



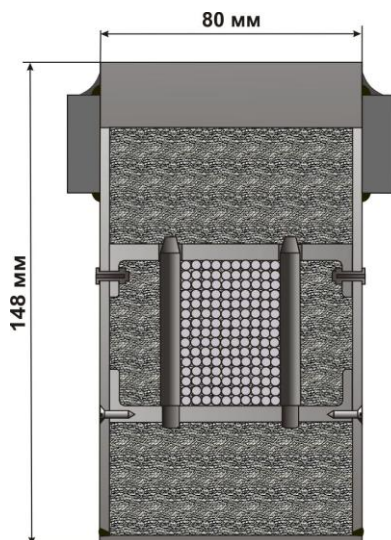
115487, Москва, ул. Нагатинская, 18/29  
тел./факс: (495) 680-52-53, (499) 616-15-48  
e-mail: info@unitsky.ru, http://www.unitsky.ru

## **Выбор типа рельса-струны для принятого варианта двухрельсового СТЮ (по колее, расчетной подвижной нагрузке и скоростным режимам движения) и выполнение предпроектных прочностных расчетов по нему применительно к природно-климатическим условиям г. Ханты-Мансийска**

Государственный контракт № 12у от 07 августа 2007 г. на выполнение работ по разработке технико-экономического обоснования строительства высотной городской пассажирской двухпутной струнной транспортной системы в г. Ханты-Мансийске

Этап 1. Определение, выбор и оптимизация основных технических, технологических и эксплуатационных параметров двух вариантов (двухрельсового и монорельсового) рельсо-струнной путевой структуры, подвижного состава и инфраструктуры струнного транспорта Юницкого (СТЮ) применительно к условиям г. Ханты-Мансийска

Подэтап 1.3.1.6. Выбор типа рельса-струны для принятого варианта двухрельсового СТЮ (по колее, расчетной подвижной нагрузке и скоростным режимам движения) и выполнение предпроектных прочностных расчетов по нему применительно к природно-климатическим условиям г. Ханты-Мансийска



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


\_\_\_\_\_ А.Э. Юницкий  
«03» октября 2007 г.

## Список основных исполнителей

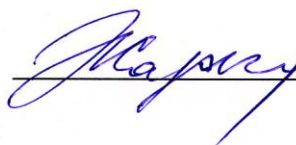
Ответственный исполнитель,  
главный инженер ООО «СТЮ»

  
А.В. Пархоменко

Исполнительный директор ООО «СТЮ»

  
Д.А. Юницкий

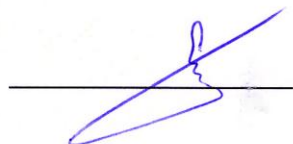
Заместитель генерального  
конструктора по подвижному составу,  
главный дизайнер ООО «СТЮ»

  
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. Выбор типа рельса-струны для принятого варианта двухрельсового городского СТЮ в г. Ханты-Мансийске .....	10
2. Расчетные нагрузки и воздействия .....	17
3. Предпроектные прочностные расчеты городского двухрельсового СТЮ применительно к природно-климатическим условиям г. Ханты-Мансийска .....	20
3.1. Построение расчетной схемы СТЮ с приложением нагрузок .....	20
3.2. Исходные данные о материалах .....	25
3.2.1. Материал струн .....	25
3.2.2. Материал головки рельса .....	26
3.2.3. Материал корпуса рельса .....	26
3.2.4. Материал заполнителя .....	27
3.3. Расчетная модель и этапы расчета .....	27
3.4. Расчетное исследование жесткости рельсо-струнной путевой структуры .....	28
3.4.1. Расчет вертикальных деформаций от собственного веса путевой структуры и при нагружении вертикальной силой от рельсового автомобиля .....	28
3.4.2. Расчет угла поворота и горизонтального перемещения рельса-струны при действии горизонтальных скручивающих сил .....	31
3.5. Расчет напряженного состояния струн. Расчет прочности струн .....	34
3.5.1. Расчет изменения усилий в струне (высокопрочной проволоке) от температурного перепада (от +55 °С летом до –55 °С зимой) .....	34
3.5.2. Расчет изменений напряжений в струне от собственного веса рельсо-струнной путевой структуры и от проезда рельсового	

автомобиля .....	37
3.5.3. Расчет прочности струны .....	37
3.6. Расчет напряженного состояния головки рельса и корпуса рельса. Расчет прочности и оценка выносливости головки рельса и корпуса рельса .....	41
3.6.1. Расчет изменений напряжений растяжения (сжатия) от температурного перепада (от +55 °С летом до –55 °С зимой) в головке рельса и корпусе рельса .....	41
3.6.2. Расчет напряжений изгиба от собственного веса рельсо- струнной путевой структуры и при нагружении вертикальной силой от рельсового автомобиля .....	43
3.6.3. Расчет прочности и оценка выносливости рельса-струны .....	44
3.7. Расчет контактных напряжений и оценка долговечности головки рельса-струны и сопротивления качению колеса рельсового автомобиля .....	49
3.8. Ровность рельсо-струнного пути под колесом рельсового автомобиля .....	51
4. Графические результаты расчетов .....	54
4.1. Схемы нагружения рельса-струны нагрузкой от подвижного состава .....	54
4.2. Эпюры продольных сил в струне .....	58
4.2.1. Эпюры продольных сил в струне, вызванных собственным весом струны и весом рельса-струны .....	58
4.2.2. Эпюры продольных сил в струне, вызванных весом рельса- струны и весом двух рельсовых автомобилей .....	62
4.3. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в рельсе-струне .....	64
4.3.1. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в рельсе- струне, вызванных собственным весом .....	64
4.3.2. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в рельсе- струне от собственного веса путевой структуры и сцепки из двух рельсовых автомобилей (для расчета прочности рельса-	

струны) .....	68
4.3.3. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в рельсе-струне от собственного веса путевой структуры и одного рельсового автомобиля (для расчета выносливости рельса-струны) .....	76
4.4. Анализ наиболее опасных положений рельсовых автомобилей на пролете из условия обеспечения прочности рельса-струны на промежуточной опоре .....	84
4.5. Результаты расчетов прочности и выносливости головки рельса, корпуса рельса и струны .....	86
5. Выводы и оптимизация конструкции рельсо-струнной путевой структуры городского СТЮ колеей 1,5 м в г. Ханты-Мансийске .....	91
6. Нормативная и справочная литература .....	95

## Резюме

При создании высотной городской пассажирской двухпутной транспортной системы в г. Ханты-Мансийске на базе струнных технологий, наиболее сложным и ответственным техническим решением, с инженерной точки зрения, станет рельсо-струнная путевая структура, поднятая на высоту 6—10 м и более. 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 скоростных рельсовых автомобилей — юнибусов, технологичность монтажа и стоимость строительства и др.

Рельсы-струны, установленные пролетами по 35 м на промежуточных опорах и закрепленные в анкерных опорах, отстоящих друг от друга на расстоянии 0,5—1 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 методику статических и динамических расчетов рельсо-струнных пролетов в условиях г. Ханты-Мансийска, 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 и их опасные сочетания.

В качестве примера для расчета взята рельсо-струнная эстакада скоростной трассы городского двухрельсового СТЮ в г. Ханты-Мансийске колеей 1,5 м. Для этого разработана конструкция рельса-струны, удовлетворяющая требованиям СНиП 2.05.03-84\* «Мосты и трубы», и выполнен комплексный расчет его напряженно-деформированного состояния, в том числе — определены наиболее опасные нагружения и максимальные напряжения в 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 4 м от опоры (для одиночного юнибуса), либо когда сцепка из двух юнибусов будет находиться точно над опорой.

Размах напряжений в струне рельсо-струнного пролета длиной 35 м городского СТЮ в г. Ханты-Мансийске, при максимальном расчетном нагружении (проезд двух городских юнибусов в сцепке общей массой 5 тонн), составит величину менее 0,3% от величины напряжений в струне (предварительных и температурных), во всем диапазоне рабочих температур: от  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 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 рельсо-струнной путевой структуры СТЮ обеспечит срок службы по выносливости не менее 100 лет.

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 35 м) обеспечивается, в основном, также струной, а не рельсом. В свою очередь это обеспечит комфортные условия скоростного движения не только для пассажиров (вертикальные ускорения в салоне юнибуса — до  $0,2\text{ м/с}^2$ ), но и для колеса — максимальные вертикальные ускорения в опорной части обода колеса будут до  $0,8\text{ м/с}^2$ , а ступицы, отделенной резиновой прослойкой от обода, — до  $0,5\text{ м/с}^2$ .

В качестве элемента струны рекомендована высокопрочная оцинкованная стальная проволока диаметром 3 мм производства Волгоградского завода «ВолгоМетиз» с пределом текучести  $19.690\text{ кгс/см}^2$ . Высокая прочность проволок позволяет увеличить допустимые напряжения в струне до  $15.750\text{ кгс/см}^2$ . При этом, благодаря иной схеме работы струны в СТЮ в сравнении с напрягаемой арматурой в мостах, несмотря на увеличенные на  $3720\text{ кгс/см}^2$  допустимые напряжения, запас прочности (более чем в 400 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  $-214\text{ }^{\circ}\text{C}$  (эта температура, например, значительно ниже температуры жидкого азота), поэтому СТЮ может быть рекомендован к строительству в самых суровых природно-климатических условиях Ханты-Мансийского автономного округа — Югры, 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 городского скоростного подвижного состава СТЮ.

В результате расчетов была уточнена конструкция рельса-струны (см. рисунок): струна набрана из 150 высокопрочных проволок диаметром 3 мм, суммарное усилие предварительного натяжения которых — 151,3 тс (при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). С учетом же преднапряжения головки и корпуса рельса суммарное усилие натяжения рельса-струны при температуре  $0^{\circ}\text{C}$  составит 202 тс. При этом поперечные размеры рельса-струны составят: ширина 100 мм, высота 148 мм, а его погонная масса будет равна 52,6 кг/м, из них: корпус рельса (с головкой) — 25,1 кг/м, струна — 8,3 кг/м, бетонный заполнитель корпуса — 19,0 кг/м, крепление струны к корпусу рельса — 0,2 кг/м, причем на сталь придется 64% массы — 33,6 кг/м.

Металлоемкость рельса-струны скоростного городского двухрельсового СТЮ столь низка (например, в сравнении с монорельсовой дорогой, с такими же пролетами по 35 м), что, например, из материала одного современного железнодорожного рельса Р-75 протяженностью 1 км можно построить однопутную рельсо-струнную путевую структуру такой же протяженности и колеей 1,5 м. При этом оставшихся 32,8 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 28 стальных опор СТЮ высотой 5—6 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 скоростного городского СТЮ обойдется, в одних и тех же природно-климатических условиях, по меньшей мере в два раза дешевле, чем железной дороги или трамвайной линии, являющейся разновидностью железной дороги (ведь железной дороге, проходящей по городу, еще необходимы шпалы, щебеночная и песчаная подушки, земляная насыпь, мосты, путепроводы, водопропускные трубы, столбы контактной сети и т.п., в том числе — в 40—50 раз больший землеотвод ценной городской земли).

