радиус перегиба должен быть больше 13 диаметров каната, или 200 мм. В реальной конструкции СТЮ радиус перегиба принят больше 50 диаметров каната.

Если поперечное давление менее 1 т/см каната, то  $m_1=1$ . Предполагаемое поперечное давление в седлах рельсо-струнной путевой структуры СТЮ будет менее 1 т/см пряди.

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

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

$m_2$  — коэффициент, учитывающий неравномерность натяжения прядей в струне. Для опытного участка эстакады пряди предполагается натягивать поочередно. Контроль натяжения будет двоякий:

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

При указанном контроле, для опытного участка эстакады 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:

$$N_{t,Rd} = 0,633 \cdot N_{b,\min}, \quad (1.26)$$

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.

Поскольку в прямых проволоках струны в рельсе-струне, в отличие от спиральных проволок прядей и витых канатов современных мостов, отсутствуют локальное обмятие и локальные концентраторы напряжений в местах контакта проволок друг с другом, то предельно допустимые усилия в струне СТЮ могут быть увеличены на 20—25% в сравнении с мостовыми нормативами — до 0,8 от величины разрывного усилия струны (или 0,8 от разрывного усилия проволоки для отдельно взятой проволоки струны). Расчеты показывают, что даже при таких повышенных расчетных напряжениях в струне СТЮ ее запас прочности по подвижной нагрузке (по воздействию проезжающего по путевой структуре юнибуса) значительно превысит величину в 100 раз, а в отдельных случаях — и 1000 раз.

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

$$\sigma_{\max} \leq m_1 \gamma_{ws} R_{dh} m = \gamma_{ws} R_{dh}, \quad (1.27)$$

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\*;

$\gamma_{ws}$  — коэффициент, учитывающий переменность напряжений и определяемый по формуле:

$$\gamma_{ws} = \frac{0,15}{\zeta \cdot \varrho \cdot [(0,884 \cdot \beta_s - 0,387) - (0,884 \cdot \beta_s - 0,455) \cdot \rho]} \leq 1,0 \quad (1.28)$$

$\zeta, \varrho, \rho$  — коэффициенты, принимаемые согласно п.4.57\* СНиП 2.05.03-84\*;

$\beta_s$  — 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 растянутых канатов заключается в сопоставлении величины размаха напряжений ( $\Delta\delta = \delta_{\max} - \delta_{\min}$ ) в проволоках каната с их предельным 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, т.е. выше, чем у спиральных канатов, на 40%. Это свидетельствует о том, что прямые проволоки работают в любой конструкции в более щадящих условиях, чем изогнутые проволоки спиральных канатов. Кроме того, во всех возможных вариантах исполнения СТЮ реальный размах напряжений в струне будет на один—два порядка ниже и не превысит 5 МПа, что значительно увеличит долговечность рельсо-струнной путевой структуры и позволяет на 20—25% увеличить

допустимые напряжения в прямой струне СТЮ в сравнении с витыми канатами в традиционных мостовых конструкциях.

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

Конструкция анкерения струн в одном из вариантов 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 1 м от анкера дополнительно обетонировать специальным композитным клеевым раствором. Композитный клеевой раствор позволит обеспечить сцепление по контакту со струной не менее  $40 \text{ кг/см}^2$ , что на длине 1 м обеспечивает передачу необходимого усилия. В такой конструкции отсутствует концентратор напряжений.

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

Опорное седло-сепаратор предназначено для разводки струн у мест анкерения на анкерных опорах (внутри корпуса рельса). Принцип проектирования седла аналогичен седлам на промежуточных опорах, с той лишь разницей, что в опорном седле введен поворот.

Рядовая опорная часть обеспечивает изгиб струны в СТЮ радиусом не менее 3 м. Поперечное давление от собственного веса рельса-струны и колеса рельсового автомобиля на струну в седле опоры (промежуточной или анкерной) значительно ниже значений  $1 \text{ тс/см}$ , 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 (1.27) и равны:

$$\sigma_{\max} \leq m_1 \gamma_{ws} R_{dh} m = \gamma_{ws} R_{dh}$$
$$R_{dh} = 10450 \text{ кг/см}^2 \text{ (ориентировочно);}$$

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

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

где:

$$\zeta = 0,7;$$

$$\rho = 1,0;$$

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

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

Компенсацию вертикальных упругих деформаций струны путевой структуры на пролете, под нагрузкой рельсового автомобиля, следует осуществлять за счет создания кривой строительного подъема корпуса рельса с головкой рельса, при которой движение юнибуса с полной нормативной нагрузкой происходило бы по линии, близкой к прямой (см. рис. 1.3б).

Кривая строительного подъема корпуса рельса на каждом пролете трассы СТЮ должна быть построена при следующих исходных данных:

- усилие в струне должно быть принято равным нормативному усилию от предварительного напряжения с учетом ползучести при средних температурах;
- кривая прогибов должна быть построена как среднее значение на основании прогибов рельса-струны, полученных от фиксации положения юнибуса с шагом 1 м вдоль всего пролета, при движении как в одну, так и в другую сторону;
- величина нагрузки для определения прогибов должна быть принята равной 100% от нормативного значения.

Предельные вертикальные и горизонтальные ускорения пассажиров в салоне юнибуса при его движении по рельсо-струнной эстакаде СТЮ не должны превышать 0,1g, или 1 м/с<sup>2</sup>.

## 1.4. 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 стальных конструкций 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  $R_{yn} = 330—390$  МПа (стали марок 09Г2СД, 15ХСНД и 10ХСНД) приведены в табл. 1.9.

Таблица 1.9

Рекомендуемые марки электродов для сварки конструкций  
из сталей с пределом текучести 330—390 МПа

Тип шва	Тип электрода по ГОСТ 9467-75	Марка электрода	Сопротивление металла шва, МПа (кг/см <sup>2</sup> )	
			Временное $R_{wun}$	срезу $R_{wf}$
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».

## **1.5. 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 (ТЭО). При этом сравнивают показатели, из которых одними из основных являются расход материалов и связанная с ним стоимость путевой структуры. При разработке вариантов важно выбрать рациональные пропорции будущей трассы (высота над поверхностью земли, длина рельсо-струнного пролетного строения, ширина колеи, размеры и расчетный вес юнибуса, количество путей, анкерных опор, поворотов и т.п.).

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 СТЮ;
- предварительный выбор технических решений;
- проведение предпроектных проработок.





Предпроектные проработки по путевой структуре СТЮ для условий ХМАО-Югры должны включать:

- построение расчетной схемы СТЮ с приложением нагрузок;
- расчет напряженно-деформированного состояния рамной конструкции, состоящей из 2-х анкерных опор, 50—100 стоек (промежуточных опор) и ригеля в виде двух предварительно напряженных рельсов-струн;
- расчет вариантов конструкции рельса-струны;
- 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 определение 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 влияния промежуточных опор и их фундаментов и напряженно-деформированное состояние рельса-струны при движении подвижного состава (в начале, середине и конце пролета);
- 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 рельсо-струнной путевой структуры;
- оптимизация конструкций путевой структуры по условиям надежности, долговечности, безопасности, технологичности и стоимости.

## **2. Пример расчета рельсо-струнной путевой структуры высокоскоростной трассы «Ханты-Мансийск — Сургут»**

### **2.1. Цель работы и постановка задачи**

Выполнение расчетов рельсо-струнной путевой структуры методом конечных элементов (МКЭ) позволяет проверить, уточнить и оптимизировать основные конструкторские и технологические решения, закладываемые в струнную транспортную систему «второго уровня». Для расчетов взят вариант высокоскоростной трассы СТЮ «Ханты-Мансийск — Сургут» колеей 1,5 м, т.к. высокие скорости движения (200 км/ч и выше) накладывают и высокие же требования к прочности, жесткости, ровности и долговечности путевой структуры, строящейся в достаточно суровых климатических условиях ХМАО—Югры.

Для расчетов приняты температуры: минимальная зимой  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , максимальная летом (с учетом нагрева конструкции солнцем)  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , перепад температур «зима — лето»:  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Расчетная схема рельсо-струнной путевой структуры высокоскоростной трассы «Ханты-Мансийск — Сургут» показана на рис. 2.1, поддерживающей железобетонной опоры (для одного пути двухпутной трассы) — на рис. 2.2., а оптимизированный вариант рельса-струны для скоростей движения юнибусов колеей 1,5 м в 300 км/ч и выше — на рис. 2.3 (в масштабе 1:1). Рассмотрены два варианта крепления рельса-струны на промежуточных опорах — жесткая заделка корпуса рельса, или шарнирное опирание корпуса.

Основные характеристики расчетной схемы трассы: пролеты 30 м, расстояние между анкерными опорами 3 км, высота опор над уровнем земли 5 м (глубина условной заделки в грунте — 2 м), колея 1,5 м, вес юнибуса, с учетом динамической перегрузки, — 2,5 тс. Рассмотрено высокоскоростное движение потока юнибусов с максимально близким расстоянием 500 м друг от друга (временной интервал движения 5—10 с) в момент их аварийного торможения с максимально возможным ускорением 4 м/с при воздействии максимальной боковой ветровой нагрузки.

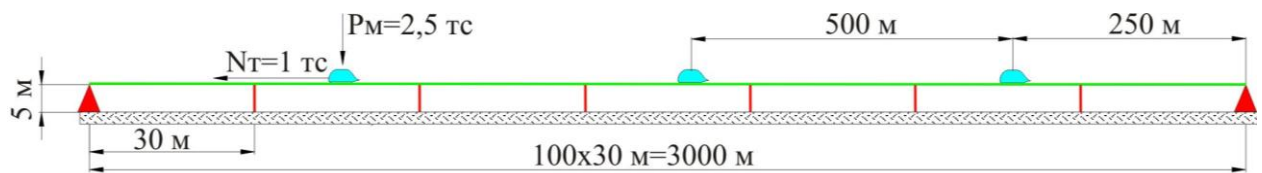
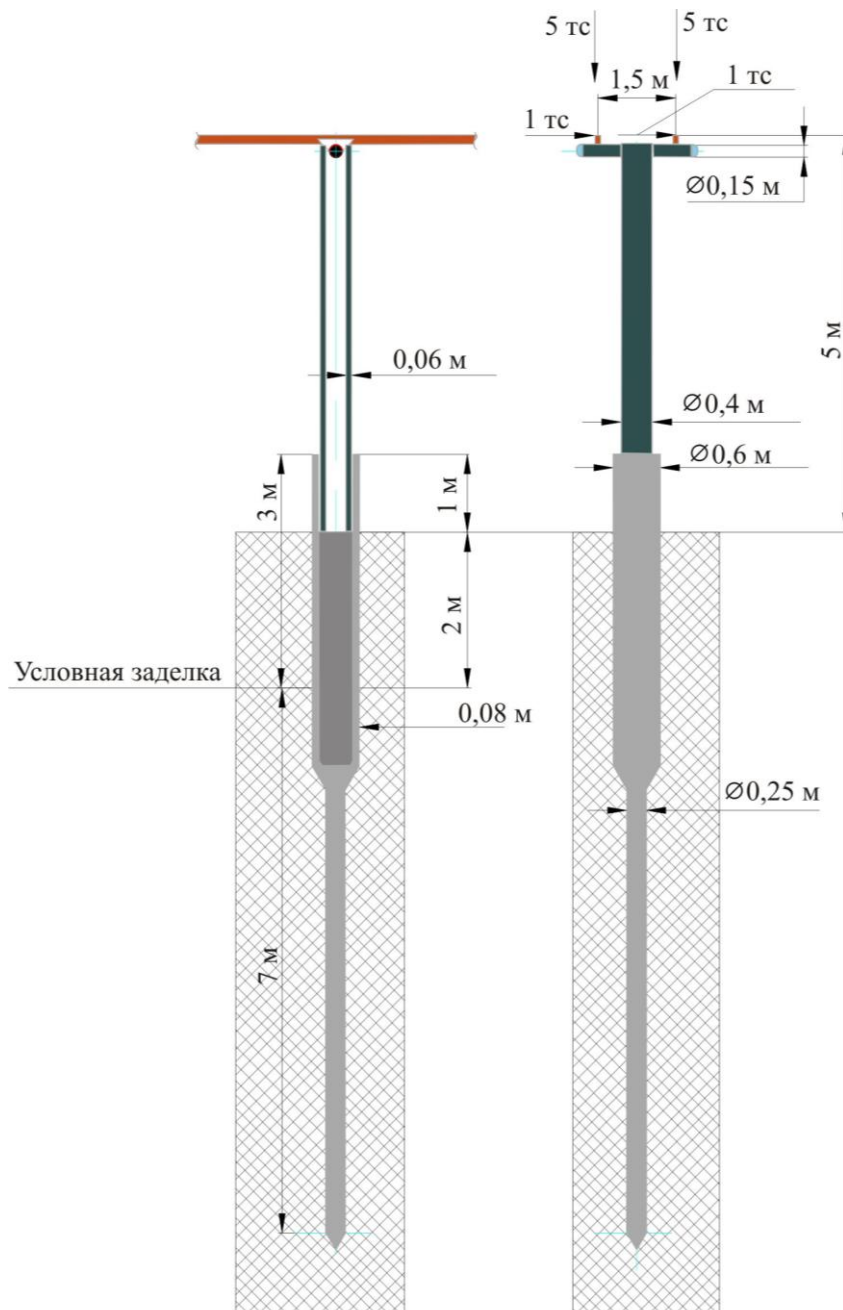


Рис. 2.1. Расчетная схема рельсо-струнной путевой структуры высокоскоростной трассы СТЮ «Ханты-Мансийск — Сургут» колеей 1,5 м



$$5 \text{ тс} = (2,5 \text{ тс} + 1,5 \text{ тс}) \times 1,25$$

Рис. 2.2. Расчетная схема поддерживающей железобетонной опоры (для одного пути двухпутной трассы) на трассе «Ханты-Мансийск — Сургут» колеей 1,5 м

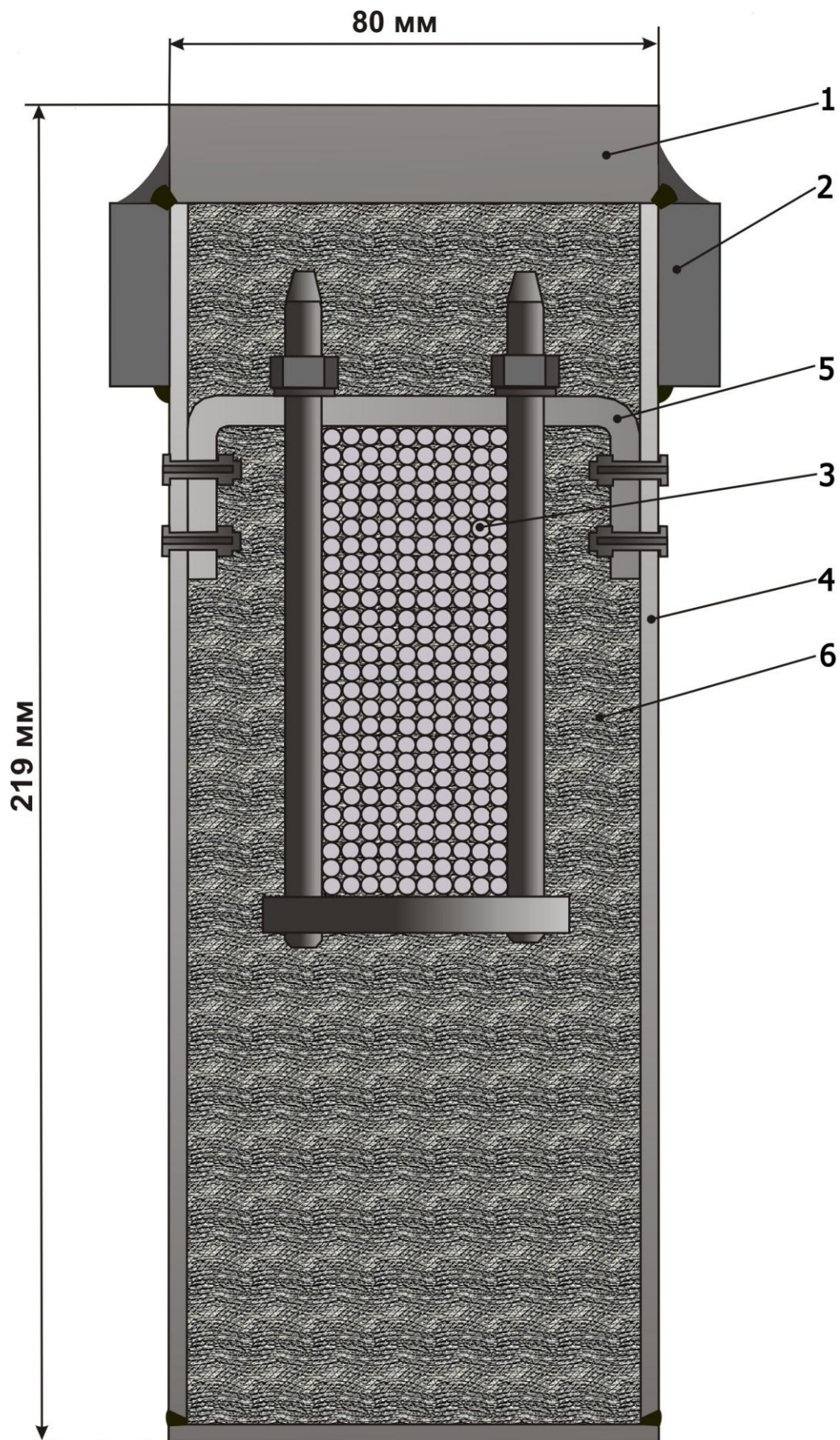


Рис. 2.3. Конструкция рельса-струны (масштаб 1:1)  
высокоскоростной трассы СТЮ «Ханты-Мансийск — Сургут» колеей 1,5 м

На рис. 2.3. цифрами обозначено: 1 — стальная головка рельса; 2 — уширение рельса, являющееся боковой головкой рельса для противосходных боковых роликов юнибуса; 3 — струна (260 высокопрочных стальных проволок диаметром 3 мм); 4 — стальной сварной корпус рельса; 5 — крепление струны к корпусу рельса (через 3 м); 6 — наполнитель (модифицированный бетон).

Необходимый стальной прокат для изготовления рельса-струны выпускается, например, на заводах Череповецкого металлургического холдинга «Северсталь-Метиз», с которым ООО «СТЮ» заключил договор на поставку продукции. При этом была уточнена конструкция сварного корпуса рельса исходя из сортамента выпускаемого проката.

В качестве элемента струны планируется использовать высокопрочную стальную оцинкованную проволоку производства Волгоградского завода «ВолгоМетиз», входящего в Череповецкий холдинг. По заказу ООО «СТЮ» завод изготовил пробную партию (300 кг длиной около 6000 м) оцинкованной высокопрочной проволоки диаметром 3 мм по ГОСТ 7348-81 марки ЖБК ТС71915393-053-06 и испытал ее на разрыв. Результаты испытаний: минимальное временное сопротивление разрыву (из партии в 10 образцов) —  $\sigma = 22.220 \text{ кгс/см}^2 = 2180 \text{ МПа}$  (усилие  $P_{0,2} = 1392 \text{ кгс} = 13656 \text{ Н}$ , что соответствует  $\sigma_{0,2} = 19700 \text{ кгс/см}^2 = 1932 \text{ МПа}$ ), минимальное разрывное усилие проволоки —  $P = 1570 \text{ кгс}$ .

Уникальные прочностные характеристики указанной проволоки, наилучшая из всех возможных ее коррозионная защищенность (слой цинка не просто нанесен на поверхность проволоки, а внедрен в структуру стали при протяжке заготовки со слоем цинка через фильеры) позволяют увеличить расчетные напряжения в струне в сравнении с нормативными. Это позволит уменьшить расход высокопрочной проволоки и, соответственно, снизить стоимость путевой структуры без ухудшения ее прочностных характеристик, долговечности и надежности.

Расчетная схема одного пути рельсо-струнной путевой структуры показана на рис. 2.4. Путевая структура одного пути состоит из двух рельсов-струн, содержащих головку рельса, корпус рельса, струну и наполнитель. Двухпутная трасса содержит два пути и 4 рельса-струны.

Схема нагружения одного пути от сцепки двух юнибусов показана на рис. 2.5.

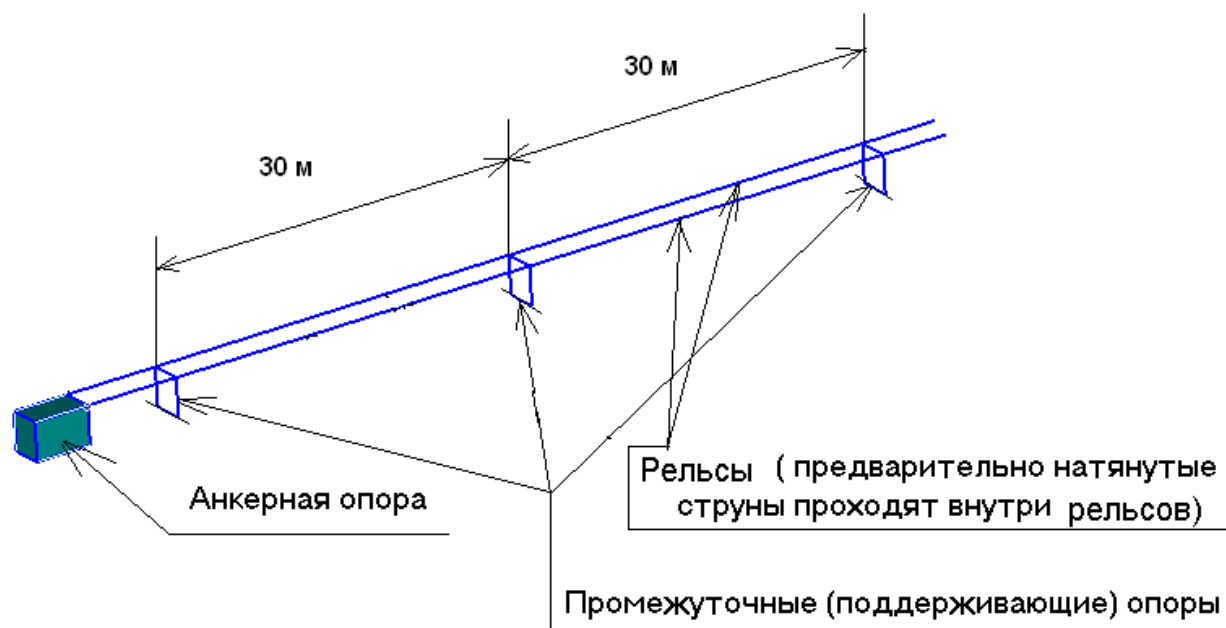


Рис. 2.4. Схема одного пути рельсо-струнной путевой структуры

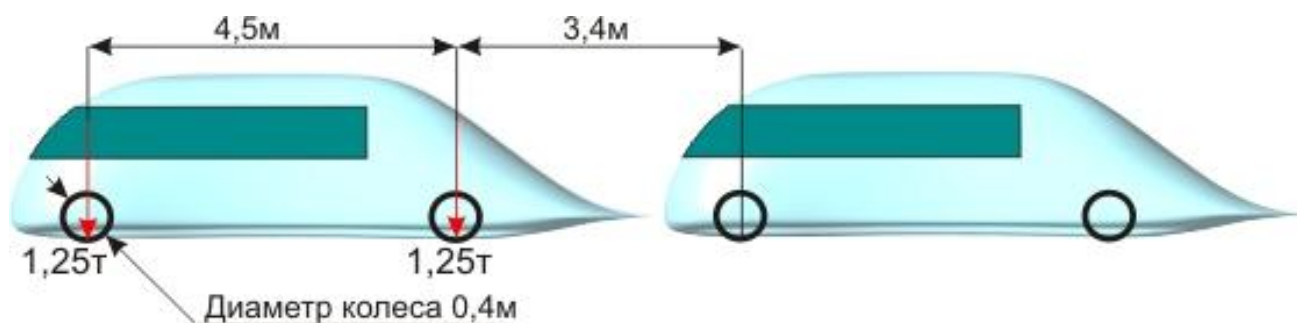


Рис. 2.5. Схема нагружения пути от сцепки двух высокоскоростных юнибусов

Внутри корпуса рельса находятся предварительно натянутые до расчетных усилий струны (стальные проволоки диаметром 3 мм) и наполнитель на основе цементного связующего (как связующее между корпусом и стальными проволоками струны).

Расчетное сечение рельса-струны и находящихся внутри струн изображено на рис. 2.6.

На рис. 2.7 изображено расчетное сечение корпуса рельса (стенки утолщены на 3,67 мм за счет добавки жесткости корпусу рельса от наполнителя — бетона, поэтому бетон в расчетную схему отдельно не вводился).

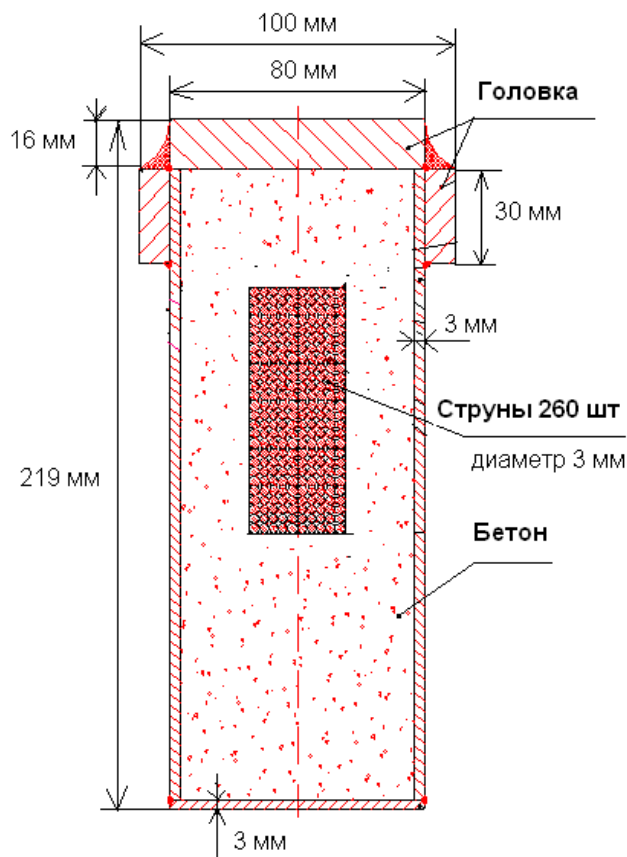


Рис. 2.6. Расчетное поперечное сечение рельса-струны

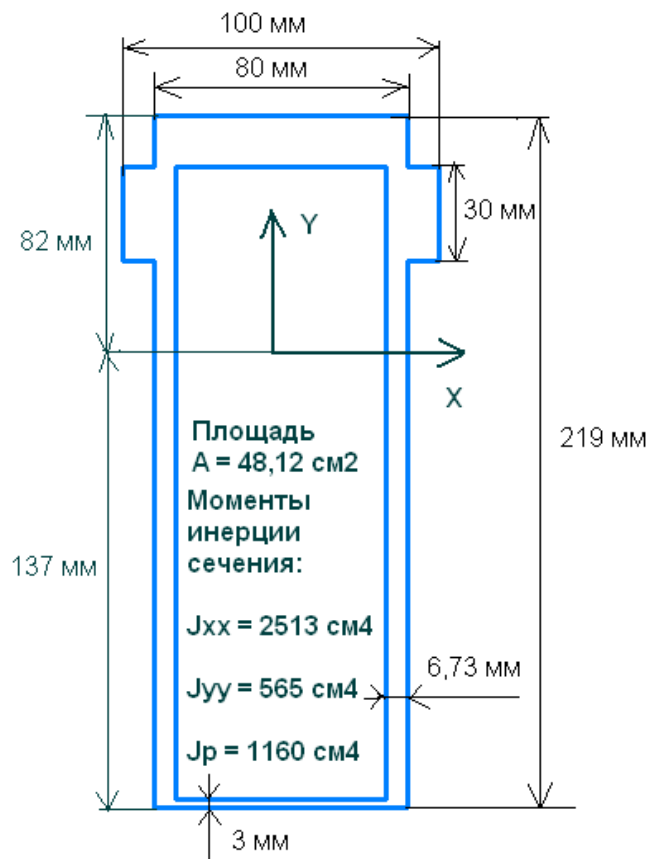


Рис. 2.7. Расчетное поперечное сечение корпуса рельса

Расчетная погонная масса одного рельса-струны рельсо-струнной путевой структуры высокоскоростного СТЮ составил 76 кг/м (26,1 кг/м — головка рельса и корпус, 14,4 кг/м — струна (260 проволок диаметром 3 мм в каждом рельсе) и 35,5 кг/м — наполнитель на основе цементобетона и металлический крепеж).

Расчет рельсо-струнной путевой структуры проводился для двух вариантов крепления рельса к промежуточным опорам:

- 1) жесткая заделка;
- 2) шарнирное закрепление.

Для расчета на жесткость, прочность и выносливость рельсо-струнной путевой структуры высокоскоростной подвижной состав (один или два юнибуса массой по 2500 кг каждый) располагался:

- в середине пролета (см. п. 3.1, рис. 3.1.1 и 3.1.2);
- по одну сторону от промежуточной опоры на расстоянии 3,1 и 2,25 м для



варианта жесткой заделки рельсов на опорах (наиболее опасные нагружения показаны в п. 3.1, рис. 3.1.3 и 3.1.5 и п. 3.4, рис. 3.4.1 и 3.4.2 и рис. 3.4.3 и 3.4.4);

- симметрично над промежуточной опорой для варианта шарнирного закрепления рельсов на опорах (наиболее опасное нагружение показано в п. 3.1, рис. 3.1.4 и п. 3.4, рис. 3.4.5 и 3.4.6);
- по одну сторону на расстоянии 5,6 м, считая от центра тяжести, и симметрично над промежуточной опорой для варианта шарнирного закрепления рельсов на опорах (наиболее опасные нагружения показаны в п. 3.1, рис. 3.1.4 и 3.1.6 и п. 3.4, рис. 3.4.5 и 3.4.6 и рис. 3.4.7 и 3.4.8).

При расчете рельсо-струнной путевой структуры на жесткость и выносливость предполагалось, что юнибус, с учетом вертикальной динамики, создает вертикальную силу 2,5 тс (на половину путевой структуры, т.е. на один рельс-струну приходится нагрузка 1,25 тс, а на каждое колесо — по 0,625 тс).

При расчете на прочность предполагалось, что юнибусов два, причем оба с полной загрузкой, они движутся друг за другом в механической сцепке и каждое создает вертикальную силу 2,5 тс. Такая ситуация возможна, например, при транспортировке к ближайшей станции вышедшего из строя юнибуса следовавшим за ним исправным юнибусом.

Расчеты проводились на основе метода конечно-элементного анализа. Конечно-элементные модели строилась на ПК с помощью конечно-элементного комплекса MSC.visualNASTRAN for Windows 2004.

## **2.2. Исходные данные о материалах**

### **2.2.1. Материал струн**

Материал струн — стальные проволоки Ст 75—85 (оцинкованные) арматурные диаметром 3 мм (площадь поперечного сечения проволок  $7,065 \text{ мм}^2$ ); принят по табл. 34 СНиП 2.05.03-84\* «Мосты и трубы» и ГОСТ 7348-71. Проволоки должны изготавливаться из углеродистой стали марок 75, 80, 85 по ГОСТ 14959-79 и иметь следующие характеристики:



• модуль упругости	206000 МПа
• коэффициент Пуассона	0,3
• плотность	7850 кг/м <sup>3</sup>
• предел прочности, не менее	1783 МПа
• коэффициент линейного температурного расширения	1,2×10 <sup>-5</sup> 1/град

### 2.2.2. Материал головки рельса

Материал головки рельса — сталь 09Г2С при толщине проката 10—20 мм класса 345 по ГОСТ 27772-88. Механические свойства проката С345 приведены в выписке из табл. 51\* СНиП II-23-81\* «Стальные конструкции» и имеют следующие характеристики:

• модуль упругости	206000 МПа
• коэффициент Пуассона	0,3
• плотность	7850 кг/м <sup>3</sup>
• расчетное сопротивление текучести	315 МПа
• расчетное сопротивление прочности	470 МПа
• коэффициент линейного температурного расширения	1,2×10 <sup>-5</sup> 1/град

### 2.2.3. Материал корпуса рельса

Материал корпуса рельса — сталь 09Г2С при толщине проката 2—10 мм класса 345 по ГОСТ 27772-88. Механические свойства проката С345 приведены в выписке из табл. 51\* СНиП II-23-81\* «Стальные конструкции» и имеют следующие характеристики:

• модуль упругости	206000 МПа
• коэффициент Пуассона	0,3
• плотность	7850 кг/м <sup>3</sup>
• расчетное сопротивление текучести	335 МПа
• расчетное сопротивление прочности	490 МПа
• коэффициент линейного температурного расширения	1,2×10 <sup>-5</sup> 1/град

#### 2.2.4. Материал заполнителя

Материал заполнителя представляет собой бетон с плотностью 2400 кг/м<sup>3</sup>. Предполагается, что заполнитель частично передает вертикальную нагрузку от головки рельса и корпуса рельса на струны (основная нагрузка передается посредством силовых поперечных стальных стержней, т.е. специальных «шпал», установленных в корпусе рельса через каждые 2—3 м). Это соответствует случаю частично разрушенного заполнителя за длительный период эксплуатации. Тогда на местный изгиб работают главным образом жестко соединенные между собой головка рельса и корпус (см. рис. 2.7), шарнирно опираясь на струны (происходит сдвиг между корпусом и струнами). В этом случае напряжения от местного изгиба в корпусе и головке рельса возрастают, и это идет в запас прочности головки рельса, корпуса рельса и путевой структуры в целом. На прочность струн такое предположение влияет незначительно.

#### 2.3. Расчетная модель и этапы расчета

Конечно-элементная модель представляла собой пятипролетную рельсо-струнную путевую структуру длиной  $30 \times 5 = 150$  м. В качестве конечных элементов использовались элементы типа ROD (струны) и Beam (рельс). Характеристики расчетной модели:

- число узлов 9714
- число элементов 9708

Граничные условия конечно-элементной модели разбивались на четыре этапа набора сил и закреплений для реализации предварительной сборки путевой структуры и ее нагружений.

Первый этап расчета заключался в предварительном натяжении струны, головки и корпуса рельса (натяжение при 0 °С расчетного поперечного сечения). Далее — закрепление корпуса и рельса на промежуточных опорах (либо жесткая заделка, либо шарнирное закрепление) и анкерных опорах (жесткая заделка).

Второй этап расчета — нагружение струн собственным весом путевой структуры (от веса головки рельса, корпуса рельса и заполнителя) при сборочной температуре 0 °С. При этом струны под действием сил тяжести дополнительно

провисают вместе с рельсом. Сам рельс с применением технологических операций в смонтированном состоянии выставляется прямым, без провиса между опорами (при сборке 0 °С). Таким образом, провис струны в рельсе является монтажным и «защит» внутри прямого рельса.

Третий этап расчета заключался в пересчете усилий натяжения и провисов элементов путевой структуры от сил тяжести в зависимости от температурного режима (+55 °С летом и –55 °С зимой).

Четвертый этап расчета заключался в нагружении вертикальными силами от одного юнибуса при расчете жесткости и выносливости путевой структуры (штатный многократный режим работы рельса-струны), и от двух юнибусов — при расчете прочности для двух крайних температурных режимов: +55 °С летом и –55 °С зимой (нештатный однократный режим работы рельса-струны).

## **2.4. Расчетное исследование жесткости рельсо-струнной путевой структуры**

### **2.4.1. Расчет вертикальных деформаций от собственного веса путевой структуры и при нагружении вертикальной силой от юнибуса**

В расчете струна (260 высокопрочных проволок диаметром 3 мм каждая, корпус и головка рельса, которые также предварительно напрягаются) в каждом рельсе предварительно натягивалась до суммарного усилия 225 тс (натяжение струны при 0 °С). При наибольшей температуре (+55 °С летом) вертикальные перемещения рельсо-струнного пролетного строения будут самыми большими, поскольку при повышении температуры суммарное натяжение струн и корпуса с головкой рельса уменьшается. Дополнительная вертикальная деформация участка рельсо-струнной эстакады от собственного веса путевой структуры при наибольшей температуре (+55 °С летом) изображена относительно положения при монтажной температуре 0 °С в увеличенном виде на рис. 2.8. Дополнительный провис рельсо-струнной эстакады от собственного веса (относительно температуры 0 °С) при этом составил в центре пролета 0,00395 метра (3,95 мм), независимо от вида крепежа на опорах (заделка или шарнир), и обусловлен только температурным снижением натяжения в рельсе-струне.

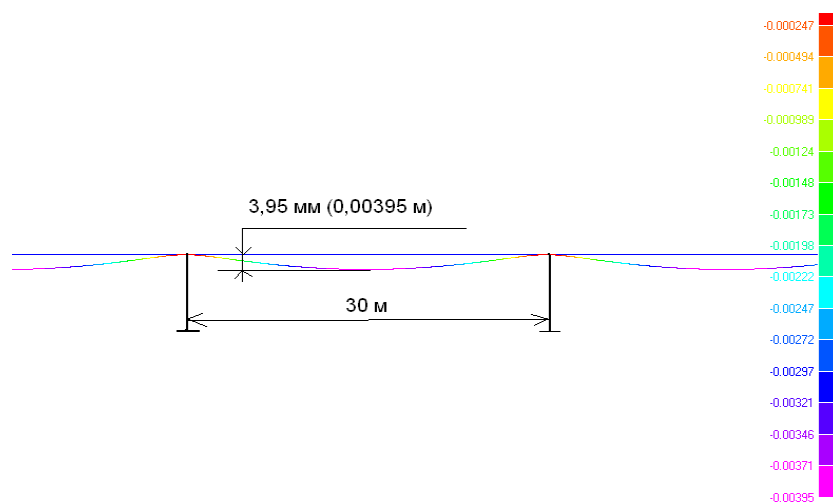


Рис. 2.8. Дополнительная вертикальная деформация участка рельсо-струнной эстакады от собственного веса при наибольшей температуре +55 °С летом (не зависит от вида крепежа на промежуточных опорах)

Наибольшая общая вертикальная деформация участка рельсо-струнной эстакады (при +55 °С) от собственного веса и при нагружении в центре пролета вертикальной силой от веса юнибуса, равного 2,5 тс (на половину струнной эстакады, т.е. на один рельс, приходится 1,25 тс, а на каждое колесо — по 0,625 тс), изображена в увеличенном виде на рис. 2.9 и 2.10. Прогиб струны в рельсо-струнной эстакаде в центре пролета при этом составит 0,0395 метра (39,5 мм) для жесткой заделки на промежуточной опоре и 0,0412 метра (41,2 мм) для шарнирного закрепления на опоре.

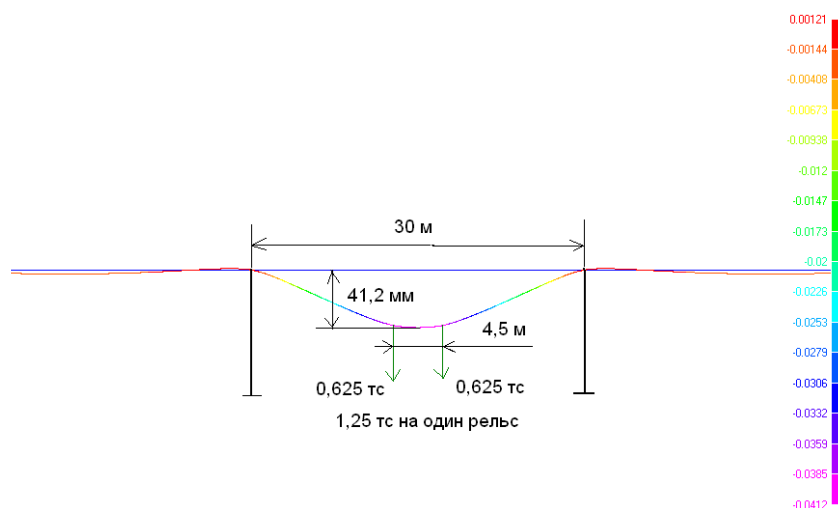


Рис. 2.9. Вертикальная деформация участка рельсо-струнной эстакады от собственного веса и при дополнительном нагружении вертикальной силой от юнибуса весом 2,5тс при наибольшей температуре +55С летом (шарнирное закрепление рельса на опоре)

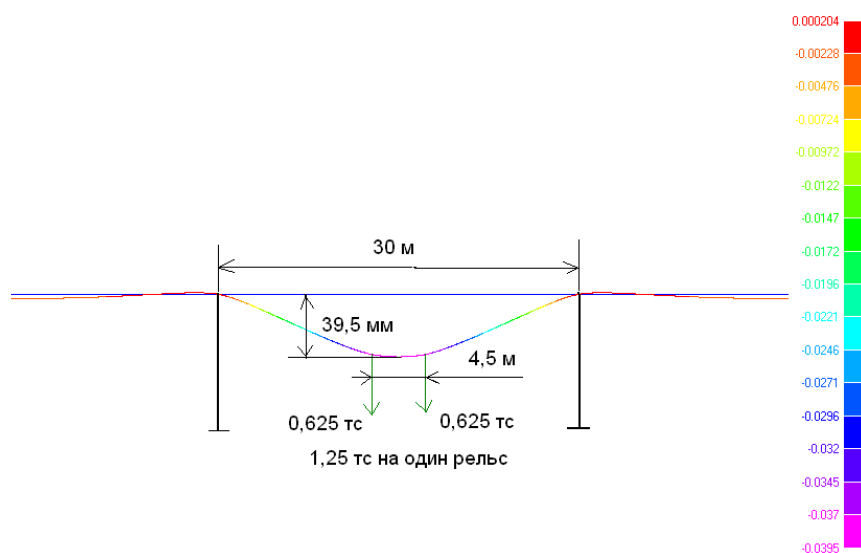


Рис. 2.10. Вертикальная деформация участка рельсо-струнной эстакады от собственного веса и при дополнительном нагружении вертикальной силой от юнибуса весом 2,5тс при наибольшей температуре +55 °С летом (жесткая заделка рельса на опоре)

Дополнительный вертикальный прогиб рельсо-струнной эстакады в центре пролета, вызванный воздействием только веса юнибуса, при жесткой заделке рельса на опоре, составит:  $0,0395 - 0,00395 = 0,03555$  метра (35,55 мм). Отношение наибольшего прогиба, вызванного транспортным модулем, к длине пролета:  $0,03555 / 30 = 1/844$ , что, например, отвечает требованиям, предъявляемым к капитальным мостам на автомобильных и железных дорогах, в том числе — высокоскоростных.