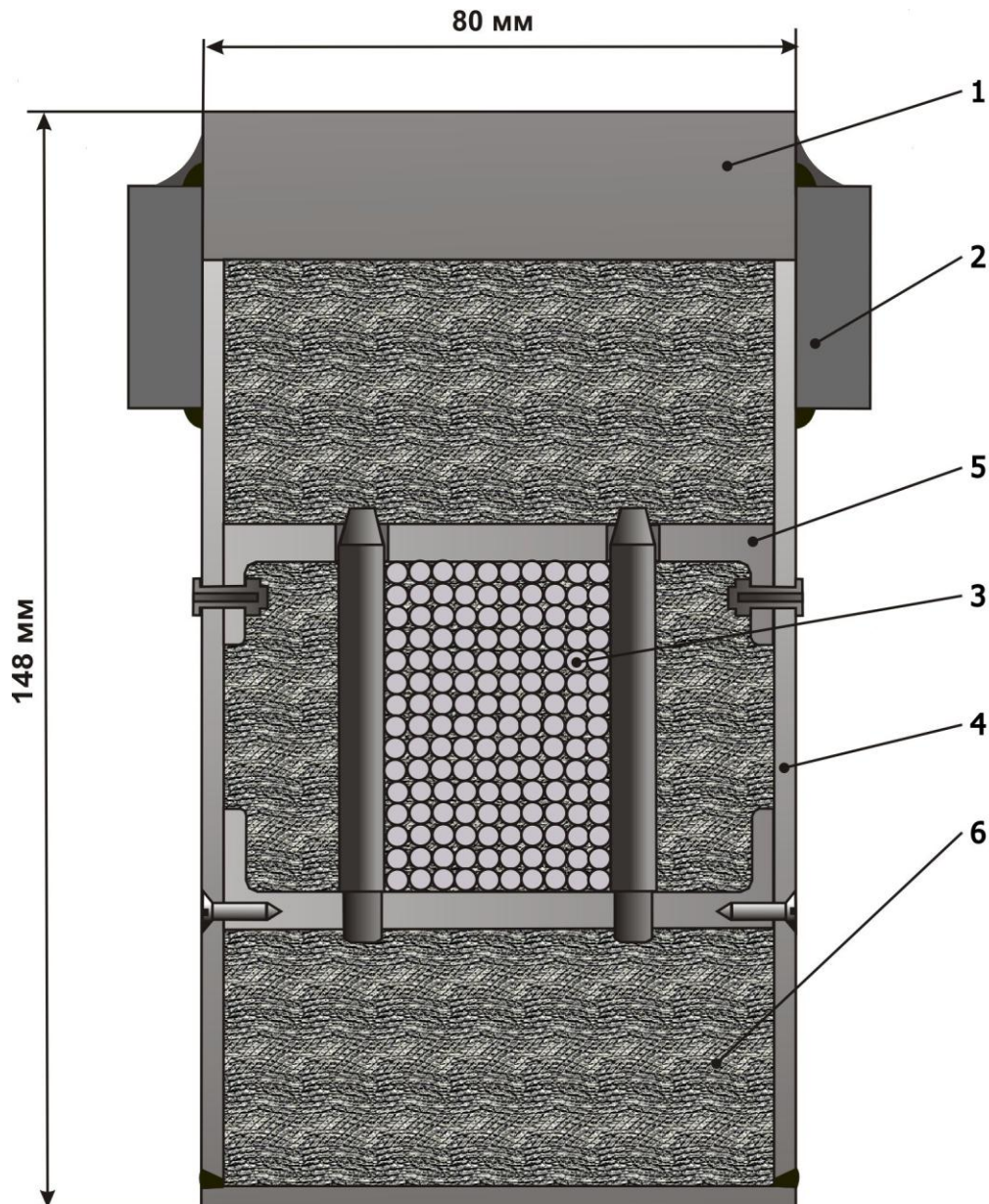


Рис. Уточненная конструкция рельса-струны (масштаб 1:1):

- 1 — головка рельса (сталь 20×80 мм); 2 — боковые щеки (сталь 30×10 мм);
- 3 — проволока (сталь Ø3, 150 штук); 4 — корпус (сварной; швеллер сталь 128×80×3 мм);
- 5 — крепление струны к корпусу рельса; 6 — наполнитель (модифицированный бетон)

## 1. Выбор типа рельса-струны для принятого варианта двухрельсового городского СТЮ в г. Ханты-Мансийске

Стандарты разработчика СТЮ — ООО «СТЮ» — предусматривают на настоящий момент пять типов городских двухрельсовых СТЮ (см. табл. 1.1).

Таблица 1.1

Типы городских двухрельсовых СТЮ

Типы двухрельсового СТЮ	Колея, мм	Полезная нагрузка, кг
Сверхлегкий	500	до 200—250
Легкий	1000	до 500—750
Средний	1500	до 1000—1500
Тяжелый	2000	до 2000—3000
Сверхтяжелый	2500	до 5000—7500 и более

По предварительным рабочим результатам разрабатываемого в настоящее время ООО «СТЮ» «Технико-экономического обоснования строительства высотной городской пассажирской двухпутной струнной транспортной системы в г. Ханты-Мансийске», согласно Государственному контракту № 12у от 07.08.2007 г., наиболее подходящим типом двухрельсового СТЮ, способным обеспечить в перспективе транспортные услуги в г. Ханты-Мансийске на «втором уровне», является средний тип двухрельсового СТЮ с колеей 1500 мм (см. рис. 1.1).

Для создания единой сети рельсо-струнной путевой структуры с типовой инфраструктурой в г. Ханты-Мансийске, целесообразно унифицировать ширину колеи 1500 мм городских электрифицированных двухрельсовых СТЮ «второго уровня» с колеей 1500 мм путевой структуры будущего высокоскоростного междугороднего двухпутного СТЮ, в частности на трассе «Ханты-Мансийск — Сургут». Поскольку срок службы СТЮ составит не менее 100 лет, то колею рельсо-

струнных трасс «второго уровня» необходимо определять исходя из перспективных транспортных целей и задач. Средний городской двухрельсовый СТЮ с колеей 1,5 м, при относительно невысокой стоимости рельсо-струнной путевой структуры и опор (до 25—30 млн. руб./км), обеспечит в перспективе большой объем городских пассажирских и грузовых перевозок, соответственно, не менее 100 тыс. пасс./сутки и 1 тыс. тонн/сутки.



Рис. 1.1. Средний двухрельсовый СТЮ  
(показан вариант городской трассы двухрельсового СТЮ в г. Ханты-Мансийске)

При оговоренной стандартом для среднего городского СТЮ полезной нагрузке 1000—1500 кг, средней массе пассажира 71 кг (согласно правил ЕЭК ООН № 52 «Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств категорий М<sub>2</sub>, М<sub>3</sub> в отношении их общей конструкции») и ручной клади 4—6 кг, один юнибус, соответствующий среднему типу двухрельсового СТЮ, может вместить с высокой комфортностью до 14 пассажиров, а в часы пик — до 21

пассажира. Разработанный ООО «СТЮ» двенадцатиместный юнибус модели Ю-324П (в часы пик вместимость до 20 пасс.), предлагаемый Заказчику, как основа подвижного состава высотного городского двухпутного электрифицированного СТЮ в городе Ханты-Мансийске, кроме перевозки пассажиров, будет удовлетворять также требованиям, предъявляемым к городскому общественному транспорту по перевозке детских и инвалидных колясок. Кроме того, эти юнибусы легко могут быть переоборудованы для перевозок грузов в количестве до 1,5—2 т (при перевозке грузов допустим коэффициент перегрузки, равный 1,5).

В настоящее время в качестве транспортных средств общего пользования в Ханты-Мансийске задействованы автобусы городского типа, курсирующие на 17-ти маршрутах города и пригорода, как основной вид общественного транспорта. По данным служб мониторинга пассажирских перевозок разных городов России средняя скорость движения городских автобусов находится в интервале 15—20 км/ч при разрешенной в городах максимальной эксплуатационной скорости в 60 км/ч. Столь значительная разница в скоростях вызвана во многом дорожными условиями, наличием светофоров и пересечений в одном уровне с другими видами транспорта и пешеходами. Движение рельсовых автомобилей по рельсо-струнной путевой структуре не зависит от вышеприведенных факторов, благодаря чему средняя скорость движения юнибусов может быть значительно выше 15—20 км/ч, а максимальная скорость может достигать в перспективе значений 100—120 км/ч. Поэтому проектируемый рельсо-струнный путь, размещенный на «втором уровне», без реконструкции должен обеспечить в будущем достижение указанных высоких скоростей движения городских юнибусов.

Как показывают результаты тягово-динамического расчета юнибуса модели Ю-324П, применительно к природно-климатическим условиям г. Ханты-Мансийска, наиболее оптимальной эксплуатационной скоростью движения юнибуса в ближайшие годы является скорость 60 км/ч (при расстоянии между смежными остановками на трассе 600—1000 м), при этом средняя скорость на маршруте составит 40,6 км/ч, что в 2,0—2,7 раза превышает аналогичный показатель городских автобусов. Благодаря высокой средней скорости движения 2—3 юнибуса пассажироместимостью до 20 человек по своей провозной способности могут заменить большой городской автобус с пассажироместимостью 100 человек. При этом, в отличие от автобусов,



электрические юнибусы являются экологически чистыми и, кроме того, в пересчете на одного перевезенного пассажира, будут потреблять в 2—3 раза меньше энергии, которая, к тому же, будет в 3—4 раза дешевле. Таким образом, применение электрических юнибусов на стальных колесах на «втором уровне» будет в 6—12 раз эффективнее городских автобусов на пневматических шинах и с двигателем внутреннего сгорания на «первом уровне».

Рассмотрим два характерных типа рельса-струны, разработанных для городской грузопассажирской трассы двухрельсового СТЮ для природно-климатических условий г. Ханты-Мансийска.

На рис. 1.2 показана конструкция рельса-струны из стальных и алюминиевых профилей и деталей, на рис. 1.3 — только из стальных профилей и деталей.

На рис. 1.2 цифрами обозначено: 1 — стальная головка рельса; 2 — уширение рельса, являющееся боковой головкой рельса для противосходных боковых роликов рельсового автомобиля (изготавливается из высокопрочного сплава алюминия); 3 — струна (120 высокопрочных стальных проволок диаметром 3 мм); 4 — алюминиевый корпус рельса; 5 — крепление струны к корпусу рельса (через 3 м); 6 — продольные пазы, заполненные клеевым модифицированным композитом; 7 — наполнитель (модифицированный бетон).

На рис. 1.3 цифрами обозначено: 1 — стальная головка рельса; 2 — уширение рельса, являющееся боковой головкой рельса для противосходных боковых роликов рельсового автомобиля; 3 — струна (150 высокопрочных стальных проволок диаметром 3 мм); 4 — стальной сварной корпус рельса; 5 — крепление струны к корпусу рельса (через 3 м); 6 — наполнитель (модифицированный бетон).

Рассматриваемые конструкции близки по всем параметрам (технологичны, прочны, экономичны). Однако существуют некоторые отличия, которые требуют пояснений.

Детали из высокопрочных алюминиевых сплавов (эти сплавы используются в космической технике и авиастроении) упрощают сборку рельса-струны на трассе, на порядок уменьшают объем сварочных работ, сокращают количество высокопрочных стальных проволок в струне, сокращают срок монтажа. Но при этом появляется необходимость изготовления фильер для получения корпуса и части головки рельса, используется более дорогой материал, добавляется транспортировка алюминиевых

профилей от завода—изготовителя на завод, который осуществляет их упрочнение («старение»), и сложно контролируемый (по дозировке и технологии) процесс приклеивания деталей.

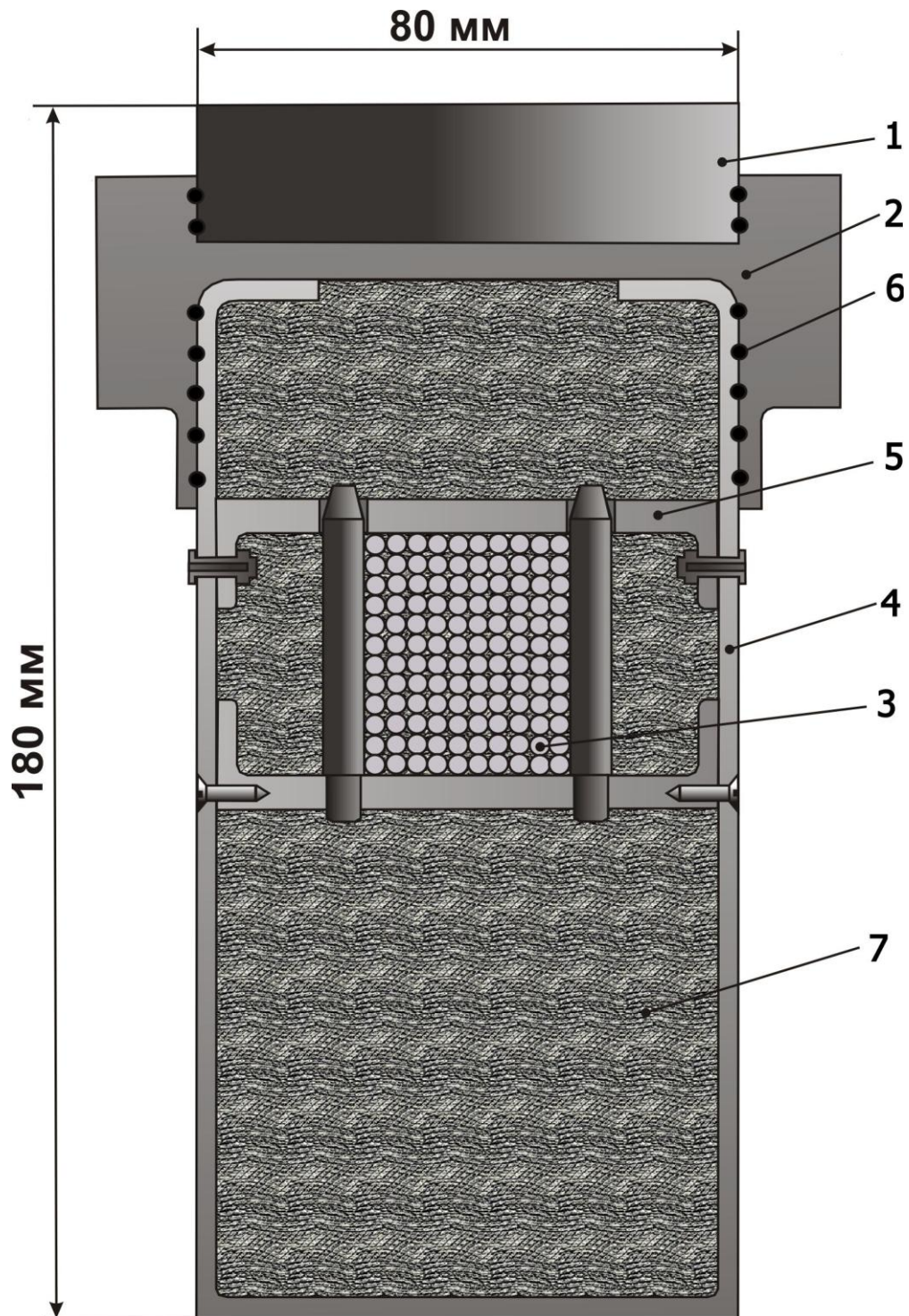


Рис. 1.2. Конструкция рельса-струны городской трассы СТЮ колеей 1,5 м применительно к природно-климатическим условиям г. Ханты-Мансийска (масштаб 1:1):  
 1 — головка рельса (сталь 20×80 мм); 2 — боковые щеки (сплав алюминия 30×10 мм);  
 3 — высокопрочная проволока (сталь  $\varnothing 3$  120 штук); 4 — корпус (короб алюминиевый 150×80×3 мм);  
 5 — крепление струны к корпусу; 6 — продольный паз; 7 — наполнитель

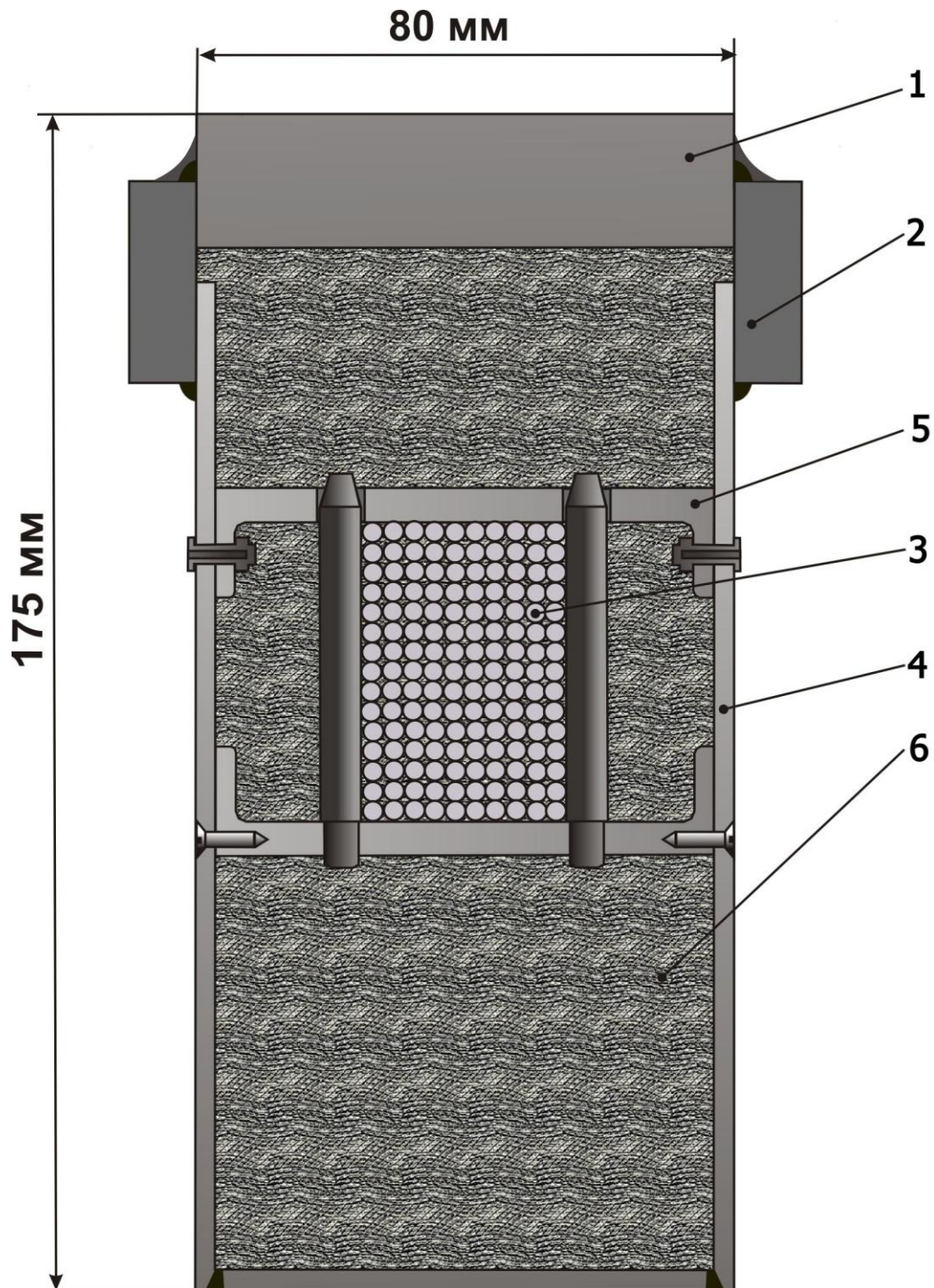


Рис. 1.3. Конструкция рельса-струны городской трассы СТЮ колеи 1,5 м применительно к природно-климатическим условиям г. Ханты-Мансийска (масштаб 1:1):

- 1 — головка рельса (сталь 20×80 мм); 2 — боковые щеки (сталь 30×10 мм);  
3 — высокопрочная проволока (сталь  $\varnothing 3$  150 шт.); 4 — корпус (сварной; швеллер сталь 150×80×3 мм);  
5 — крепление струны к корпусу рельса; 6 — наполнитель



Стальные же детали (корпус и головка рельса) выполняются из существующих и изготавливаемых по ГОСТу стальных профилей, не зависят от конкретного завода-изготовителя, исключают процесс приклеивания деталей, позволяют использовать менее дорогой материал, но на порядок увеличивают объем сварочных работ, а также увеличивают количество высокопрочных стальных проволок в струне и требуют периодического (раз в 5—10 лет) нанесения противокоррозионного покрытия на свои открытые поверхности.

В настоящее время, как более экономичный вариант, предлагается конструкция рельса-струны, полностью выполненная только из стальных деталей (см. рис. 1.3).

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 предлагаемая 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.

## 2. Расчетные нагрузки и воздействия

Нагрузки и воздействия, используемые для расчетов городского двухрельсового СТЮ, применительно к природно-климатическим условиям г. Ханты-Мансийска, были определены при выполнении подэтапа 2.2 «Разработка технических условий на рельсо-струнную путевую структуру» по государственному контракту № 7у «Генеральная транспортная стратегия применения и создания трасс струнного транспорта Юницкого в Ханты-Мансийском автономном округе — Югре», поэтому в данном разделе результаты этих расчетов указаны для справки.

Таблица 2.1

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

Таблица 2.2

Расчетные нагрузки от давления колес заполненного и пустого скоростного юнибуса колеей 1,5 м

Расчеты пролетного строения					$\lambda = 90.00$		
№	Нагрузки	Ед. изм.	Норм.	коэффициент		Расчетные нагрузки	
				$1+\mu$	$\gamma_f$	прочность	выносливость
Груженный рельсовый автомобиль							
1	Давление колеса передней оси $P_1$	тс	0,54	1,15	1,183	0,625	0,639

Расчеты пролетного строения						$\lambda = 90.00$	
№	Нагрузки	Ед. изм.	Норм.	коэффициент		Расчетные нагрузки	
				$1+\mu$	$\gamma_f$	прочность	выносливость
2	Давление колеса задней оси $P_2$	тс	0,54	1,15	1,183	0,625	0,639
Порожний 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.

Таблица 2.3

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
Рельсовый автомобиль	19	10	29	26,6	14	41

Для дальнейших расчетов рельсо-струнной путевой структуры СТЮ на температурные воздействия для условий г. Ханты-Мансийска 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.

В связи с изменением в последнее время климатических условий в РФ и возникшей тенденцией установления температурных рекордов, целесообразно несколько завысить крайние значения температурного интервала для выполнения расчетов. Тогда принимаем наибольшую и наименьшую расчетные температуры для

условий г. Ханты-Мансийска:

- наибольшая: +55 °С;
- наименьшая: -55 °С;
- расчетная температурная амплитуда: 110 °С.

Таблица 2.4

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

Нагрузки и воздействия (варианты сочетаний)	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

### **3. Предпроектные прочностные расчеты городского двухрельсового СТЮ применительно к природно-климатическим условиям г. Ханты-Мансийска**

#### **3.1. Построение расчетной схемы СТЮ с приложением нагрузок**

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 один перегон (700 м) городской трассы среднего двухрельсового СТЮ колеи 1,5 м, с высотой опор 10 м и шагом поддерживающих опор, равным 35 м, с двумя вариантами нагружения:

- а) поток груженых рельсовых автомобилей, идущих на расстоянии 70 м друг от друга и осуществляющих аварийное торможение;
- б) сцепка из двух груженых рельсовых автомобилей, осуществляющих аварийное торможение.

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 городской трассы для условий г. Ханты-Мансийска показана на рис. 3.1.1, а поддерживающей железобетонной опоры (для одного пути двухпутной трассы) — на рис. 3.1.2. Крепление рельса-струны на промежуточных опорах — шарнирное опирание корпуса, на анкерных опорах (по краям перегона) — жесткая заделка.

Рассмотрено городское движение потока рельсовых автомобилей с максимально близким расстоянием 70 м друг от друга (временной интервал движения 5—10 сек.) в момент их аварийного торможения с максимально возможным ускорением 4 м/с при воздействии максимальной боковой ветровой нагрузки.