Дополнительный вертикальный прогиб рельсо-струнной эстакады в центре пролета, вызванный только весом транспортного модуля при шарнирном закреплении рельса на опоре составит:  $0,0412 - 0,00395 = 0,03725$  метра (37,25 мм). Отношение наибольшего прогиба, вызванного юнибусом, к длине пролета:  $0,03725 / 30 = 1/805$ .

Для проверки правильности численного расчета проведен аналитический расчет. Он учитывает силы натяжения струн и корпуса с головкой рельса, но не учитывает изгибной жесткости корпуса с головкой рельса, ввиду малости этого влияния на расчет деформаций.

Расчет прогиба только от подвижной нагрузки аналитическим методом (при +55 °С)

Исходные данные:

1. Вертикальная сила на один рельс:  $P = 1250$  кГс
2. Сила натяжения в одном рельсе:  $T = (199,3 - 2,9) \times 10^3$  кГс

3. Длина одного пролета:  $L = 30$  м

4. База транспортного средства:  $\lambda = 4,5$  м

Расчет наибольшего прогиба путевой структуры в центре пролета от веса юнибуса (при +55 °С), без учета изгибной жесткости рельса:

$$\Delta = \frac{P \times L - \lambda}{4 \times T} = \frac{1250 \times 30 - 4,5}{4 \times 196400} = 0,0406 \text{ м (40,6 мм)} \quad (2.1)$$

Аналитический расчет по формуле (2.1) дает схожие результаты, но отличающиеся в большую сторону по сравнению с численным расчетом для шарнирного закрепления на 9%, для заделки — на 14% (при температуре +55 °С). Это объясняется учетом жесткости бетонного заполнителя, стального корпуса и головки рельса в численном расчете, что снижает деформативность системы при нагружении вертикальной нагрузкой. При низких температурах, когда струна будет натянута сильнее, влияние изгибной жесткости рельса-струны на деформативность рельсо-струнного пролетного строения будет еще ниже, не более 5—7%, поэтому его расчет можно выполнять аналитически по формуле (2.1) с достаточной степенью точности (при инженерных расчетах).

#### 2.4.2. Расчет угла поворота и горизонтального перемещения рельса-струны при действии горизонтальных скручивающих сил

Ввиду неопределенности боковых сил, возникающих при движении транспортного средства из-за деформаций корпуса транспортного средства и его узлов, расчет конструкции проводился при действии только одной условной единичной горизонтальной силы. Величина условной единичной горизонтальной силы была принята равной 1 тс на каждый рельс (на одно колесо — 500 кгс) и прикладывалась в верхней точке рельса (точке контакта рельса с колесом). Для ухудшения условий приложения поперечной горизонтальной нагрузки (чтобы обеспечить более высокий запас прочности), которую может создать боковой ветер при его скорости не менее 300 км/ч, она приложена к рельсу в одной точке, в то время как у сцепки из двух модулей расчетная боковая нагрузка на рельсо-струну

прикладывается в четырех точках, отстоящих на расстоянии 4,5 м друг от друга (ее величина составит всего 0,15 тс на одно колесо от воздействия расчетной боковой ветровой нагрузки на юнибус в размере 41 кгс/м<sup>2</sup>).

Расчетная схема воздействия боковой поперечной силы изображена на рис. 2.11. Предполагалось, что рельс жестко заделан от поворота на промежуточных опорах.

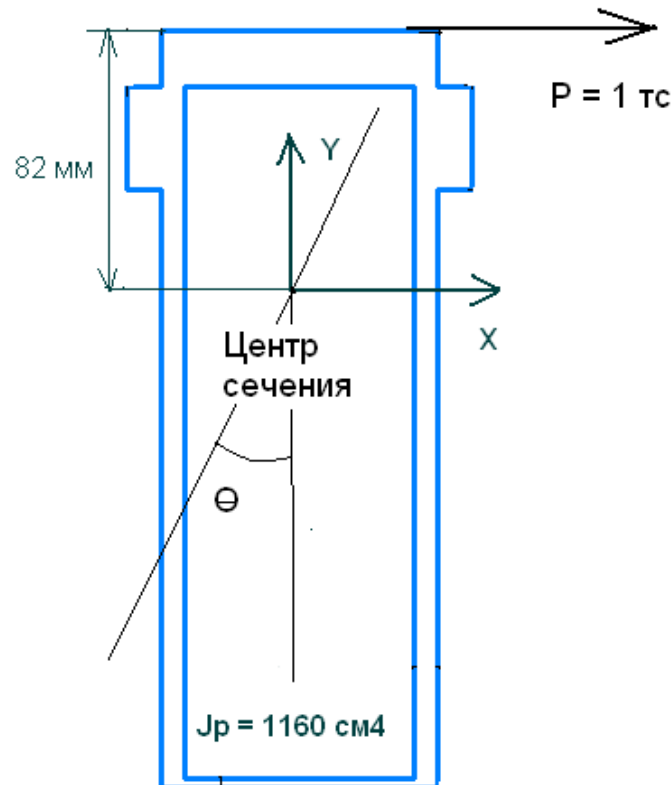


Рис. 2.11. Расчетная схема действия горизонтальной скручивающей силы

Для оценки угла поворота сечения рельса проведен аналитический расчет методом сопрягата. Рельс жестко заделан от поворота на промежуточных опорах и работает на кручение один (без струн, крутильной жесткостью которых можно пренебречь). В этом случае рельс поворачивается вокруг своего центра сечения. Крутящий момент, соответствующий центру сечения и силе 1 тс на рельс, равен 820 Н×м. Угол поворота рельса при этом составит всего 0,327 градуса.

#### Расчет на скручивание рельса крутящим моментом 820 Н×м

Исходные данные:

1. Полярный момент инерции сечения рельса:  $J_{p\_RELS} = 1,16 \times 10^{-5} \text{ м}^4$

- |                                   |                             |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| 2. Модуль сдвига стали:           | $G = 7,9 \times 10^{10}$ Па |
| 3. Длина одного пролета:          | $L = 30$ м                  |
| 4. База модуля:                   | $\lambda = 4,5$ м           |
| 5. Крутящий момент на один рельс: | $M = 820$ Н×м               |
| Расчет угла скручивания рельса:   |                             |

$$\theta = \frac{M \times \lambda}{G \times J_{p\_RELS}} \quad (2.2)$$

Расчет по формуле (2.2) дает следующие результаты:

$$\theta = 5,7 \times 10^{-3} \text{ радиан, или } \theta \times \frac{180}{\pi} = 0,327 \text{ градус.}$$

При этом необходимо отметить, что под колесом модуля рельс в действительности не сможет повернуться на угол  $0,327^\circ$ , т.к. возникнет восстанавливающий момент, обусловленный плоской поверхностью опирания головки рельса и цилиндрической поверхностью колеса.

Для оценки бокового увода сечения рельса-струны проведен аналитический расчет без учета изгибной жесткости рельса (при  $+55^\circ\text{C}$  летом, когда минимальное усилие натяжения струны). Боковой увод в этом случае составит 32,5 мм, что составит относительно длины пролета величину  $1/923$ . В действительности, при расчетной ветровой нагрузке на юнибус  $41 \text{ кгс/м}^2$ , этот увод от сцепки юнибусов будет примерно в 3 раза ниже, т.е. около 10 мм, а от одиночного юнибуса — не более 5 мм.

#### Расчет перемещения рельса от боковой силы 1 тс (при $+55^\circ\text{C}$ )

Исходные данные:

- |                                   |                                     |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Боковая сила на один рельс:    | $P = 1000$ кгс                      |
| 2. Сила натяжения струн и рельса: | $T = (199,3 - 2,9) \times 10^3$ кгс |

Расчет бокового перемещения рельса в центре пролета:



$$\Delta_{\text{бок}} = \frac{P \times \left( \frac{1}{\lambda} - \lambda \right)}{4 \times T} \quad (2.3)$$

Расчет по формуле (2.3) дает следующий результат:

$$\Delta_{\text{бок}} = 0,0325 \text{ м} = 32,5 \text{ мм}$$

## 2.5. Расчет напряженного состояния струн. Расчет прочности струн

### 2.5.1. Расчет изменения усилий в струне (высокопрочной проволоке) от температурного перепада (от +55 °С летом до –55 °С зимой)

#### Расчет температурных сил и напряжений в стальных проволоках

1. Температура сборки:	$t_{\text{cb}} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$
2. Температура летом:	$t_{\text{L}} = +55 \text{ } ^\circ\text{C}$
3. Температура зимой:	$t_{\text{Z}} = -55 \text{ } ^\circ\text{C}$
4. Модуль упругости проволок:	$E_{\text{tros}} = 2,06 \times 10^{11} \text{ Па}$
5. Коэффициент линейного расширения:	$\alpha_{\text{stell}} = 1,2 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
6. Площадь одной проволоки:	$F_{\text{trosa}} = 7,065 \times 10^{-6} \text{ м}^2$
7. Всего проволок в рельсе:	$n = 260 \text{ шт.}$
8. Сила натяжения одной проволоки при 0 °С:	$N_0 = 8482 \text{ Н}$

Напряжения в проволоке при температуре сборки 0 °С составят:

$$\sigma_0 = \frac{N_0}{F_{\text{trosa}}} \quad (2.4)$$

Тогда:

$$\sigma_0 = 1,2 \times 10^9 \text{ Па} = 1200 \text{ МПа}$$

9. Сила натяжения одной проволоки при температуре +55 °С (без учета воздействия подвижной нагрузки):

$$N_{55} = N_0 + E_{\text{tros}} \times \alpha_{\text{stell}} \times (t_{\text{cb}} - t_{\text{L}}) \times F_{\text{trosa}} \quad (2.5)$$

Тогда:

$$N_{55} = 7521 \text{ Н} = 767,45 \text{ кГс}$$

Напряжения в проволоке при +55 °С (без учета воздействия подвижной нагрузки):

$$\sigma_{55} = \frac{N_{55}}{F_{\text{троса}}} \quad (2.6)$$

Тогда:

$$\sigma_{55} = 1,064 \times 10^9 \text{ Па} = 1064 \text{ МПа}$$

10. Сила натяжения одной проволоки при –55 °С (без учета воздействия подвижной нагрузки):

$$N_{-55} = N_0 + E_{\text{трос}} \times \alpha_{\text{стелл}} \times (t_{\text{cb}} - t_z) \times F_{\text{троса}} \quad (2.7)$$

Тогда:

$$N_{-55} = 9443 \text{ Н} = 963,57 \text{ кГс}$$

Напряжения в проволоке при –55 °С (без учета воздействия подвижной нагрузки):

$$\sigma_{-55} = \frac{N_{-55}}{F_{\text{троса}}} \quad (2.8)$$

Тогда:

$$\sigma_{-55} = 1,336 \times 10^9 \text{ Па} = 1336 \text{ МПа}$$

11. Сила натяжения всех проволок в рельсе при +55 °С (без учета воздействия подвижной нагрузки):

$$T_{55} = N_{55} \times n \quad (2.9)$$

Тогда:

$$T_{55} = 1,955 \times 10^6 \text{ Н} = 200000 \text{ кгс} = 200 \text{ т}\cdot\text{с}$$

12. Сила натяжения всех проволок в рельсе при  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$  (без учета воздействия подвижной нагрузки):

$$T_{-55} = N_{-55} \times n \quad (2.10)$$

Тогда:

$$T_{-55} = 2,455 \times 10^6 \text{ Н} = 250500 \text{ кгс} = 250,5 \text{ т}\cdot\text{с}$$

Как видно из расчета, наибольшая сила натяжения струны, от предварительного натяжения и от перепада температур в струне, составляет 250,5 тонн (зимой при  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ ), что соответствует растягивающему напряжению 1336 МПа. Это значительно ниже предела текучести материала высокопрочной проволоки диаметром 3 мм производства завода ВолгоМетиз (г. Волгоград), которую планируется использовать для струн ( $\sigma_{0,2} = 1932 \text{ МПа}$ ).

#### 2.5.2. Расчет изменений напряжений в струнах от собственного веса рельсо-струнной путевой структуры и от проезда юнибуса

Расчеты по изменению напряжений струн проводились для участка рельсо-струнной путевой структуры, общей длиной 150 м (5 пролетов). Эпюры продольных сил в струне для различных нагрузок показаны в п. 3.2, рис. 3.2.1—3.2.8. Наибольшее натяжение струн будет при движении двух юнибусов, расположенных в середине пролета (см. п. 3.2, рис. 3.2.5) при температуре  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $2457,6 \text{ кН} = 250,8 \text{ тс}$ .

При этой же температуре  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ , усилие в струне на пролете, где нет юнибусов, составит  $2456,8 \text{ кН}$ , т.е. сцепка юнибусов увеличит усилие в струне на нагруженном пролете лишь на  $2457,6 - 2456,8 = 0,8 \text{ кН} = 0,08 \text{ тс}$ , т.е. всего на 0,03%. Из полученных данных можно сделать важный вывод: в процессе эксплуатации рельсо-струнная путевая структура является статической системой, т.к. даже аварийное нагружение путевой структуры двумя движущимися на пролете

юнибусами приводит к увеличению напряжений в струне менее чем на 0,1%, чем можно пренебречь.

Расчет проводился для воздействия от двух юнибусов, весом 2,5 тс каждый, расположенных в середине пролета между промежуточными опорами. Результаты расчетов приведены в табл. 3.5.1 (см. п. 3.5).

### 2.5.3. Расчет прочности струн

Как видно из табл. 3.5.1 (п. 3.5), наибольшее изменение напряжений в струне от проезда двух груженых юнибусов в сцепке произойдет летом при +55 °С, когда они меньше всего натянуты. Однако размах напряжений от проезда двух транспортных средств общим весом 5 тонн очень мал и составляет всего 0,4 МПа зимой при –55 °С и 0,84 МПа летом при +55 °С, что составляет пренебрежимую величину — менее 0,1% от напряжений в струне. Коэффициент асимметрии цикла напряжений  $\rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$  при этом составит:

$$\text{Летом } +55 \text{ }^\circ\text{C:} \quad \rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 1065,14/1065,98 = 0,99921 \quad (2.11)$$

$$\text{Зимой } -55 \text{ }^\circ\text{C:} \quad \rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 1336,83/1337,23 = 0,99970 \quad (2.12)$$

Коэффициенты асимметрии цикла напряжений зимой и летом практически не отличаются от единицы. По любым существующим методикам расчета выносливости (СниПы, Нормы и т.д. в России и других странах) это означает, что нагрузка на струны — статическая и циклической составляющей можно пренебречь.

От одного юнибуса размах напряжений в струне будет еще меньше. По этой причине расчет на выносливость струн не проводится согласно действующим нормативам. При этом струны обеспечат срок службы по выносливости более 100 лет.

Как видно из табл. 3.5.1 (п. 3.5), наибольшие напряжения в струнах будут зимой при –55 °С и соответствуют растягивающему напряжению 1337 МПа.

В табл. 2.1 представлены нормативные характеристики высокопрочной проволоки, используемой для струн, согласно ГОСТ 7348-81.

Таблица 2.1

Нормативные технические характеристики высокопрочной проволоки из углеродистой стали  
(круглая и периодического профиля)

Диаметр проволоки	3,0 мм; 4,0 мм; 5,0 мм
Марка стали	75, 80, 85
Разрывное усилие	для 3,0 мм — не менее 12600 Н для 4,0 мм — не менее 21400 Н для 5,0 мм — не менее 32800 Н
Область применения	В строительстве для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций

Для проволоки диаметром 3 мм нормативное разрывное напряжение должно быть не менее  $R_{\text{нп}} = 12600/7,069 = 1782$  МПа — напряжение при разрывном усилии 12600 Н, согласно ГОСТ 7348-81 (для проволоки, планируемой к использованию в СТЮ и выпускаемой отечественной промышленностью,  $R_{\text{нп}} > 2200$  МПа).

Предлагаемая к использованию в СТЮ в ХМАО—Югре высокопрочная оцинкованная проволока диаметром 3 мм имеет значительно более высокие прочностные характеристики, чем рекомендуемые строительными нормативами. Поэтому при определении расчетных (допустимых) напряжений в струне необходимо руководствоваться требованиями долговечности и выносливости конструкции и ее запасом прочности, а не рекомендациями по проектированию других, пусть и близких к СТЮ строительных сооружений (в частности, висячих мостов), но существенно отличающихся от СТЮ воздействиями, нагрузками и принципами работы.

Предельно допустимые растягивающие напряжения в проволоках струны СТЮ (производства завода «ВолгоМетиз») при расчетах по прочности могут быть приняты равными:

$$R_y = 0,8 \times \sigma_{0,2} = 0,8 \times 1932 = 1545 \text{ МПа}, \quad (2.13)$$

где:

$R_y$  — расчетное сопротивление материала (проволоки струны),

0,8 — понижающий коэффициент (при 20%-ном относительном запасе прочности, а абсолютном запасе прочности —  $\Delta R_{\text{пр}} = 387$  МПа);

1932 МПа — прочность на разрыв оцинкованной проволоки диаметром 3 мм (данные заводских лабораторных испытаний).

Запас прочности струны при этом составит  $\Delta R_{\text{пр}} = 1932 - 1545 = 387$  МПа, что превышает прочность большинства конструкционных сталей, например, 09Г2С, применяемых в мостостроении и планируемых для изготовления головки и корпуса рельса-струны. Поэтому такой запас прочности струны не является заниженным и оправдан с позиций материаловедения, когда прочностные свойства материалов конструкции используются максимально.

По сравнению с мостовыми нормативами, действующими на территории РФ, допустимые напряжения в струне СТЮ будут превышать допустимые напряжения в высокопрочной гладкой проволоке В-II диаметром 3 мм в автодорожных и городских мостах на  $1545 - 1180 = 365$  МПа (см. табл. 31\* СНиП 2.05.03-84\*).

Занижение допустимых растягивающих напряжений в предварительно напрягаемой арматуре традиционных мостов вполне оправдано, т.к. увеличение со временем временной нагрузки, например, в 3 раза (что возможно за длительный период эксплуатации моста), или увеличение массы моста на 50% (например, за счет многократной укладки нового асфальтобетонного покрытия поверх старого), могут привести к обрушению моста.

В СТЮ благодаря другой схеме работы рельсо-струнной путевой структуры на пролете (она работает как жесткая нить, а не как балка), напряжения в струне не критичны к внешним поперечным воздействиям, как то: подвижная нагрузка, ветровая нагрузка, лед, снег и др. Кроме того, например, снег и лед, в отличие от мостов, вообще не могут образоваться на рельсе-струне, т.к. при каждом проходе юнибуса, они будут раздавливаться стальными колесами и сбрасываться ими вниз.

Запас прочности традиционных мостов по воздействию расчетной подвижной нагрузки (при заниженных допустимых напряжениях в арматуре) не превышает 3—5 раз, в то время как в СТЮ даже при увеличении до 1545 МПа допустимых напряжений в струне запас прочности составит (в самом напряженном состоянии, при  $-55$  °С зимой):

- 1) для сцепки из двух юнибусов (2,5 тс + 2,5 тс):  $n_1 = (1932 - 1545)/0,4 = 968$ ;
- 2) для одиночного модуля запас прочности  $n_2$  струны превысит значение  $n_2 = 1900$  раз (при  $-55$  °С),

где:

0,4 МПа — размах напряжений в струне при  $-55$  °С от воздействия расчетной

подвижной нагрузки (от двух юнибусов в сцепке: 2,5 тс + 2,5 тс) — см. п. 3.5, табл. 3.5.1.

В настоящее время ни в одной строительной конструкции, даже самого высокого уровня ответственности, в том числе в висячих и вантовых мостах, ни в РФ ни за рубежом, не используются такие запасы прочности (1000 раз и более), поэтому повышение допустимых расчетных напряжений в струне СТЮ, в сравнении с напрягаемой арматурой традиционных мостов, является оправданным и обоснованным. При этом расчетные напряжения в струне при воздействии расчетной подвижной нагрузки практически не отличаются от воздействия монтажных нагрузок и от состояния, когда вообще не действуют никакие нагрузки (кроме собственного веса). Эти отличия составляют величину менее 0,1%, поэтому в дальнейшем коэффициент условий работы струны принимается равным 1.

Проверку прочности струны проводим по СНиП 2.05.03-84\* «Мосты и трубы».

$$\sigma_s \leq R_y \times m, \quad (2.14)$$

где:

$\sigma_s$  — нормальные напряжения от растяжения;

$m = 1$  — коэффициент условий работы струны, принимаемый по таблице 60\* СНиП 2.05.03-84\*.

Для проволоки струны диаметром 3 мм:  $R_y = 1545$  МПа,  $m \times R_y = 1545$  МПа.

Сопоставляя наибольшие действующие напряжения растяжения в струнах зимой при  $-55$  °С, равные 1337 МПа, которые приведены в таблице 3.5.1 (п. 3.5), с расчетными сопротивлениями  $m \times R_y = 1545$  МПа, можно утверждать, что прочность струн при  $-55$  °С обеспечена. При этом запас надежности по величине расчетных напряжений от подвижной нагрузки составит  $n_3 = (1545 - 1337)/0,4 = 520$  (при  $-55$  °С), а запас надежности по величине минимальной температуры составит  $n_4 = (1545 - 1337)/2,47 = 84$  (где 2,47 МПа/°С — изменение напряжений в струне при изменении температуры на 1 °С).

Это говорит о чрезвычайно высокой надежности СТЮ по отношению к внешним воздействиям, не имеющей аналогов в мировом мостостроении. Еще более высокими будут запасы прочности струны СТЮ, т.к. разрушающие напряжения будут выше допустимых еще на 387 МПа.

## 2.6. Расчет напряженного состояния головки рельса и корпуса рельса. Расчет прочности и оценка выносливости головки рельса и корпуса рельса

2.6.1. Расчет изменений напряжений растяжения (сжатия) от температурного перепада (от +55 °С летом до –55 °С зимой) в головке рельса и корпусе рельса

### Расчет температурных сил и напряжений в рельсе

- |  |  |
|--|--|
| 1. Температура сборки:   | $t_{cb} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$                           |
| 2. Температура летом:  | $t_L = +55 \text{ } ^\circ\text{C}$                            |
| 3. Температура зимой:  | $t_Z = -55 \text{ } ^\circ\text{C}$                            |
| 4. Модуль упругости:   | $E_k = 2,06 \times 10^{11} \text{ Па}$                         |
| 5. Коэффициент линейного расширения:   | $\alpha_{stell} = 1,2 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ |
| 6. Площадь сечения (с учетом приведенного бетонного наполнителя к стенкам рельса): | $F_k = 0,004812 \text{ м}^2$                                   |
| 7. Сила натяжения корпуса рельса при температуре сборки 0 °С:                      | $6,256 \times 10^5 \text{ Н}$                                  |

Усилие в корпусе и головке рельса при температуре сборки 0 °С составят:

$$N_0 = 6,256 \times 10^5 \text{ Н} = 63840 \text{ кГс} = 63,84 \text{ тс}, \quad (2.15)$$

а напряжения:

$$\sigma_0 = \frac{N_0}{F_k}$$

Тогда:  $\sigma_0 = 130 \times 10^6 \text{ Па} = 130 \text{ МПа}.$

8. Сила натяжения корпуса и головки рельса при температуре +55 °С составит:

$$N_{55} = N_0 + E_k \times \alpha_{stell} \times (t_{cb} - t_L) \times F_k. \quad (2.16)$$

Тогда:



$$N_{55} = -2,868 \times 10^4 \text{ Н} = -2927 \text{ кгс} = -2,927 \text{ тс},$$

т.е. корпус и головка рельса при +55 °С будут сжаты небольшим усилием.

Температурные напряжения в корпусе рельса при +55 °С:

$$\sigma_{55} = \frac{N_{55}}{F_k}. \quad (2.17)$$

Тогда:

$$\sigma_{55} = -5,96 \times 10^6 \text{ Па} = -5,96 \text{ МПа}.$$

9. Сила натяжения корпуса и головки рельса при -55 °С:

$$N_{-55} = N_0 + E_k \times \alpha_{\text{st}} \times (t_{\text{cb}} - t_z) \times F_k. \quad (2.18)$$

Тогда:

$$N_{-55} = 1,28 \times 10^6 \text{ Н} = 130600 \text{ кгс} = 130,6 \text{ тс}$$

Температурные напряжения корпуса и головки рельса при -55 °С:

$$\sigma_{-55} = \frac{N_{-55}}{F_k}. \quad (2.19)$$

Тогда:

$$\sigma_{-55} = 2,66 \times 10^8 \text{ Па} = 266 \text{ МПа}.$$

### 2.6.2. Расчет напряжений изгиба от собственного веса рельсо-струнной путевой структуры и при нагружении вертикальной силой от юнибуса

Расчет напряжений изгиба от собственного веса рельсо-струнной путевой структуры и при нагружении вертикальными силами от юнибусов проводились для

участка путевой структуры, общей длиной 150 м (5 пролетов по 30 метров каждый).

Для расчета на прочность и выносливость рельсо-струнной путевой структуры при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточных опорах, юнибус располагался:

- для одиночного юнибуса и для сцепки из двух юнибусов — в середине пролета (п. 3.1, рис. 3.1.1 и 3.1.2);
- для сцепки из двух юнибусов — по одну сторону от промежуточной опоры на расстоянии 9,3 м от нее, считая от центра тяжести (или 3,1 м до ближайшего колеса) для расчета прочности (п. 3.1, рис. 3.1.3). Обоснование наиболее опасного расположения подвижной нагрузки приведено в п. 3.4, рис. 3.4.1 и 3.4.2;
- по одну сторону от промежуточной опоры на расстоянии 5 м от нее, считая от центра тяжести (или 2,75 м до ближайшего колеса) для расчета выносливости (п. 3.1, рис. 3.1.5) Обоснование наиболее опасного расположения подвижной нагрузки представлено в п. 3.4, рис. 3.4.3 и 3.4.4.

Для расчета на прочность и выносливость рельсо-струнной путевой структуры для варианта шарнирного закрепления корпуса рельса на промежуточных опорах, юнибус располагался:

- для одного юнибуса и для сцепки из двух юнибусов — в середине пролета (п. 3.1, рис. 3.1.1 и 3.1.2);
- для сцепки из двух юнибусов — симметрично над промежуточной опорой для расчета на прочность (п. 3.1, рис. 3.1.4); обоснование наиболее опасного расположения подвижной нагрузки приведено в п. 3.4, рис. 3.4.5 и 3.4.6;
- для одного юнибуса — по одну сторону от промежуточной опоры на расстоянии 5,6 м от нее, считая от центра тяжести (или 3,35 м до ближайшего колеса), для расчета выносливости (п. 3.1, рис. 3.1.6); обоснование наиболее опасного расположения подвижной нагрузки приведено в п. 3.4, рис. 3.4.7 и 3.4.8.

При расчете на прочность предполагалось, что транспортных модулей два, они движутся вместе в механической сцепке и каждое создает вертикальную силу 2,5 тс. При расчете на прочность два юнибуса создавали вертикальную силу 5 тс (на половину рельсо-струнной путевой структуры, т.е. на один рельс-струну приходится

2,5 тс, а на каждое колесо — по 0,625 тс). Результаты расчетов напряжений в головке и корпусе рельса-струны для оценки его прочности приведены в п. 3.5: для жесткой заделки рельса-струны на опоре — табл. 3.5.2.1 и 3.5.2.2, для шарнирного закрепления рельса-струны на опоре — табл. 3.5.3.1 и 3.5.3.2; данные приведены для двух нагружений — в центре пролета и у опоры.

При расчете рельсо-струнной путевой структуры на выносливость предполагалось, что одиночный транспортный модуль с учетом вертикальной динамики создает вертикальную силу 2,5 тс (на половину струнной путевой структуры, т.е. на один рельс, приходится 1,25 тс, а на каждое колесо — по 0,625 тс). Результаты расчетов напряжений в головке и корпусе рельса-струны для оценки его выносливости приведены в п. 3.5: для жесткой заделки рельса-струны на опоре — табл. 3.5.4.1 и 3.5.4.2, для шарнирного закрепления рельса-струны на опоре — табл. 3.5.5.1 и 3.5.5.2; данные приведены для двух нагружений — в центре пролета и у опоры.

Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил для корпуса и головки рельса-струны показаны в п. 3.3 (рис. 3.3.1—3.3.40).

### 2.6.3. Расчет прочности и оценка выносливости рельса-струны

#### Проверка прочности корпуса и головки рельса-струны

Проверку прочности проводим по формуле (2.14) согласно СНиП 2.05.03-84\* (Мосты и трубы):

$$\sigma_s \leq R_y \times m, \quad (2.20)$$

где:

$\sigma_s$  — нормальные напряжения от изгиба и растяжения;

$R_y$  — расчетное сопротивление текучести материала;

$m = 0,95$  — коэффициент условий работы корпуса и головки рельса, принимаемый по таблице 60\* СНиП 2.05.03-84\*.

Марка стали принята 09Г2С по ГОСТ 19281-89\* класса 345 по ГОСТ 27772-88.

Механические свойства проката С345 приведены в табл. 2.2 (выписка из табл. 51\* СНиП II-23-81\*).

Механические свойства проката С345

Класс стали	Толщина проката, мм	Нормативное сопротивление, МПа				Расчетное сопротивление, МПа			
		листового, полосового		фасонного		листового, полосового		фасонного	
		$R_{yn}$	$R_{un}$	$R_{yn}$	$R_{un}$	$R_y$	$R_u$	$R_y$	$R_u$
345	2—10	345	490	345	490	335	480	335	480
	>10—20	325	470	325	470	315	460	315	460
	>20—40	305	460	305	460	300	450	300	450
	>40—60	285	450	—	—	280	440	—	—
	>60—80	275	440	—	—	270	430	—	—
	>80—160	265	430	—	—	260	420	—	—

Исходя из данных, приведенных в табл. 2.2, расчетные сопротивления текучести следует принять равными:

- для головки рельса (толщина 20 мм):  $R_y = 315$  МПа,  $m \times R_y = 299$  МПа;
- для корпуса рельса (толщина 3 мм):  $R_y = 335$  МПа,  $m \times R_y = 318$  МПа.

Вариант жесткой заделки рельса-струны на промежуточных опорах

1) Середина пролета

Сопоставляя наибольшие действующие для верхней точки головки рельса напряжения растяжения зимой при  $-55$  °С, равные  $+286,52$  МПа в середине пролета, которые приведены в табл. 3.5.2.1, с расчетными сопротивлениями  $m \times R_y = 299$  МПа для стали 09Г2, можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям в головке рельса в середине пролета при  $-55$  °С для этой стали обеспечена.

Так же сопоставляя наибольшие действующие для нижней точки корпуса рельса напряжения сжатия летом при  $+55$  °С, равные  $28,45$  МПа в середине пролета, которые приведены в табл. 3.5.2.1, с расчетными сопротивлениями  $m \times R_y = 318$  МПа для стали 09Г2С, можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям корпуса рельса в середине пролета при  $+55$  °С для этой стали обеспечена.

2) На промежуточной опоре

Сопоставляя наибольшие действующие для верхней точки головки рельса напряжения растяжения зимой при  $-55$  °С, равные  $+312,92$  МПа на промежуточной опоре, которые приведены в табл. 3.5.2.2, с расчетными сопротивлениями  $m \times R_y = 299$

МПа, можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям головки рельса при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  не обеспечена.

Сопоставляя наибольшие действующие для нижней точки корпуса рельса напряжения сжатия летом при  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , равные  $-140,04\text{ МПа}$  на промежуточной опоре, которые приведены в табл. 3.5.2.2, с расчетными сопротивлениями  $m \times R_y = 318\text{ МПа}$ , можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям корпуса при  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$  обеспечена.

Для обеспечения прочности головки рельса при жесткой заделке рельса-струны на опоре необходимо либо усилить сечение рельса непосредственно над промежуточной опорой, либо применить для головки рельса более прочную сталь — с расчетным сопротивлением более  $313\text{ МПа}$ .

При усилении рельса над промежуточной опорой для корпуса рельса в этом случае подойдет рассмотренная выше сталь 09Г2С. При этом усиливать необходимо лишь достаточно короткий участок над опорой, длиной  $2\text{—}3\text{ м}$  (или по  $1\text{—}1,5\text{ м}$  от центра опоры в обе стороны, т.к., например, на расстоянии  $1\text{—}1,5\text{ м}$  от центра опоры изгибающий момент в рельсе падает в  $2\text{—}3$  раза и не превышает его значения на остальной части пролета (см. рис. 3.3.15, п. 3.3).

#### Вариант шарнирного закрепления рельса-струны на промежуточных опорах

##### 1) Середина пролета

Сопоставляя наибольшие действующие для верхней точки головки рельса напряжения растяжения зимой при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , равные  $+286,94\text{ МПа}$  в середине пролета, которые приведены в табл. 3.5.3.1, с расчетными сопротивлениями  $m \times R_y = 299\text{ МПа}$  для стали 09Г2С, можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям головки рельса при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  для этой стали обеспечена.

Так же сопоставляя наибольшие действующие для нижней точки корпуса рельса напряжения сжатия летом при  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , равные  $29,12\text{ МПа}$  в середине пролета, которые приведены в табл. 3.5.3.1, с расчетными сопротивлениями  $m \times R_y = 318\text{ МПа}$  для стали 09Г2С, можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям корпуса рельса при  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$  для этой стали обеспечена.

##### 2) На промежуточной опоре

Сопоставляя наибольшие действующие для верхней точки головки рельса напряжения растяжения зимой при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , равные  $+298,2\text{ МПа}$  на промежуточной

опоре, которые приведены в табл. 3.5.3.2, с расчетными сопротивлениями  $m \times R_y = 299$  МПа для стали 09Г2С, можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям рельса при  $-55$  °С для этой стали обеспечена.

Сопоставляя наибольшие действующие для нижней точки корпуса рельса напряжения сжатия летом при  $+55$  °С, равные  $-95,73$  МПа на промежуточной опоре, которые приведены в табл. 3.5.3.2, с расчетными сопротивлениями  $m \times R_y = 318$  МПа для стали 09Г2С, можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям корпуса рельса при  $+55$  °С для этой стали обеспечена.

Таким образом, расчеты показывают, что шарнирное закрепление рельса на промежуточных опорах предпочтительней, т.к. при наиболее опасном нагружении (два юнибуса в сцепке общим весом 5 тс):

- максимальный изгибающий момент в рельсе-струне в сечении над промежуточной опорой при  $+55$  °С будет меньше, чем при жесткой заделке корпуса рельса, на  $2,455 - 1,645 = 0,81$  т×м (см. рис. 3.3.15 и 3.3.23 п. 3.3);
- максимальный изгибающий момент при  $+55$  °С в рельсе-струне в сечении под колесами модулей при их нахождении у опоры будет меньше, чем при жесткой заделке корпуса рельса, на  $0,63 - 0,52 = 0,11$  т×м (см. рис. 3.3.15 и 3.3.23 п. 3.3);
- максимальные напряжения растяжения в головке рельса над опорой при  $-55$  °С будут ниже аналогичных напряжений при жесткой заделке рельса на опоре на  $312,9 - 298,2 = 14,7$  МПа (см. табл. 3.5.2.2 и 3.5.3.2);
- максимальные напряжения сжатия в подошве корпуса рельса над опорой при  $+55$  °С будут ниже аналогичных напряжений при жесткой заделке рельса на опоре на  $140 - 95,7 = 44,3$  МПа (см. табл. 3.5.2.2 и 3.5.3.2);

### Проверка выносливости рельса

Стальные конструкции и их элементы эстакадных транспортных сооружений, к чему может быть отнесен и СТЮ, непосредственно воспринимают многократно действующие подвижные, вибрационные или другого вида нагрузки с количеством циклов нагружений  $10^6$  и более. Это может привести к явлению усталости, поэтому их следует проектировать с применением таких конструктивных решений, которые не вызывают значительной концентрации напряжений, а также следует проверять расчетом на выносливость.

Проверку выносливости будем проводить для наиболее ослабленного поперечного сечения рельса-струны — для поперечных сварных швов в головке и корпусе рельса по СНиП II-23-81\* (Стальные конструкции). Сварные поперечные швы располагаются в путевой структуре через каждые 10—12 метров (по длине проката). На промежуточных опорах сварные швы существенно усиливаются (накладками, косынками и др.), поэтому расчет проводим для поперечных сварных швов головки и корпуса рельса, расположенных между опорами. Расчет проводим для двух крайних температур:  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Напряженное состояние рельса-струны в сечении середины пролета под колесами юнибусов практически не отличается от напряженных состояний в других сечениях на расстояниях не ближе 3 метров от промежуточных опор. Так же имеются очень малые отличия напряженного состояние рельса (на указанных расстояниях от опор) от вида крепления рельса на опорах — жесткого или шарнирного (см. табл. 3.5.4.1—3.5.4.2 и 3.5.5.1—3.5.5.2 для середины пролета). Поэтому напряжения для расчетных сечений будем брать из табл. 3.5.4.1 для середины пролета.

Расчет конструкций на выносливость следует производить на действие нагрузок, устанавливаемых согласно требованиям СНиПа II-23-81 по нагрузкам и воздействиям.

Расчет на выносливость следует производить по формуле:

$$\sigma_{\max} \leq \alpha \times R_v \times \gamma_v, \quad (2.21)$$

где:

$R_v$  — расчетное сопротивление усталости, принимаемое по табл. 32\* СНиПа в зависимости от временного сопротивления стали и групп элементов конструкций, приведенных в табл. 83\*; для поперечных сварных швов (соединение встык прокатных профилей) не зависит от прочности материала рельса и равен  $R_v = 75\text{ МПа}$  (четвертая группа элементов);

$\alpha$  — коэффициент, учитывающий количество циклов нагружений  $n$  и при  $n \geq 3,9 \cdot 10^6$  принимается равным  $\alpha = 0,77$ ;

$\gamma_v$  — коэффициент, определяемый по табл. 33 СНиПа в зависимости от вида напряженного состояния и коэффициента асимметрии напряжений

$\rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ ; здесь  $\sigma_{\min}$  и  $\sigma_{\max}$  — соответственно наибольшее и наименьшее по абсолютному значению напряжения в рассчитываемом элементе.

Значения коэффициентов  $R_v$  и  $\gamma_v$  представлены в табл. 2.3 и 2.4.

Таблица 2.3

Значения коэффициента  $R_v$  (таблица 32\* СНиП II-23-81)

Группа элементов	Значения $R_v$ при временном сопротивлении стали разрыву $R_{\text{уп}}$ , МПа (кгс/см <sup>2</sup> )				
	до 420 (4300)	св. 420 (4300) до 440 (4500)	св. 440 (4500) до 520 (5300)	св. 520 (5300) до 580 (5900)	св. 580 (5900) до 635 (6500)
1	120 (1220)	128 (1300)	132 (1350)	136 (1390)	145 (1480)
2	100 (1020)	106 (1080)	108 (1100)	110 (1120)	116 (1180)
3	Для всех марок стали 90 (920)				
4	Для всех марок стали 75 (765)				
5	Для всех марок стали 60 (610)				
6	Для всех марок стали 45 (460)				
7	Для всех марок стали 36 (370)				
8	Для всех марок стали 27 (275)				

Таблица 2.4

Значения коэффициента  $\gamma_v$  (таблица 33 СНиП II-23-81)

$\sigma_{\max}$	Коэффициент асимметрии напряжений $\rho$	Формулы для вычисления коэффициента $\gamma_v$
Растяжение	$-1 \leq \rho \leq 0$	$\gamma_v = \frac{2,5}{1,5 - \rho}$
	$0 < \rho \leq 0,8$	$\gamma_v = \frac{2,0}{1,2 - \rho}$
	$0,8 < \rho < 1$	$\gamma_v = \frac{1,0}{1 - \rho}$
Сжатие	$-1 \leq \rho < 1$	$\gamma_v = \frac{2}{1 - \rho}$

1) Выполним проверку выносливости поперечного сварного шва верха головки рельса зимой при  $-55$  °С (данные из табл. 3.5.4.1, п. 3.5, для середины пролета):

Верх головки рельса:  $\sigma_{\min} = 262,59$  МПа (с подвижной нагрузкой);  $\sigma_{\max} = 266,35$



МПа (без подвижной нагрузки на пролете),  $\rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 262,59 / 266,35 = 0,986$ .

$$\gamma_v = \frac{1,0}{1 - \rho} = 70,92$$

$$\alpha \times R_v \times \gamma_v = 0,77 \times 75 \times 70,92 = 4095 \text{ МПа} > \sigma_{\max} = 266,35 \text{ МПа.}$$

Выносливость места сварки головки рельса зимой при  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$  обеспечена.

2) Выполним проверку выносливости поперечного сварного шва низа корпуса рельса зимой при  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$  (данные из табл. 3.5.4.1, п. 3.5, для середины пролета):

Низ корпуса рельса:  $\sigma_{\min} = 265,31 \text{ МПа}$  (без подвижной нагрузки);  $\sigma_{\max} = 285,5 \text{ МПа}$  (с подвижной нагрузкой на пролете);  $\rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 265,31/285,5 = 0,929$ .

$$\gamma_v = \frac{1,0}{1 - \rho} = 14,14$$

$$\alpha \times R_v \times \gamma_v = 0,77 \times 75 \times 14,14 = 816,6 \text{ МПа} > \sigma_{\max} = 285,5 \text{ МПа.}$$

Выносливость места сварки корпуса рельса зимой при  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$  обеспечена.