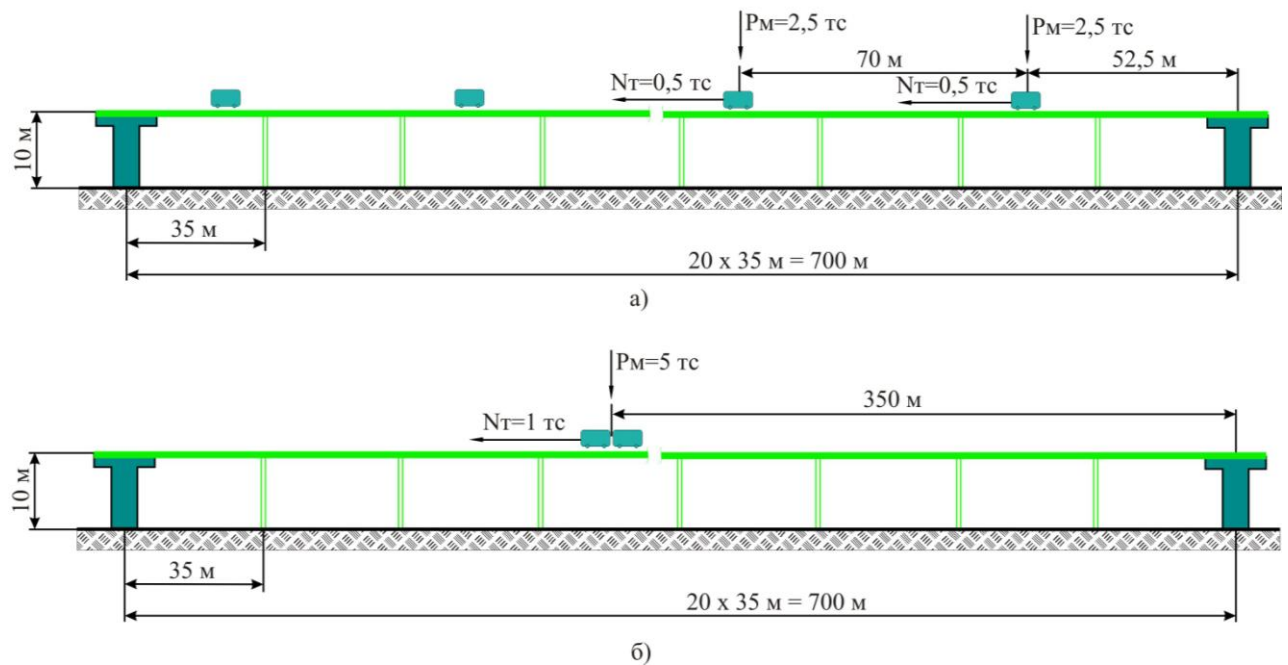


Рис. 3.1.1. Расчетная схема нагружения городской трассы СТЮ колеи 1,5 м в условиях г. Ханты-Мансийска:

- а) для потока рельсовых автомобилей, осуществляющих аварийное торможение;  
 б) для сцепки из двух груженых рельсовых автомобилей, осуществляющей аварийное торможение

Основные характеристики расчетной схемы трассы:

- пролеты по 35 м;
- расстояние между анкерными опорами 0,7 км;
- высота опор над уровнем земли 10 м (глубина условной заделки в грунте — 2 м);
- колея 1,5 м;
- вес рельсового автомобиля, с учетом динамической перегрузки, — 2,5 тс.

Расчетная схема одного пути рельсо-струнной путевой структуры показана на рис. 3.1.3. Путевая структура одного пути состоит из двух рельсов-струн, содержащих головку рельса, корпус рельса, струну и заполнитель. Двухпутная трасса содержит два пути и 4 рельса-струны.

Схема нагружения одного пути от рельсового автомобиля (юнибуса) показана на рис. 3.1.4.

Схема нагружения одного пути от сцепки двух рельсовых автомобилей показана на рис. 3.1.5.

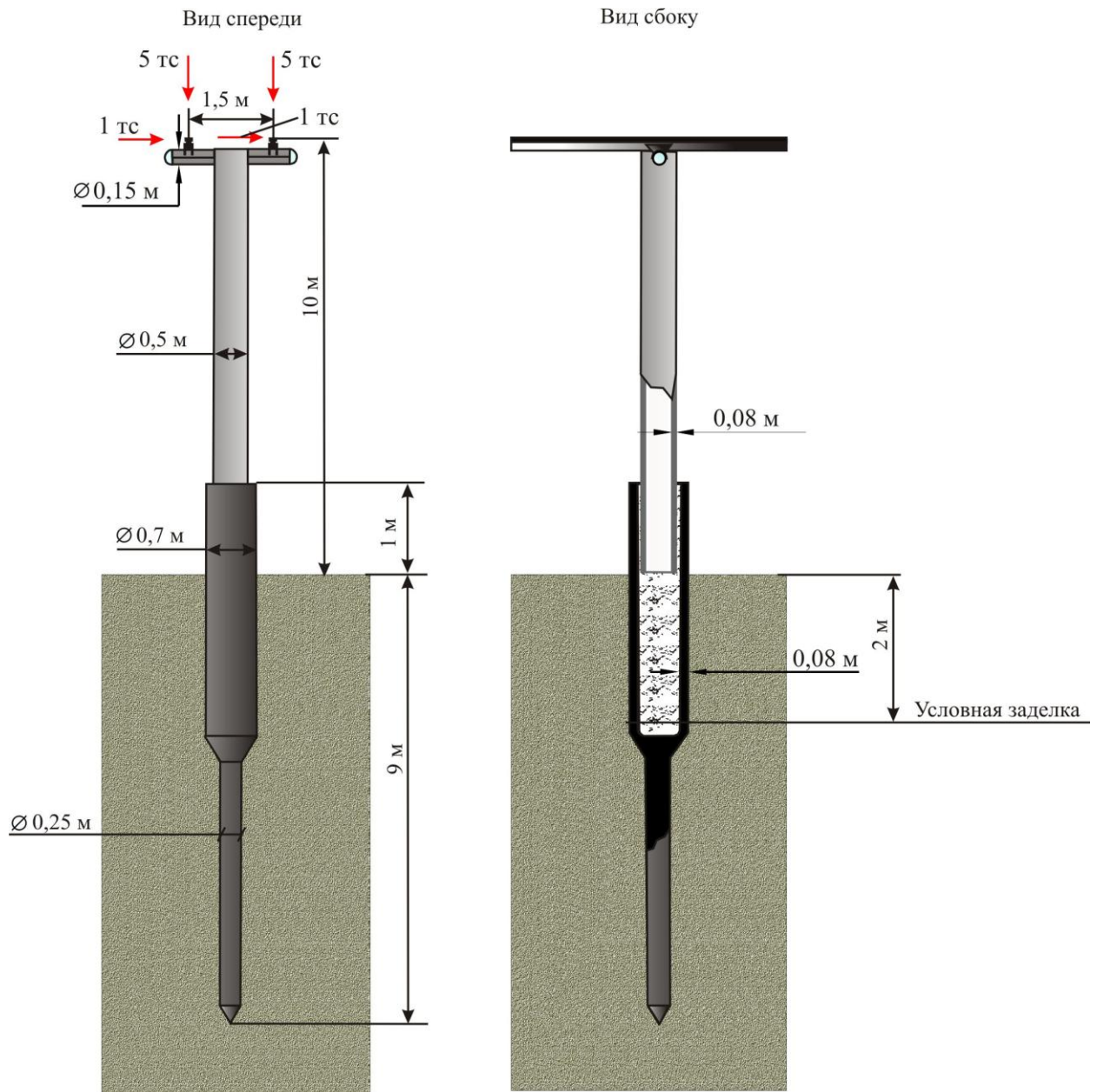


Рис. 3.1.2. Расчетная схема поддерживающей железобетонной опоры (для одного пути двухпутной трассы) на городской трассе среднего СТЮ в г. Ханты-Мансийске

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

Расчетное сечение рельса-струны и находящихся внутри струн изображено на рис. 3.1.6.



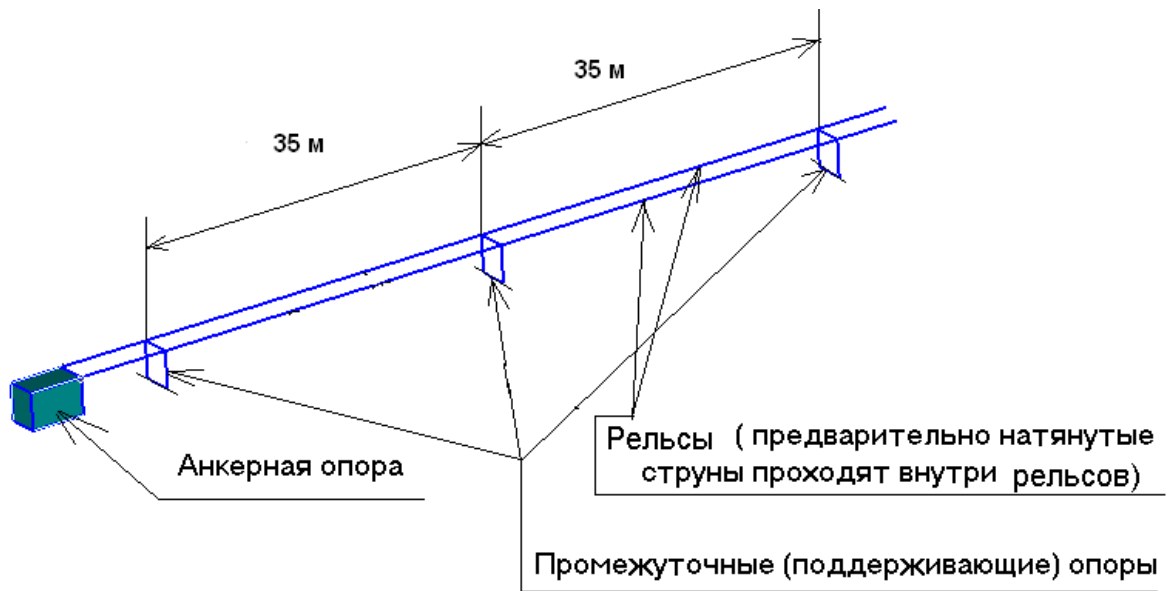


Рис. 3.1.3. Схема одного пути рельсо-струнной путевой структуры

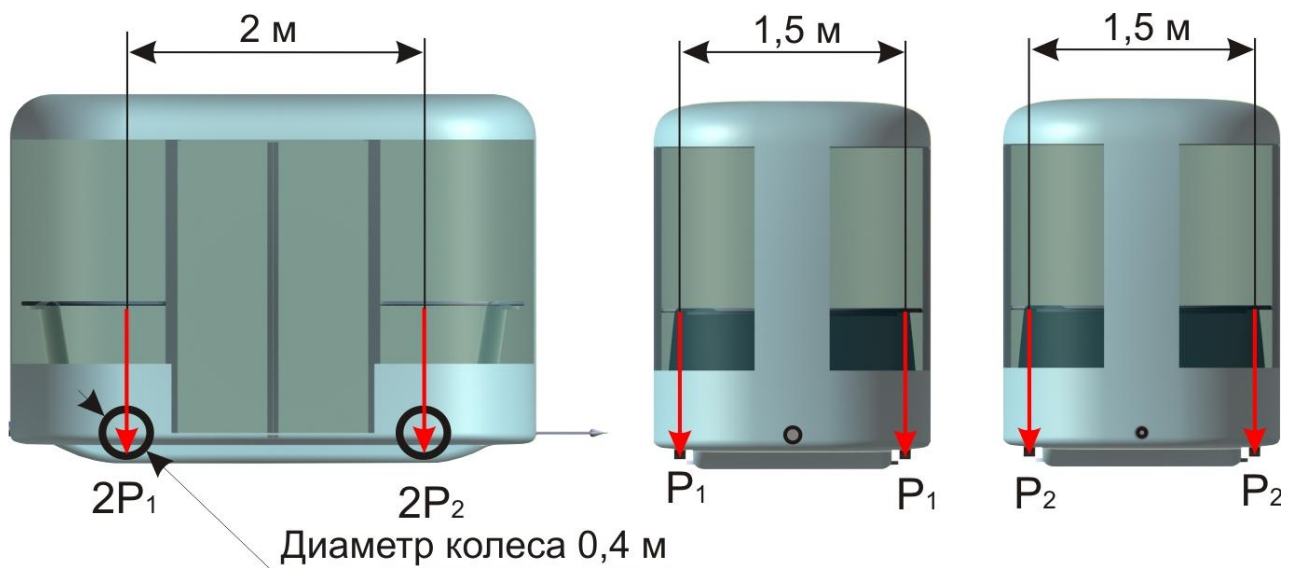


Рис. 3.1.4. Схема нагружения пути от городского рельсового автомобиля (юнибуса)

На рис. 3.1.7 изображено расчетное сечение корпуса рельса (его стенки утолщены на 3,5 мм за счет добавки жесткости корпусу рельса от наполнителя — бетона, поэтому бетон в расчетную схему отдельно не вводился).

Расчетная погонная масса одного рельса-струны рельсо-струнной путевой структуры скоростного СТЮ составил 58,7 кг/м, из них: 26,1 кг/м — головка рельса и корпус рельса, 8,3 кг/м — струна (150 проволок диаметром 3 мм в каждом рельсе) и 24,3 кг/м — наполнитель на основе цементобетона и металлический крепеж.

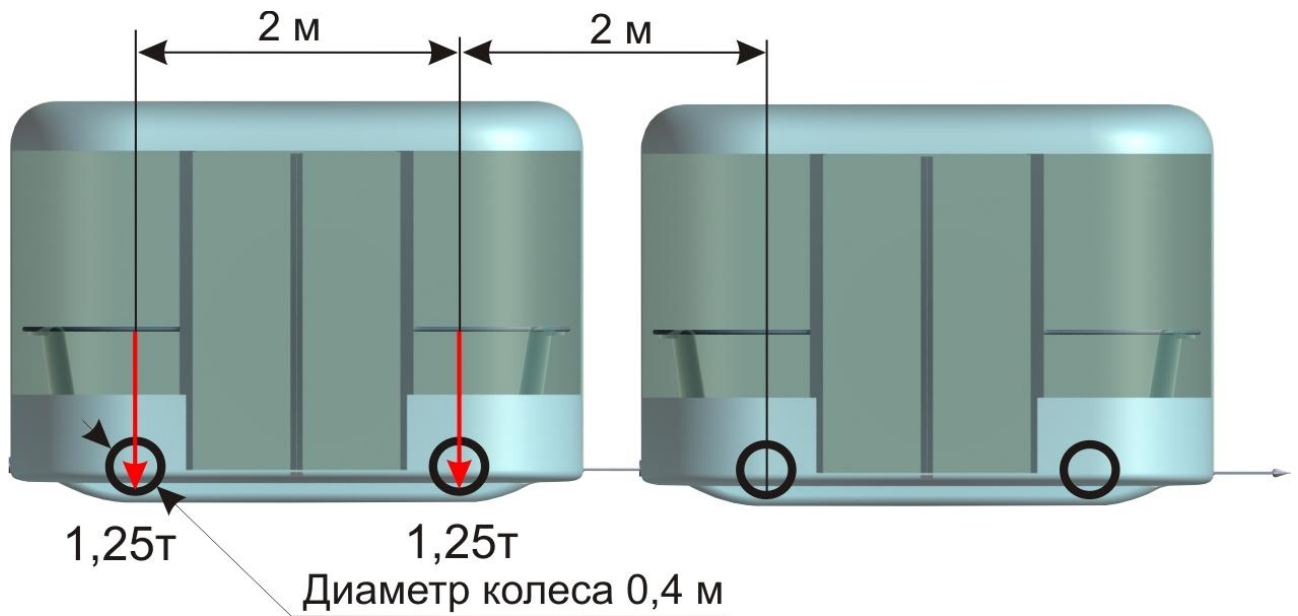


Рис. 3.1.5. Схема нагружения рельсо-струнного пути от сцепки двух городских рельсовых автомобилей

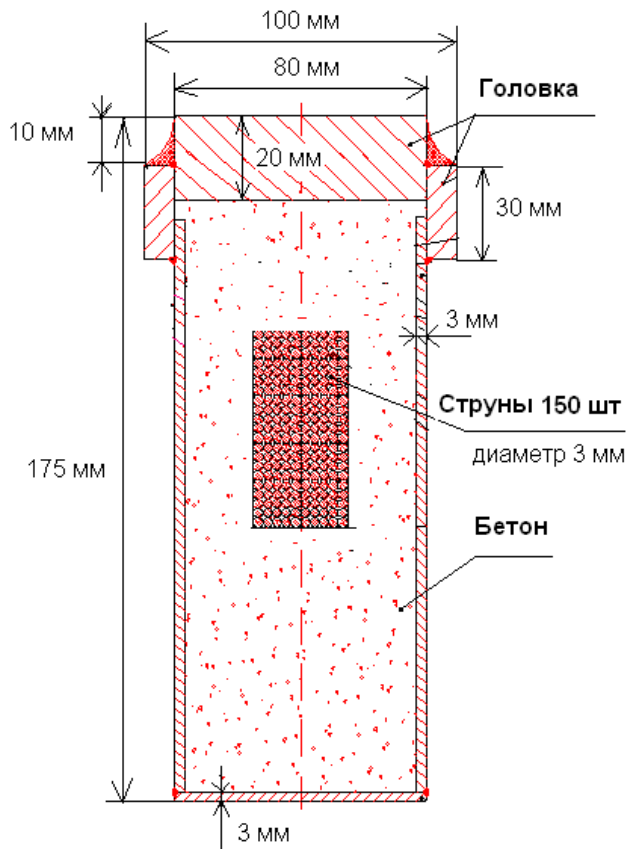


Рис. 3.1.6. Расчетное поперечное сечение рельса-струны

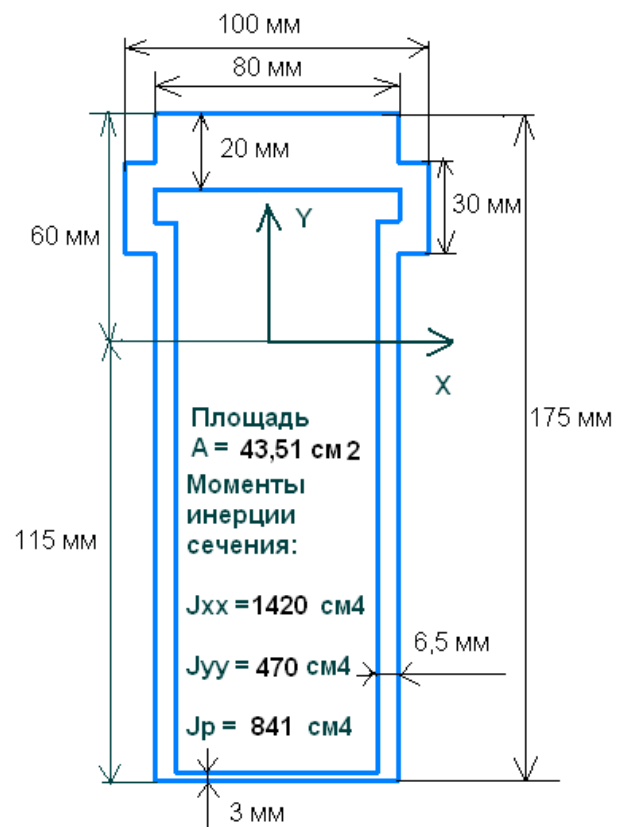


Рис. 3.1.7. Расчетное поперечное сечение корпуса рельса

Расчет рельсо-струнной путевой структуры проводился для шарнирного варианта крепления рельса к промежуточным опорам (рельс-струна имеет возможность поворота на опоре вокруг оси, нормальной продольной оси рельса).

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

- в середине пролета (см. п. 4.1, рис. 4.1.1 и 4.1.2);
- симметрично над промежуточной опорой (наиболее опасное нагружение показано в п. 4.1, рис. 4.1.3);
- по одну сторону на расстоянии 5,0 м, считая от центра тяжести юнибуса, (наиболее опасное нагружение показано в п. 4.1, рис. 4.1.4).

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

При расчете на прочность предполагалось, что рельсовых автомобилей — 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 рельсового автомобиля следовавшим за ним исправным рельсовым автомобилем.

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

## **3.2. Исходные данные о материалах**

### **3.2.1. 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

### 3.2.2. 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

### 3.2.3. 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

### 3.2.4. Материал заполнителя

Материал заполнителя представляет собой бетон с плотностью  $2400 \text{ кг/м}^3$ . Предполагается, что заполнитель частично передает вертикальную нагрузку от головки рельса и корпуса рельса на струны (основная нагрузка передается посредством силовых поперечных стальных профилей, 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. 3.1.6), 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.

### 3.3. Расчетная модель и этапы расчета

Конечно-элементная модель представляет собой пятипролетную рельсо-струнную путевую структуру длиной  $35 \times 5 = 175 \text{ м}$ . 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 до напряжений  $1400 \text{ МПа}$ , головки рельса до напряжений  $120 \text{ МПа}$  и корпуса рельса до напряжений  $120 \text{ МПа}$  (натяжение расчетного поперечного сечения осуществляется при  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Далее — закрепление корпуса и рельса на промежуточных опорах (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 рельсового автомобиля при расчете жесткости и выносливости путевой структуры (штатный многократный режим работы рельса-струны), и от двух рельсовых автомобилей — при расчете прочности для двух крайних температурных режимов: +55 °С летом и –55 °С зимой (нештатный однократный режим работы рельса-струны).

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

#### **3.4.1. Расчет вертикальных деформаций от собственного веса путевой структуры и при нагружении вертикальной силой от рельсового автомобиля**

В расчете струна (150 высокопрочных проволок диаметром 3 мм каждая, а также корпус и головка рельса, которые также предварительно напрягаются и являются составными элементами струны) в каждом рельсе предварительно натягивалась до суммарного усилия  $151,3 + 53,2 = 204,5$  тс (суммарное натяжение рельса-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 струны 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 ее положения при монтажной

температуре 0 °С, в увеличенном виде на рис. 3.4.1.1. Дополнительный провис рельсо-струнной эстакады от собственного веса (относительно температуры 0 °С) при этом составил в центре пролета 0,00584 метра (5,84 мм), и обусловлен только температурным снижением натяжения в рельсе-струне.

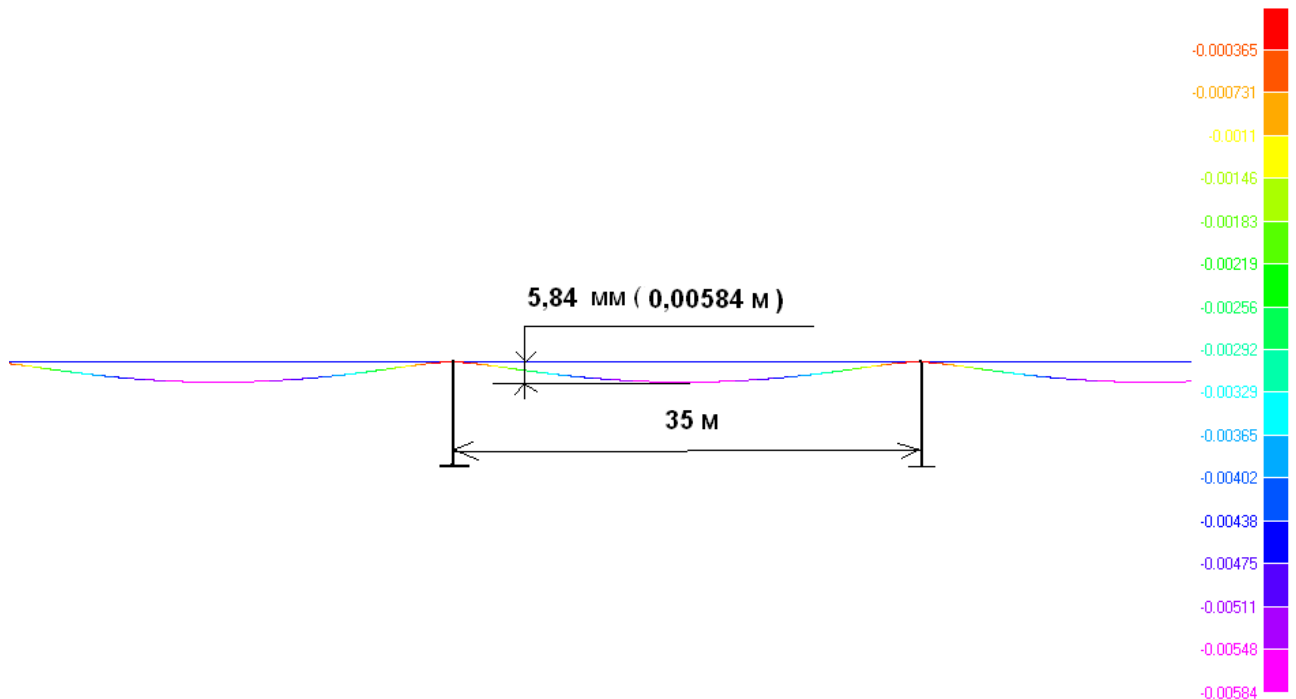


Рис. 3.4.1.1 Дополнительная вертикальная деформация участка рельсо-струнной эстакады от собственного веса при наибольшей температуре +55 °С летом

Наибольшая общая вертикальная деформация участка рельсо-струнной эстакады (при +55 °С) от собственного веса и при нагружении в центре пролета вертикальной силой от веса рельсового автомобиля, 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. 3.4.1.2. Прогиб струны в рельсо-струнной эстакаде в центре пролета при этом составит 0,079 метра (79 мм).