3) Выполним проверку выносливости поперечного сварного шва верха головки рельса летом при  $+55 \text{ }^\circ\text{C}$  (данные из табл. 3.5.4.1 для середины пролета):

Верх головки рельса:  $\sigma_{\min} = -6,7 \text{ МПа}$  (без подвижной нагрузки);  $\sigma_{\max} = -24,51 \text{ МПа}$  (с подвижной нагрузкой на пролете),  $\rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = -6,7/-24,51 = 0,273$  (сжатие).

$$\gamma_v = \frac{2}{1 - \rho} = 1,376$$

$$\alpha \times R_v \times \gamma_v = 0,77 \times 75 \times 1,376 = 79,46 \text{ МПа} > \sigma_{\max} = 24,51 \text{ МПа.}$$

Выносливость места сварки головки рельса летом при  $+55 \text{ }^\circ\text{C}$  обеспечена.

4) Выполним проверку выносливости поперечного сварного шва низа корпуса рельса летом при  $+55 \text{ }^\circ\text{C}$  (данные из табл. 3.5.4.1 для середины пролета):

Низ корпуса рельса:  $\sigma_{\min} = -4,69 \text{ МПа}$  (без подвижной нагрузки);  $\sigma_{\max} = 24,76 \text{ МПа}$  (с подвижной нагрузкой на пролете);

$$\rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = -4,69/24,76 = -0,189.$$

$$\gamma_v = \frac{2,5}{1,5 - \rho} = 1,48$$

$$\alpha \times R_v \times \gamma_v = 0,77 \times 75 \times 1,48 = 85,47 \text{ МПа} > \sigma_{\max} = 24,76 \text{ МПа}.$$

Выносливость места сварки корпуса рельса летом при +55°С обеспечена.

## 2.7. Расчет горизонтальных нагрузок на промежуточные опоры при торможении потока юнибусов

При торможении потока высокоскоростных юнибусов (см. рис. 2.12) от сил сцепления колес с рельсами происходит горизонтальное нагружение промежуточных опор. Коэффициент сцепления между колесом и рельсом принят максимально возможным — равным 0,4.



Рис. 2.12. Расчетная схема нагружения опор шестью модулями

Промежуточные опоры в расчете имели высоту 5 метров, в сечении — круглая труба с наружным диаметром 40 см и толщиной стенки 6 см. Материал опор для простоты расчета принимался изотропным с модулем упругости  $E_6 = 35000 \text{ МПа}$  (как у бетона).

В расчете приняты две схемы нагружения:

1) Шесть модулей весом 2,5 тс одновременно тормозят на длине между анкерными опорами. Расстояние между ними по 500 метров.

Расчетная схема изображена на рис. 2.12.

Результат расчета изображен в виде графика на рис. 2.13.

Как видно из рис. 2.13, наибольшие горизонтальные силы получились в расчете равными  $367 \text{ Н} = 37,45 \text{ кгс}$ .



Рис. 2.13. График нагружения горизонтальными силами верха промежуточных опор шестью тормозящими юнибусами

2) Два юнибуса в сцепке, каждый весом 2,5 тс, одновременно тормозят над промежуточной опорой, одинаково удаленной (по 1500 м) от двух анкерных опор.

Результат расчета изображен в виде графика на рис. 2.14.



Рис. 2.14. График нагружения горизонтальными силами верха промежуточных опор двумя юнибусами в сцепке, тормозящих одновременно в середине между анкерными опорами

Как видно из рис. 2.14, наибольшая горизонтальная сила получена в расчете равной  $544 \text{ Н} = 55,5 \text{ кГс}$ .

Расчеты показывают малость горизонтальных сил на промежуточные опоры от торможения юнибусов. Это, соответственно, приведет к невысоким изгибающим моментам в теле опоры, которые могут быть выполнены ажурными (например, эти усилия будут ниже, чем в столбах освещения городских улиц и в столбах, поддерживающих контактную сеть на троллейбусных, трамвайных и железнодорожных линиях).

## **2.8. Расчет противовыгиба корпуса рельса-струны для повышения ровности пути**

Для повышения динамической ровности пути (рельсо-струнной путевой структуры) предлагается, во время строительства трассы СТЮ, осуществить выгиб из горизонтального положения корпуса рельса по определенной кривой вверх (создать противовыгиб). На промежуточных опорах величина противовыгиба равна нулю, а в середине пролета между промежуточными опорами максимальна и направлена вверх. При расчете кривой противовыгиба предполагалось, что статически приложенная вертикальная нагрузка  $2,1 \text{ тс}$  от юнибуса (вес юнибуса и наполовину заполненный пассажирами салон) при температуре  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , перемещаясь по пролету (между промежуточными опорами) будет двигаться строго по прямой. Расчет кривой противовыгиба осуществлялся для двух случаев: жесткого и шарнирного крепления рельса-струны на опоре.

### **2.8.1. Жесткая заделка рельса на опоре**

Результат расчета кривой противовыгиба изображен на рис. 2.15, а ее координаты представлены в табл. 2.5.



Рис. 2.15. Половина кривой противовыгиба от 0 метров (опора) до 15 метров (середина пролета); вторая ветвь кривой (не показана) — симметрична относительно середины пролета

Таблица 2.5

Координаты кривой противовыгиба от 0 метров (опора) до 15 метров (середина пролета)

Координата по оси X (метры)	Величина противовыгиба оси Y(мм)
0	0,000
1	0,409
2	1,662
3	3,523
4	5,756
5	8,129
6	10,467
7	12,655
8	14,615
9	16,334
10	17,804
11	19,018
12	19,968
13	20,645
14	21,042
15	21,152

1) Сделаем оценку повышения ровности пути, используя результаты расчетов прогиба точки — середины между передними и задними колесами юнибуса весом 2,5 тс — **при температуре +55 °С** (при температуре +55 °С прогибы наибольшие).

Результаты расчетов движения центра масс юнибуса — середины между колесами — изображены в виде графиков на рис. 2.16.

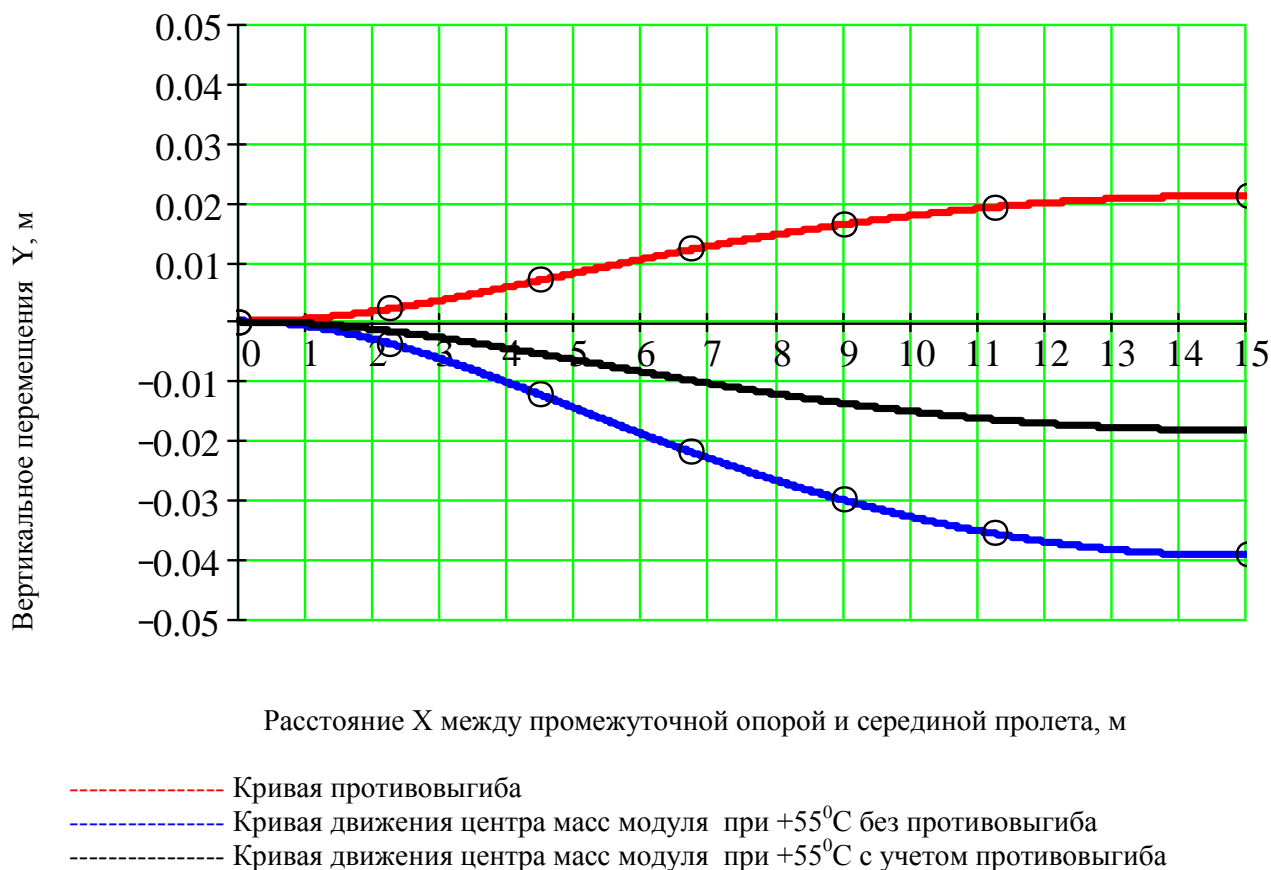


Рис. 2.16. Половина кривых противовыгиба и движения центра масс юнибуса от 0 метров (опора) до 15 метров (середина пролета) при +55 °С; вторые ветви кривых (не показаны) — симметричны относительно середины пролета

Как видно из рисунка 2.16, существенно повысилась ровность пути: полный прогиб рельса-струны относительно горизонтальной линии уменьшился с 39,5 мм до 18,35 мм. Ровность пути возросла более чем в два раза. Отношение наибольшей неровности, вызванной проездом юнибуса по пролету, к длине пролета, ранее составляло:  $0,0395/30 = 1/759$ . Теперь, после выполнения противовыгиба, составляет:  $0,01835/30 = 1/1635$ .

Оценим увеличение радиусов продольной кривизны пути под движущимся колесом юнибуса при +55 °С, без противовыгиба и с учетом противовыгиба, для различных точек пролета (см. рис. 2.17).

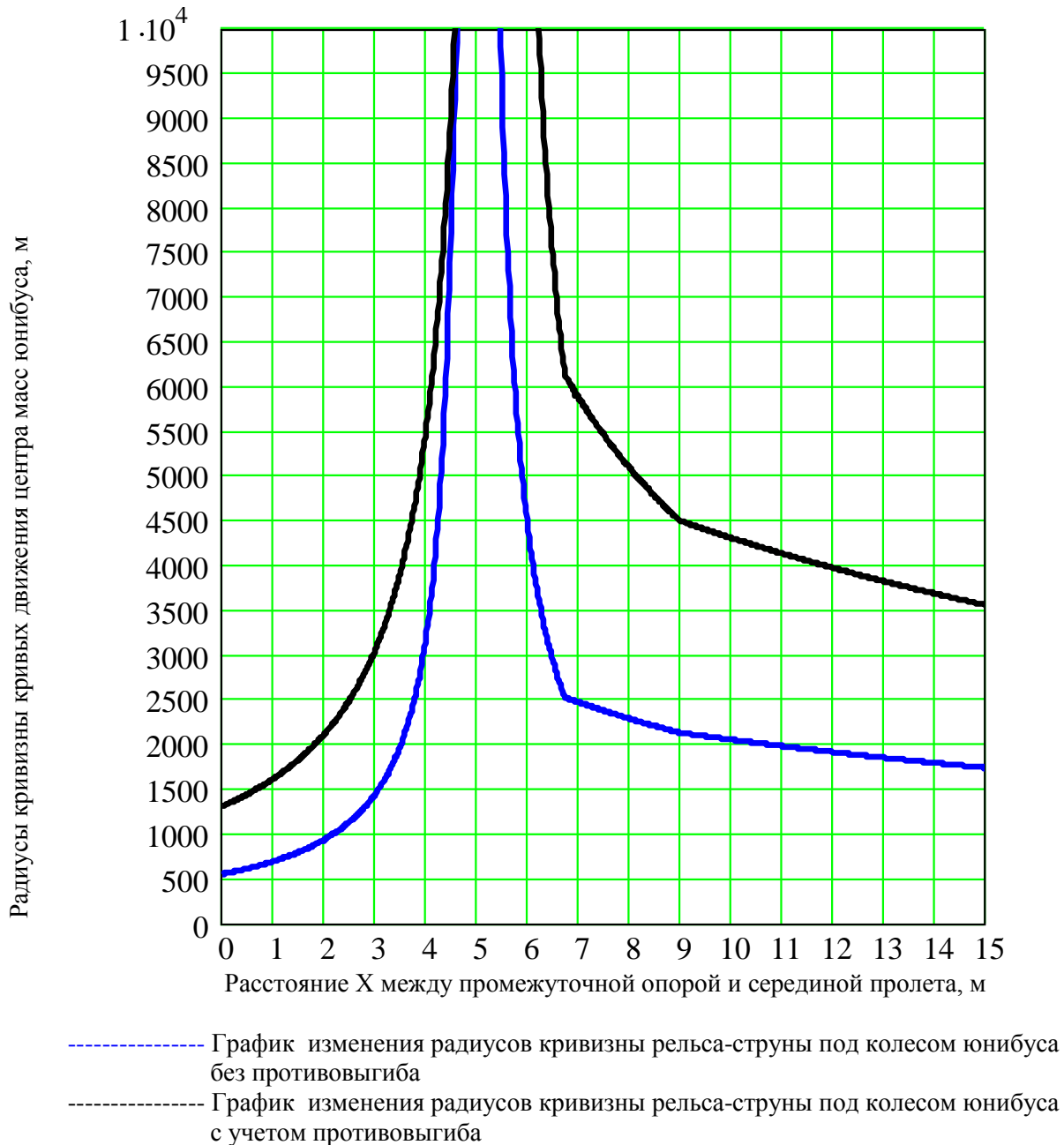


Рис. 2.17. Радиусы кривизны кривых движения центра масс юнибуса — от 0 метров (опора) до 15 метров (середина пролета) при +55 °С; вторые ветви графиков (не показано) — симметричны относительно середины пролета

Как видно из рис. 2.17, существенно повысились радиусы кривизны: на опоре он увеличился с 540 метров до 1300 метров. Динамические нагрузки (центробежные силы) также существенно снизятся при переезде модуля через промежуточную опору.

2) Сделаем оценку повышения ровности пути, используя результаты расчетов движения точки — середины между передними и задними колесами юнибуса весом 2,5 тс — при температуре 0 °С (при температура сборки).

Результаты расчетов движения юнибуса изображены в виде графиков на рис. 2.19.

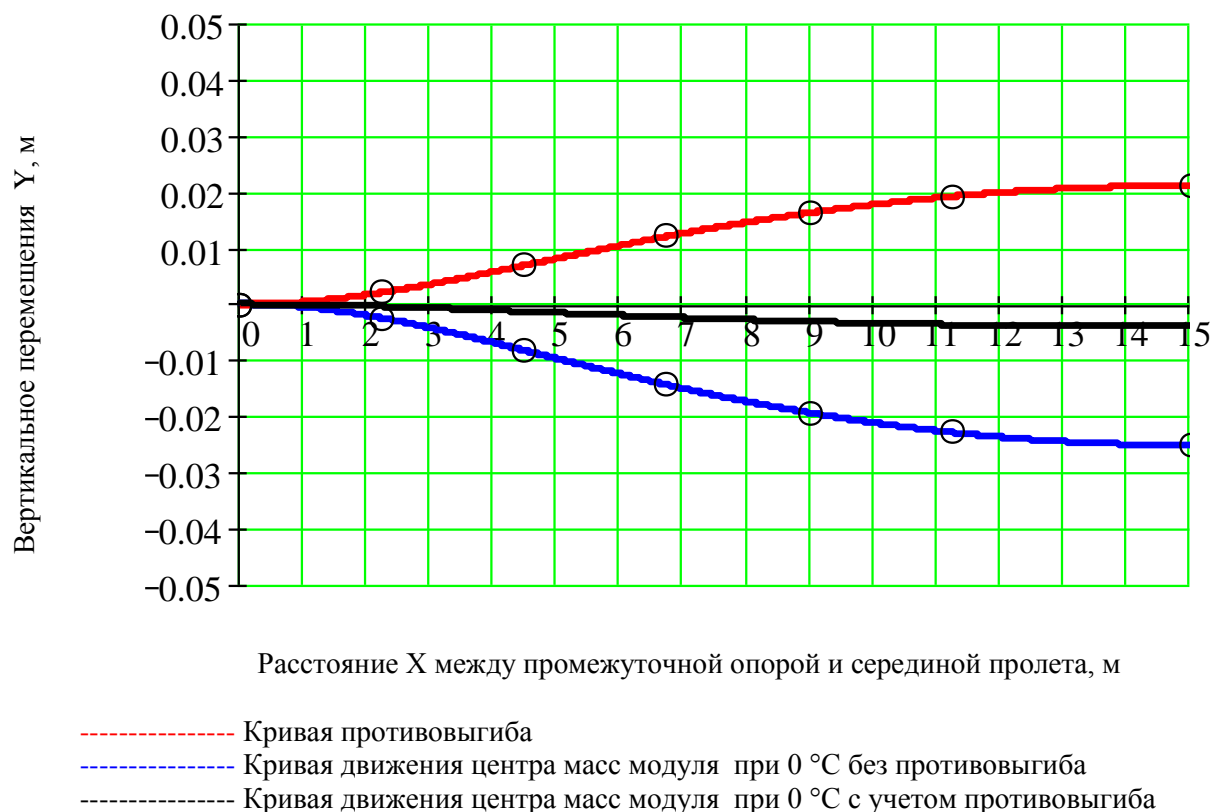


Рис. 2.18. Половина кривых противовыгиба и движения центра масс юнибуса от 0 метров (опора) до 15 метров (середина пролета) при 0 °С; вторые ветви кривых (не показано) — симметричны относительно середины пролета

Как видно из рис. 2.18, существенно повысилась ровность пути: полный прогиб рельса под нагрузкой при температуре 0 °С, относительно горизонтальной линии, уменьшился с 25,18 мм до 4,02 мм. Ровность пути возросла более чем в шесть раз. Отношение наибольшей неровности, вызванной проездом юнибуса по пролету, к длине пролета, ранее составляло:  $0,02518/30 = 1/1191$ . Теперь, после выполнения противовыгиба, составляет:  $0,00402/30 = 1/7463$ .



Оценим увеличение радиусов продольной кривизны рельса-струны при 0 °С без противовыгиба и с учетом противовыгиба (см. рис. 2.19).

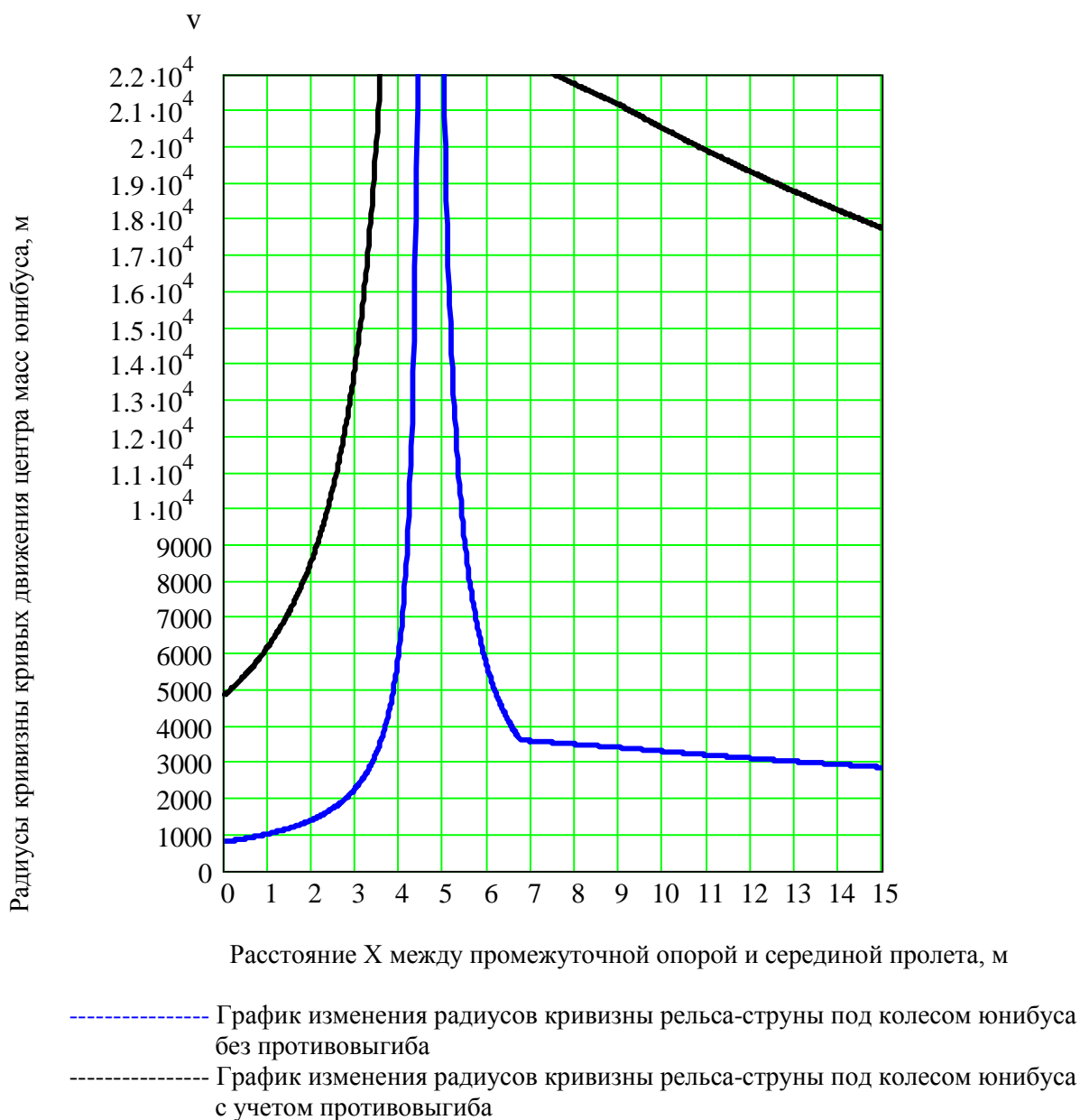


Рис. 2.19. Радиусы кривизны кривых движения центра масс юнибуса —

от 0 метров (опора) до 15 метров (середина пролета) при температуре 0 °С;

вторые ветви графиков (не показано) — симметричны относительно середины пролета

Как видно из рисунка 2.19, существенно повысились радиусы кривизны при температуре 0 °С: на он опоре увеличился с 777 метров до 4805 метров. Динамические нагрузки также существенно снизятся при переезде модуля через промежуточную опору.

3) Сделаем оценку повышения ровности пути, используя результаты расчетов прогиба точки — середины между колесами юнибуса весом 2,5 тс — **при температуре  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$**  (при температуре  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  прогибы будут направлены вверх).

Результаты расчетов движения колес изображены в виде графиков на рис. 2.20.



Рис. 2.20. Половина кривых противовыгиба и движения центра масс юнибуса — от 0 метров (опора) до 15 метров (середина пролета) при температуре  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; вторые ветви кривых (не показано) — симметричны относительно середины пролета

Как видно из рис. 2.20, существенно повысилась ровность пути: полный прогиб рельса под нагрузкой при температуре  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , относительно горизонтальной линии, уменьшился с 17,31 мм до 3,84 мм. Ровность пути возросла более чем в четыре раза. Отношение наибольшей неровности, вызванной проездом юнибуса по пролету, к длине пролета, ранее составляла:  $0,01731/30 = 1/1733$ . Теперь, после выполнения противовыгиба, составляет:  $0,00384/30 = 1/7812$ .

Оценим увеличение радиусов продольной кривизны кривых рельса-струны при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  без противовыгиба и с учетом противовыгиба (см. рис. 2.21).

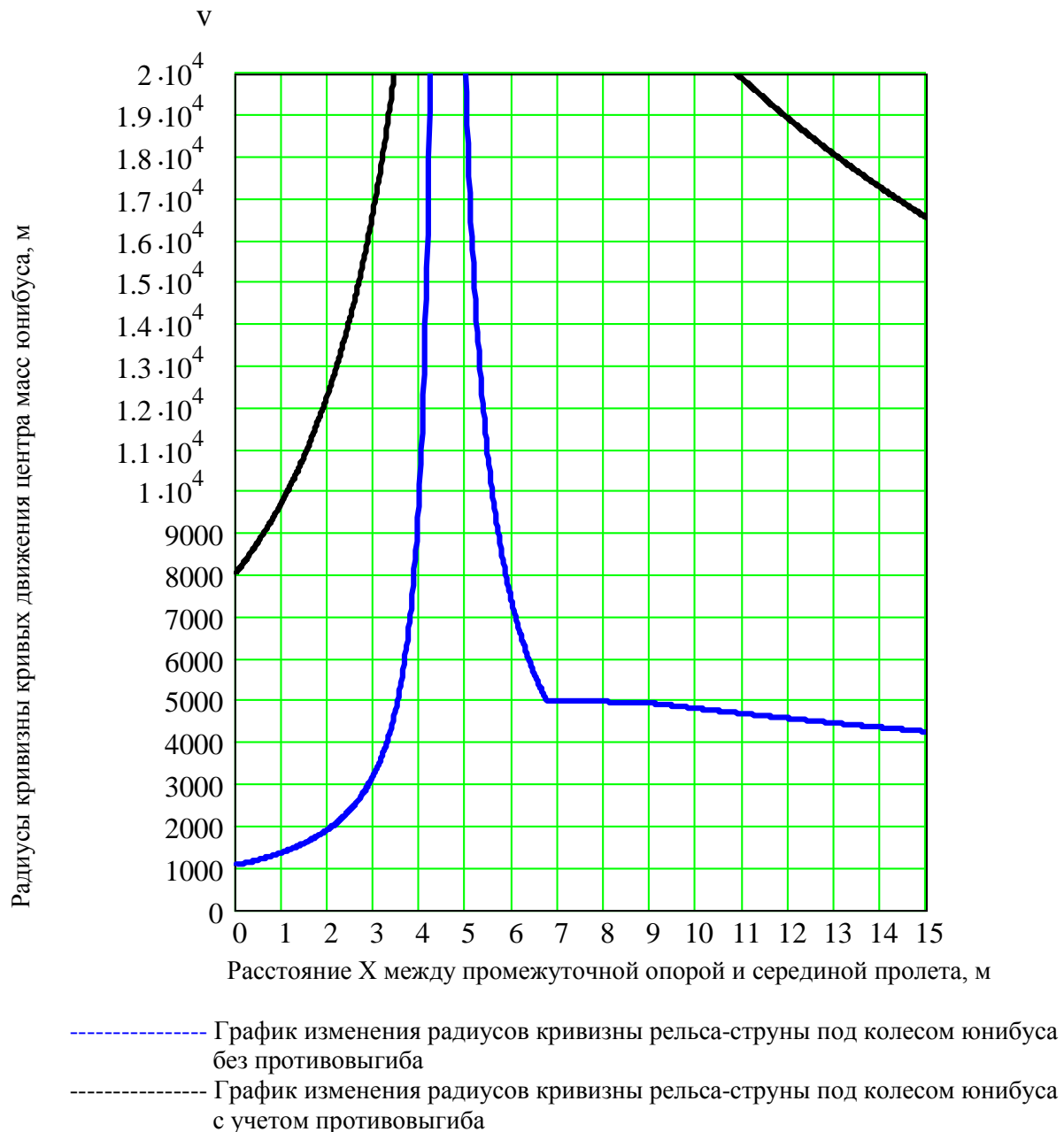


Рис. 2.21. Радиусы кривизны кривых движения центра масс юнибуса — от 0 метров (опора) до 15 метров (середина пролета) при температуре  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; вторые ветви графиков (не показано) — симметричны относительно середины пролета

Как видно из рисунка 2.21, существенно повысились радиусы кривизны при температуре  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ : на опоре он увеличился с 1047 метров до 8250 метров. Динамические нагрузки также существенно снизятся при переезде модуля через промежуточную опору.

## 2.8.2. Шарнирное крепление рельса на опоре

Результат расчета кривой противовыгиба изображен на рисунке 2.22, а ее координаты показаны в табл. 2.6.

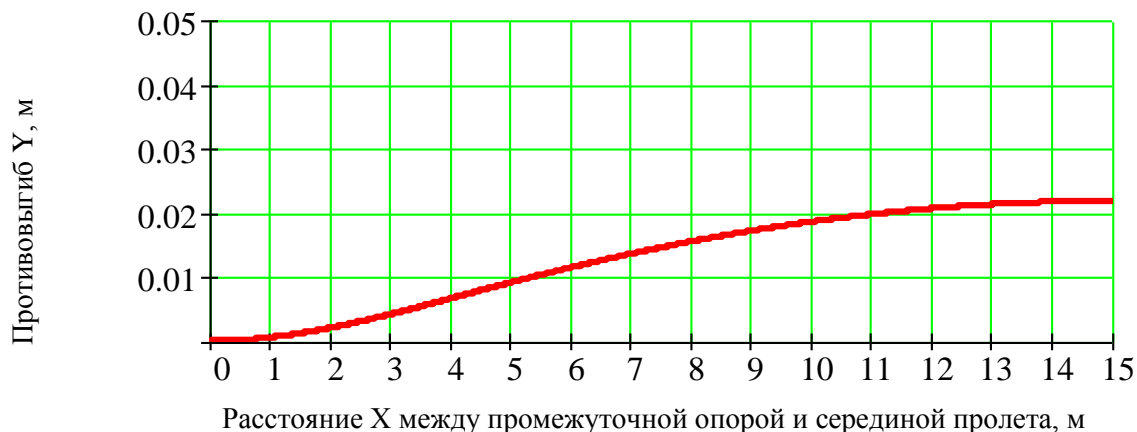


Рис. 2.22. Половина кривой противовыгиба от 0 метров (опора) до 15 метров (середина пролета); вторая ветвь кривой (не показано) — симметрична относительно середины пролета

Таблица 2.6

Координаты кривой противовыгиба от 0 метров (опора) до 15 метров (середина пролета)

Координата по оси X (метры)	Величина противовыгиба оси Y(мм)
0	0,000
1	0,569
2	2,074
3	4,211
4	6,675
5	9,168
6	11,515
7	13,665
8	15,582
9	17,254
10	18,673
11	19,835
12	20,740
13	21,387
14	21,775
15	21,903

1) Сделаем оценку повышения ровности пути, используя результаты расчетов движения точки — середины между колесами юнибуса весом 2,5 тс — **при температуре +55 °С** (при температуре +55 °С прогибы наибольшие).

Результаты расчетов движения точки — середины между колесами юнибуса (соответствует кривизне движения центра масс юнибуса) изображены в виде графиков на рис. 2.23.

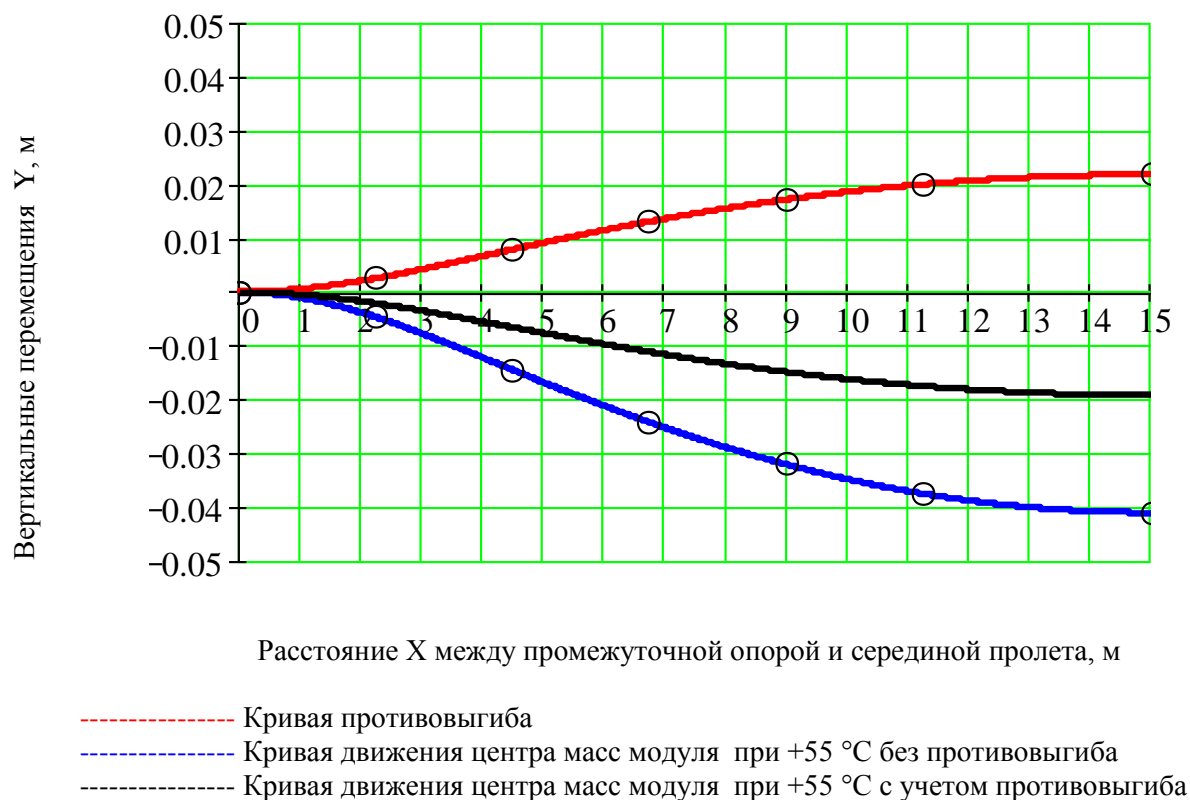


Рис. 2.23. Половина кривых противовыгиба и движения центра масс юнибуса — от 0 метров (опора) до 15 метров (середина пролета) при температуре +55 °С; вторые ветви кривых (не показано) — симметричны относительно середины пролета

Как видно из рис. 2.23, существенно повысилась ровность пути при температуре +55 °С: полный прогиб рельса на пролете относительно горизонтальной линии уменьшился с 41,2 мм до 21,9 мм. Ровность пути возросла примерно в два раза. Отношение наибольшей неровности, вызванной только юнибусом, к длине пролета, ранее составляло:  $0,0412/30 = 1/728$ . Теперь, после выполнения противовыгиба, составляет:  $0,0219/30 = 1/1370$ .

Оценим увеличение радиусов продольной кривизны рельса-струны при +55 °С без противовыгиба и с учетом противовыгиба (см. рис. 2.24).

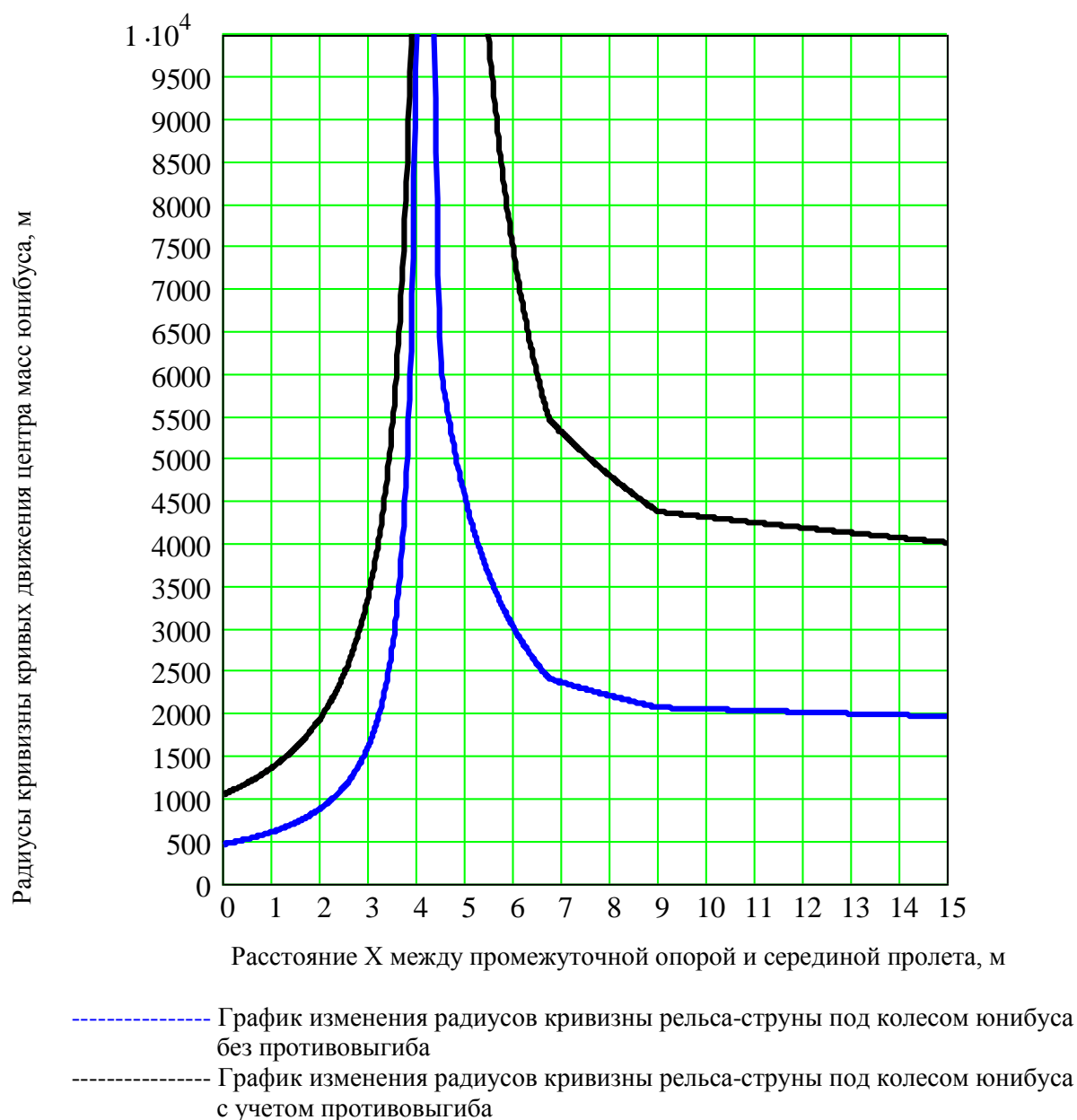


Рис. 2.24. Радиусы кривизны кривых движения центра масс юнибуса — от 0 метров (опора) до 15 метров (середина пролета) при +55 °С; вторые ветви графиков (не показано) — симметричны относительно середины пролета

Как видно из рис. 2.24, существенно повысилась радиусы кривизны при температуре +55 °С: на опоре он увеличился с 454 метра до 1041 метра. Динамические нагрузки также существенно снизятся при переезде юнибуса через промежуточную опору.

2) Сделаем оценку повышения ровности пути, используя результаты расчетов движения точки — середины между колесами юнибуса весом 2,5 тс (соответствует движению центра масс юнибуса) — **при температуре 0 °С** (температура сборки).

Результаты расчетов движения юнибуса изображены в виде графиков на рис. 2.25.

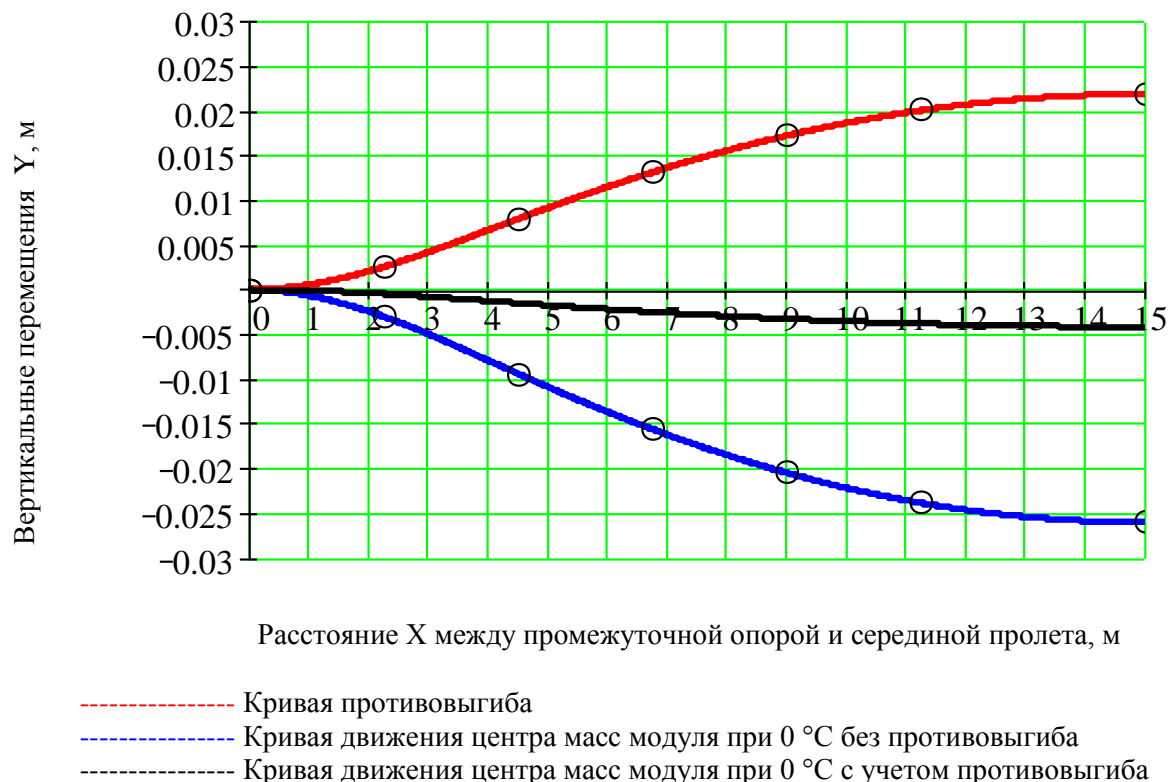


Рис. 2.25. Половина кривых противовыгиба и движения центра масс юнибуса от 0 метров (опора) до 15 метров (середина пролета) при 0 °С;

вторые ветви кривых (не показано) — симметричны относительно середины пролета

Как видно из рисунка 2.25, существенно повысилась ровность пути при температуре 0 °С: полный прогиб рельса под юнибусом относительно горизонтальной линии уменьшился с 26,07 мм до 4,16 мм. Ровность пути возросла примерно в 6 раз. Отношение наибольшей неровности, вызванной проездом юнибуса по пролету, к длине пролета, ранее составляло:  $0,02607/30 = 1/1151$ . Теперь, после выполнения противовыгиба, составляет:  $0,00416/30 = 1/7212$ .