Дополнительный вертикальный прогиб рельсо-струнной эстакады в центре пролета, вызванный только весом рельсового автомобиля, при шарнирном закреплении рельса на опоре, составит:  $0,079 - 0,00584 = 0,0732$  метра (73,2 мм). Отношение наибольшего прогиба, вызванного рельсовым автомобилем, к длине пролета при этом составит:  $0,07316 / 35 = 1/478$ .



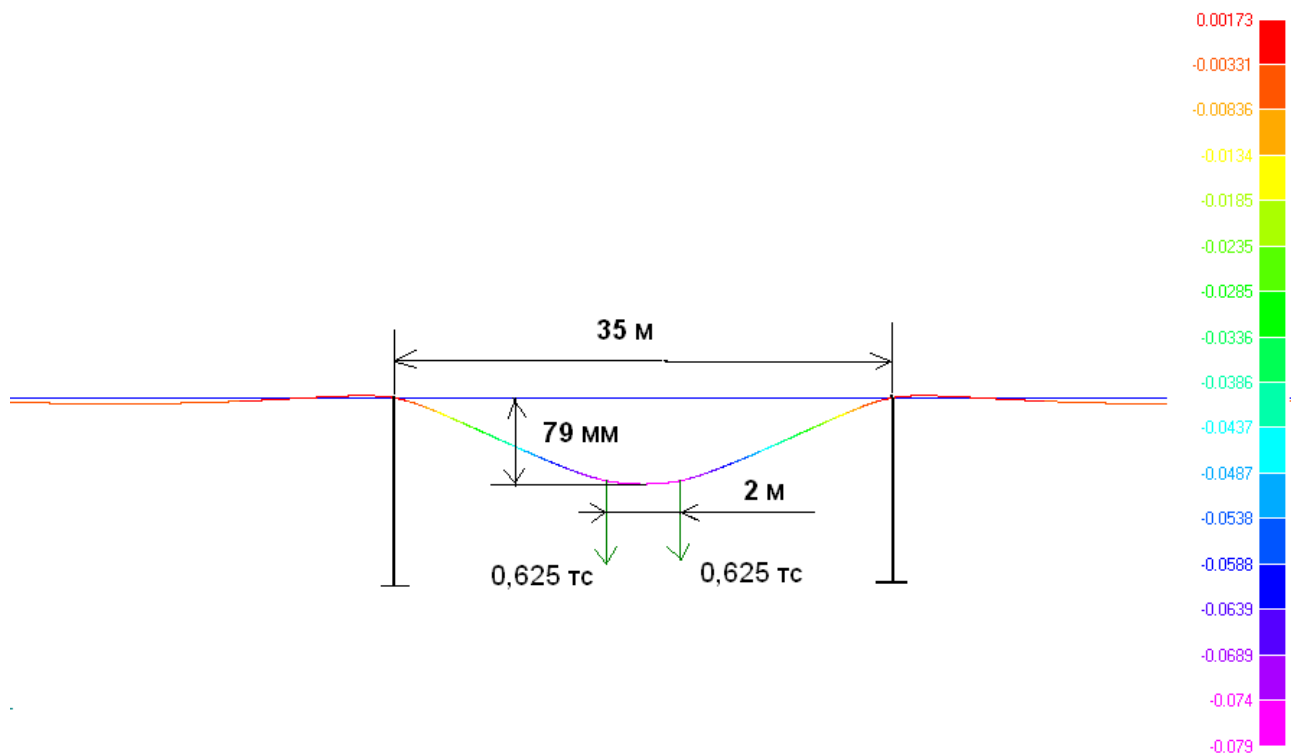


Рис. 3.4.1.2. Вертикальная деформация участка рельсо-струнной эстакады от собственного веса и при дополнительном нагружении вертикальной силой от рельсового автомобиля весом 2,5тс при наибольшей температуре +55С летом

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 вертикальных деформаций рельсо-струнного пролетного строения.

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

Исходные данные:

- |  |   |
|--|---|
| 1. Вертикальная сила на один рельс:                                    | $P = 1250 \text{ кГс}$                      |
| 2. Сила натяжения в одном рельсе<br>(струна, корпус и головка рельса): | $T = (136,6 - 7,1) \times 10^3 \text{ кГс}$ |
| 3. Длина одного пролета:   | $L = 35,0 \text{ м}$                        |
| 4. База рельсового автомобиля:   | $\lambda = 2,0 \text{ м}$                   |

Величина наибольшего прогиба рельсо-струнной путевой структуры в центре пролета от веса рельсового автомобиля (при +55 °С), без учета изгибной жесткости рельса, составит:

$$\Delta = \frac{P \times L - \lambda}{4 \times T} = \frac{1250 \times 35 - 2,0}{4 \times 129500} = 0,0796 \text{ м (79,6 мм)}. \quad (2.1)$$

Таким образом, аналитический расчет по формуле (2.1) дает схожие результаты, но отличающиеся в большую сторону, по сравнению с численным расчетом, на 9% (при температуре +55 °С). Это объясняется учетом жесткости бетонного заполнителя, стального корпуса и головки рельса в численном расчете, что несколько 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).

При минимальной температуре (–55 °С) суммарное усилие натяжения в рельсо-струне составит 252.550 кгс (струна, головка и корпус рельса), поэтому величина наибольшего прогиба рельсо-струнной путевой структуры в середине пролета, определенная аналитически по формуле (2.1), составит 40,8 мм, т.е. будет в 1,95 раза меньше, чем при температуре +55°С. С учетом изгибной жесткости рельса-струны, реальный его прогиб под действием веса юнибуса, находящегося в центре пролета, будет меньше примерно на 5%, т.е. будет равен 38,8 мм.

#### 3.4.2. 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 его корпуса и его узлов, расчет конструкции рельса-струны проводился при действии только одной условной единичной горизонтальной силы, заведомо превышающей по величине реально действующую силу. Величина условной единичной горизонтальной силы была принята равной 500 кгс на каждый рельс (на одно колесо — 250 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 250 км/ч, она приложена к рельсу в одной точке, в то время как у сцепки из двух рельсовых автомобилей, обладающей наибольшей боковой парусностью при воздействии бокового ветра, расчетная боковая нагрузка на рельс-струну прикладывается в четырех точках, отстоящих на расстоянии 2,0 м друг от друга (ее величина составит всего 150 кгс на одно колесо от воздействия расчетной боковой ветровой нагрузки на рельсовый автомобиль в размере 41 кгс/м<sup>2</sup>).

Для оценки угла поворота сечения рельса проведен аналитический расчет методом сопряжения. Рельс жестко заделан на промежуточных опорах от поворота вокруг продольной оси и работает на кручение один (без струн, крутильной жесткостью которых можно пренебречь). В этом случае рельс поворачивается вокруг своего центра сечения (см. рис. 3.4.2.1). Крутящий момент, соответствующий центру сечения и боковой силе 500 кгс, действующей на рельс, равен 300 Н×м. Угол поворота рельса при этом составит всего 0,214 градуса.

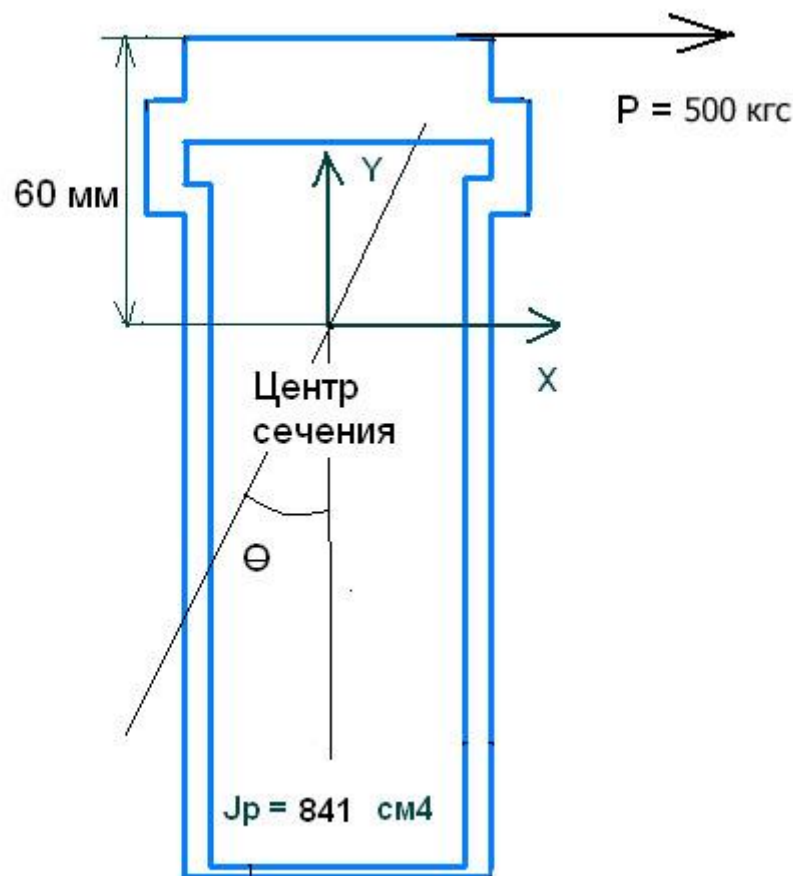


Рис. 3.4.2.1. Расчетная схема действия условной горизонтальной скручивающей силы на рельс-струну

### Расчет на скручивание рельса крутящим моментом 300 Н×м

Исходные данные:

1. Полярный момент инерции сечения рельса:  $J_{p\_RELS} = 8,41 \times 10^{-6} \text{ м}^4$
2. Модуль сдвига стали:  $G = 7,9 \times 10^{10} \text{ Па}$
3. Длина одного пролета:  $L = 35 \text{ м}$
4. База рельсового автомобиля:  $\lambda = 2,0 \text{ м}$
5. Крутящий момент на один рельс:  $M = 300 \text{ Н} \times \text{м}$

Расчет угла скручивания рельса:

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

Расчет по формуле (2.2) дает следующие результаты:

$$\theta = 3,725 \times 10^{-3} \text{ радиан, или } \theta \times \frac{180}{\pi} = 0,214 \text{ градуса.}$$

При этом необходимо отметить, что под колесом рельсового автомобиля рельс в действительности не сможет повернуться на угол  $0,214^\circ$ , т.к. возникнет восстанавливающий момент, обусловленный плоской поверхностью опирания головки рельса и цилиндрической поверхностью колеса и равный  $981 \text{ Н} \times \text{м}$  (от четырех колес сцепки из двух юнибусов).

Для оценки бокового увода сечения рельса-струны под воздействием боковой силы в  $500 \text{ кгс}$ , приложенной в центре пролета, проведен аналитический расчет без учета изгибной жесткости рельса (при  $+55 \text{ }^\circ\text{C}$  летом, когда минимальное усилие натяжения струны). Боковой увод в этом случае составит  $31,8 \text{ мм}$ , что составит относительно длины пролета величину  $1/1100$ . В действительности, при значительно меньшей расчетной ветровой нагрузке, этот увод от сцепки двух рельсовых автомобилей, идущих на расстоянии друг от друга, при  $+55 \text{ }^\circ\text{C}$  будет примерно в 2 раза ниже, т.е. около  $15 \text{ мм}$ , а от одиночного рельсового автомобиля — не более  $10 \text{ мм}$ . При более низких, чем  $+55 \text{ }^\circ\text{C}$ , температурах, этот увод также будет меньше (при

–55 °С примерно в 2 раза).

Расчет перемещения рельса от боковой силы, приложенной в центре пролета и равной 500 кгс (при +55 °С)

Исходные данные:

- |                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| 1. Боковая сила на один рельс:    | $P = 500 \text{ кгс};$                       |
| 2. Сила натяжения струн и рельса: | $T = (136,6 - 7,1) \times 10^3 \text{ кгс}.$ |

Расчет бокового перемещения рельса в центре пролета:

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

Расчет по формуле (2.3) дает следующий результат:

$$\Delta_{\text{бок}} = 0,0318 \text{ м} = 31,8 \text{ мм}.$$

### **3.5. Расчет напряженного состояния струн. Расчет прочности струн**

3.5.1. 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:                                       | $t_{\text{cb}} = 0 \text{ °С}$                            |
| 2. Температура летом:  | $t_{\text{L}} = +55 \text{ °С}$                           |
| 3. Температура зимой:  | $t_{\text{Z}} = -55 \text{ °С}$                           |
| 4. Модуль упругости материала проволок:                      | $E_{\text{трос}} = 2,06 \times 10^{11} \text{ Па}$        |
| 5. Коэффициент линейного расширения:                         | $\alpha_{\text{stell}} = 1,2 \times 10^{-5} \text{ 1/°С}$ |
| 6. Площадь одной проволоки:                                  | $F_{\text{троса}} = 7,065 \times 10^{-6} \text{ м}^2$     |
| 7. Всего проволок в рельсе:                                  | $n = 150 \text{ шт}.$                                     |
| 8. Сила предварительного натяжения одной проволоки при 0 °С: | $N_0 = 9896 \text{ Н}$                                    |

Напряжения в проволоке при температуре сборки 0 °С составят:

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

Тогда:

$$\sigma_0 = 1,4 \times 10^9 \text{ Па} = 1400 \text{ МПа}.$$

Сила натяжения всех проволок струны при температуре сборки 0 °С (сила предварительного натяжения только струны, без учета предварительного натяжения головки рельса и корпуса рельса):

$$T_0 = N_0 \times n = 9896 \text{ Н} \times 150 = 1484400 \text{ Н} = 151300 \text{ кгс} = 151,3 \text{ тс}.$$

9. Сила натяжения одной проволоки диаметром 3 мм при температуре +55 °С (без учета воздействия подвижной нагрузки):

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

Тогда:

$$N_{55} = 8935 \text{ Н} = 910,8 \text{ кгс}.$$

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

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

Тогда:

$$\sigma_{55} = 1,264 \times 10^9 \text{ Па} = 1264 \text{ МПа}.$$

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

$$N_{-55} = N_0 + E_{\text{tros}} \times \alpha_{\text{stell}} \times (t_{\text{cb}} - t_Z) \times F_{\text{trosa}}. \quad (2.7)$$

Тогда:

$$N_{-55} = 10860 \text{ Н} = 1107 \text{ кГс.}$$

Напряжения в проволоке при  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$  (без учета воздействия подвижной нагрузки):

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

Тогда:

$$\sigma_{-55} = 1,536 \times 10^9 \text{ Па} = 1536 \text{ МПа.}$$

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

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

Тогда:

$$T_{55} = 1,34 \times 10^6 \text{ Н} = 136600 \text{ кГс} = 136,6 \text{ тс.}$$

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:

$$T_{-55} = 1,629 \times 10^6 \text{ Н} = 166055 \text{ кГс} = 166,1 \text{ тс.}$$

Как видно из расчета, наибольшая суммарная сила натяжения всех проволок струны, от предварительного натяжения и от перепада температур, составляет 166,1 тонн (зимой при  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ ), что соответствует растягивающему напряжению 1536 МПа. Это значительно ниже, на 396 МПа (или на  $4037 \text{ кгс/см}^2$ ), предела текучести материала высокопрочной проволоки диаметром 3 мм производства завода ВолгоМетиз (г. Волгоград), которую планируется использовать для струн ( $\sigma_{0,2} = 1932 \text{ МПа}$ ).



### 3.5.2. Расчет изменений напряжений в струне от собственного веса рельсо-струнной путевой структуры и от проезда рельсового автомобиля

Расчеты по изменению напряжений в струне проводились для участка рельсо-струнной путевой структуры, общей длиной 175 м (5 пролетов по 35 м). Эпюры продольных сил в струне для различных нагрузок показаны в п. 4.2, рис. 4.2.1.1—4.2.1.4. Наибольшее натяжение струн будет при движении двух рельсовых автомобилей в сцепке, расположенных в середине пролета (см. п. 4.2.2, рис. 4.2.2.1), при температуре  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ :  $1630,604\text{ кН} = 166,2\text{ тс}$ .

При этой же температуре  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , усилие в струне на пролете, в отсутствие рельсовых автомобилей, составит  $1629,648\text{ кН}$ . Таким образом, сцепка из двух груженых рельсовых автомобилей увеличит усилие в струне на нагруженном пролете лишь на  $1630,604 - 1629,648 = 0,956\text{ кН} = 0,09745\text{ тс}$ , т.е. всего на  $0,06\%$ . 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 груженными рельсовыми автомобилями в сцепке приводит к увеличению напряжений в струне менее чем на  $0,1\%$ , чем можно пренебречь.

Расчет проводился для воздействия от двух рельсовых автомобилей, весом  $2,5\text{ тс}$  каждый, расположенных в середине пролета между промежуточными опорами. Результаты расчетов приведены в табл. 4.5.1 (см. п. 4.5).

### 3.5.3. Расчет прочности струны

Как видно из табл. 4.5.1 (п. 4.5), наибольшее изменение напряжений в струне от проезда двух груженых рельсовых автомобилей в сцепке произойдет летом при  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , когда струна меньше всего натянута. Однако размах напряжений от проезда двух транспортных средств общим весом  $5\text{ тонн}$  очень мал и составляет всего  $0,91\text{ МПа}$  зимой при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $2,78\text{ МПа}$  летом при  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что составляет пренебрежимо малую величину — менее  $0,1\%$  зимой и  $0,25\%$  летом от величины статических напряжений в струне. Коэффициент асимметрии цикла напряжений  $\rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$  при этом составит:

$$\text{Летом } +55 \text{ }^{\circ}\text{C:} \quad \rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 1265,91/1268,69 = 0,99781 \quad (2.11)$$

$$\text{Зимой } -55 \text{ }^{\circ}\text{C:} \quad \rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 1537,4/1538,31 = 0,99941 \quad (2.12)$$

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 рельсового автомобиля 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. 4.5.1 (п. 4.5), наибольшие напряжения в струнах будут зимой при  $-55 \text{ }^{\circ}\text{C}$  и соответствуют растягивающему напряжению 1538 МПа.

В табл. 3.5.3.1 представлены нормативные характеристики высокопрочной проволоки, используемой для струн, согласно ГОСТ 7348-81.

Таблица 3.5.3.1

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  $R_{\text{ип}} = 12600/7,065 = 1783 \text{ МПа}$  — напряжение при разрывном усилии 12600 Н, согласно ГОСТ 7348-81 (для проволоки, планируемой к использованию в СТЮ и выпускаемой отечественной промышленностью,  $R_{\text{ип}} > 2200 \text{ МПа}$ ).

Предлагаемая к использованию в СТЮ в г. Ханты-Мансийске 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», г. Волгоград) 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 —  $\Delta R_{пр} = 387$  МПа);

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

Запас прочности струны при этом составит  $\Delta R_{пр} = 1932 - 1545 = 387$  МПа и столь значителен, 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. Кроме того, в традиционных мостах арматура

подвержена коррозии, что со временем приводит к снижению ее прочности.

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 рельсо-струне, т.к. при каждом проходе рельсового автомобиля, они будут раздавливаться стальными колесами и сбрасываться ими вниз. К тому же струна в рельсо-струне надежна защищена прочным и герметичным корпусом рельса от механических воздействий и находится в герметике, исключая ее коррозию за весь срок эксплуатации.

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 ее прочности составит (в самом напряженном состоянии, при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  зимой):

- 1) для сцепки из двух рельсовых автомобилей (2,5 тс + 2,5 тс):  $n_1 = (1932 - 1545)/0,91 = 425$ ;
- 2) для одиночного рельсового автомобиля запас прочности  $n_2$  струны превысит значение  $n_2 = 1000$  раз,

где:

0,91 МПа — размах напряжений в струне при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  от воздействия расчетной подвижной нагрузки (от двух рельсовых автомобилей в сцепке: 2,5 тс + 2,5 тс) — см. п. 4.5, табл. 4.5.1.

В настоящее время ни в одной строительной конструкции, даже самого высокого уровня ответственности, в том числе в висячих и вантовых мостах, ни в России ни за рубежом, не используются такие запасы прочности (400 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 0,3%, 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 1538 МПа, которые приведены в таблице 4.5.1 (п. 4.5), 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  $n_3 = (1545 - 1538)/0,91 = 7,7$  (при  $-55$  °С), а запас надежности по величине минимальной температуры составит  $n_4 = (1545 - 1538)/2,47 = 2,8$  (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.

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

3.6.1. 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:

$$t_{cb} = 0 \text{ °С}$$

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:  $\alpha_{\text{stell}} = 1,2 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$   
 6. Площадь сечения (с учетом приведенного бетонного

наполнителя к стальным стенкам рельса):  $F_k = 0,004351 \text{ м}^2$

7. Сила натяжения корпуса рельса при температуре сборки  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $5,221 \times 10^5 \text{ Н}$

Усилие предварительного натяжения в корпусе и головке рельса при температуре сборки  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  составит:

$$N_0 = 5,221 \times 10^5 \text{ Н} = 53221 \text{ кгс} = 53,22 \text{ тс}, \quad (2.15)$$

а напряжения:

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

Тогда:

$$\sigma_0 = 120 \times 10^6 \text{ Па} = 120 \text{ МПа}.$$

8. Сила натяжения корпуса и головки рельса при температуре  $+55 \text{ }^\circ\text{C}$  составит:

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

Тогда:

$$N_{55} = -6,944 \times 10^4 \text{ Н} = -7078 \text{ кгс} = -7,078 \text{ тс},$$

т.е. корпус и головка рельса при  $+55 \text{ }^\circ\text{C}$  будут сжаты небольшим усилием.

Температурные напряжения в корпусе рельса при  $+55 \text{ }^\circ\text{C}$ :

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



Тогда:

$$\sigma_{-55} = -1,596 \times 10^7 \text{ Па} = -15,96 \text{ МПа.}$$

9. Сила натяжения корпуса и головки рельса при  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ :

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

Тогда:

$$N_{-55} = 1,114 \times 10^6 \text{ Н} = 113558 \text{ кгс} = 113,56 \text{ тс.}$$

Температурные напряжения корпуса и головки рельса при  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ :

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

Тогда:

$$\sigma_{-55} = 2,56 \times 10^8 \text{ Па} = 256 \text{ МПа.}$$

### 3.6.2. Расчет напряжений изгиба от собственного веса рельсо-струнной путевой структуры и при нагружении вертикальной силой от рельсового автомобиля

Расчет напряжений изгиба от собственного веса рельсо-струнной путевой структуры и при нагружении вертикальными силами от рельсовых автомобилей проводились для участка путевой структуры, общей длиной 175 м (5 пролетов по 35 метров каждый).

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

- для одного рельсового автомобиля и для сцепки из двух рельсовых автомобилей — в середине пролета (п. 4.1, рис. 4.1.1 и 4.1.2);
- для сцепки из двух рельсовых автомобилей — симметрично над промежуточной опорой для расчета на прочность (п. 4.1, рис. 4.1.3);

обоснование наиболее опасного расположения подвижной нагрузки приведено в п. 4.4, рис. 4.4.1 и 4.4.2;

- для одного рельсового автомобиля — по одну сторону от промежуточной опоры на расстоянии 5,0 м от нее, считая от центра тяжести (или 4,0 м до ближайшего колеса), для расчета выносливости (п. 4.1, рис. 4.1.4); обоснование наиболее опасного расположения подвижной нагрузки приведено в п. 4.4, рис. 4.4.3 и 4.4.4.

При расчете на прочность предполагалось, что рельсовых автомобилей два, они движутся вместе в механической сцепке и каждое создает вертикальную силу 2,5 тс. При расчете на прочность два рельсовых автомобиля 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 струне, головке и корпусе рельса-струны для оценки их прочности приведены в п. 4.5: — табл. 4.5.1, 4.5.2 и 4.5.3; данные приведены для двух нагружений — в центре пролета и у опоры.

При расчете рельсо-струнной путевой структуры на выносливость предполагалось, что одиночный рельсовый автомобиль 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. 4.5: — табл. 4.5.4 и 4.5.5; 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. 4.3.1—4.3.3 (рис. 4.3.1.3—4.3.3.8).

### 3.6.3. 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. 3.6.3.1 (выписка из табл. 51\* СНиП II-23-81\*).

Таблица 3.6.3.1

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. 3.6.3.1, 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.

### 1) Середина пролета

Сопоставляя наибольшие действующие для нижней точки корпуса напряжения растяжения зимой при  $-55^\circ\text{C}$ , равные  $+289,8$  МПа в середине пролета, которые приведены в табл. 4.5.2, с расчетными сопротивлениями  $m \times R_y = 299$  МПа для стали 09Г2С, можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям головки рельса при  $-55^\circ\text{C}$  для этой стали обеспечена.