Оценим увеличение радиусов кривизны кривых при 0 °С без противовыгиба и с учетом противовыгиба (см. рис. 2.26).

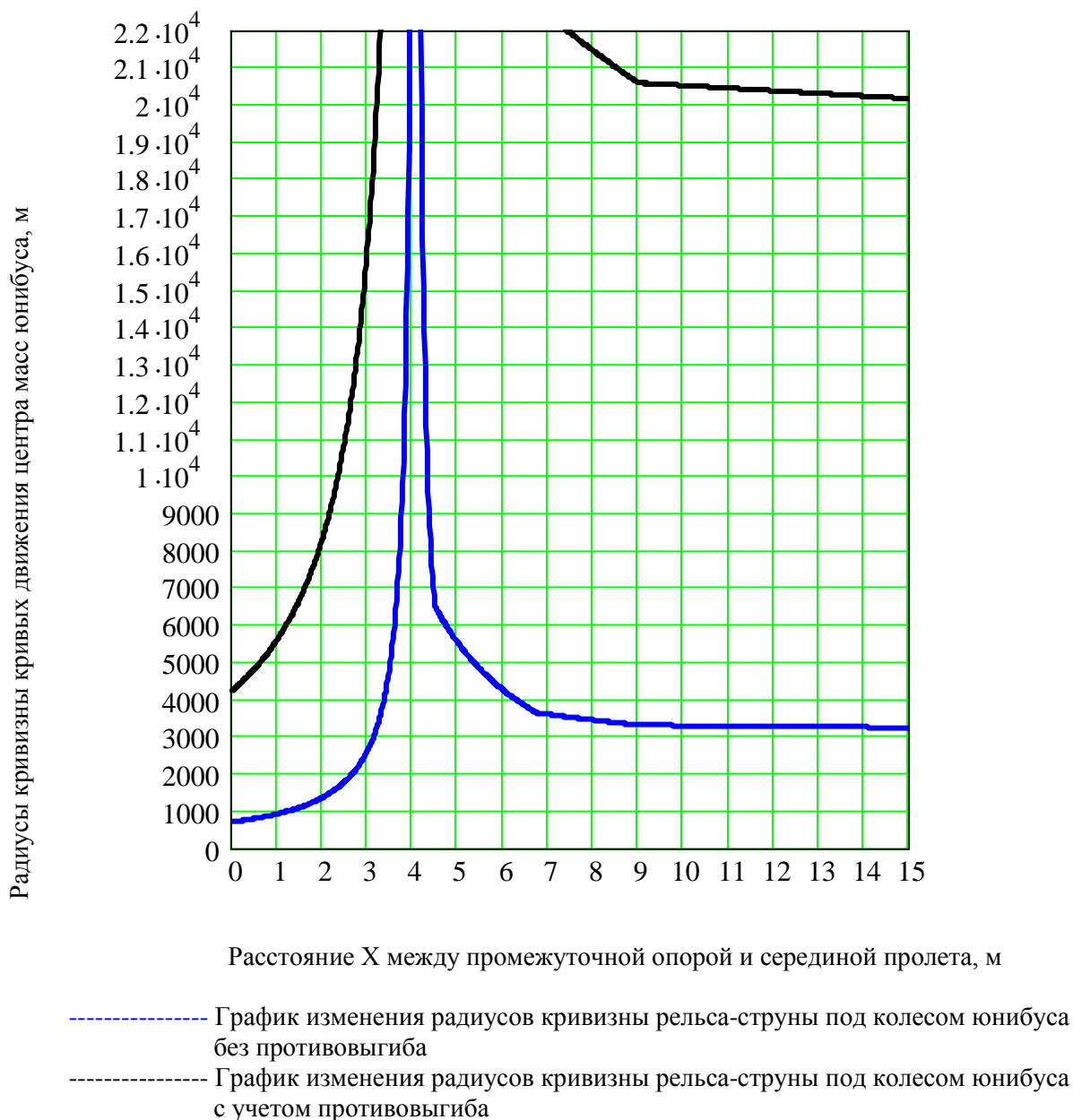


Рис. 2.26. Радиусы кривизны кривых движения центра масс юнибуса — от 0 метров (опора) до 15 метров (середина пролета) при температуре 0 °С; вторые ветви графиков (не показано) — симметричны относительно середины пролета

Как видно из рис. 2.26, существенно повысились радиусы кривизны при температуре 0 °С: на опоре он увеличился с 676 метра до 4191 метра. Динамические нагрузки также существенно снизятся при переезде юнибуса через промежуточную опору.



3) Сделаем оценку повышения ровности пути, используя результаты расчетов движения точки — середины между колесами юнибуса весом 2,5 тс (соответствует движению центра масс юнибуса) — **при температуре  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$**  (при температуре  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  неровности на пролете направлены вверх).

Результаты расчетов движения центра масс юнибуса изображены в виде графиков на рис. 2.27.

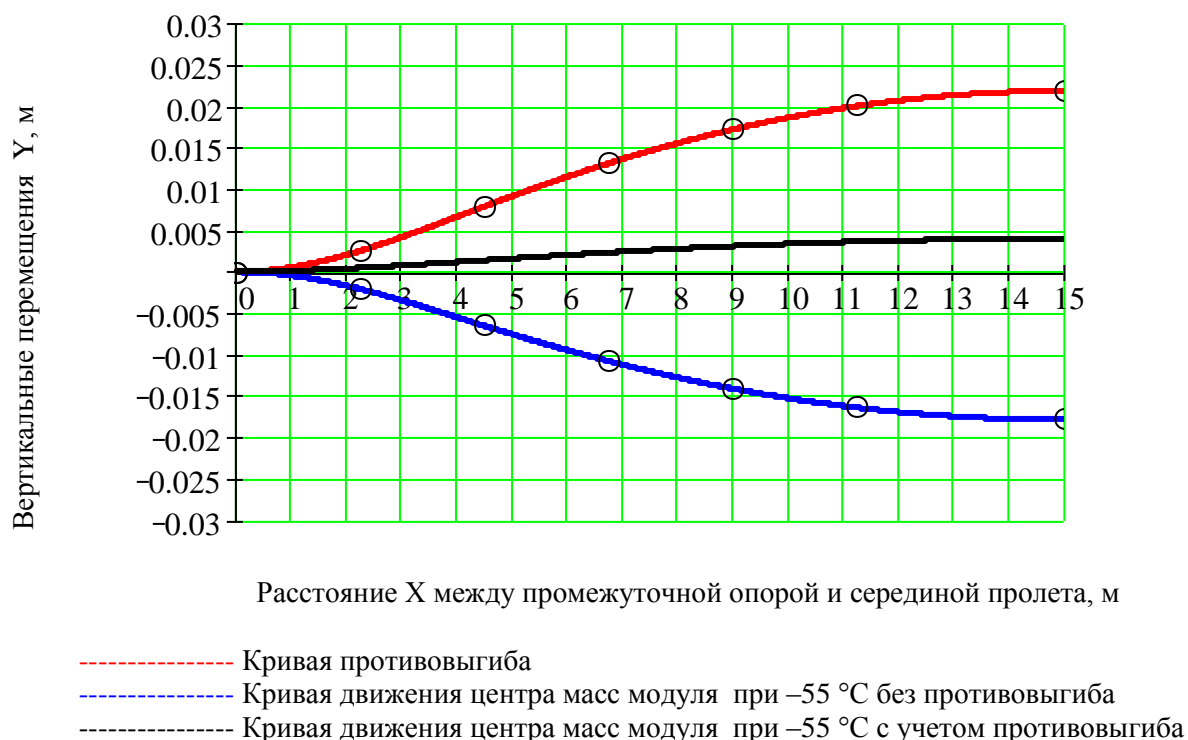


Рис. 2.27. Половина кривых противовыгиба и движения центра масс юнибуса от 0 метров (опора) до 15 метров (середина пролета) при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

вторые ветви кривых (не показано) — симметричны относительно середины пролета

Как видно из рисунка 2.27, существенно повысилась ровность пути при температуре  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ : максимальная неровность рельса уменьшилась с 17,88 мм до 4,03 мм. Ровность пути возросла примерно в четыре раза. Отношение наибольшей неровности, вызванной проездом юнибуса, к длине пролета, ранее составляло:  $0,01788/30 = 1/1678$ . Теперь, после выполнения противовыгиба, составляет:  $0,00403/30 = 1/7444$ .

Оценим увеличение радиусов продольной кривизны кривых рельса-струны при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  без противовыгиба и с учетом противовыгиба (см. рис. 2.28).

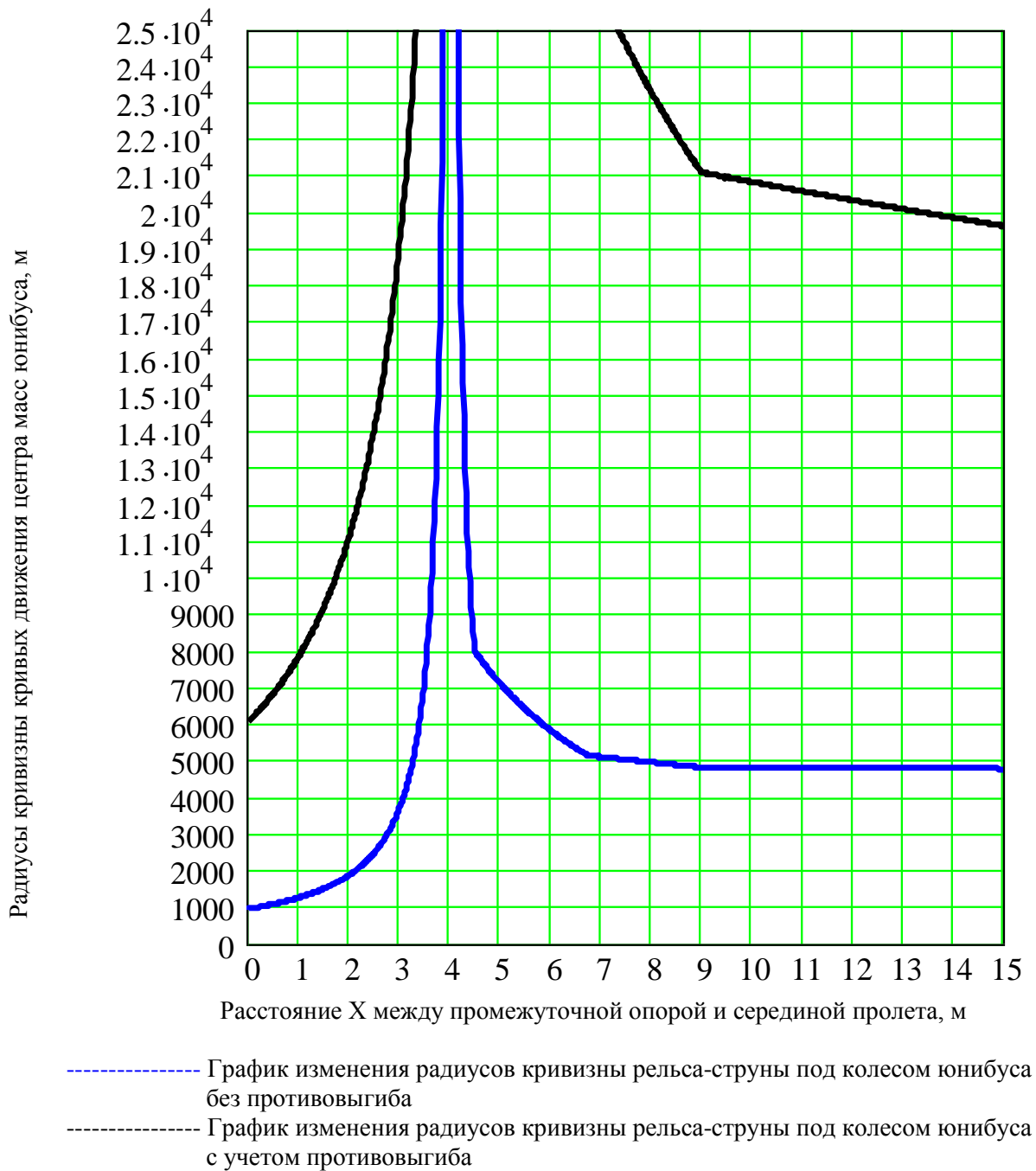


Рис. 2.28. Радиусы кривизны кривых движения центра масс юнибуса — от 0 метров (опора) до 15 метров (середина пролета) при температуре  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; вторые ветви графиков (не показано) — симметричны относительно середины пролета

Как видно из рис. 2.28, существенно повысились радиусы кривизны при температуре  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ : на опоре он увеличился с 931 метра до 6033 метра. Динамические нагрузки также существенно снизятся при переезде юнибуса через промежуточную опору.

### 2.8.3. Анализ ровности пути на пролете при движении юнибуса

На рис. 2.16, 2.18, 2.20, 2.23, 2.25 и 2.27 показаны траектории движения неподдресоренной части юнибуса (задемпфированного стального обода колеса), а на рис. 2.17, 2.19, 2.21, 2.24, 2.26 и 2.28 — кривизна рельса под движущимся колесом юнибуса при различных температурах (+55 °С, 0 °С, -55 °С) и для различного крепления рельса-струны на опоре (жесткая заделка и шарнирное закрепление). Наименьший радиус кривизны рельса-струны будет в точке над опорой при температуре + 55 °С — он будет равен 1041 м. Тогда при скорости юнибуса 100 м/с (360 км/ч) вертикальное ускорение точки контакта обода колеса с рельсом составит 9,6 м/с<sup>2</sup> (обод будет работать под нагрузкой как рессора или жесткая резиновая шина). Вертикальное же ускорение задемпфированной ступицы колеса будет в пределах 2 м/с<sup>2</sup>, а установленного на подвеске салона с пассажирами — до 0,5 м/с<sup>2</sup>. При рабочем ходе подвески в 18 мм (летом) и 4 мм (зимой) высокоскоростной юнибус обеспечит абсолютно плавное и комфортное движение для пассажиров, недостижимое на железной дороге.

### 2.9. Расчет контактных напряжений и оценка долговечности головки рельса-струны и сопротивления качению колеса юнибуса

Контактные напряжения в пятне контакта в паре «цилиндрическое колесо — плоский рельс» можно определить по формуле Герца-Беляева:

$$\sigma_k = 0,42 (P \cdot E / b \cdot r)^{1/2} = 0,42 (625 \cdot 2.060.000 / 8 \cdot 20)^{1/2} = 1.191 \text{ кгс/см}^2, \quad (2.22)$$

где:

$P = 625 \text{ кгс}$  — усилие прижима колеса;

$E = 2.060.000 \text{ кгс/см}^2$  — модуль упругости стали;

$b = 8 \text{ см}$  — ширина контакта;

$r = 20 \text{ см}$  — радиус колеса юнибуса.

Тогда площадь пятна контакта в паре «колесо — рельс» составит:

$$F_k = P / \sigma_k = 625 / 1.191 = 0,525 \text{ см}^2,$$

а длина пятна контакта (в направлении движения юнибуса) будет равна:

$$l_k = F_k / b = 0,525 / 8 = 0,066 \text{ см} = 0,66 \text{ мм}.$$

По сравнению с железной дорогой контактные напряжения в паре «колесо — рельс» (они достигают там значений 20.000 кгс/см<sup>2</sup> и более) в СТЮ будут в 10—15 раз ниже, а длина пятна контакта в направлении движения, которая в основном и определяет сопротивление качению колеса, будет также меньше в 10—15 раз.

Таким образом, для головки рельса-струны и колеса юнибуса могут быть использованы те марки сталей, которые в железнодорожных рельсах работают в зоне пластических деформаций, что резко снижает их долговечность, а в СТЮ они будут работать в упругой зоне, составляющей лишь 15—20% от напряжений текучести стали. Это может обеспечить существенное увеличение, в 3—5 раз и более, долговечности головки рельсов в СТЮ (до 100 лет и более).

Изменение эллиптической формы пятна контакта «коническое колесо колесной пары — цилиндрическая головка рельса» на железной дороге (длина пятна около 10 мм), на узкую прямоугольную полосу (длиной менее 1 мм и шириной 80 мм) опирания цилиндрического колеса юнибуса на плоскую головку рельса СТЮ, дает следующие преимущества:

- даже при уменьшенном в 2 раза диаметре колеса юнибуса (в сравнении с железнодорожным колесом) сопротивление его качению будет в 2—3 раза ниже, чем у колесной пары на железной дороге, что не только снизит затраты энергии на движение и потребляемую мощность привода, но и сделает движение такого колеса более плавным и менее шумным;
- улучшится сцепление колеса с рельсом (в пятне контакта нет пластики), при этом контактирующие поверхности меньше повреждаются и изнашиваются, что в несколько раз повысит их долговечность;



- в пятне контакта не будет проскальзывания участков цилиндрического колеса относительно плоской головки рельса (на коническом колесе железной дороги при его уклоне 1:20 и ширине пятна контакта 10 мм, периметры крайних диаметров колеса в пятне контакта будут различаться друг от друга на 2—3 мм, что неизбежно приводит к их проскальзыванию относительно рельса). Это существенно снизит износ, а также — шум при движении колеса не только в пятне контакта, но и за его пределами за счет исключения высокочастотных поперечных колебаний железнодорожных рельсов, которые неизбежны при высокоскоростном движении конических колес на железной дороге, но будут отсутствовать в рельсе-струне СТЮ.

### 3. Графические результаты расчетов

#### 3.1. Схемы нагружения рельса-струны нагрузкой от подвижного состава

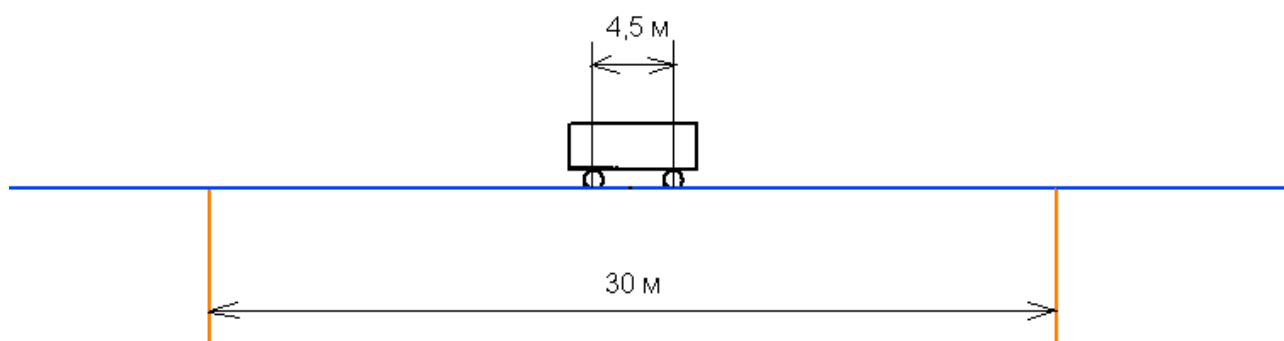


Рис. 3.1.1. Юнибус располагается в середине пролета

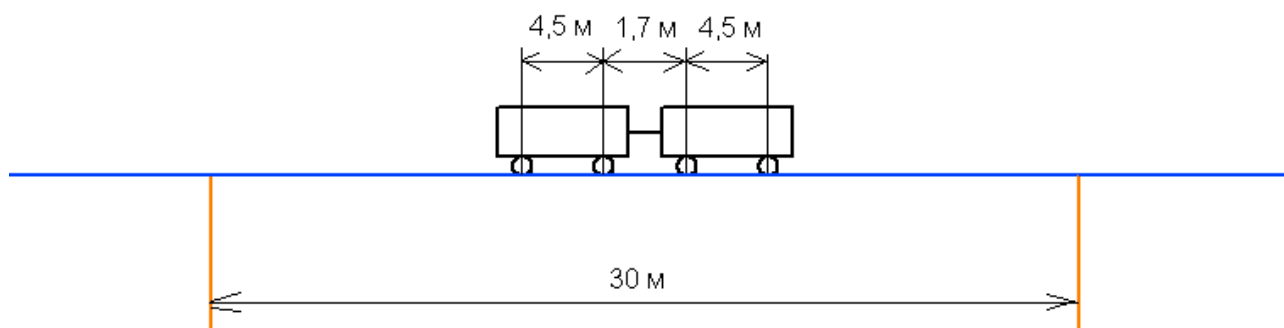


Рис 3.1.2. Два юнибуса располагаются в середине пролета

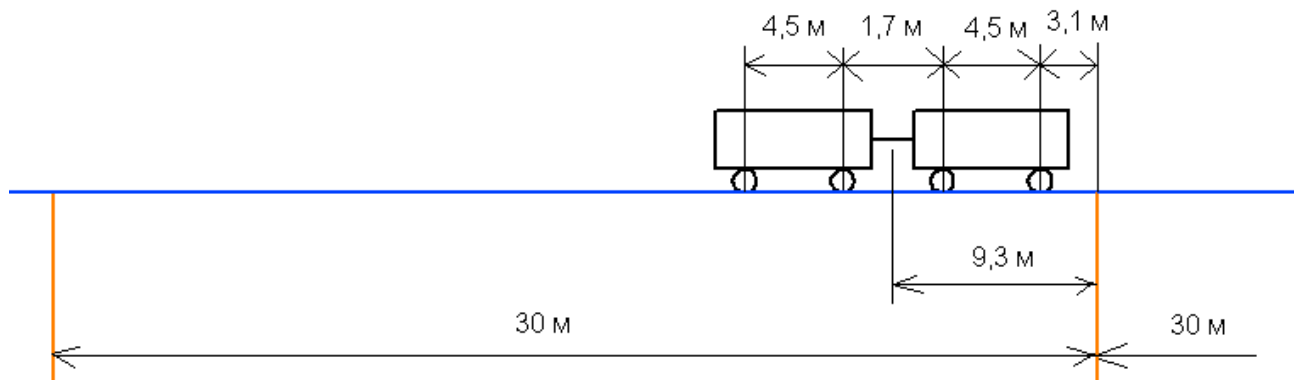


Рис. 3.1.3. Два юнибуса располагаются по одну сторону от промежуточной опоры на расстоянии 3,1 м от нее

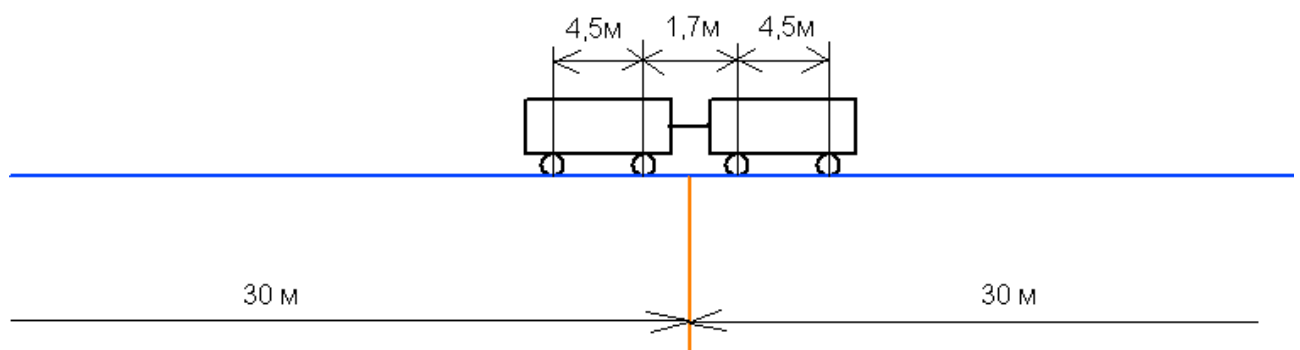


Рис. 3.1.4. Два юнибуса располагаются симметрично над промежуточной опорой

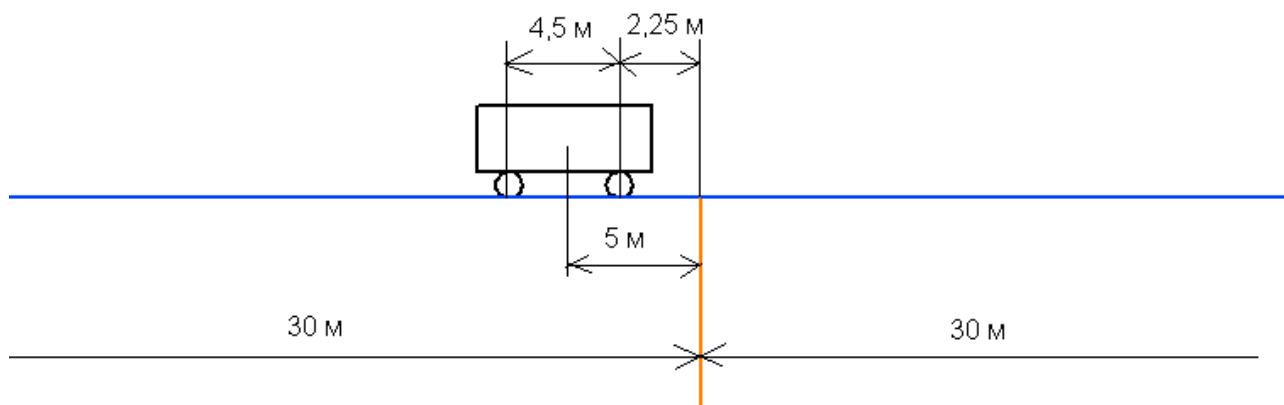


Рис. 3.1.5. Юнибус располагается по одну сторону от промежуточной опоры на расстоянии 5 м, считая то центра тяжести модуля (2,25 м от опоры до ближайшего колеса)

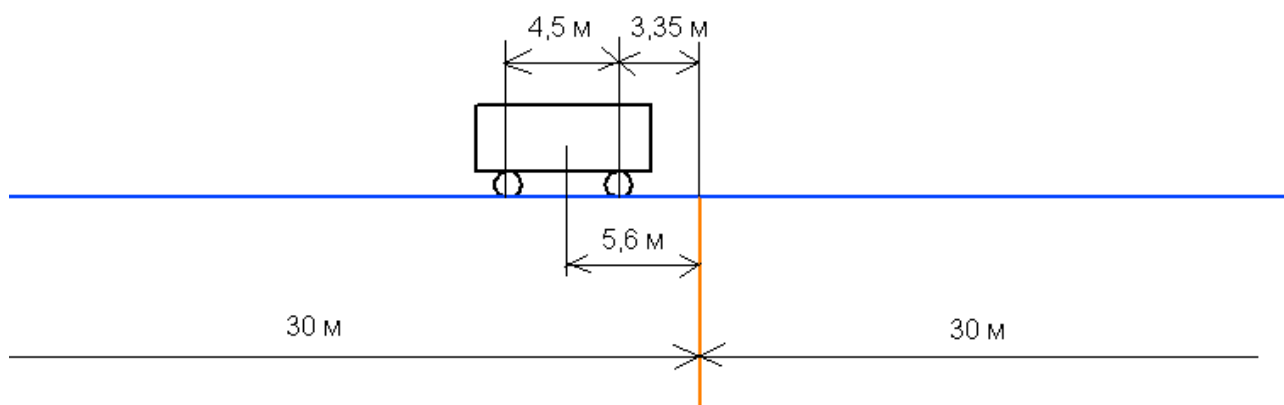


Рис. 3.1.6. Юнибус располагается по одну сторону от промежуточной опоры на расстоянии 5,6 м, считая то центра тяжести модуля (3,35 м от опоры до ближайшего колеса)



## 3.2. Эпюры продольных сил в струне

### 3.2.1. Эпюры продольных сил в струне, вызванных собственным весом струны и весом рельса-струны

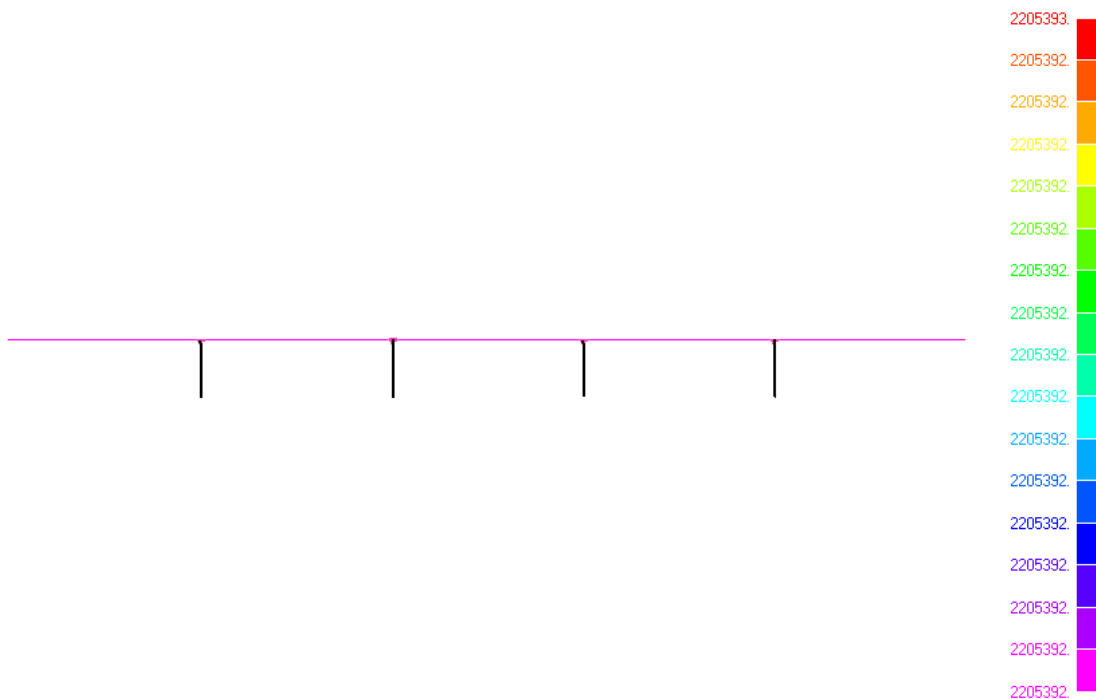


Рис. 3.2.1. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и без учета сил тяжести остальных элементов путевой структуры при температуре 0 °С (температура сборки)

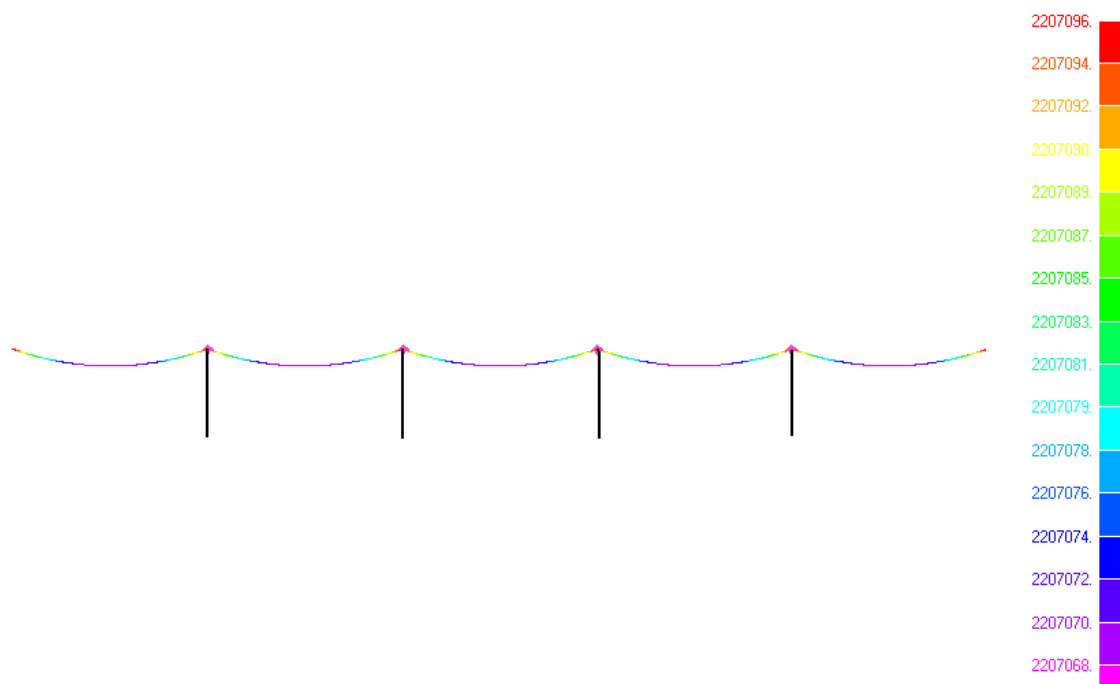


Рис. 3.2.2. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и с учетом сил тяжести всей путевой структуры при температуре 0 °С (температура сборки)

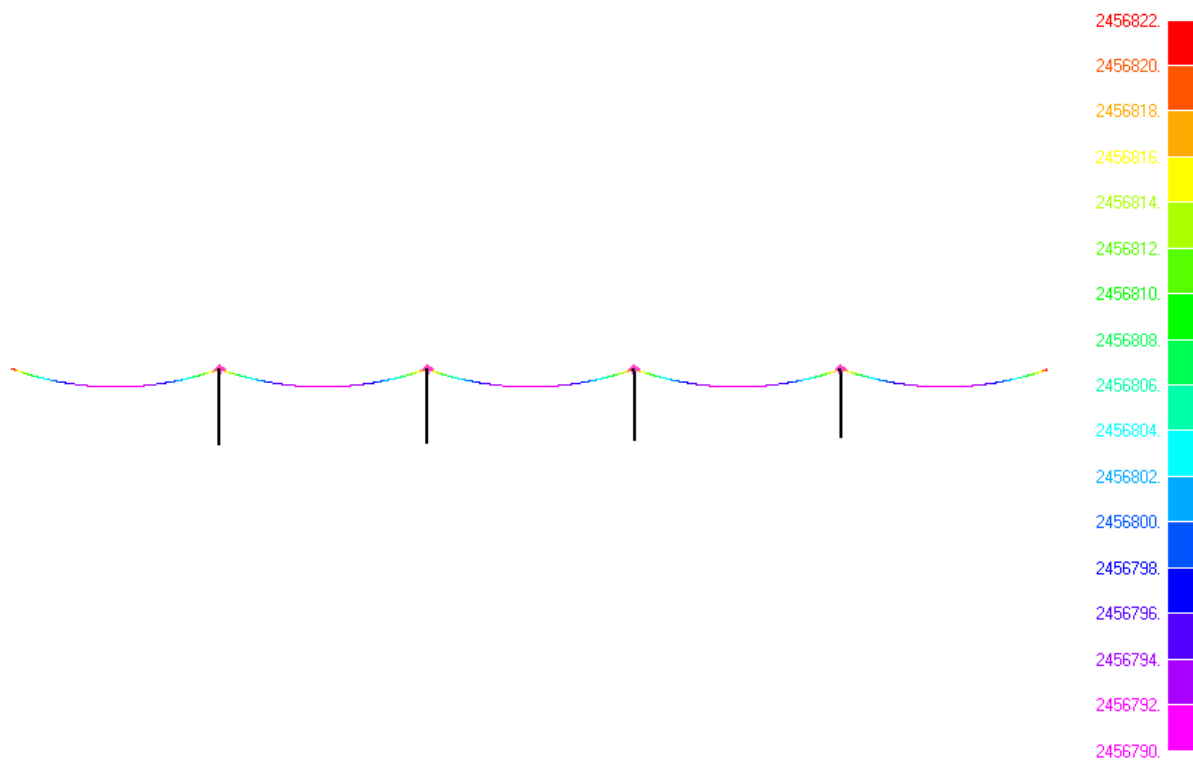


Рис. 3.2.3. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и с учетом сил тяжести путевой структуры при температуре  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

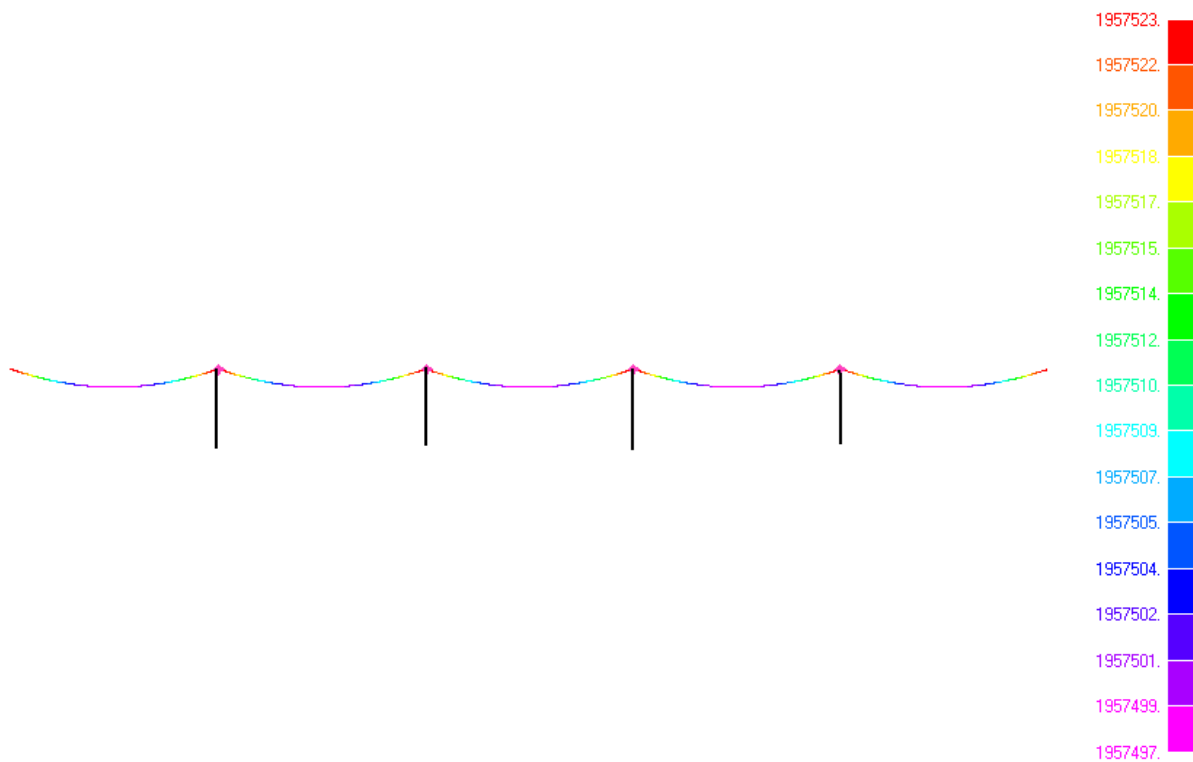


Рис. 3.2.4. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и с учетом сил тяжести путевой структуры при температуре  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$

### 3.2.2. Эпюры продольных сил в струне, вызванных весом рельса-струны и весом двух юнибусов

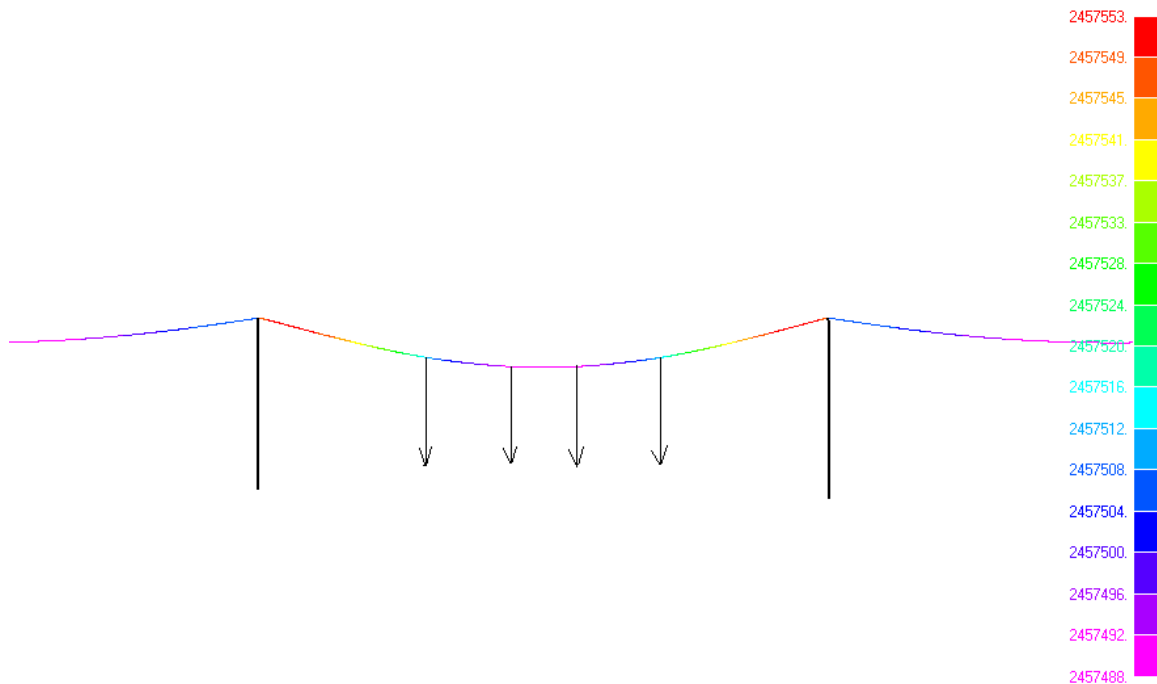


Рис. 3.2.5. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и с учетом сил тяжести путевой структуры и двух юнибусов, расположенных в середине пролета (см. п. 3.1, рис. 3.1.2) при температуре  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

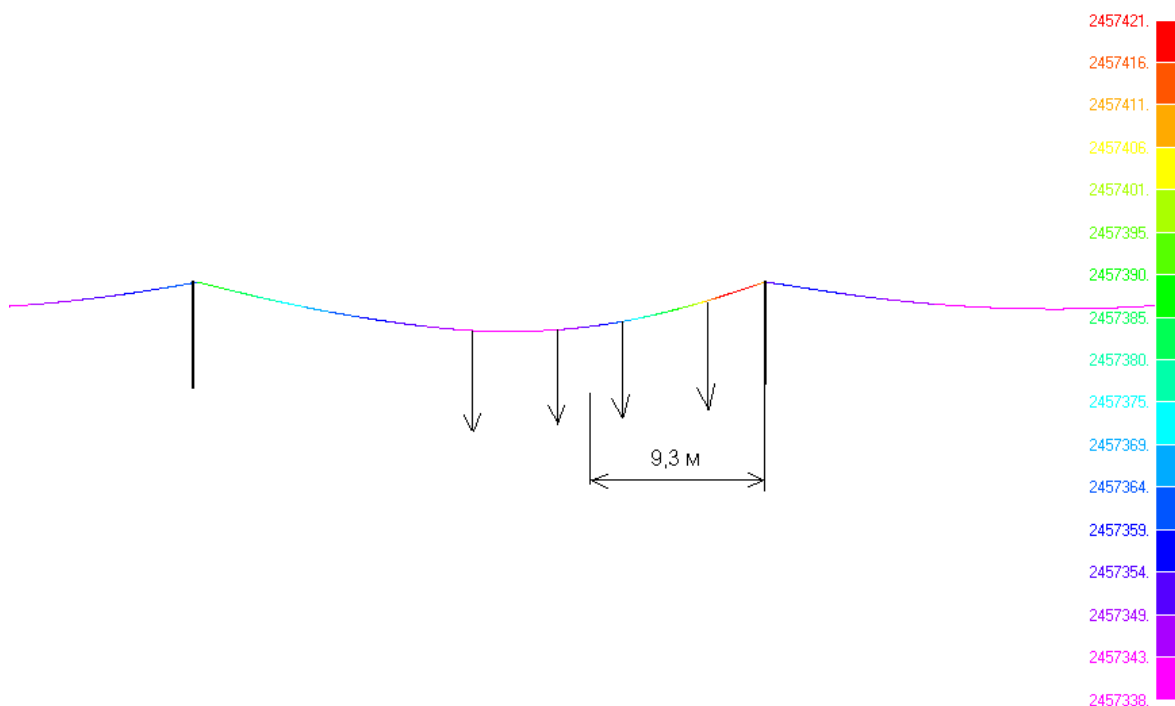


Рис. 3.2.6. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и с учетом сил тяжести путевой структуры и двух юнибусов, расположенных возле промежуточной опоры на расстоянии 2 м от нее (см. п. 3.1, рис. 3.1.3) при температуре  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

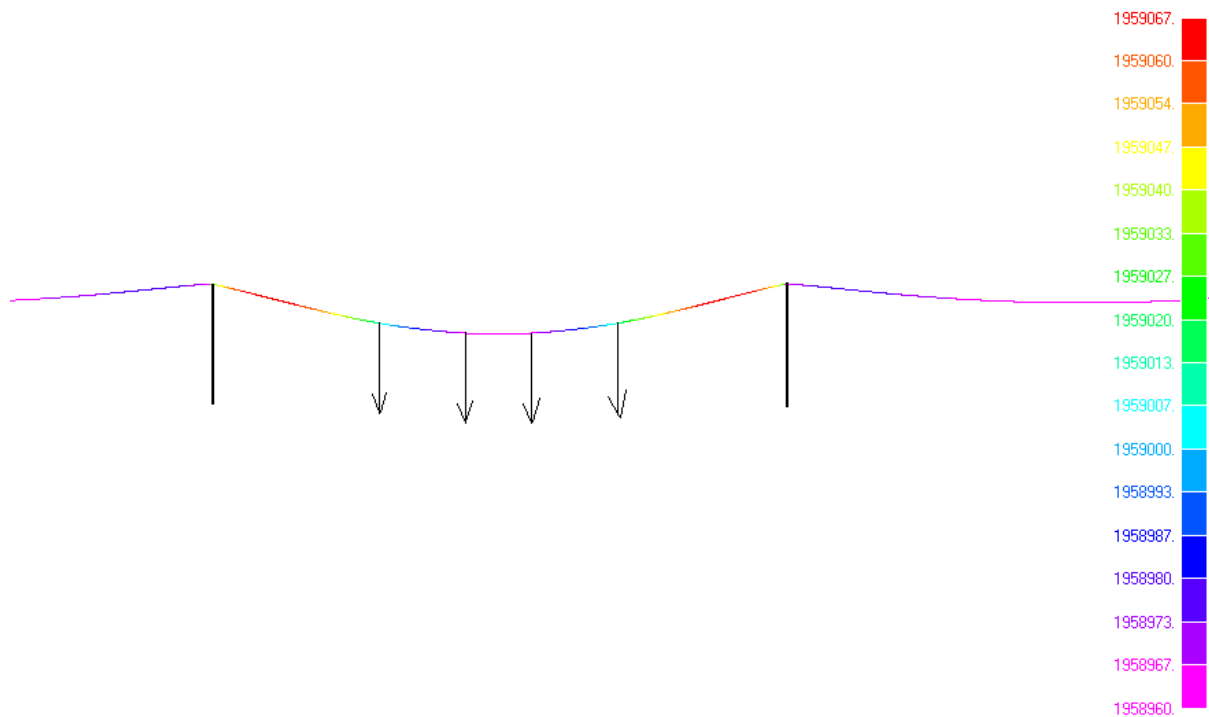


Рис. 3.2.7. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и с учетом сил тяжести путевой структуры и двух юнибусов, расположенных в середине пролета (см. п. 3.1, рис. 3.1.2) при температуре +55 °С

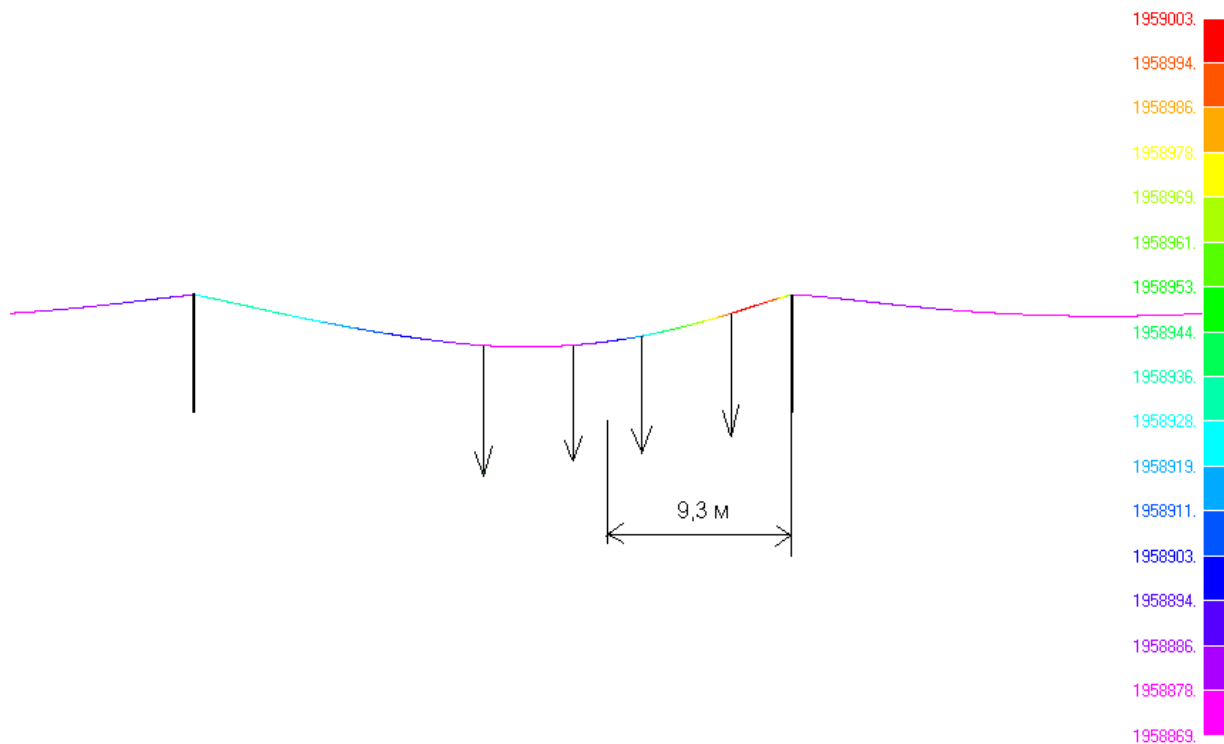


Рис. 3.2.8. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и с учетом сил тяжести путевой структуры и двух юнибусов, расположенных возле опоры на расстоянии 2 м от нее (см. п. 3.1, рис. 3.1.3) при температуре +55 °С

### 3.3. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в рельсо-струне

#### 3.3.1. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в рельсо-струне, вызванных собственным весом

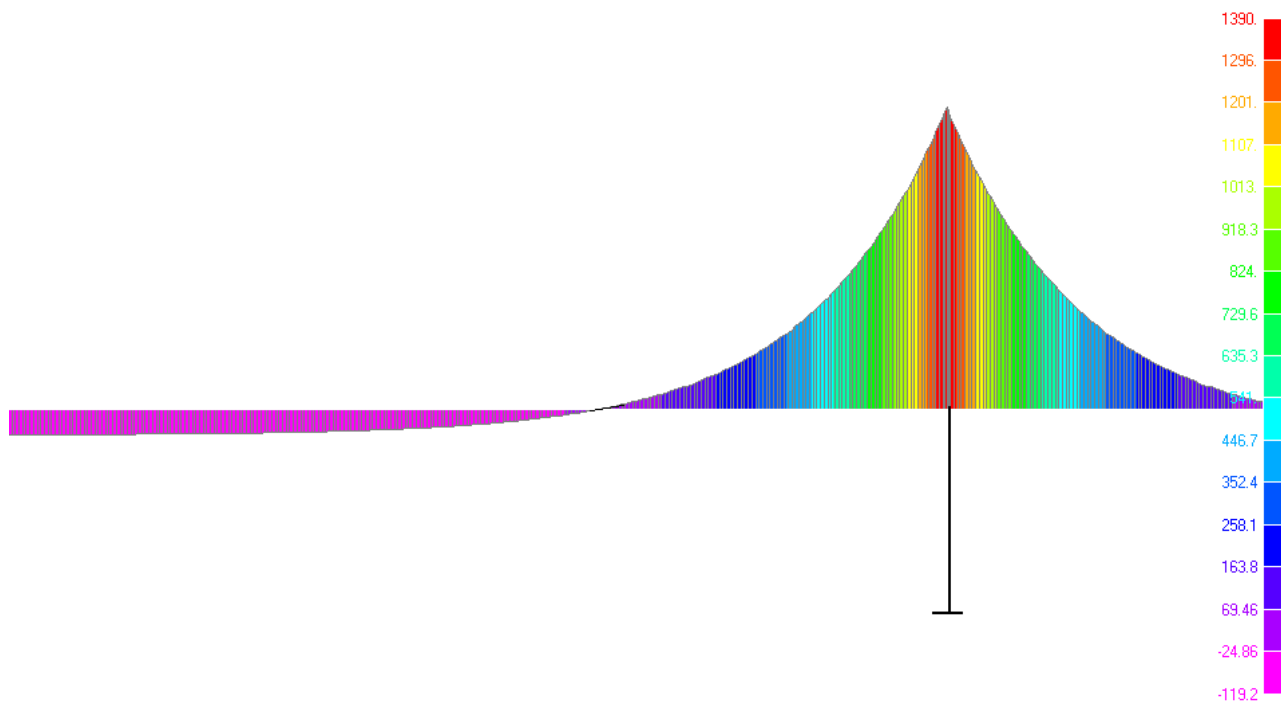


Рис. 3.3.1. Эпюра изгибающих моментов (Н×м) в рельсо-струне от собственного веса рельса-струны при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

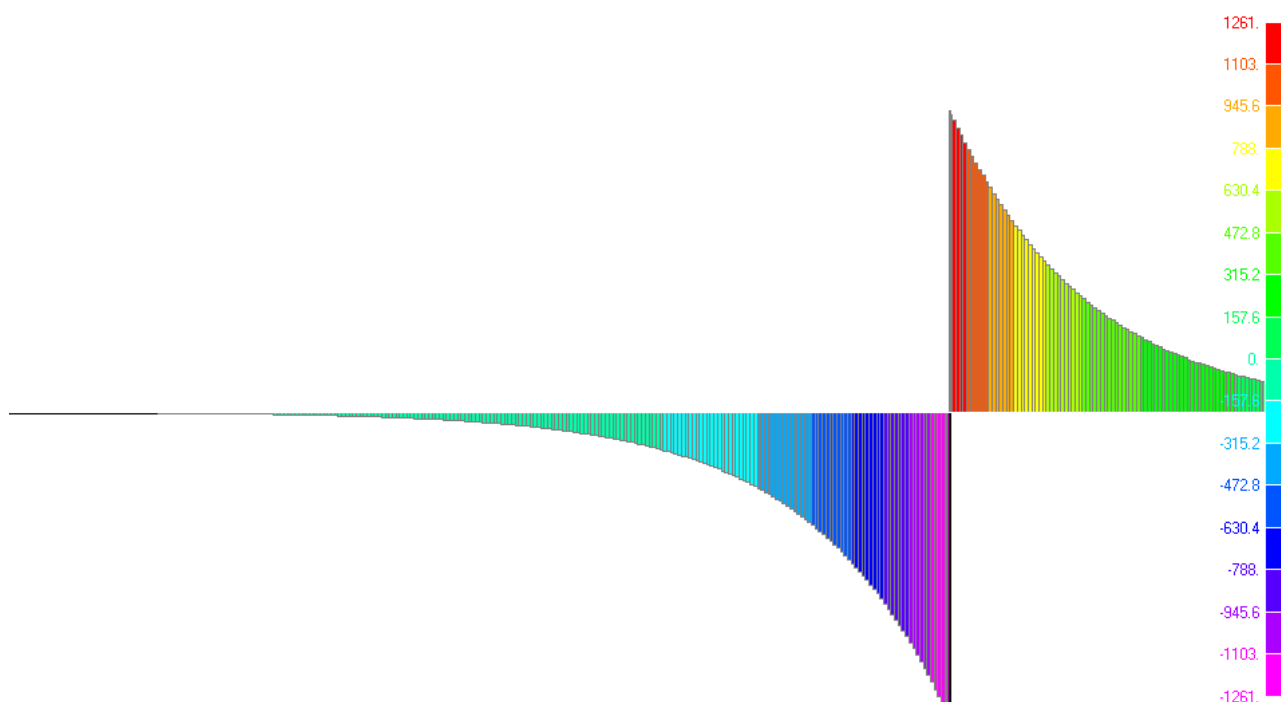


Рис. 3.3.2. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны при жесткой заделке рельса на промежуточной опоре и при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

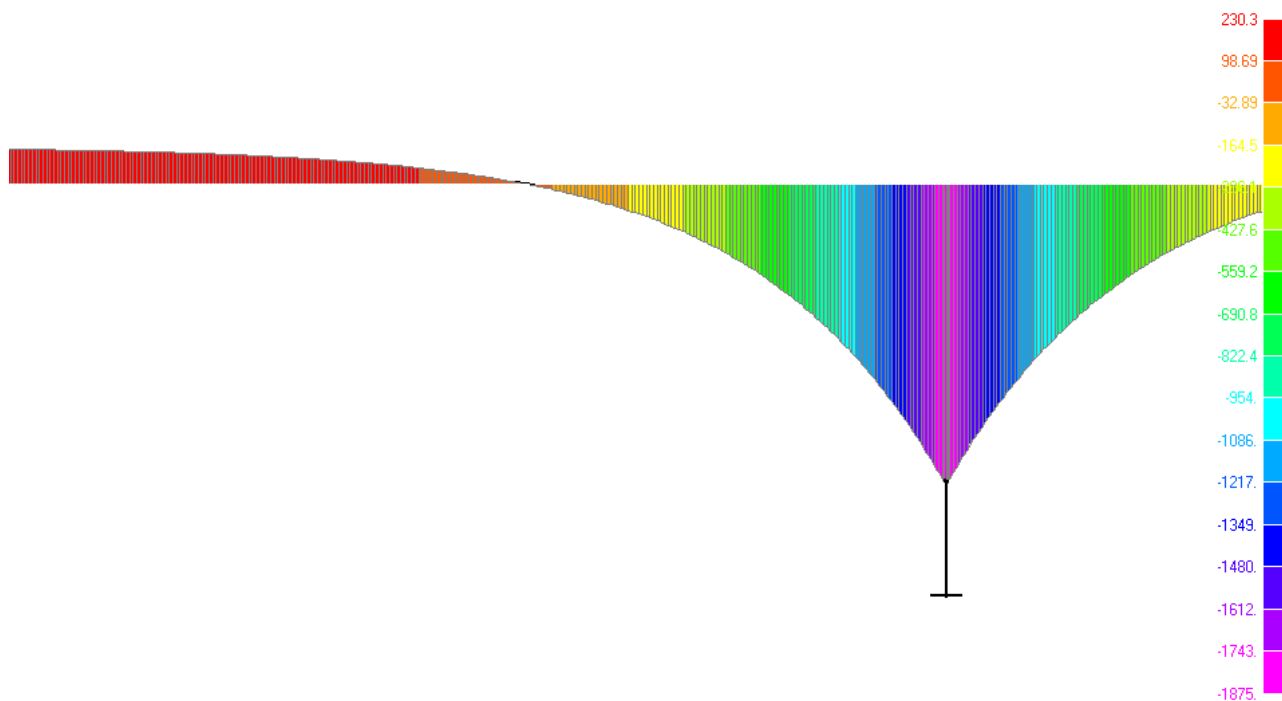


Рис. 3.3.3. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{H}\times\text{м}$ ) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$

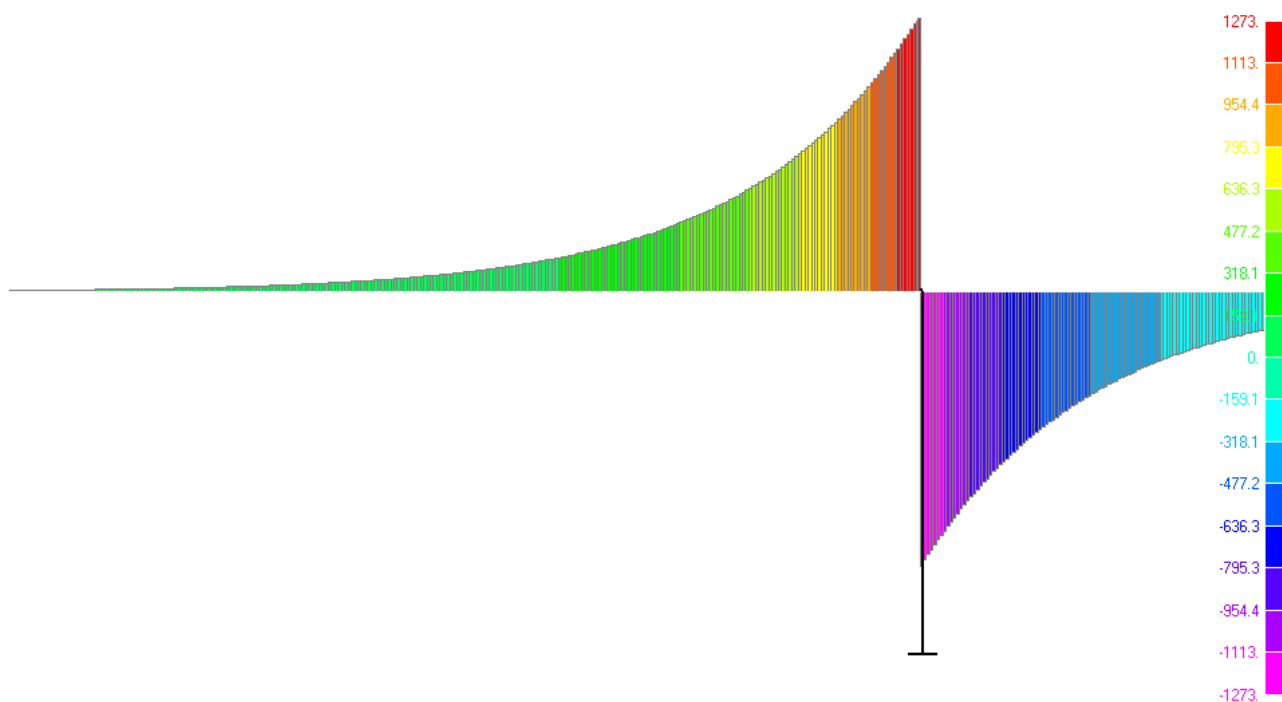


Рис. 3.3.4. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$

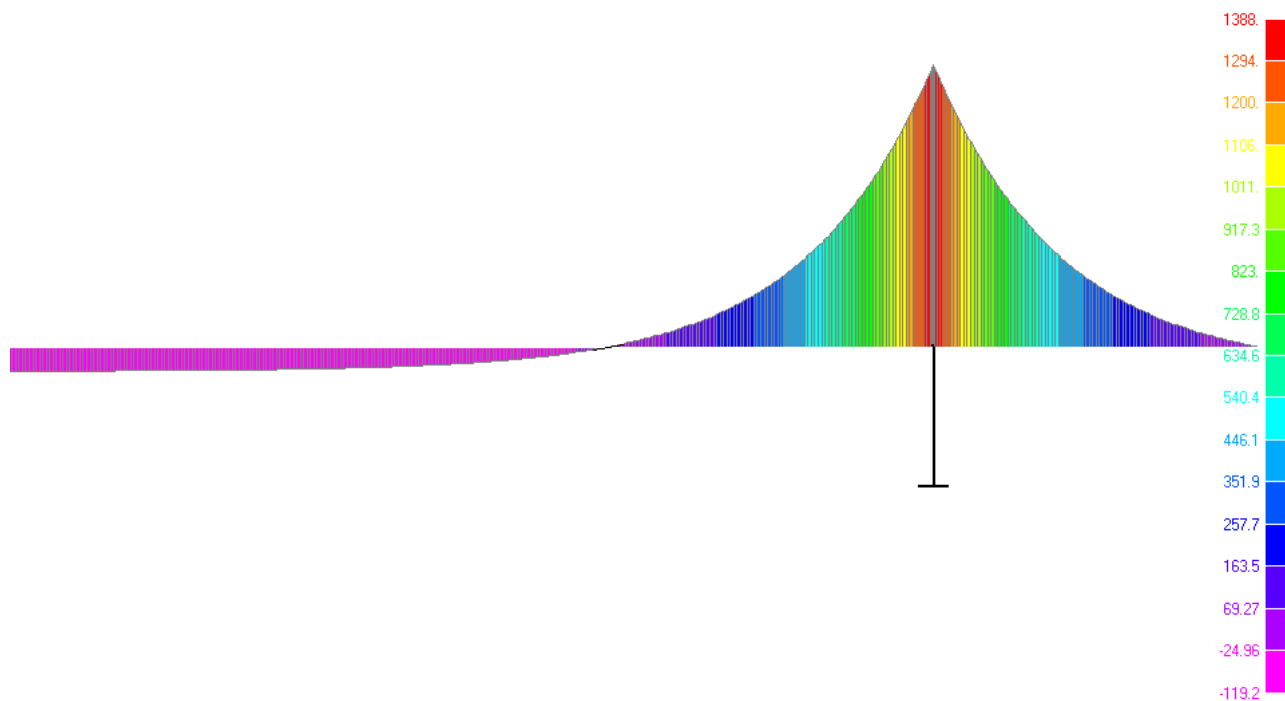


Рис. 3.3.5. Эпюра изгибающих моментов (Н×м) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

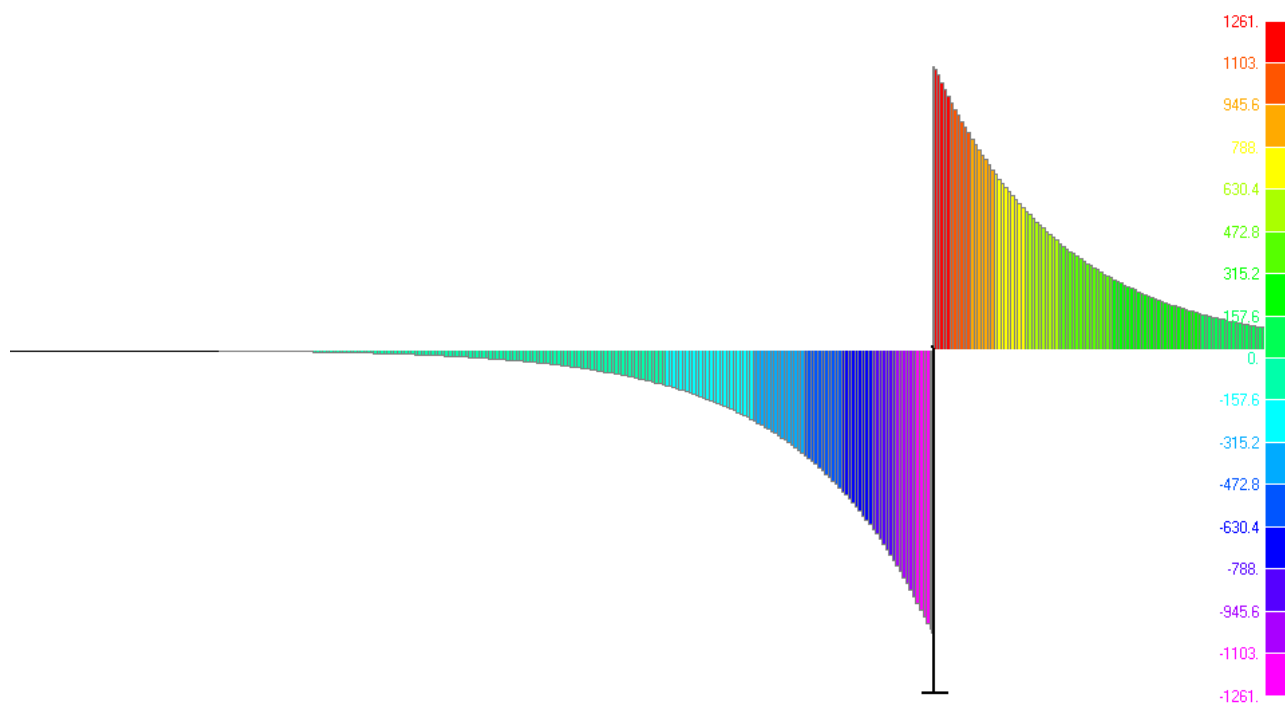


Рис. 3.3.6. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

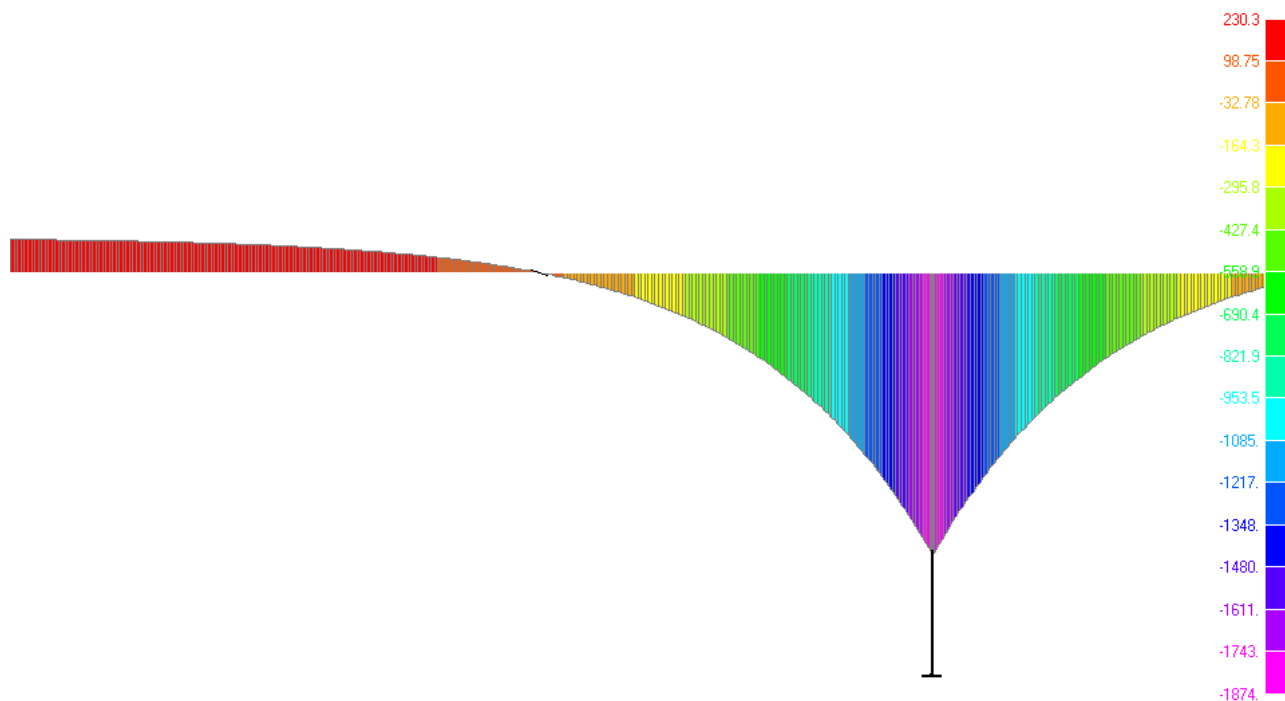


Рис. 3.3.7. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{H}\times\text{м}$ ) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $+55\text{ }^\circ\text{C}$

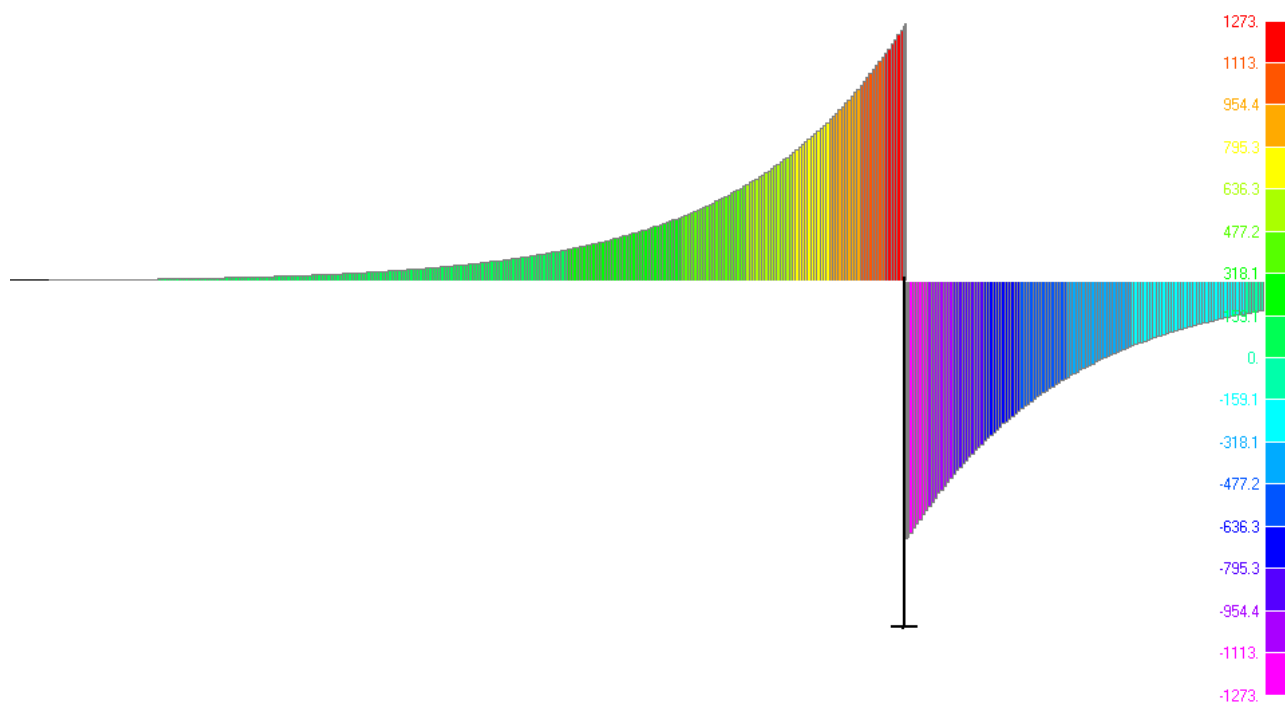


Рис. 3.3.8. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $+55\text{ }^\circ\text{C}$



### 3.3.2. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в рельсо-струне от собственного веса путевой структуры и двух юнибусов (для расчета прочности рельса-струны)

Для жесткой заделки корпуса рельса-струны на промежуточной опоре

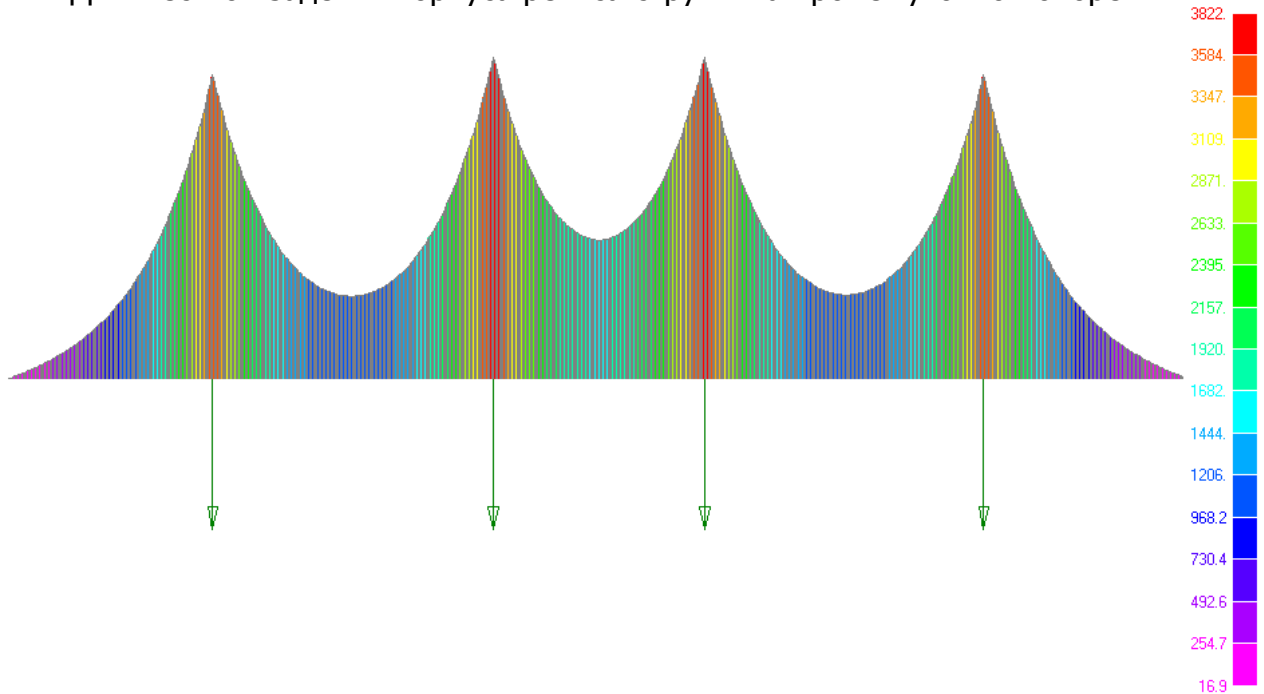


Рис. 3.3.9. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{H}\times\text{м}$ ) в рельсо-струне от собственного веса рельса-струны и двух юнибусов, размещенных в середине пролета, при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

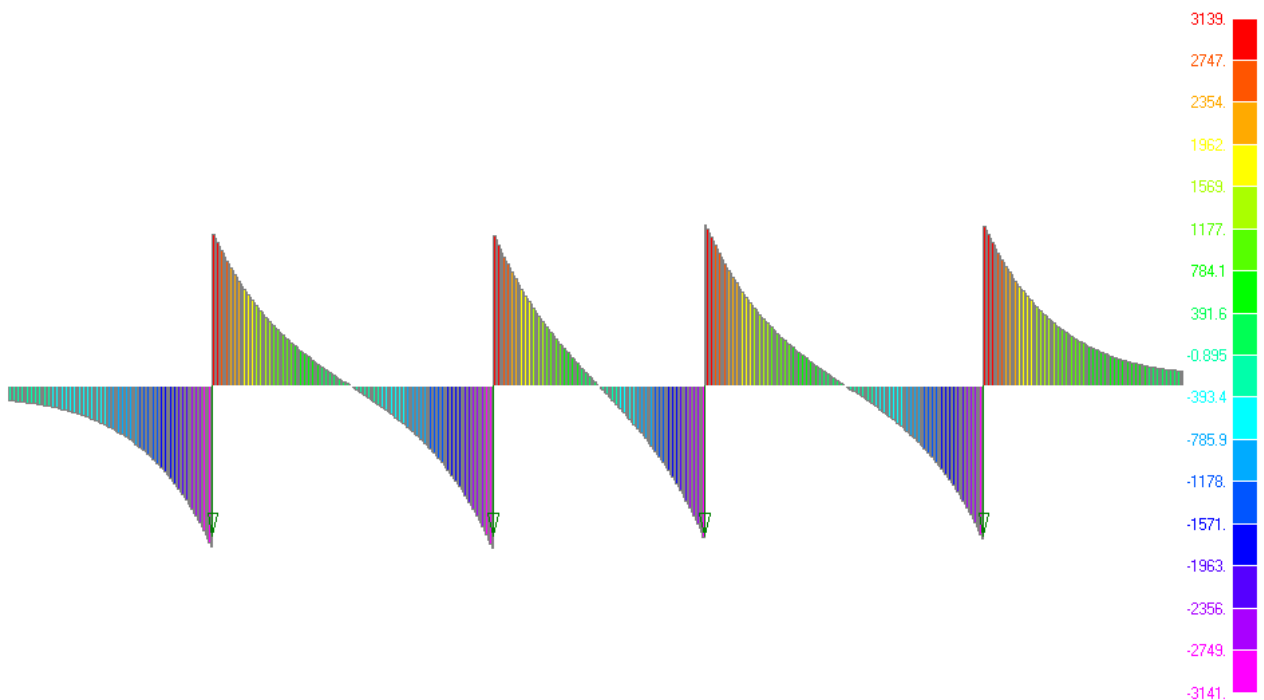


Рис. 3.3.10. Эпюра поперечных сил ( $\text{H}$ ) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух юнибусов, размещенных в середине пролета, при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

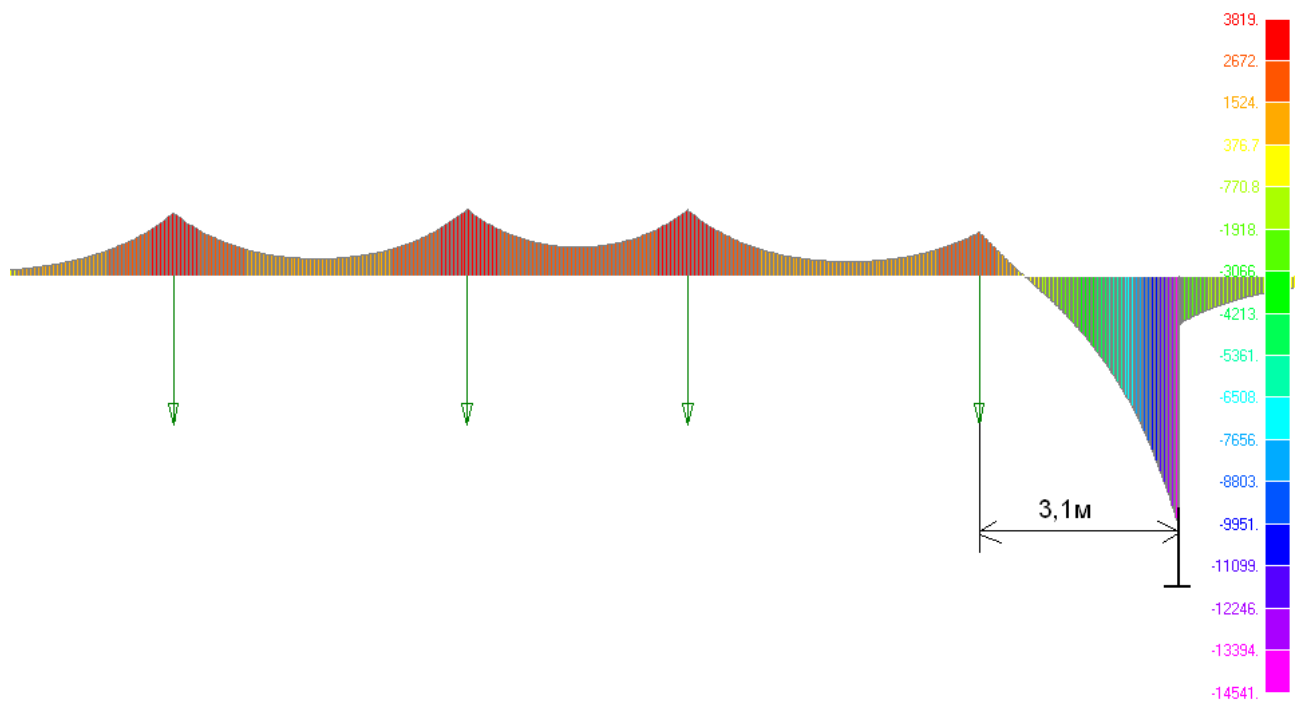


Рис. 3.3.11. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{Н}\times\text{м}$ ) в рельсо-струне от собственного веса рельса-струны и двух юнибусов, размещенных на расстоянии 3,1 м от промежуточной опоры при жесткой заделке корпуса рельса на опоре и при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

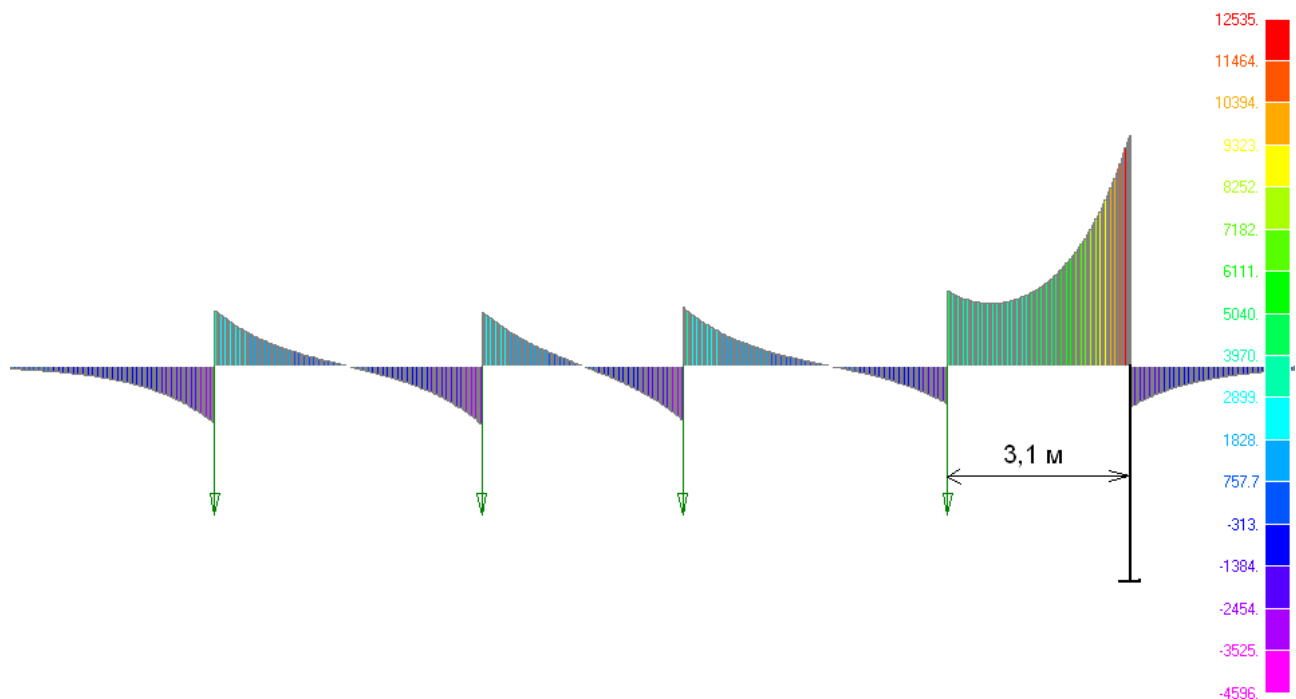


Рис. 3.3.12. Эпюра поперечных сил ( $\text{Н}$ ) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух юнибусов, размещенных на расстоянии 3,1 м от промежуточной опоры, при жесткой заделке корпуса рельса на опоре и при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

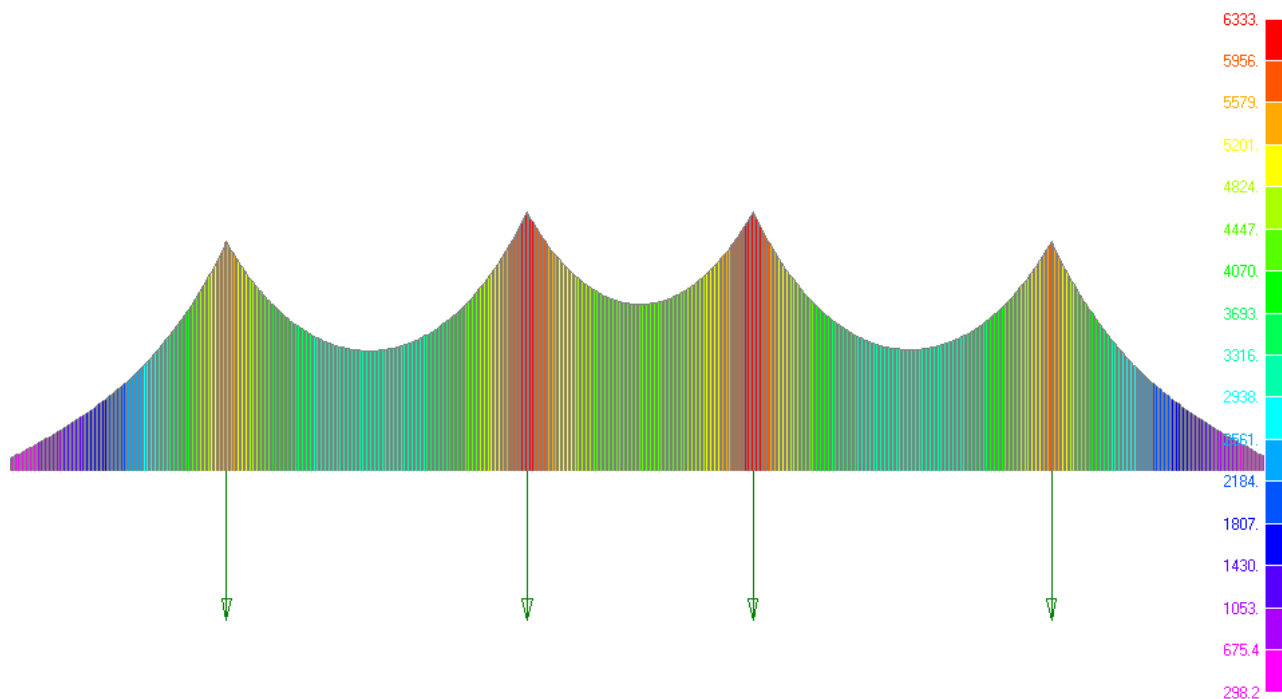


Рис. 3.3.13. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{H}\times\text{м}$ ) в рельсе струне от собственного веса рельса-струны и двух юнибусов, размещенных в середине пролета, при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $+55\text{ }^\circ\text{C}$

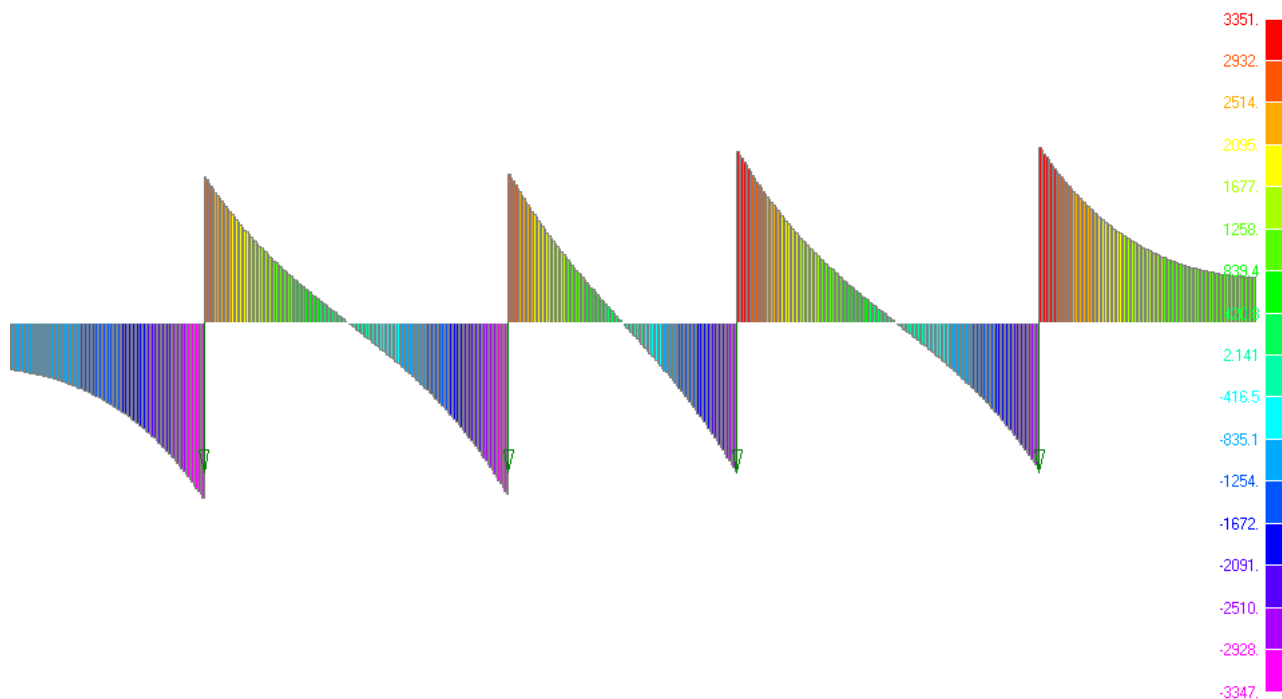


Рис. 3.3.14. Эпюра поперечных сил ( $\text{H}$ ) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух юнибусов, размещенных в середине пролета, при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $+55\text{ }^\circ\text{C}$

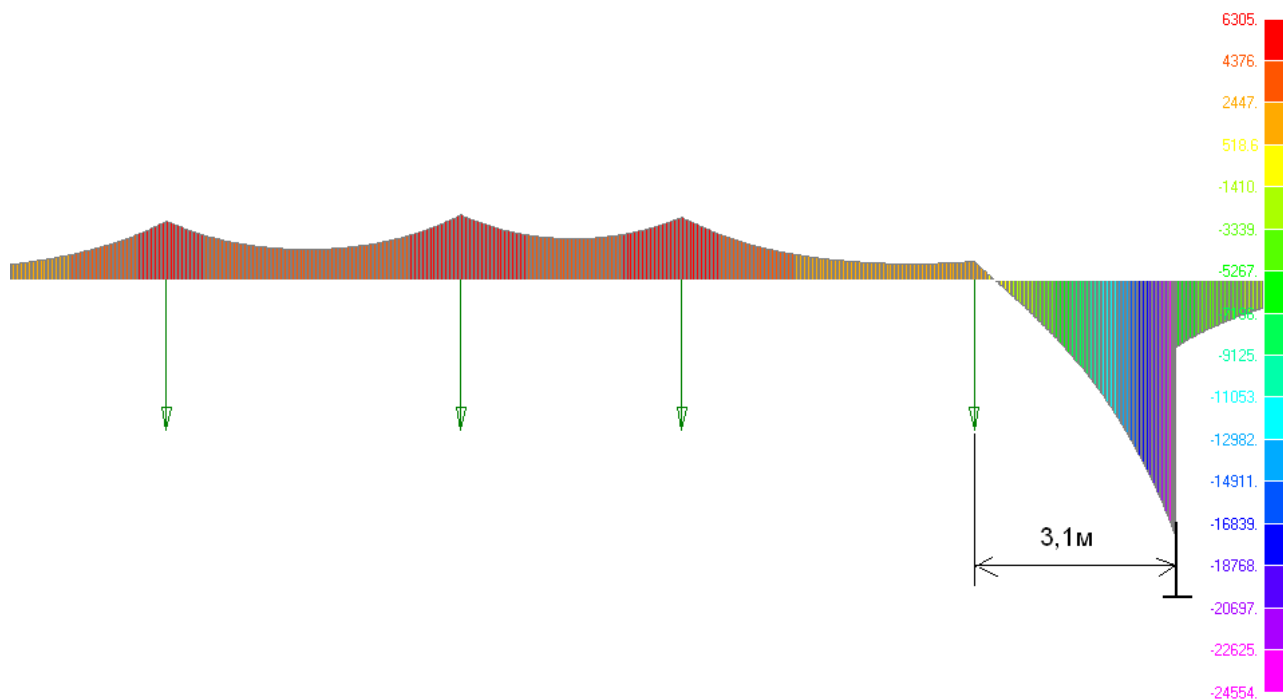


Рис. 3.3.15. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{H}\times\text{м}$ ) в рельсо-струне от собственного веса рельса-струны и двух юнибусов, размещенных на расстоянии 3,1 м от промежуточной опоры, при жесткой заделке корпуса рельса на опоре и при  $+55\text{ }^\circ\text{C}$

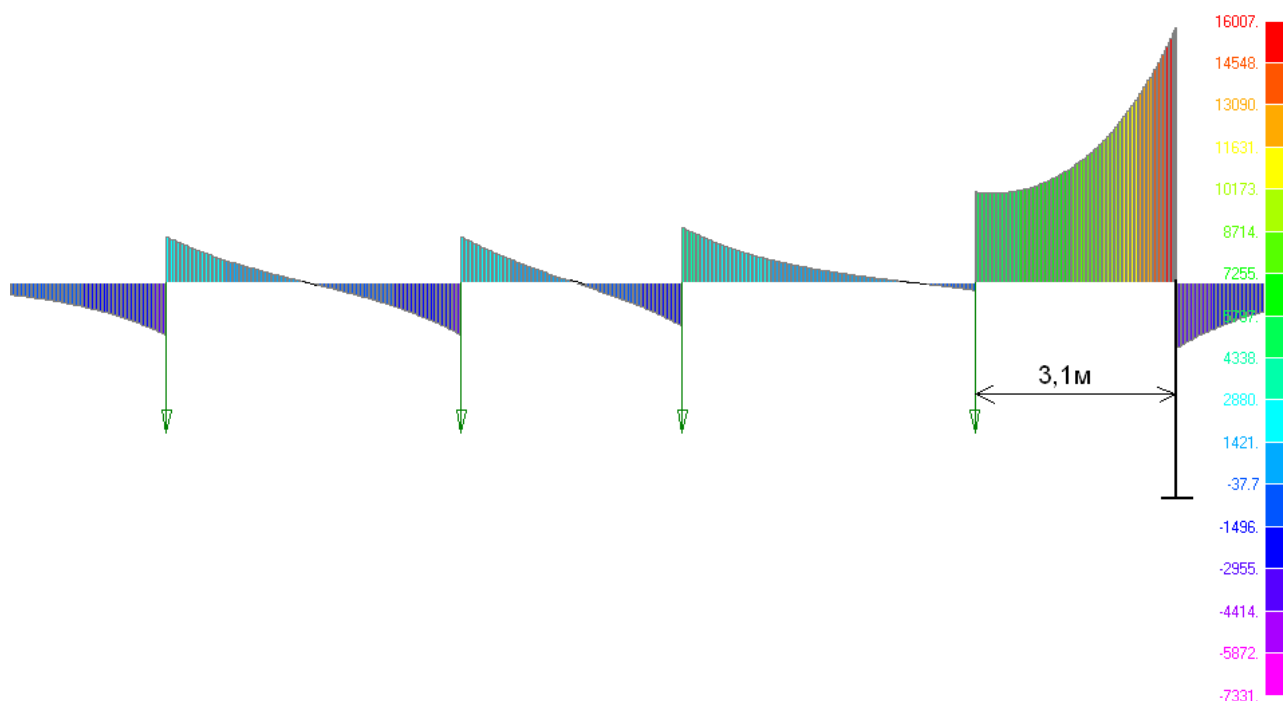


Рис. 3.3.16. Эпюра поперечных сил ( $\text{H}$ ) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух юнибусов, размещенных на расстоянии 3,1 м от промежуточной опоры, при жесткой заделке корпуса рельса на опоре и при  $+55\text{ }^\circ\text{C}$

Для шарнирного закрепления корпуса рельса-струны на промежуточной опоре

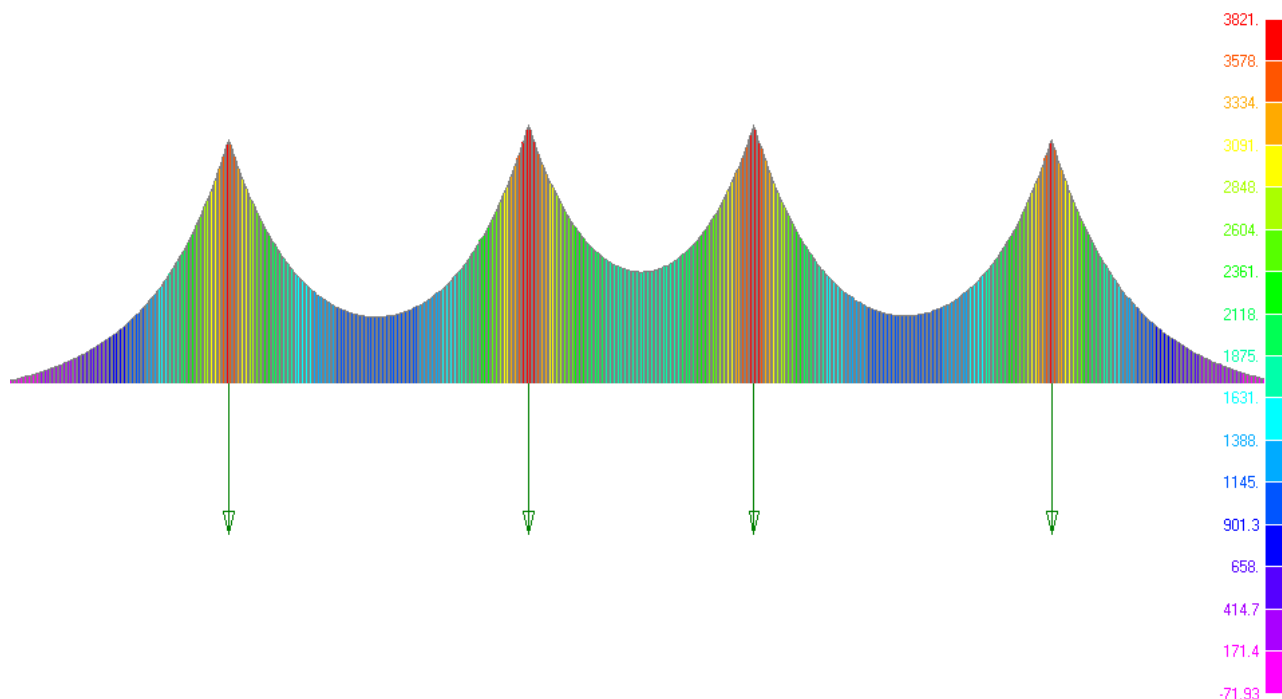


Рис. 3.3.17. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{H}\times\text{м}$ ) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и двух юнибусов, размещенных в середине пролета, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

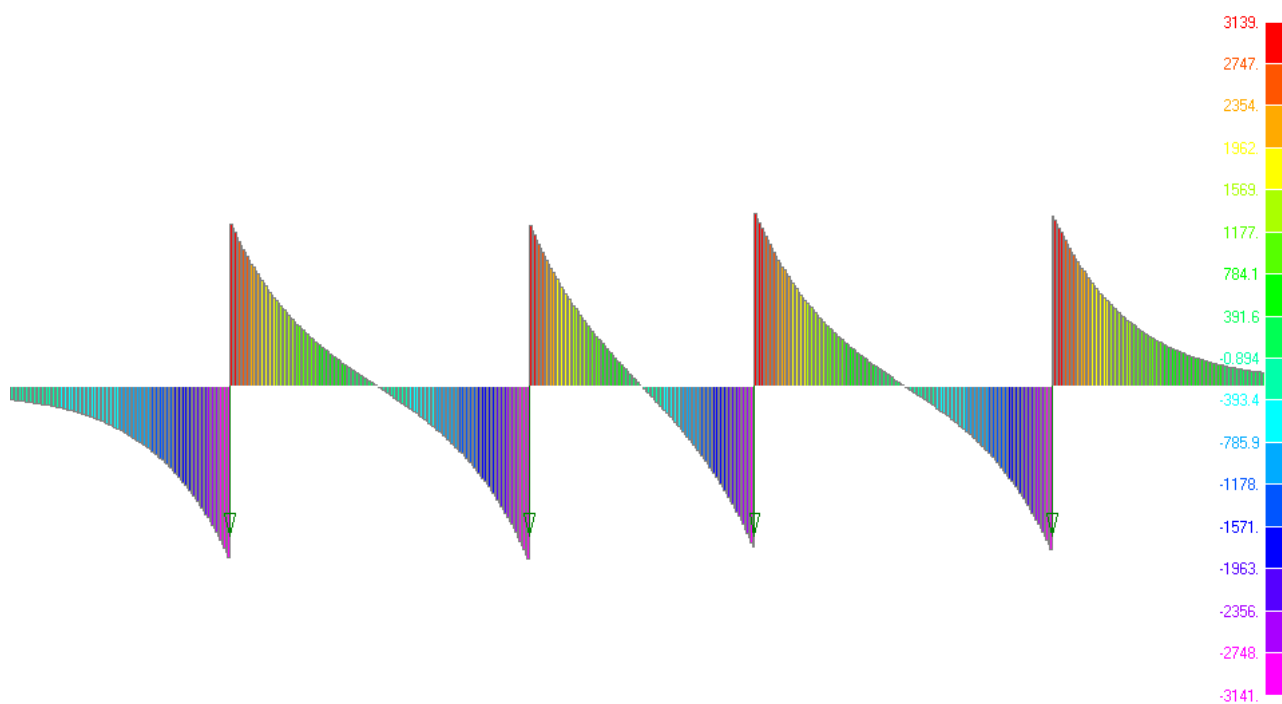


Рис. 3.3.18. Эпюра поперечных сил ( $\text{H}$ ) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух юнибусов, размещенных в середины пролета, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

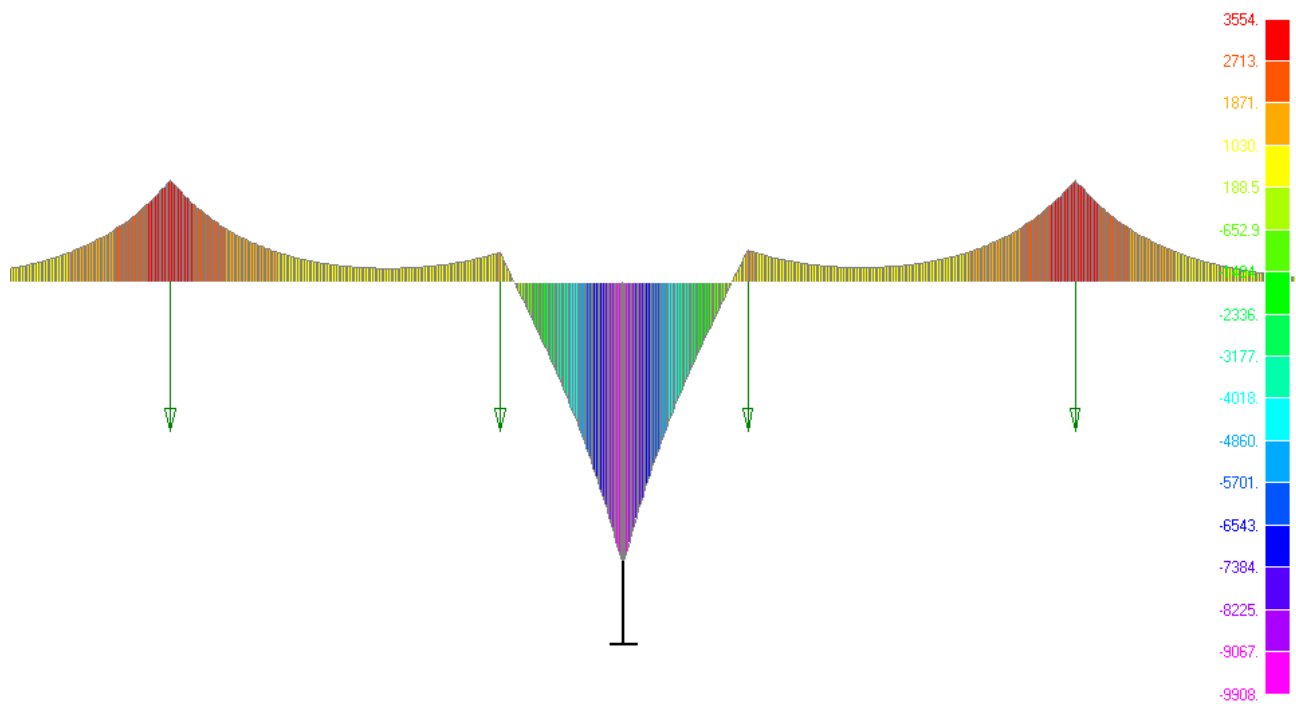


Рис. 3.3.19. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{H}\times\text{м}$ ) в рельсо-струне от собственного веса рельса-струны и двух юнибусов, размещенных симметрично на промежуточной опоре, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

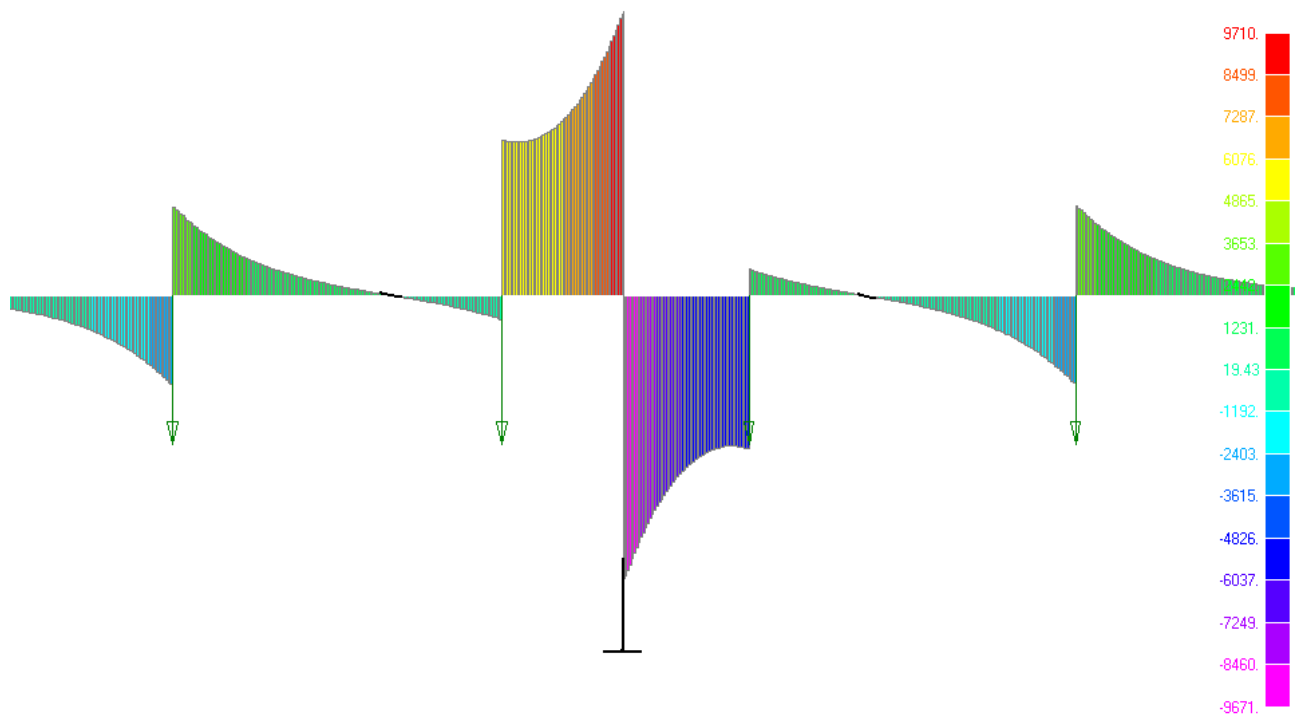


Рис. 3.3.20. Эпюра поперечных сил ( $\text{H}$ ) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух юнибусов, размещенных симметрично на промежуточной опоре, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

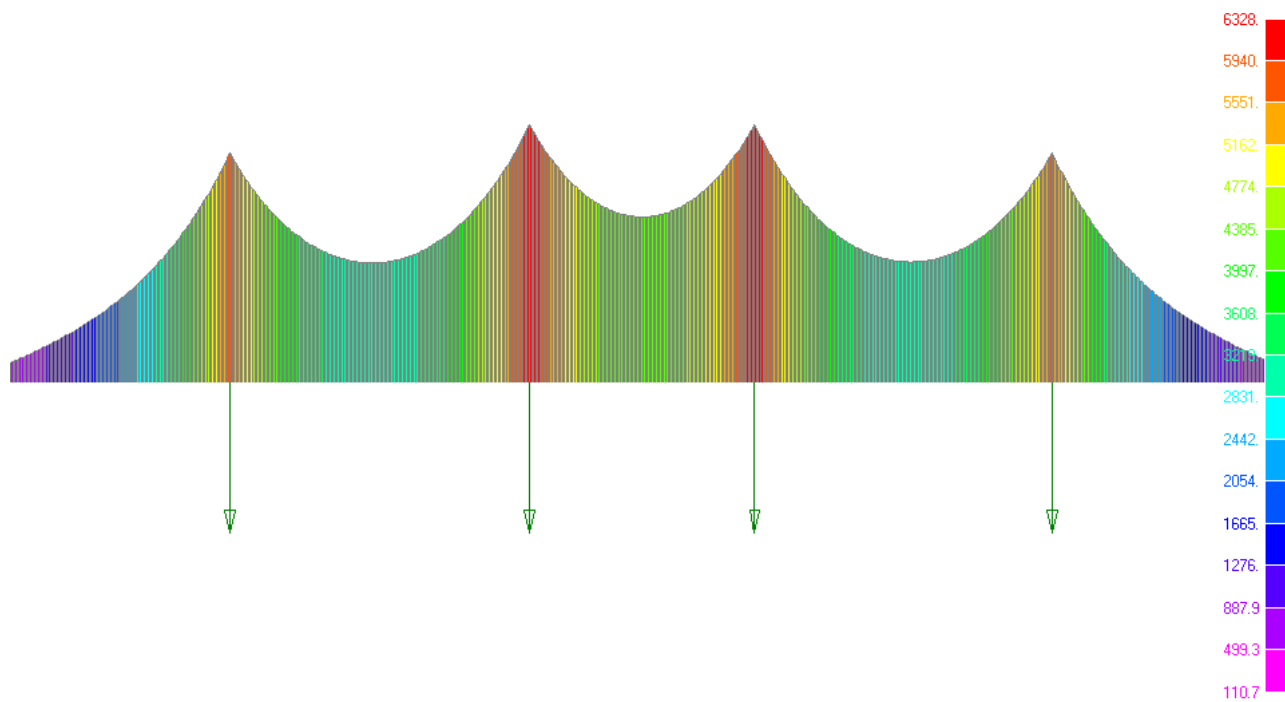


Рис. 3.3.21. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{H}\times\text{м}$ ) в рельсо-струне от собственного веса рельса-струны и двух юнибусов, размещенных в середине пролета, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $+55\text{ }^\circ\text{C}$

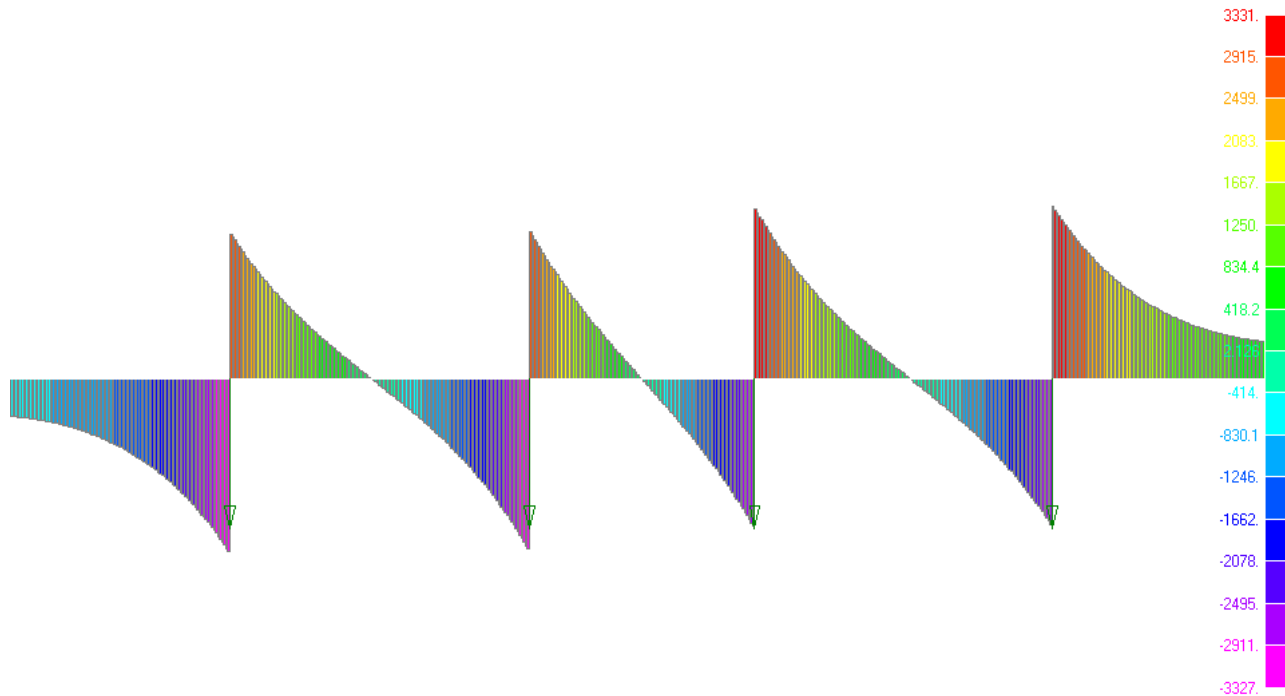


Рис. 3.3.22. Эпюра поперечных сил ( $\text{H}$ ) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух юнибусов, размещенных в середине пролета, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $+55\text{ }^\circ\text{C}$

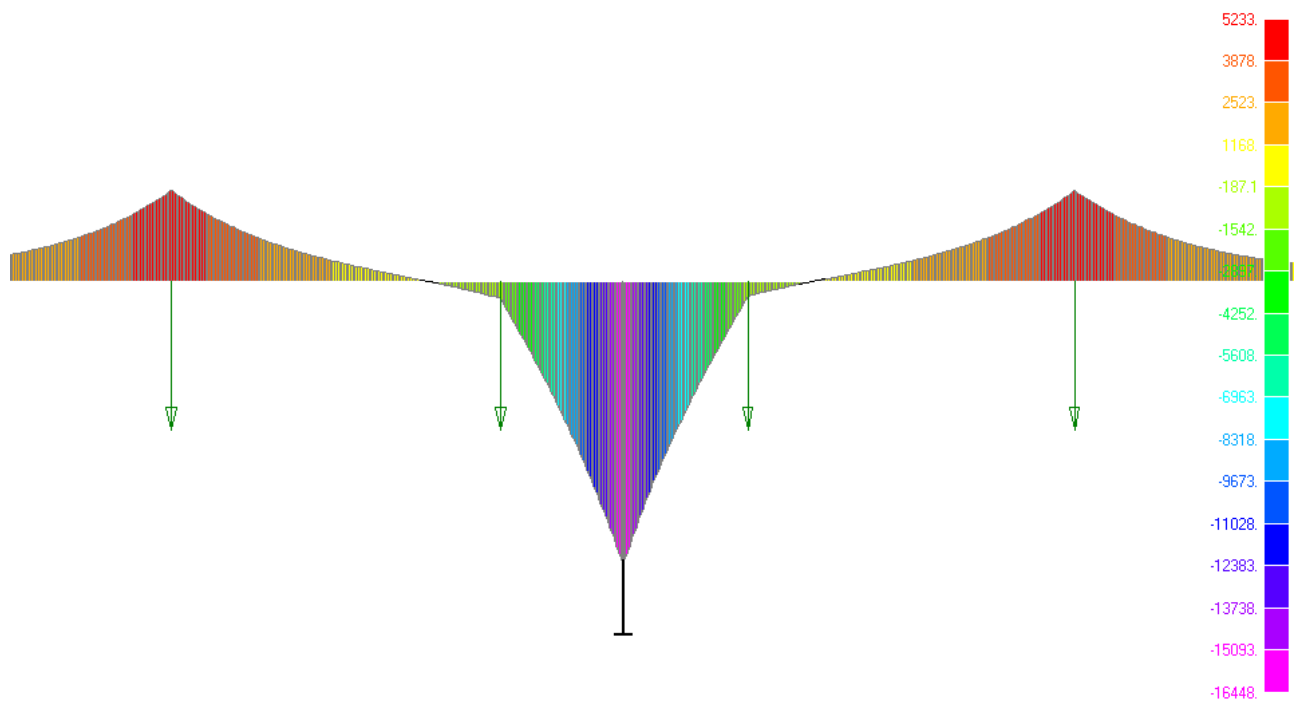


Рис. 3.3.23. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{H}\times\text{м}$ ) в рельсо-струне от собственного веса рельса-струны и двух юнибусов, размещенных симметрично на промежуточной опоре, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $+55\text{ }^\circ\text{C}$

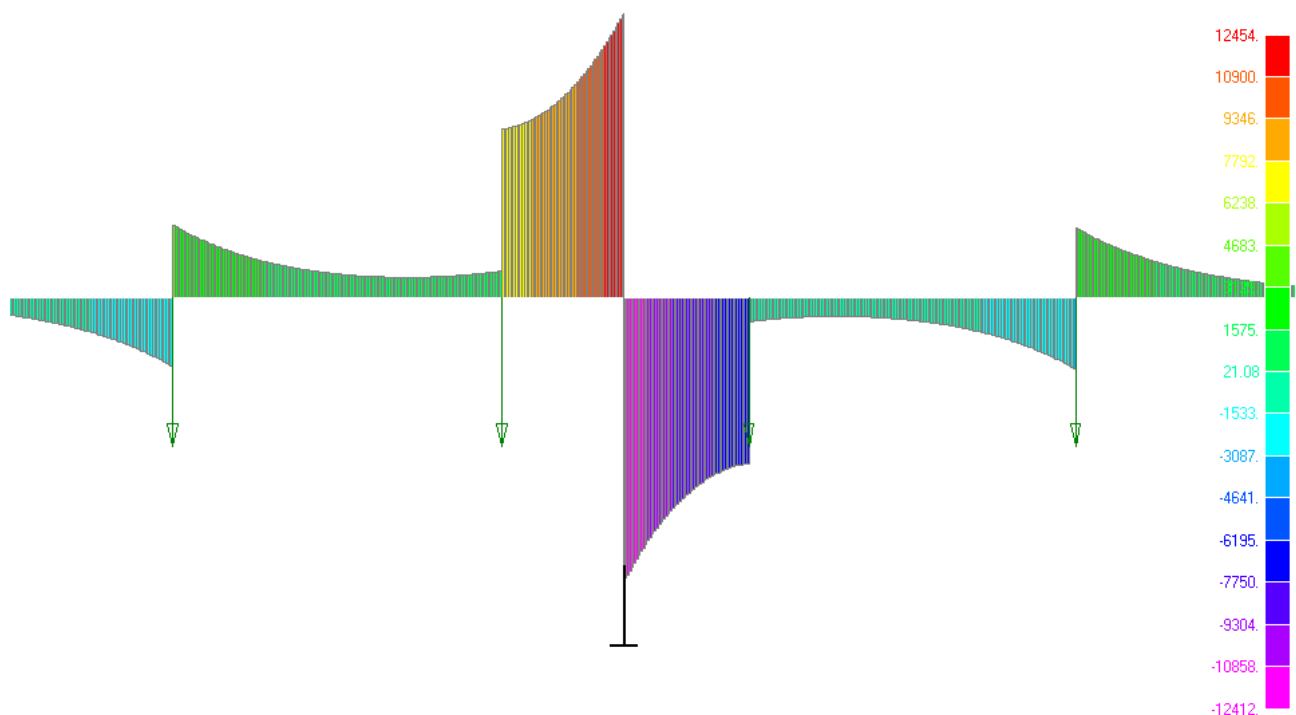


Рис. 3.3.24. Эпюра поперечных сил ( $\text{H}$ ) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух юнибусов, размещенных симметрично на промежуточной опоре, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $+55\text{ }^\circ\text{C}$



### 3.3.3. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в рельсо-струне от собственного веса путевой структуры и одного юнибуса (для расчета выносливости рельса-струны)

Для жесткой заделки корпуса рельса-струны на промежуточной опоре

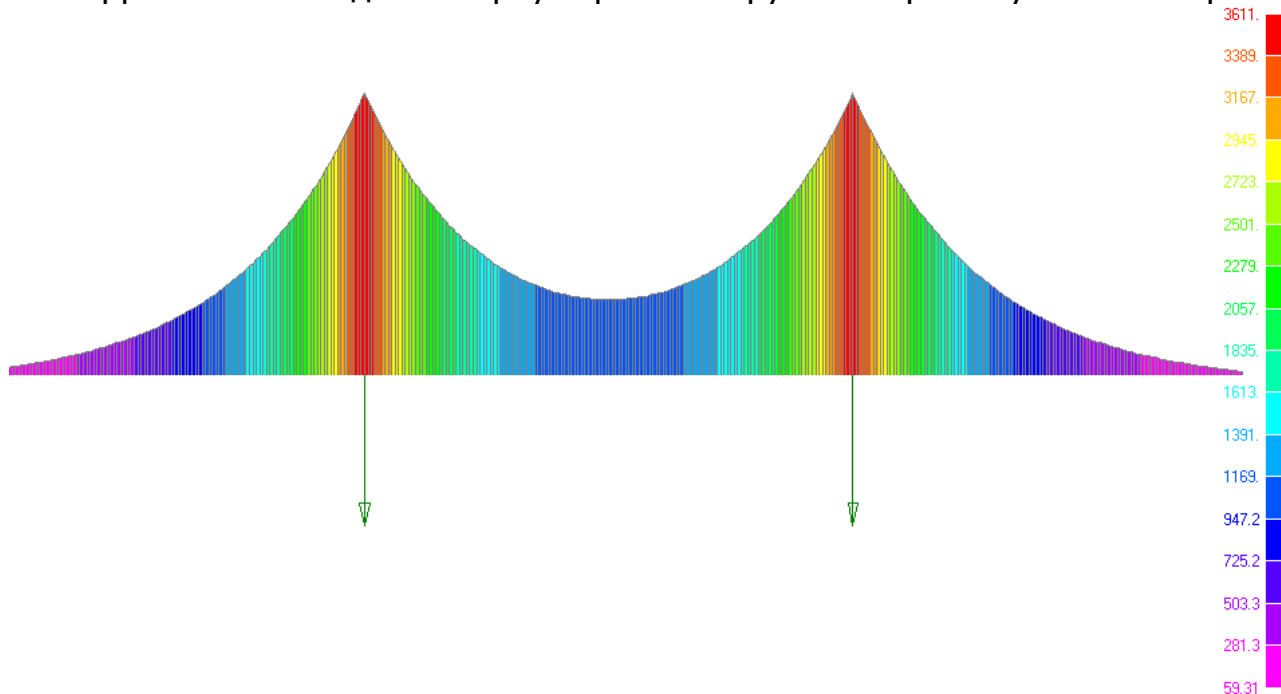


Рис. 3.3.25. Эпюра изгибающих моментов (Н×м) в рельсо-струне от собственного веса рельса-струны и одного юнибуса, размещенного в середине пролета, при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

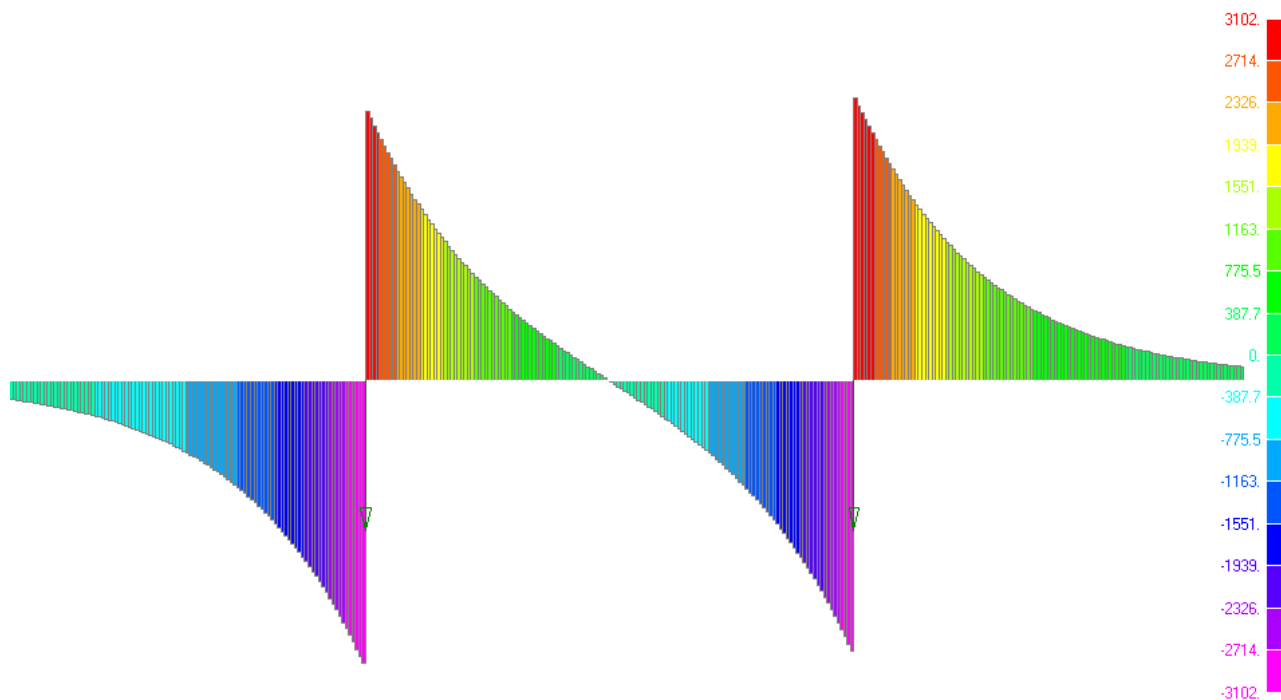


Рис. 3.3.26. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного юнибуса, размещенного в середине пролета, при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

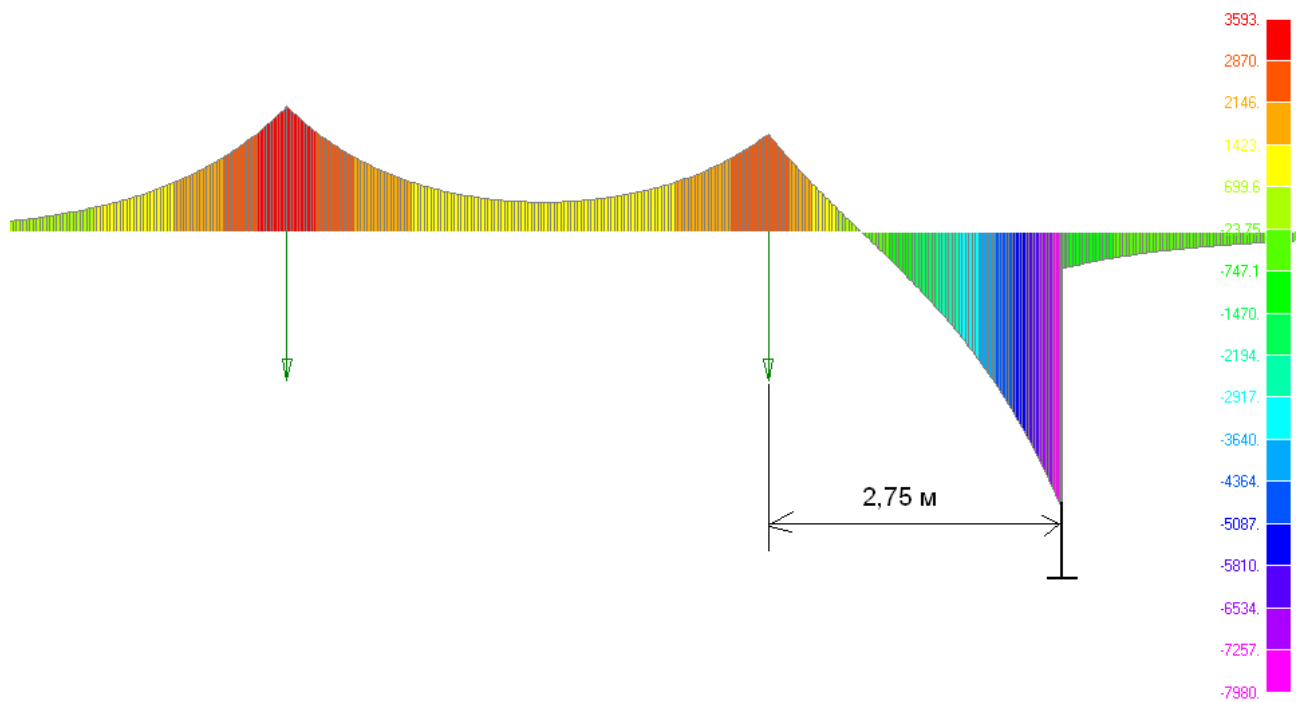


Рис. 3.3.27. Эпюра изгибающих моментов (Н×м) в рельсо-струне от собственного веса рельса-струны и одного юнибуса, размещенного на расстоянии 2,75 м от промежуточной опоры, при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

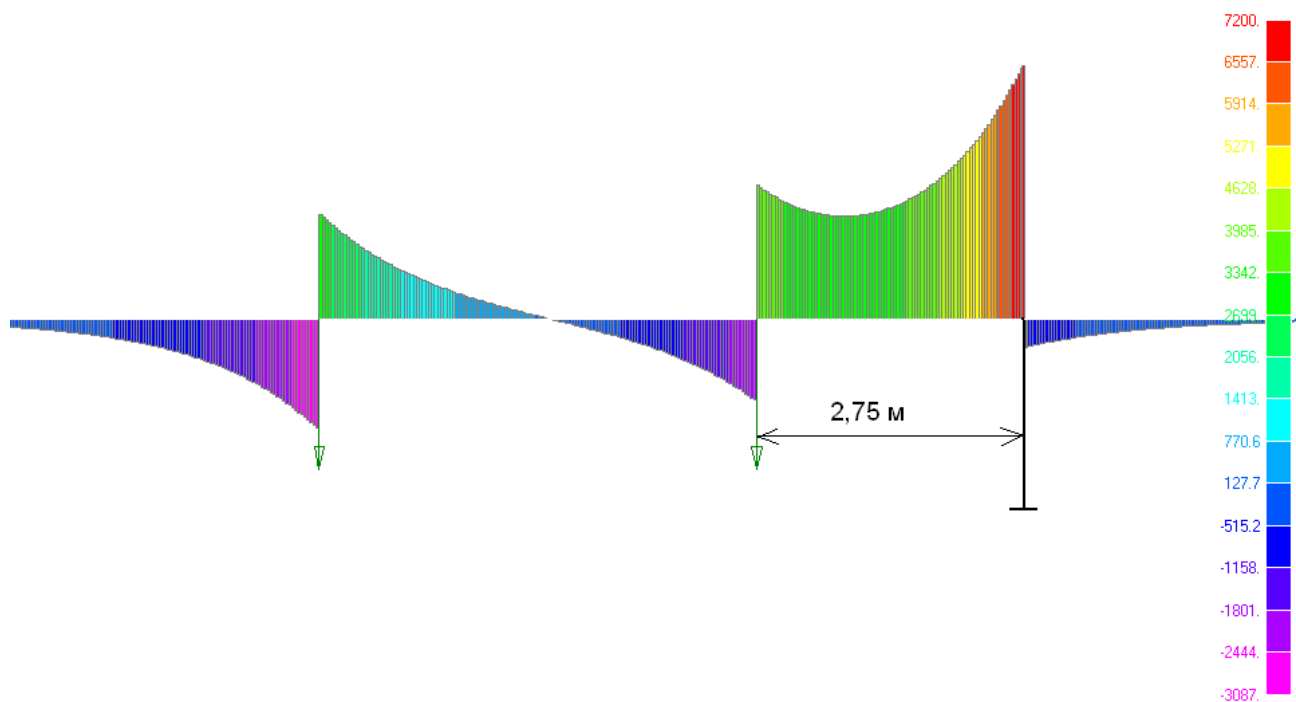


Рис. 3.3.28. Эпюра поперечных сил (Н) в рельсо-струне от собственного веса рельса-струны и одного юнибуса, размещенного на расстоянии 2,75 м от промежуточной опоры, при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

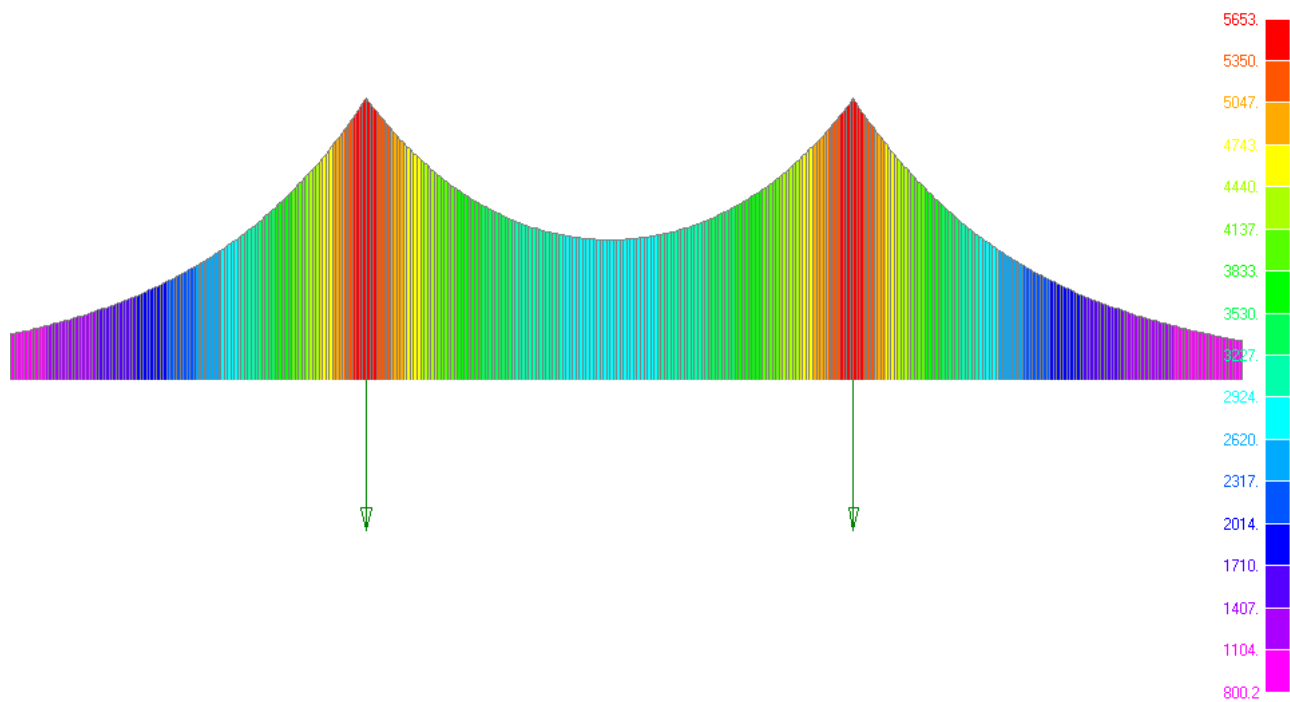


Рис. 3.3.29. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{H}\times\text{м}$ ) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и одного юнибуса, размещенного в середине пролета, при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $+55\text{ }^\circ\text{C}$

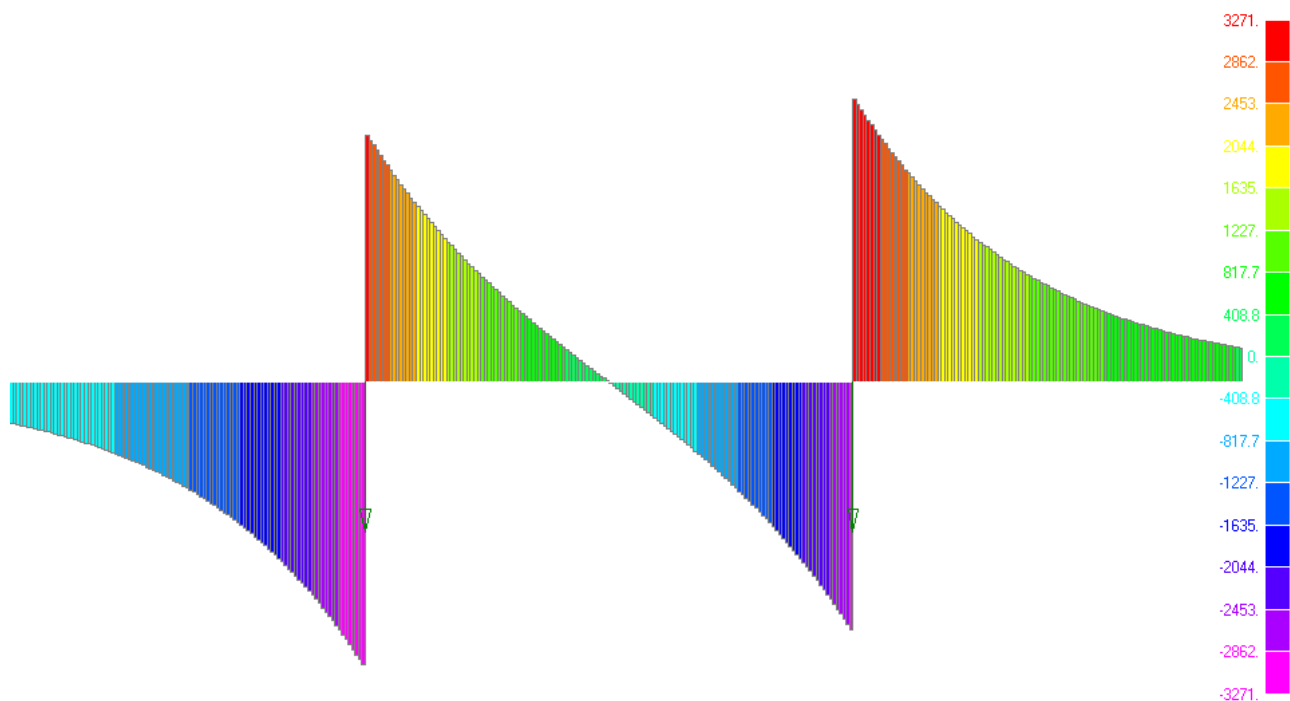


Рис. 3.3.30. Эпюра поперечных сил ( $\text{H}$ ) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного юнибуса, размещенного в середине пролета, при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $+55\text{ }^\circ\text{C}$

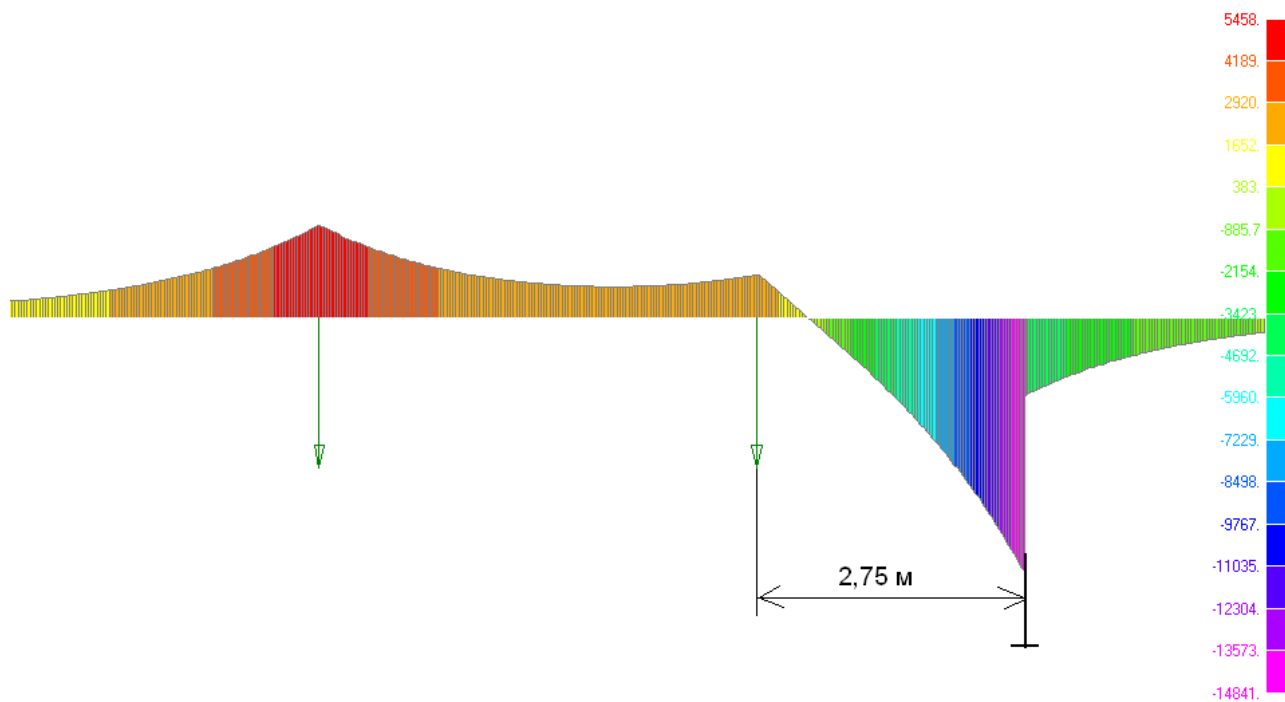


Рис. 3.3.31. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{H}\times\text{м}$ ) в рельсо-струне от собственного веса рельса-струны и одного юнибуса, размещенного на расстоянии 2,75 м от промежуточной опоры, при жесткой заделке корпуса рельса на опоре и при  $+55\text{ }^\circ\text{C}$

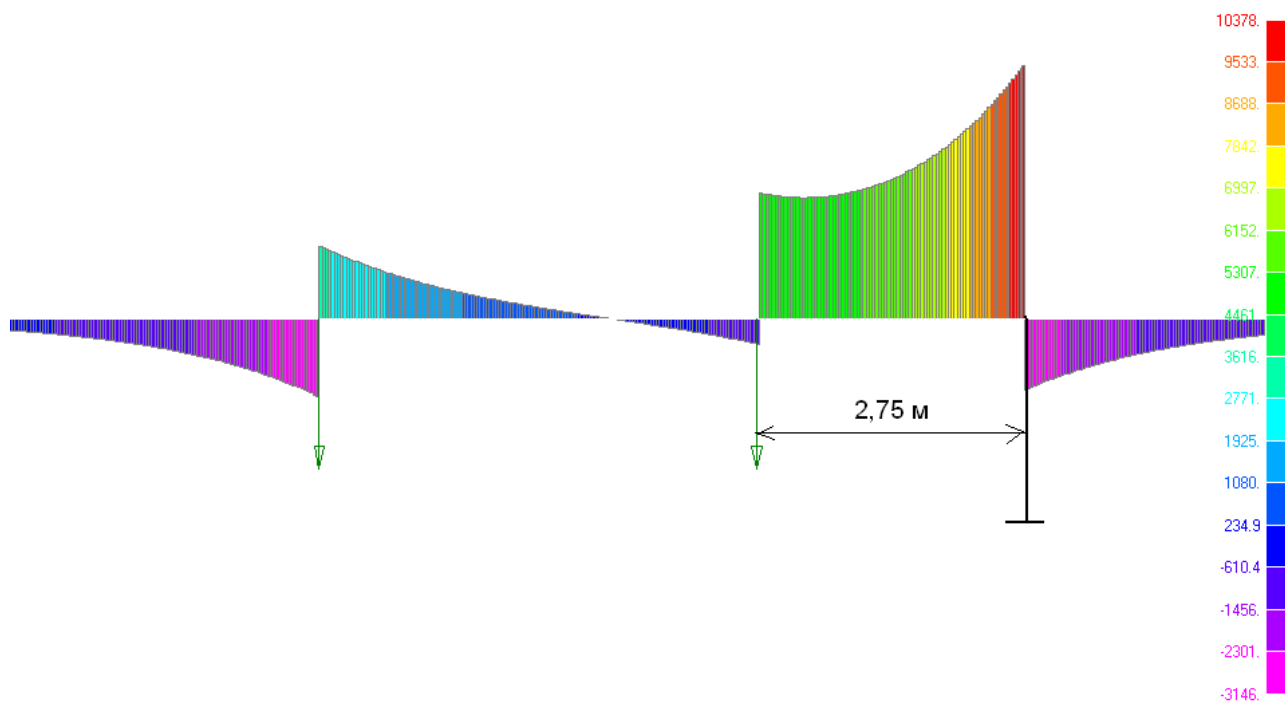


Рис. 3.3.32. Эпюра поперечных сил ( $\text{H}$ ) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного юнибуса, размещенного на расстоянии 2,75 м от промежуточной опоры, при жесткой заделке корпуса рельса на опоре и при  $+55\text{ }^\circ\text{C}$

Для шарнирного закрепления корпуса рельса-струны на промежуточной опоре

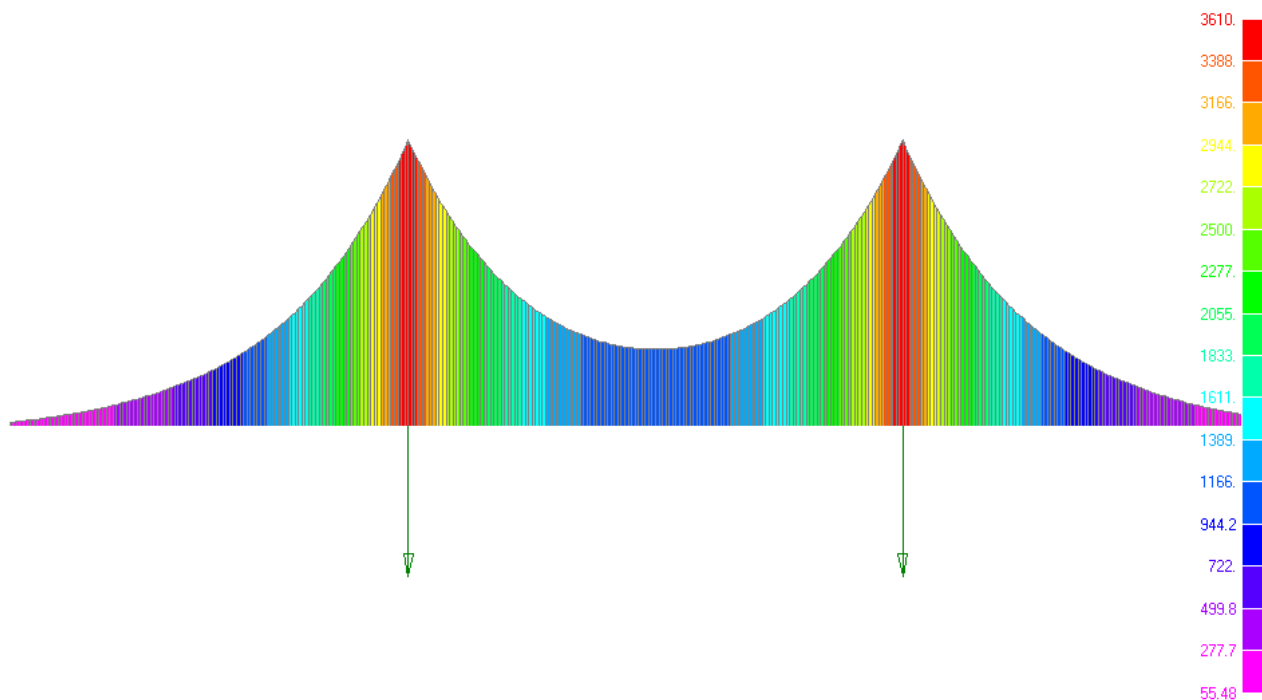


Рис. 3.3.33. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{H}\times\text{м}$ ) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и одного юнибуса, размещенного в середине пролета, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $-55^\circ\text{C}$

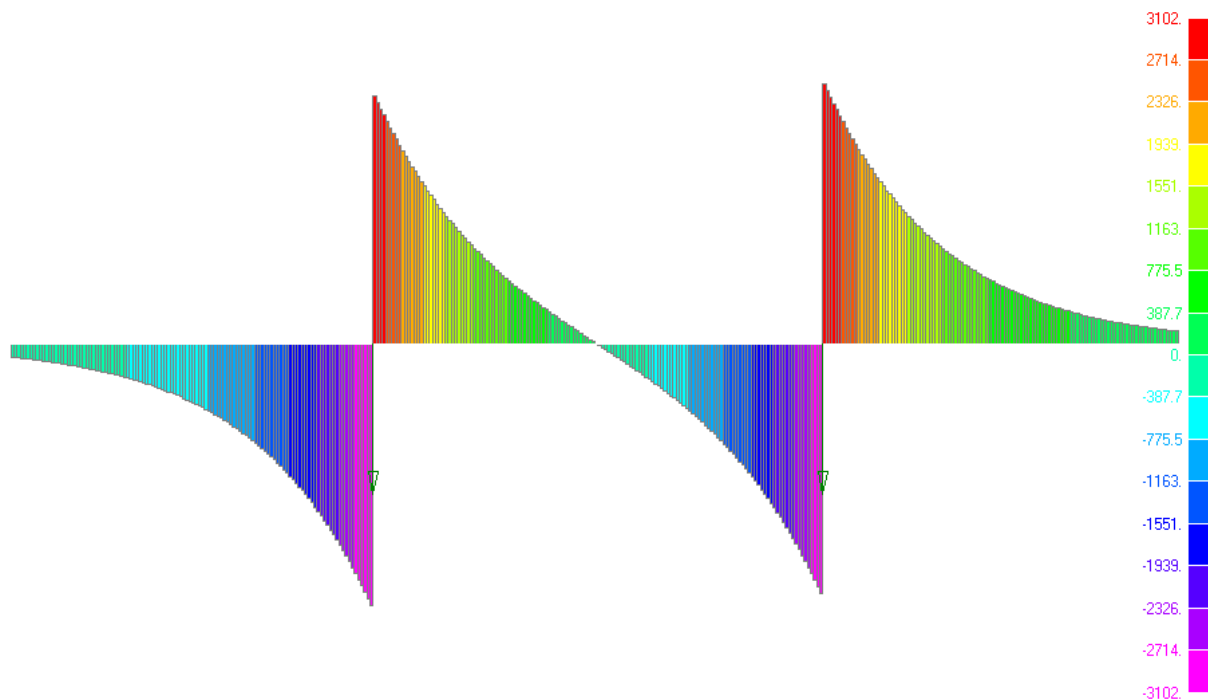


Рис. 3.3.34. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного юнибуса, размещенного в середине пролета, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $-55^\circ\text{C}$

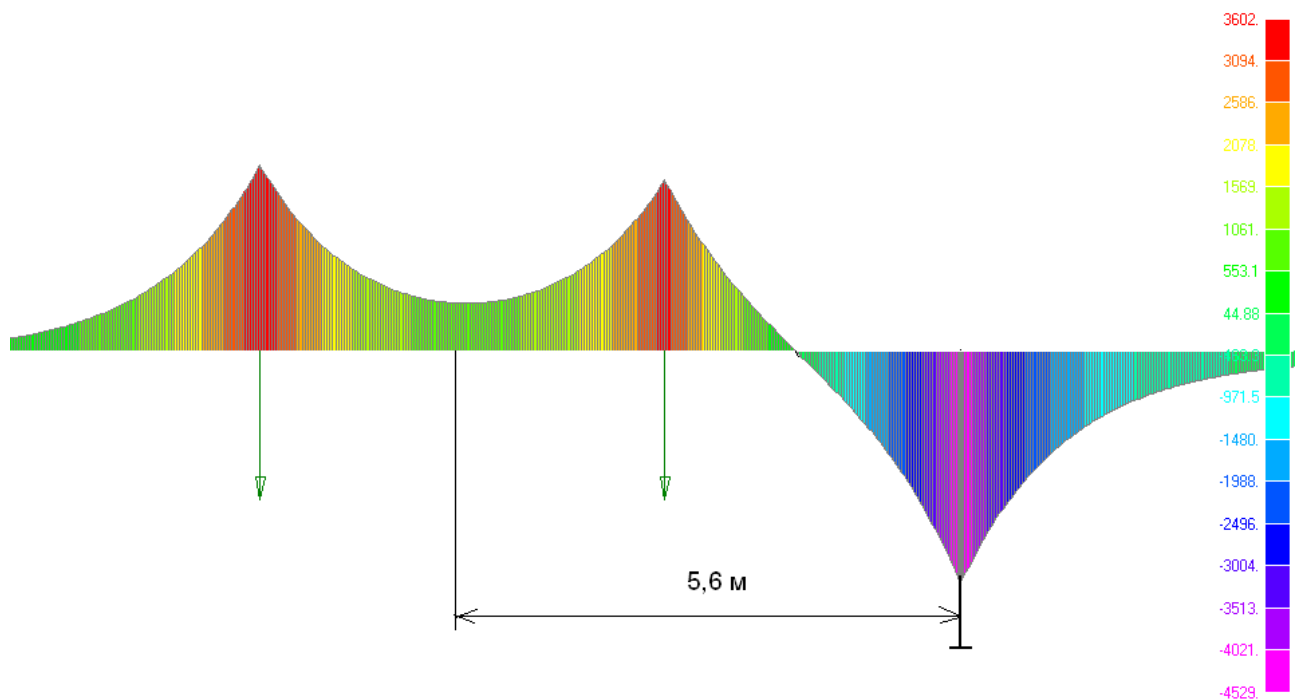


Рис. 3.3.35. Эпюра изгибающих моментов (Н×м) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и одного юнибуса, размещенного на расстоянии 5,6 м от промежуточной опоры, при шарнирном закреплении корпуса рельса на опоре и при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

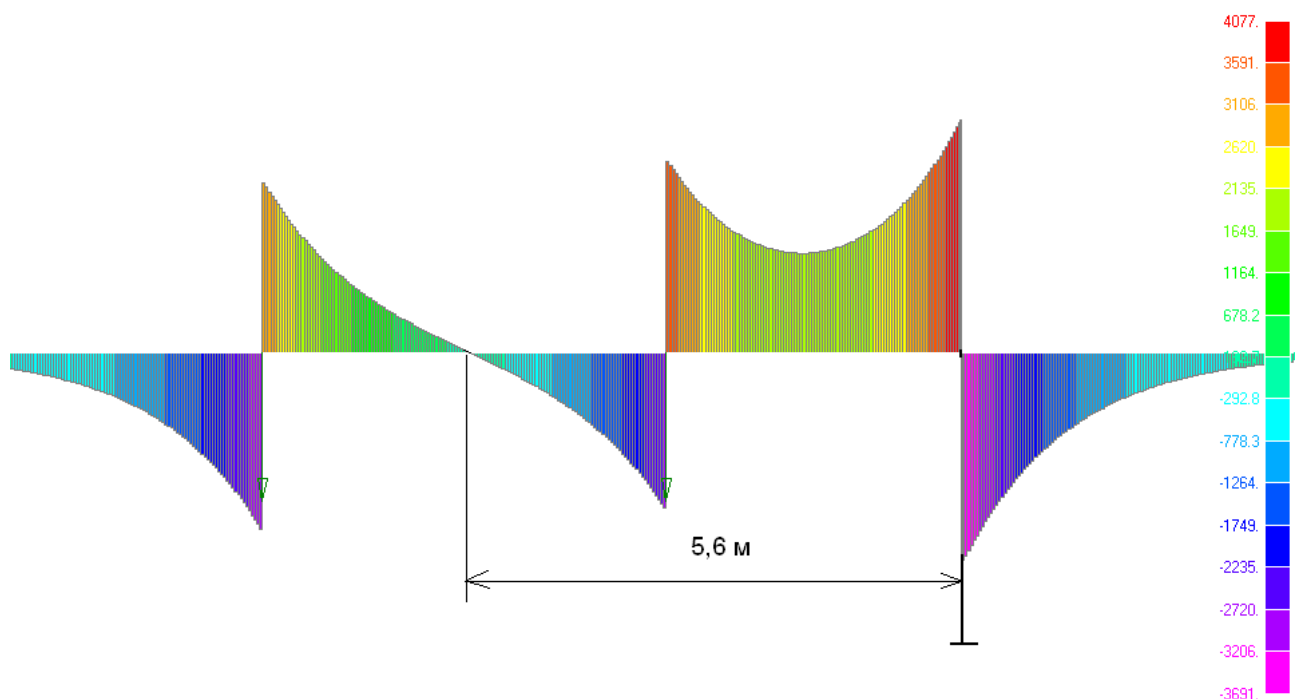


Рис. 3.3.36. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельсе от собственного веса рельса-струны и одного юнибуса, размещенного на расстоянии 5,6 м от промежуточной опоры, при шарнирном закреплении рельса на опоре и при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

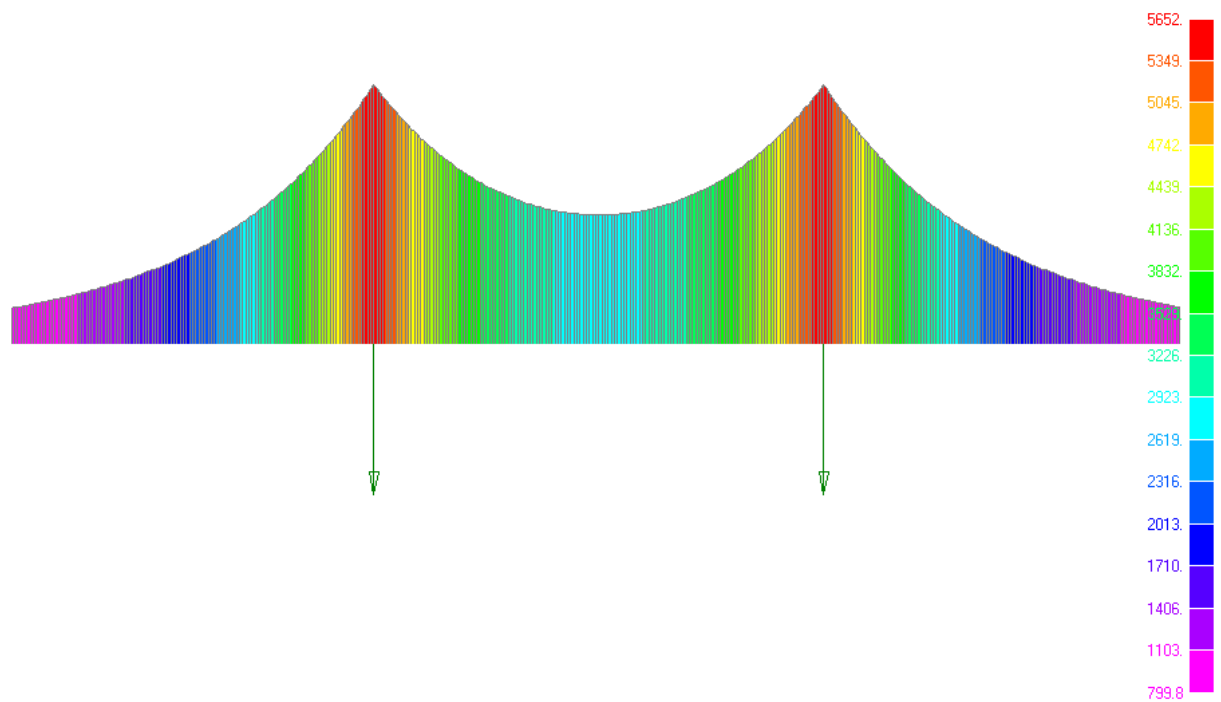


Рис. 3.3.37. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{H}\times\text{м}$ ) в рельсо-струне от собственного веса рельса-струны и одного юнибуса, размещенного в середине пролета, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $+55\text{ }^\circ\text{C}$

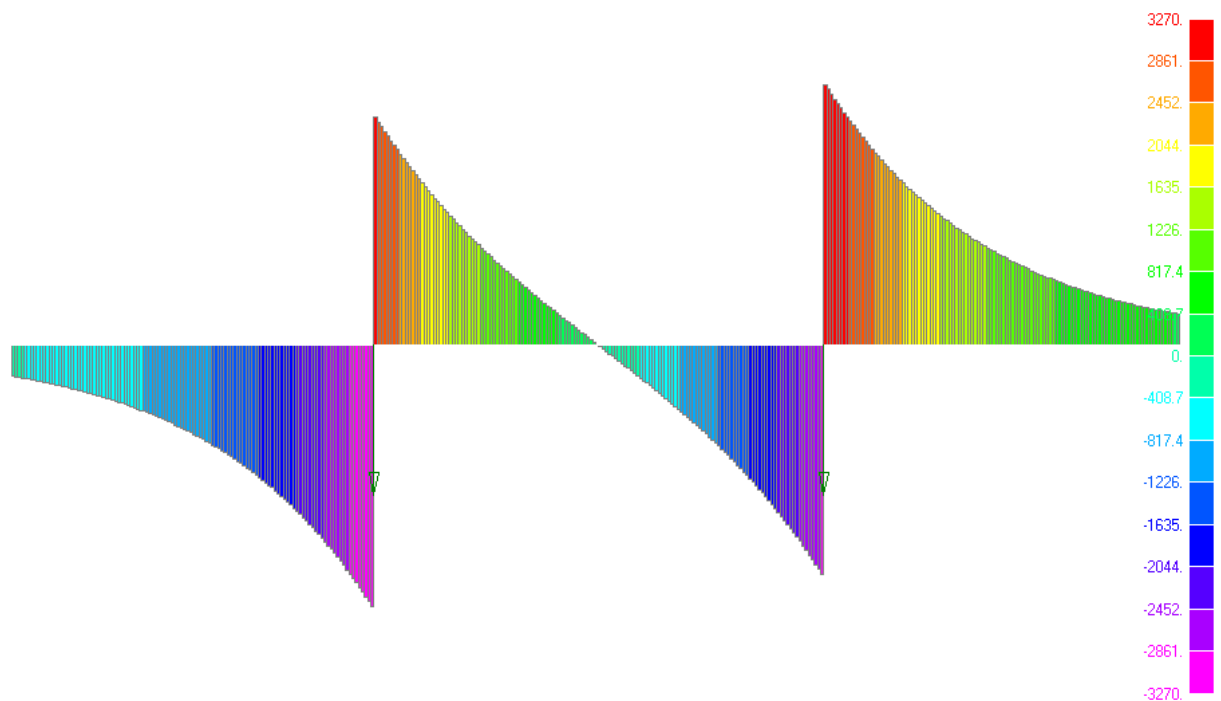


Рис. 3.3.38. Эпюра поперечных сил ( $\text{H}$ ) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного юнибуса, размещенного в середине пролета, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при  $+55\text{ }^\circ\text{C}$

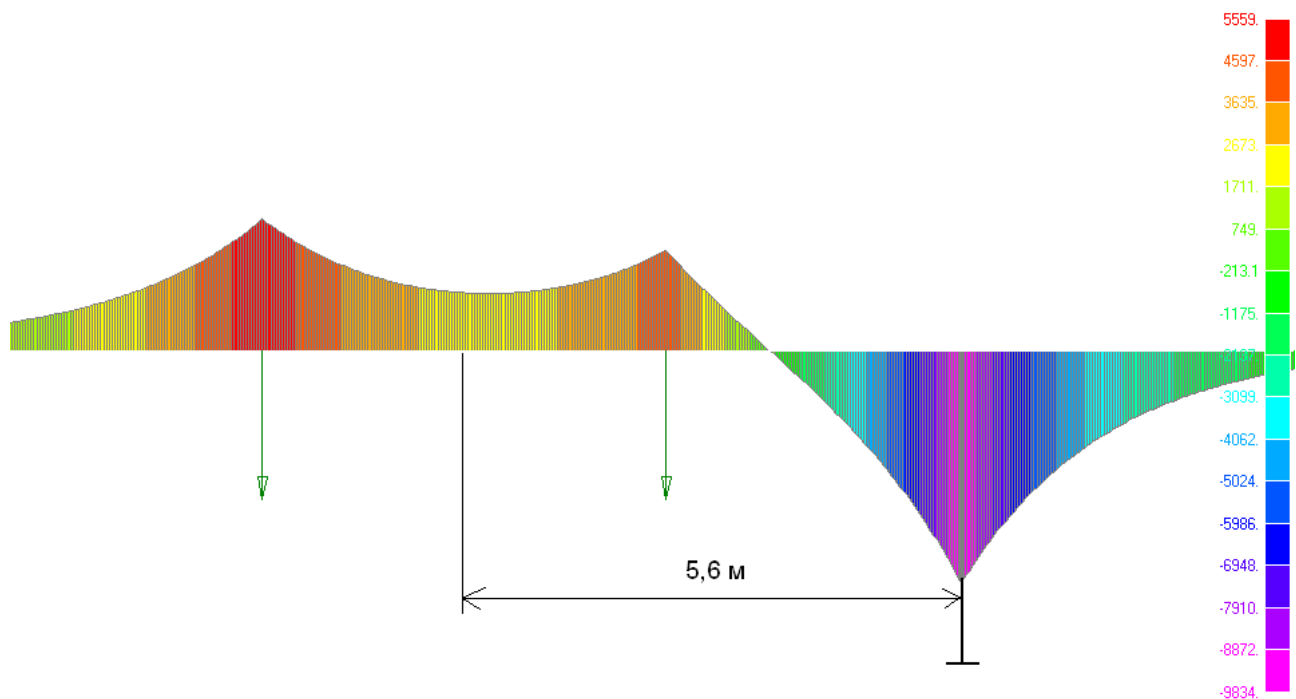


Рис. 3.3.39. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{H}\cdot\text{м}$ ) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и одного юнибуса, размещенного на расстоянии 5,6 м от промежуточной опоры, при шарнирном закреплении рельса на опоре и при  $+55^\circ\text{C}$

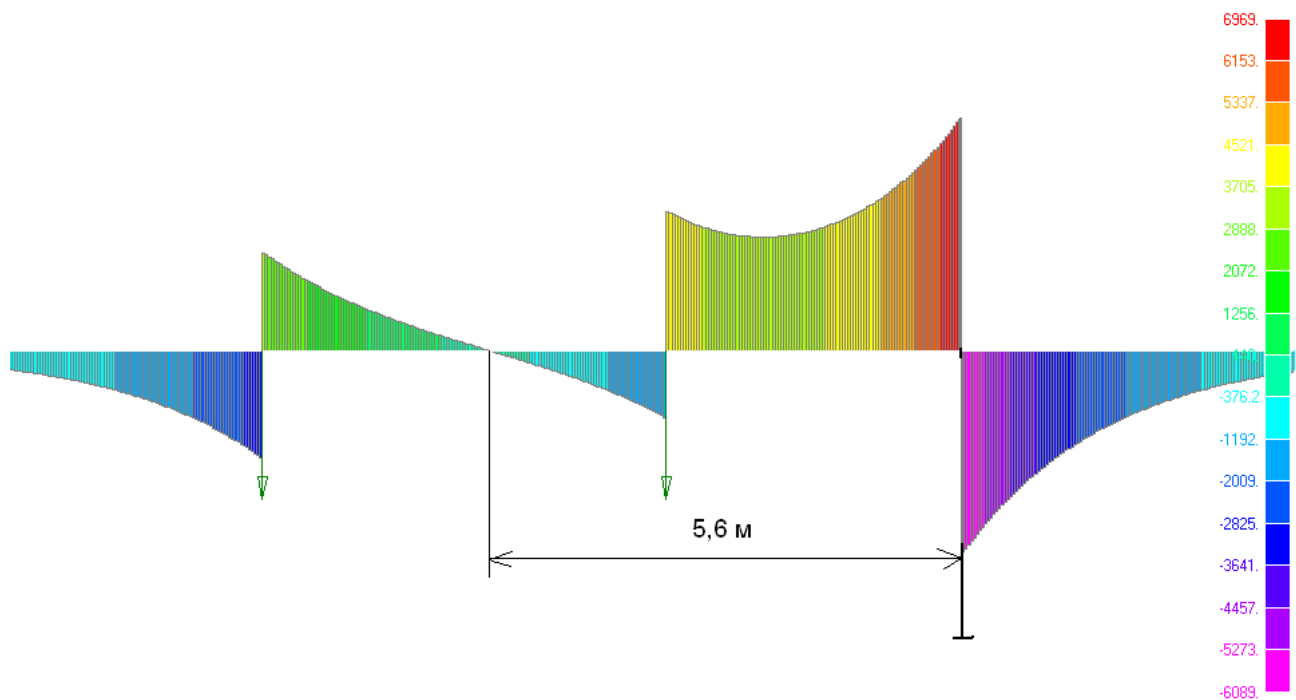


Рис. 3.3.40. Эпюра поперечных сил ( $\text{H}$ ) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного юнибуса, размещенного на расстоянии 5,6 м от промежуточной опоры, при шарнирном закреплении рельса на опоре и при  $+55^\circ\text{C}$



### 3.4. Анализ наиболее опасных положений юнибусов на пролете из условия обеспечения прочности рельса-струны на промежуточной опоре

#### 3.4.1. Для жесткой заделки корпуса рельса-струны на промежуточной опоре

Схема размещения сцепки двух юнибусов на пролете показана на рис. 3.4.1, а значения изгибающих моментов — на рис. 3.4.2.

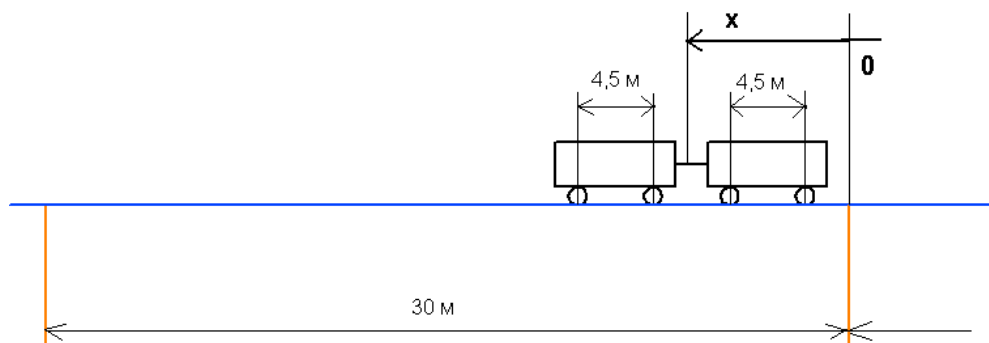


Рис. 3.4.1. Координаты расположения двух юнибусов на пролете (для расчета на прочность рельса-струны при жесткой заделке рельса-струны на промежуточной опоре)

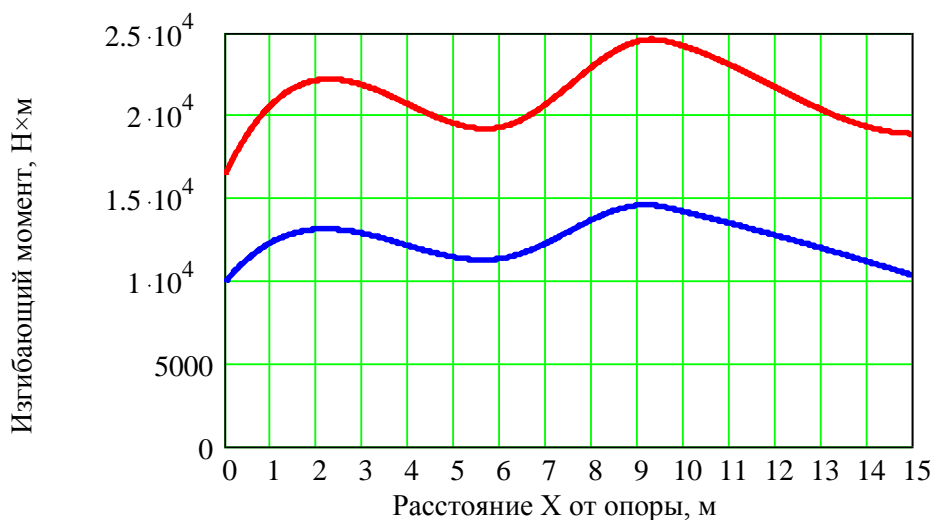


Рис. 3.4.2. Изменение величины изгибающего момента (Н×м) в сечении рельса-струны на промежуточной опоре в зависимости от расстояния (метры) до опоры при движении по пролету двух юнибусов и жесткой заделке корпуса рельса на опоре: зимой: при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ : ----- летом: при  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ : - - - - -

**Выводы:** при движении двух юнибусов в механической сцепке по пролету с жесткой заделкой рельса-струны на промежуточной опоре, максимум изгибающего момента в рельсе-струне (в его сечении над опорой) достигается при  $X = 9,3\text{ м}$ , т.е. при нахождении первого (или последнего по ходу движения) колеса в сцепке на расстоянии  $3,1\text{ м}$  от опоры.

Схема размещения одного юнибуса на пролете показана на рис. 3.4.3, а значения изгибающих моментов — на рис. 3.4.4.

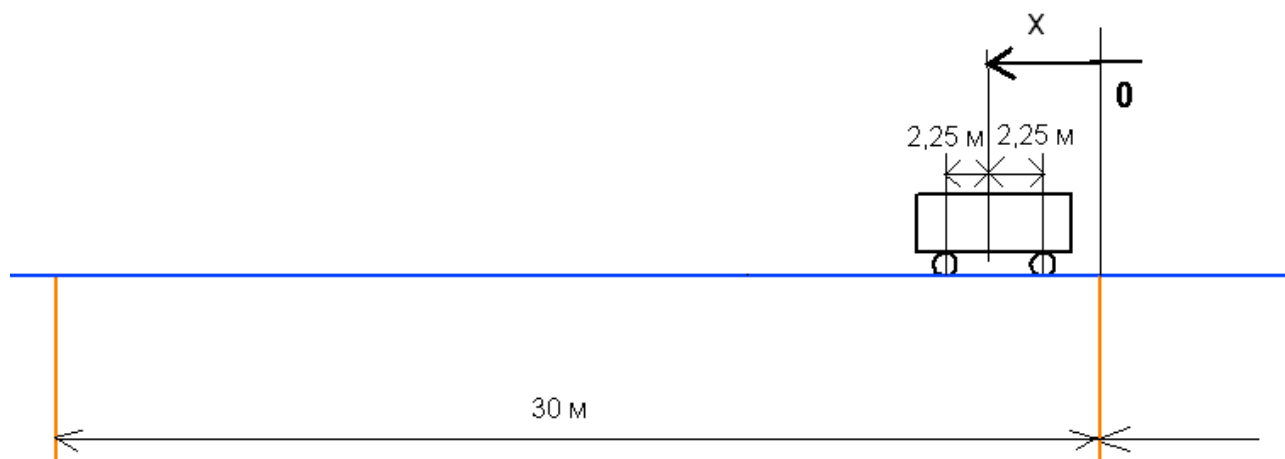


Рис. 3.4.3. Координаты расположения одного юнибуса на пролете (для расчета на выносливость рельса-струны при жесткой заделке рельса-струны на промежуточной опоре)

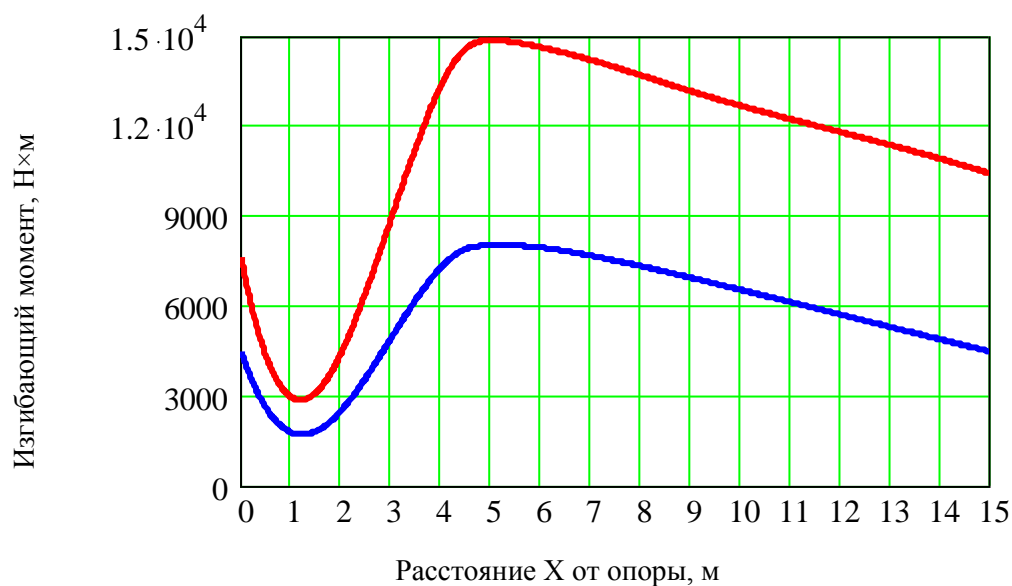


Рис. 3.4.4. Изменение величины изгибающего момента ( $\text{Н}\times\text{м}$ ) в сечении рельса-струны на промежуточной опоре в зависимости от расстояния (метры) до опоры при движении по пролету одного юнибуса (см. рис. 3.4.3) и жесткой заделке корпуса рельса на опоре:

зимой: при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ : — — — — —

летом: при  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ : - - - - -

**Выводы:** при движении одного юнибуса по пролету с жестким закреплением рельса-струны на промежуточной опоре, максимум изгибающего момента в рельсо-струне (в его сечении над опорой) достигается при  $X = 5\text{ м}$ , т.е. при нахождении первого (или последнего по ходу движения) колеса на расстоянии 2,75 м от опоры.

### 3.4.2. Для шарнирного закрепления корпуса рельса на промежуточной опоре

Схема размещения сцепки двух юнибусов на пролете показана на рис. 3.4.5, а значения изгибающих моментов — на рис. 3.4.6.

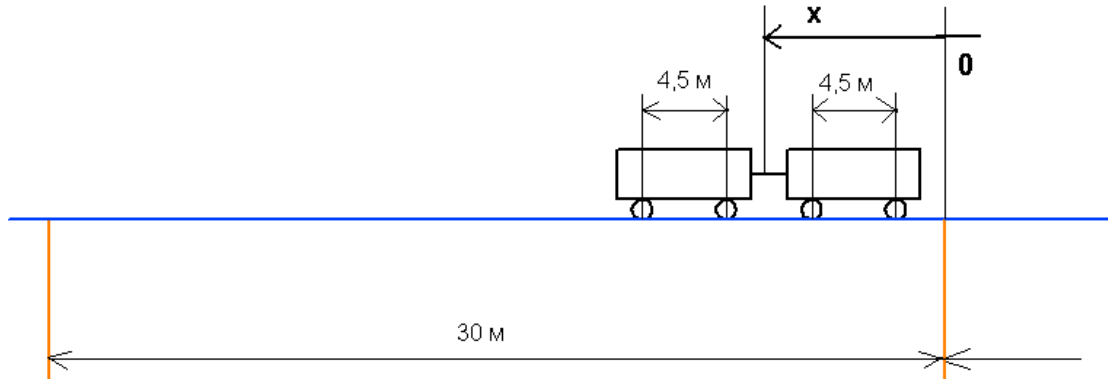


Рис. 3.4.5. Координаты расположения двух юнибусов на пролете (для расчета на прочность рельсо-струны при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре)

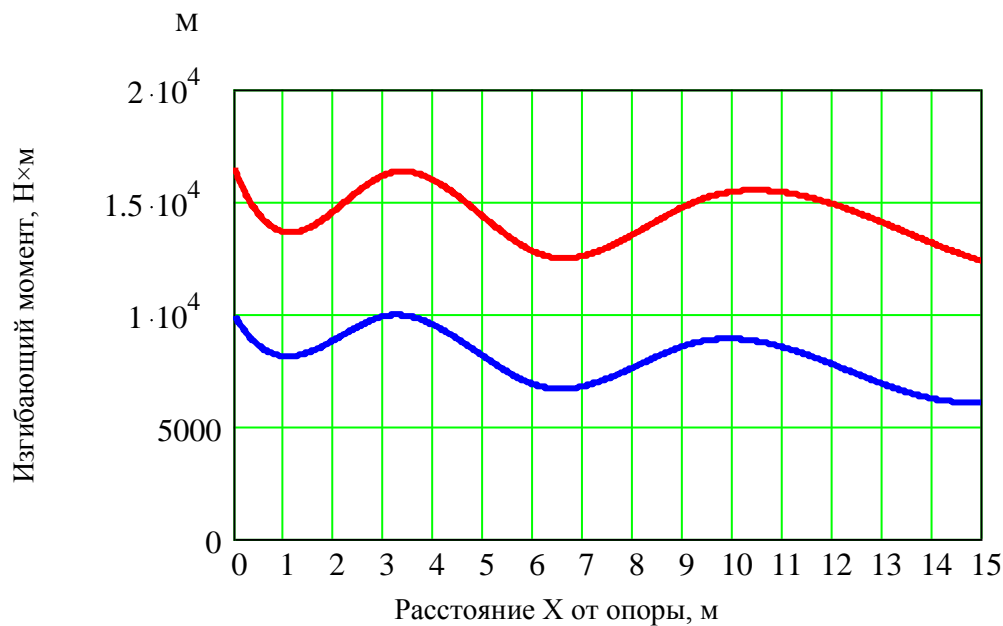


Рис. 3.4.6. Изменение величины изгибающего момента (Н×м) в сечении рельса-струны над промежуточной опорой в зависимости от расстояния (метры) до опоры при движении по пролету двух юнибусов (см. рис. 3.4.5) и шарнирном закреплении корпуса рельса на опоре:

зимой: при -55 °С: ----- летом: при +55 °С: - - - - -

**Выводы:** при движении по пролету с шарнирным закреплением рельса-струны на промежуточной опоре двух юнибусов, максимум изгибающего момента в рельсо-струне (в его сечении над опорой) достигается при  $X = 0$  м, считая от его центра тяжести сцепки модулей, т.е. при нахождении сцепки модулей над опорой, симметрично относительно нее.

Схема размещения одного юнибуса на пролете показана на рис. 3.4.7, а значения изгибающих моментов — на рис. 3.4.8.

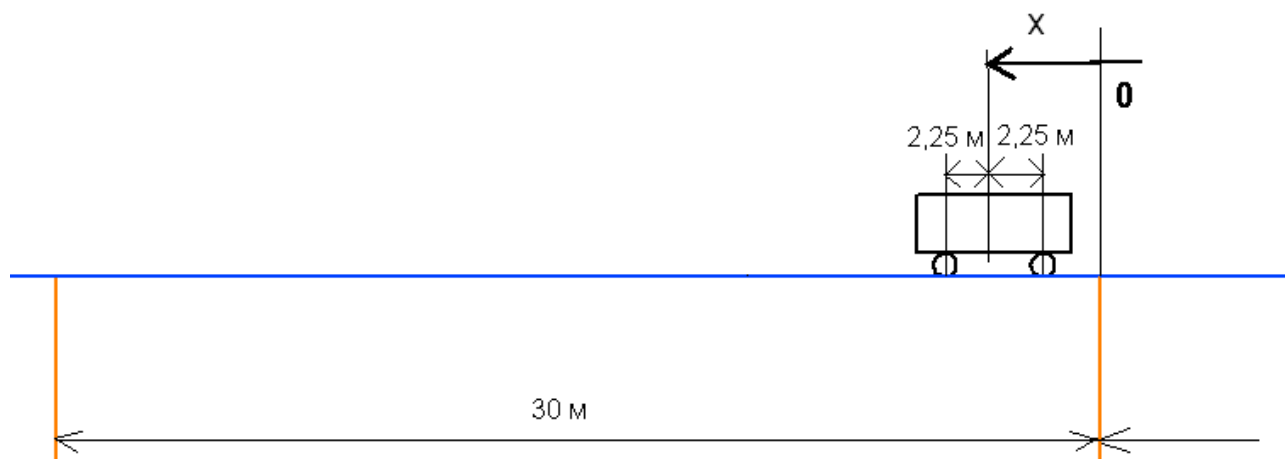


Рис. 3.4.7. Координаты расположения одного юнибуса на пролете(для расчета на выносливость рельса-струны при шарнирном закреплении рельса-струны на промежуточной опоре)

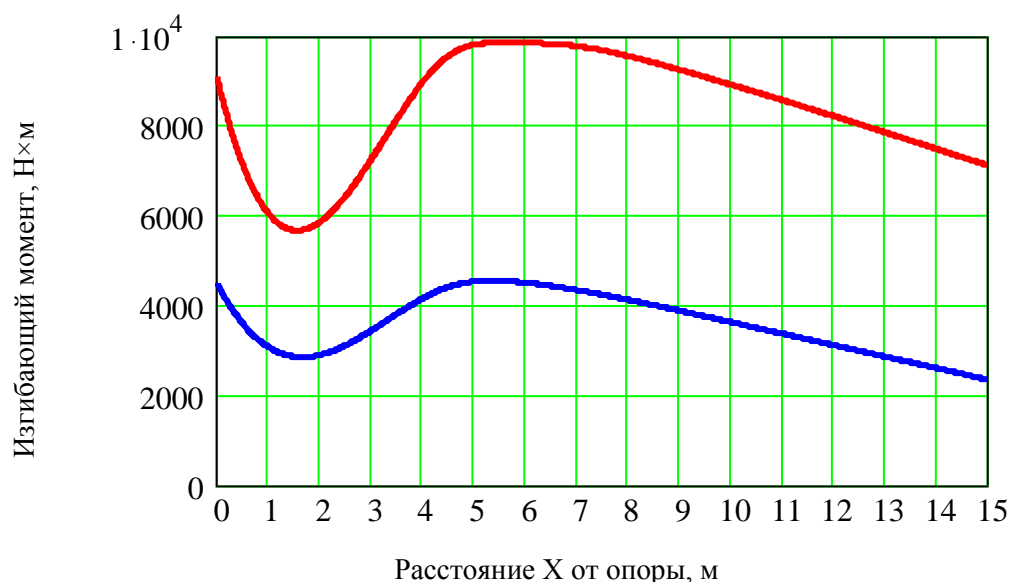


Рис. 3.4.8. Изменение величины изгибающего момента (Н×м) в сечении рельса-струны над промежуточной опорой в зависимости от расстояния (метры) до опоры при движении по пролету одного юнибуса (см. рис. 3.4.7) и шарнирном закреплении корпуса рельса на опоре:

зимой: при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ : ----- лето: при  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ : - - - - -

**Выводы:** при движении одного юнибуса по пролету с шарнирным закреплении рельса-струны на промежуточной опоре, максимум изгибающего момента в рельсе-струне (в его сечении над опорой) достигается при  $X = 5,6$  м, считая от его центра тяжести, или на расстоянии 3,35 м от опоры до ближнего колеса модуля.

### 3.5. Результаты расчетов прочности и выносливости головки рельса, корпуса рельса и струны

Результаты расчетов прочности и выносливости головки рельса, корпуса рельса и струны представлены в табл. 3.5.1—3.5.5.2.

Таблица 3.5.1

Расчет прочности струн от воздействия двух модулей весом 2,5 тс каждый (сцепка модулей — в середине пролета)

№	Описание расчетного элемента	Предварительное натяжение (при 0°C)	Напряжения в МПа								Суммарные			
			От собственного веса (относительно 0°C)		От изменения температуры (относительно 0°C)		От временной нагрузки				Зима -55°C		Лето +55°C	
			Зима -55°C	Лето +55°C	Зима -55°C	Лето +55°C	Зима -55°C		Лето +55°C		Зима -55°C		Лето +55°C	
							max	min	max	min	max	min	max	min
1	Струна	1200	0,87	1,1	135,96	-135,96	0,4	0	0,84	0	1337,23	1336,83	1065,98	1065,14

Таблица 3.5.2.1

Расчет прочности головки рельса и корпуса рельса от воздействия двух модулей весом 2,5 тс каждый (крепление рельса к опоре — жесткая заделка)

Сцепка модулей — в середине пролета, напряжения — под колесом

№	Описание расчетной точки	Предварительное натяжение (при 0°C)	Напряжения в МПа								Суммарные			
			От собственного веса (относительно 0°C)		От изменения температуры (относительно 0°C)		От временной нагрузки				Зима -55°C		Лето +55°C	
			Зима -55°C	Лето +55°C	Зима -55°C	Лето +55°C	Зима -55°C		Лето +55°C		Зима -55°C		Лето +55°C	
							max	min	max	min	max	min	max	min
1	Верх головки рельса	130	0,39	-0,74	135,96	-135,96	0	-3,93	0	-20,04	266,35	262,42	-6,7	-26,74
2	Низ корпуса рельса	130	-0,65	1,27	135,96	-135,96	21,21	0	33,14	0	286,52	265,31	28,45	-4,69

Таблица 3.5.2.2

Расчет прочности головки рельса и корпуса рельса от воздействия двух модулей весом 2,5 тс каждый (крепление рельса к опоре — жесткая заделка)  
Сцепка модулей — на расстоянии от 3,1 м от промежуточной опоры, напряжения — над опорой

№	Описание расчетной точки	Напряжения в МПа												
		Предварительное натяжение (при 0°С)	От собственного веса (относительно 0°С)		От изменения температуры (относительно 0°С)		От временной нагрузки				Суммарные			
			Зима -55°С	Лето +55°С	Зима -55°С	Лето +55°С	Зима -55°С		Лето +55°С		Зима -55°С		Лето +55°С	
							max	min	max	min	max	min	max	min
1	Верх головки рельса	130	-4,51	6,1	135,96	-135,96	51,47	0	73,47	0	312,92	261,45	73,61	0,14
2	Низ корпуса рельса	130	7,58	-10,22	135,96	-135,96	0	-87,34	0	-123,86	273,54	186,2	-16,18	-140,04

Таблица 3.5.3.1

Расчет прочности головки рельса и корпуса рельса от воздействия двух модулей весом 2,5 тс каждый (крепление рельса к опоре — шарнирное закрепление)  
Сцепка модулей — в середине пролета, напряжения — под колесом

№	Описание расчетной точки	Напряжения в МПа												
		Предварительное натяжение (при 0°С)	От собственного веса (относительно 0°С)		От изменения температуры (относительно 0°С)		От временной нагрузки				Суммарные			
			Зима -55°С	Лето +55°С	Зима -55°С	Лето +55°С	Зима -55°С		Лето +55°С		Зима -55°С		Лето +55°С	
							max	min	max	min	max	min	max	min
1	Верх головки рельса	130	0,39	-0,74	135,96	-135,96	0	-3,52	0	-19,33	266,35	262,83	-6,7	-26,03
2	Низ корпуса рельса	130	-0,65	1,27	135,96	-135,96	21,63	0	33,81	0	286,94	265,31	29,12	-4,69

Таблица 3.5.3.2  
 Расчет прочности головки рельса и корпуса рельса от воздействия двух модулей весом 2,5 тс каждый  
 (крепление рельса к опоре — шарнирное закрепление)  
 Сцепка модулей — симметрично над промежуточной опорой, напряжения — над опорой

№	Описание расчетной точки	Напряжения в МПа												
		Предварительное натяжение (при 0°С)	От собствен- ного веса (относи- тельно 0°С)		От измене- ния темпе- ратуры (относи- тельно 0°С)		От временной нагрузки				Суммарные			
			Зима -55°С	Лето +55°С	Зима -55°С	Лето +55°С	Зима -55°С		Лето +55°С		Зима -55°С		Лето +55°С	
							max	min	max	min	max	min	max	min
1	Верх головки рельса	130	-4,51	6,1	135,96	-135,96	36,75	0	47,47	0	298,2	261,45	47,61	0,14
2	Низ корпуса рельса	130	7,58	-10,23	135,96	-135,96	0	-61,69	0	-79,54	273,54	211,85	-16,19	-95,73

Таблица 3.5.4.1  
 Расчет выносливости головки рельса и корпуса рельса от циклического воздействия модуля весом 2,5 тс (крепление рельса к опоре — жесткая заделка)  
 Модуль — в середине пролета, напряжения — под колесом

№	Описание расчетной точки	Напряжения в МПа												
		Предварительное натяжение (при 0°С)	От собствен- ного веса (отно- сительно 0°С)		От измене- ния темпе- ратуры (отно- сительно 0°С)		От временной нагрузки				Суммарные			
			Зима -55°С	Лето +55°С	Зима -55°С	Лето +55°С	Зима -55°С		Лето +55°С		Зима -55°С		Лето +55°С	
							max	min	max	min	max	min	max	min
1	Верх головки рельса	130	0,39	-0,74	135,96	-135,96	0	-3,76	0	-17,81	266,35	262,59	-6,7	-24,51
2	Низ корпуса рельса	130	-0,65	1,27	135,96	-135,96	20,19	0	29,45	0	285,5	265,31	24,76	-4,69

Таблица 3.5.4.2

Расчет выносливости головки рельса и корпуса рельса от циклического воздействия модуля весом 2,5 тс (крепление рельса к опоре — жесткая заделка)  
 Модуль — на расстоянии 2,25 м от промежуточной опоры, напряжения — над опорой

№	Описание расчетной точки	Напряжения в МПа												
		Предварительное натяжение (при 0°С)	От собственного веса (относительно 0°С)		От изменения температуры (относительно 0°С)		От временной нагрузки				Суммарные			
			Зима -55°С	Лето +55°С	Зима -55°С	Лето +55°С	Зима -55°С		Лето +55°С		Зима -55°С		Лето +55°С	
							max	min	max	min	max	min	max	min
1	Верх головки рельса	130	-4,51	6,1	135,96	-135,96	30,28	0	41,86	0	291,73	261,45	42	0,14
2	Низ корпуса рельса	130	7,58	-10,22	135,96	-135,96	0	-51,36	0	-71,16	273,54	222,18	-16,18	-87,34

Таблица 3.5.5.1

Расчет выносливости головки рельса и корпуса рельса от циклического воздействия модуля весом 2,5 тс (крепление рельса к опоре — шарнирное закрепление)  
 Модуль — в середине пролета, напряжения — под колесом

№	Описание расчетной точки	Напряжения в МПа												
		Предварительное натяжение (при 0°С)	От собственного веса (относительно 0°С)		От изменения температуры (относительно 0°С)		От временной нагрузки				Суммарные			
			Зима -55°С	Лето +55°С	Зима -55°С	Лето +55°С	Зима -55°С		Лето +55°С		Зима -55°С		Лето +55°С	
							max	min	max	min	max	min	max	min
1	Верх головки рельса	130	0,39	-0,74	135,96	-135,96	0	-3,53	0	-17,46	266,35	262,82	-6,7	-24,16
2	Низ корпуса рельса	130	-0,65	1,27	135,96	-135,96	20,41	0	29,79	0	285,72	265,31	25,1	-4,69



Таблица 3.5.5.2

Расчет выносливости головки рельса и корпуса рельса от циклического воздействия модуля весом 2,5 тс (крепление рельса к опоре — шарнирное закрепление)  
 Модуль — на расстоянии 5,6 м от промежуточной опоры, считая от центра тяжести модуля, напряжения — над опорой

№	Описание расчетной точки	Напряжения в МПа												
		Предварительное натяжение (при 0°С)	От собственного веса (относительно 0°С)		От изменения температуры (относительно 0°С)		От временной нагрузки				Суммарные			
			Зима -55°С	Лето +55°С	Зима -55°С	Лето +55°С	Зима -55°С		Лето +55°С		Зима -55°С		Лето +55°С	
							max	min	max	min	max	min	max	min
1	Верх головки рельса	130	-4,51	6,1	135,96	-135,96	19,26	0	25,97	0	280,71	261,45	26,11	0,14
2	Низ корпуса рельса	130	7,58	-10,23	135,96	-135,96	0	-32,3	0	-43,41	273,54	241,24	-16,19	-59,6

## 4. Выводы

1. Размах напряжений в струне от проезда двух юнибусов в сцепке общей массой 5 т составляет менее 0,1% от величины напряжений в струне (предварительных и температурных). Это означает, что нагрузка на струну — статическая и циклической составляющей можно пренебречь. Таким образом, по любым существующим методикам расчета выносливости (СНиПы, Нормы и т.п. в России и за рубежом) струна рельсо-струнной путевой структуры СТЮ обеспечит срок службы по выносливости более 100 лет.

2. Максимальные тормозные усилия от потока юнибусов, передаваемые через крепление рельса-струны одной промежуточной опоре, невелики (около 50 кГс), поэтому опоры могут быть выполнены легкими, ажурными, без мощного фундамента и, соответственно, — недорогими. Эти усилия по длине пути будут распределены на множество поддерживающих опор и будут восприняты, в основном, не ими, а — анкерными опорами.

3. Рельсо-струнная путевая структура СТЮ обеспечит высокую ровность пути и комфортность движения юнибуса при скоростях движения 300 км/ч и выше. Например, при рабочем ходе подвески в 18 мм летом (при + 55 °С) и 4 мм зимой (при –55 °С) при переезде через опоры пассажиры в салоне юнибуса будут испытывать вертикальные ускорения значительно ниже 0,5 м/с<sup>2</sup>, что, например, недостижимо на железной дороге, где допустимые вертикальные ускорения для пассажиров — до 3 м/с<sup>2</sup>.

4. Основную вертикальную жесткость под нагрузкой рельсо-струнного пролетного строения в СТЮ определяет не рельс (корпус и головка рельса, а также бетонный заполнитель), а — струна. Например, в оптимизированном варианте рельса-струны, предлагаемом для использования в высокоскоростной трассе «второго уровня» «Ханты-Мансийск — Сургут» с колеей 1,5 м, вертикальную жесткость пути

на пролете 30 м на 91—95% определяет струна и лишь на 5—9% — рельс. Это соответствует названию принципиально новой транспортной системы «второго уровня» — струнная (а не рельсовая).

5. Для повышения ровности пути при высокоскоростном движении юнибуса, на каждом пролете (30 м) рельс-струна, при его монтаже, выполнен с выгибом вверх — примерно на 20 мм (в центре пролета) по определенной кривой. Тогда относительная ровность пути при движении юнибуса составит: наихудшая (при +55 °С) — 1/1635, наилучшая (при отрицательных температурах воздуха) — 1/7463. Поэтому колеса юнибуса не будут «прыгать» ни при движении по пролету, ни при переезде через опоры, а рельсо-струнная путевая структура высокоскоростного СТЮ будет в несколько раз жестче и ровнее, чем железнодорожный путь высокоскоростных железных дорог, уложенный на «втором уровне» на традиционные балочные эстакады.

6. Шарнирное закрепление рельса-струны на промежуточной опоре предпочтительнее жесткого закрепления (заделки), т.к. при наиболее опасном нагружении (два юнибуса в механической сцепке общим весом 5 тс):

- максимальный изгибающий момент в рельсе-струне в сечении над промежуточной опорой при +55 °С будет меньше, чем при жесткой заделке корпуса рельса, на 1,81 т×м;
- максимальный изгибающий момент при +55 °С в рельсе-струне в сечении под колесом юнибусов при их нахождении у опоры будет меньше, чем при жесткой заделке корпуса рельса, на 0,05 т×м;
- максимальные напряжения растяжения в головке рельса над опорой при –55 °С будут ниже аналогичных напряжений при жесткой заделке рельса на опоре на 67 МПа;
- максимальные напряжения сжатия в подошве корпуса рельса над опорой при +55 °С будут ниже аналогичных напряжений при жесткой заделке рельса на опоре на 156 МПа;
- при шарнирном закреплении рельса усиливать над промежуточной опорой необходимо лишь головку рельса (корпус рельса удовлетворяет

требованиям по прочности) на расстоянии до 0,4—0,6 м от опоры, где изгибающий момент уменьшается на 40—50%; либо для головки рельса необходимо использовать более прочную сталь, чем 09Г2С.

7. Для формирования струны наиболее целесообразно использовать высокопрочную оцинкованную стальную проволоку диаметром 3 мм производства Волгоградского завода «ВолгоМетиз» с пределом текучести 1932 МПа (19690 кгс/см<sup>2</sup>). Это позволит увеличить допустимые напряжения в струне до 1545 МПа (15750 кгс/см<sup>2</sup>). При этом, благодаря другой схеме работы струны в СТЮ по сравнению с напрягаемой арматурой в мостах, несмотря на увеличенные в сравнении с мостовыми конструкциями допустимые напряжения, запас прочности струны (примерно в 1.000 раз) по воздействию подвижной нагрузки будет беспрецедентно выше, чем в любой другой известной строительной конструкции. Запас надежности по величине минимальной температуры при этом составит:  $(1932 - 1545) / 2,47 = 156$  °С, (где 2,47 МПа/°С — изменение напряжений в струне при изменении температуры на 1 °С), т.е. струна будет разрушена расчетной подвижной нагрузкой лишь при температуре:

$$[-55\text{ °С} + (-156\text{ °С})] = -211\text{ °С}$$

Это, в совокупности с 1000-кратным запасом прочности струны, и определяет чрезвычайно высокую надежность рельсо-струнной транспортной системы к внешним воздействиям.

8. Отказ от железнодорожных стандартов — колесных пар, реборд на колесе, конуса на опорной части колеса и цилиндрической опорной поверхности головки рельса — снизило контактное напряжение в СТЮ в паре «цилиндрическое колесо — плоская головка рельса» по сравнению с железной дорогой в 10—15 раз. Это повысит в несколько раз долговечность рельса, уменьшит его износы, снизит шумы при качении колеса, улучшит его сцепление с рельсом, а также существенно снизит затраты энергии и мощность привода на преодоление сопротивления качению стальных колес высокоскоростного подвижного состава.

9. Уточненная в результате расчетов конструкция рельса-струны, для высокоскоростной трассы СТЮ колеей 1,5 м в природно-климатических условиях ХМАО—Югры, представлена на рис. 4.1. Количество высокопрочных проволок в струне уменьшено с 260 шт. до 220 шт., а напряжения предварительного натяжения в них — увеличены с 1.200 МПа до 1.400 МПа (при температуре 0 °С). Кроме того, толщина головки рельса увеличена с 16 мм до 20 мм, а высота рельса-струны — с 219 мм до 223 мм. При этом усилие предварительного натяжения конструкции рельса-струны (струны, головки и корпуса рельса) несколько увеличены — до 259,0 тс (при температуре 0 °С), а в головке рельса снижены напряжения предварительного натяжения (при 0 °С) с 1300 кгс/см<sup>2</sup> до 1200 кгс/см<sup>2</sup>. Такой рельс-струна будет еще прочнее, жестче и долговечнее и обеспечит срок службы не менее 100 лет (при выполнении головки и корпуса рельса из легированных сталей, для исключения их коррозии).

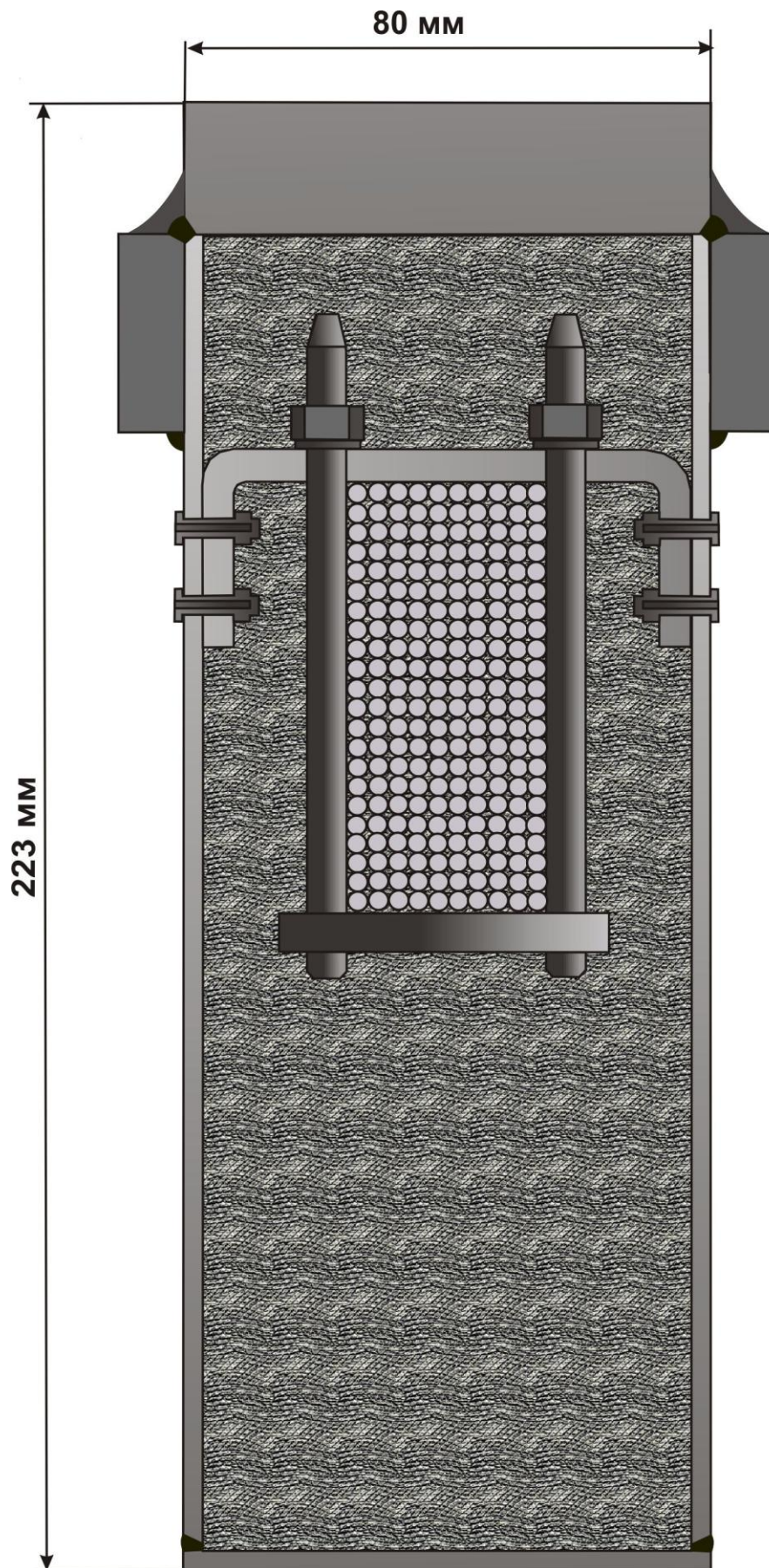


Рис. 4.1. Уточненная конструкция рельса-струны (масштаб 1:1)

## 5. 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. proEN 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. Городецкий А.С., Шмуклер В.С., Бондарев А.В. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций. Учебное пособие. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. — 889 с.
13. Железнодорожный транспорт: Энциклопедия / Гл. редактор Н.С. Конарев. — М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия», 1994. — 559 с.