Так же сопоставляя наибольшие действующие для нижней точки корпуса рельса напряжения сжатия летом при  $+55^\circ\text{C}$ , равные  $47,74$  МПа в середине пролета, которые приведены в табл. 4.5.2, 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.

## **2) На промежуточной опоре**

Сопоставляя наибольшие действующие для верхней точки головки рельса напряжения растяжения зимой при –55 °С, равные +291,97 МПа на промежуточной опоре, которые приведены в табл. 4.5.3, 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 –124,55 МПа на промежуточной опоре, которые приведены в табл. 4.5.3, 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.

## **Проверка выносливости рельса**

Стальные конструкции и их элементы в эстакадных транспортных сооружениях, к чему может быть отнесен и СТЮ, непосредственно воспринимают многократно действующие подвижные, вибрационные и 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 стального 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 °С и +55 °С. Напряженное состояние рельса-струны в сечении середины пролета под колесами рельсовых автомобилей практически не отличается от напряженных состояний в других

сечениях на расстояниях не ближе 3 метров от промежуточных опор. (см. табл. 4.5.1—4.5.5 для середины пролета). Поэтому напряжения для расчетных сечений будем брать из табл. 4.5.4 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  $R_v = 75$  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. 3.6.3.2 и 3.6.3.3.

Таблица 3.6.3.2

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

Группа элементов	Значения $R_v$ при временном сопротивлении стали разрыву $R_{un}$ , 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 3.6.3.3

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  $-55\text{ }^\circ\text{C}$  (данные из табл. 4.5.4, п. 4.5, для середины пролета):

Верх головки рельса:  $\sigma_{\min} = 240,88$  МПа (с подвижной нагрузкой);  $\sigma_{\max} = 256,22$  МПа (без подвижной нагрузки на пролете),  $\rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 240,88 / 256,22 = 0,94$ .

$$\gamma_v = \frac{1,0}{1 - \rho} = 16,67$$

$$\alpha \times R_v \times \gamma_v = 0,77 \times 75 \times 16,67 = 962,7 \text{ МПа} > \sigma_{\max} = 256,22 \text{ МПа.}$$

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. 4.5.4, п. 4.5, для середины пролета):

Низ корпуса рельса:  $\sigma_{\min} = 255,47$  МПа (без подвижной нагрузки);  $\sigma_{\max} = 285,12$  МПа (с подвижной нагрузкой на пролете);  $\rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 255,47/285,12 = 0,9$ .

$$\gamma_v = \frac{1,0}{1 - \rho} = 10,0$$



$$\alpha \times R_v \times \gamma_v = 0,77 \times 75 \times 10 = 577,5 \text{ МПа} > \sigma_{\max} = 285,12 \text{ МПа}.$$

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

3) Выполним проверку выносливости поперечного сварного шва верха головки рельса летом при  $+55^\circ\text{C}$  (данные из табл. 4.5.4 для середины пролета):

Верх головки рельса:  $\sigma_{\min} = -16,5 \text{ МПа}$  (без подвижной нагрузки);  $\sigma_{\max} = -41,15 \text{ МПа}$  (с подвижной нагрузкой на пролете),  $\rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = -16,5/-41,15 = 0,4$  (сжатие).

$$\gamma_v = \frac{2}{1-\rho} = 3,33$$

$$\alpha \times R_v \times \gamma_v = 0,77 \times 75 \times 3,33 = 192,3 \text{ МПа} > \sigma_{\max} = 41,15 \text{ МПа}.$$

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

4) Выполним проверку выносливости поперечного сварного шва низа корпуса рельса летом при  $+55^\circ\text{C}$  (данные из табл. 4.5.4 для середины пролета):

Низ корпуса рельса:  $\sigma_{\min} = -14,89 \text{ МПа}$  (без подвижной нагрузки);  $\sigma_{\max} = 33,71 \text{ МПа}$  (с подвижной нагрузкой на пролете);

$$\rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = -14,89/33,71 = -0,44.$$

$$\gamma_v = \frac{2,5}{1,5-\rho} = 1,29$$

$$\alpha \times R_v \times \gamma_v = 0,77 \times 75 \times 1,29 = 74,5 \text{ МПа} > \sigma_{\max} = 33,71 \text{ МПа}.$$

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

### **3.7. Расчет контактных напряжений и оценка долговечности головки рельса-струны и сопротивления качению колеса рельсового автомобиля**

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 рельсового автомобиля.

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

$$F_k = 3,05 \cdot (P \cdot r \cdot b / E)^{1/2} = 3,05 \cdot (625 \cdot 20 \cdot 8 / 2.060.000)^{1/2} = 0,672 \text{ см}^2,$$

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

$$\ell_k = 3,05 \cdot (P \cdot r / E \cdot b)^{1/2} = 3,05 \cdot (625 \cdot 20 / 2.060.000 \cdot 8)^{1/2} = 0,084 \text{ см} = 0,84 \text{ мм}.$$

По сравнению с железной дорогой контактные напряжения в паре «колесо — рельс» (они достигают там значений  $20.000 \text{ кгс/см}^2$  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 рельсового автомобиля 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 рельсового автомобиля на плоскую головку рельса СТЮ, дает следующие преимущества:

- даже при уменьшенном в 2 раза диаметре колеса рельсового автомобиля (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 потребную 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 скоростном движении конических колес на железной дороге, но будут отсутствовать в рельсе-струне СТЮ.

### **3.8. Ровность рельсо-струнного пути под колесом рельсового автомобиля**

Из практики, которая затем перешла в нормативы, известно, что для комфортного движения колесного подвижного состава по мостовому сооружению (рельсо-струнная эстакада является разновидностью висячего моста с несущим невитым канатом, зашитым в балку жесткости, т.е. в корпус рельса-струны), относительная неровность пролетного строения (отнесенная к длине пролета) под воздействием расчетной подвижной нагрузки должна быть не более  $1/400$ . Необходимо отметить, что в ряде стран эти нормативы считают слишком жесткими и пытаются увеличить это значение для висячих мостов до  $1/250$ .

Согласно СНиП 2.05.03-84\* «Мосты и трубы» допустимая ровность пути для городских мостов, к которым относится СТЮ в г. Ханты-Мансийске, составляет

1/400 (см. п. 1.43 Норм). Кроме того, нормативы допускают угол перелома в продольном профиле традиционных мостов на участке над опорами, т.е. в зоне температурных швов, до 8‰ при скоростях движения подвижного состава до 100—120 км/ч. Это приводит на традиционных городских мостах и путепроводах к возникновению значительных ударных нагрузок на этих участках, т.е. при переезде колеса через температурный шов.

Колесо рельсового автомобиля (юнибуса) движется по неразрезному гладкому пути, т.е. пути, не имеющему стыков (температурных швов) и точек перегиба. Такое движение будет происходить без ударов и сопровождающих их шумов. При этом радиусы вертикальной кривизны головки рельса под колесом юнибуса на всем протяжении пути будут равны 500—1000 м и более. Минимальные радиусы кривизны будут при максимальной температуре +55 °С, в результате нагрева рельса на солнце, когда рельс-струна меньше всего натянута, и составят величину около 500 м. Причем в середине пролета эта кривизна будет вогнутой, а над опорой — выпуклой. Поэтому при максимальной скорости движения 20 м/с (72 км/час) колесо городского юнибуса на перегоне будет испытывать вертикальные ускорения до  $0,8 \text{ м/с}^2$ , направленные в середине пролета вниз, а над опорами — вверх. Тогда мнение скептиков о том, что в СТЮ при переезде юнибуса через опору пассажиры испытают удар, не соответствует действительности. Наоборот, пассажиры испытывают некоторое плавное уменьшение своего веса (на 1—2%), которое, благодаря наличию мягкой подвески, будет в 3—5 раз ниже, чем на колесе, т.к. вертикальные ускорения в пассажирском салоне будут в пределах  $0,1—0,2 \text{ м/с}^2$ . Это настолько низкие ускорения, что не будут ощущаться пассажирами. Например, в поезде на магнитном подвесе «Трансрапид», Германия, в пассажирском салоне вагона допустимы вертикальные ускорения до  $3 \text{ м/с}^2$ , т.е. в 15—30 раз более высокие (а ведь многие считают «Трансрапид» верхом совершенства).

Путь в СТЮ, при необходимости, еще на стадии строительства, может быть выполнен с еще более высокой относительной ровностью и радиусами кривизны, соответственно, менее 1/1000 и более 1000 м. Для этого необходимо корпус рельса зафиксировать относительно струны со строительным подъемом, т.е. с выгибом вверх на 50—60 мм в середине пролета. Строительный подъем, значение которого будет находиться между максимальным прогибом пути летом в 73,2 мм (при +55 °С) и

минимальным прогибом зимой в 38,8 мм (при  $-55\text{ C}$ ), снизит абсолютные неровности пути на пролете, обусловленные его деформативностью под воздействием расчетной подвижной нагрузки, до 15—20 мм, а относительные — до 1/1500—1/2000.

## 4. Графические результаты расчетов

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

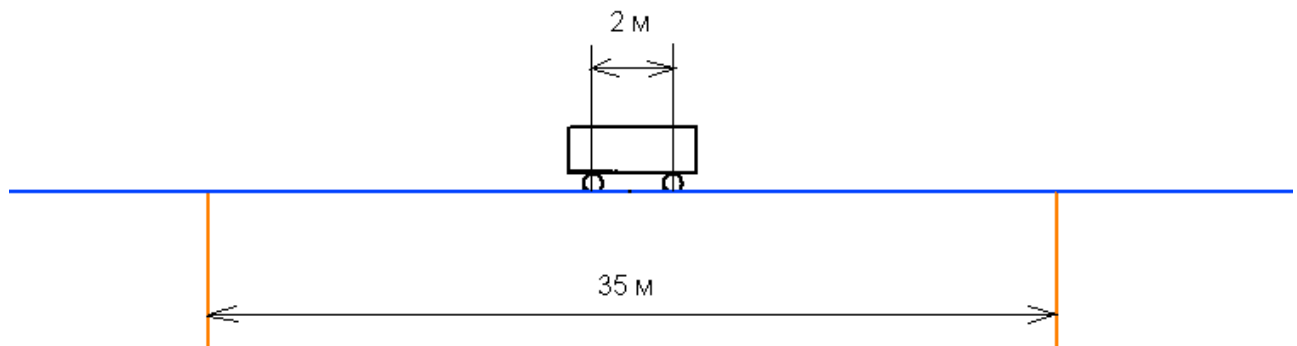


Рис. 4.1.1. Рельсовый автомобиль располагается в середине пролета



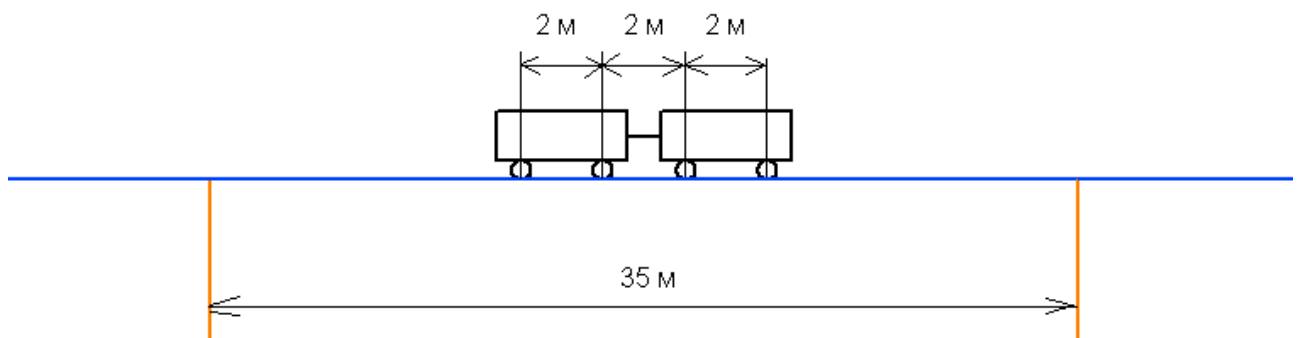


Рис 4.1.2. Два рельсовых автомобиля располагаются в середине пролета

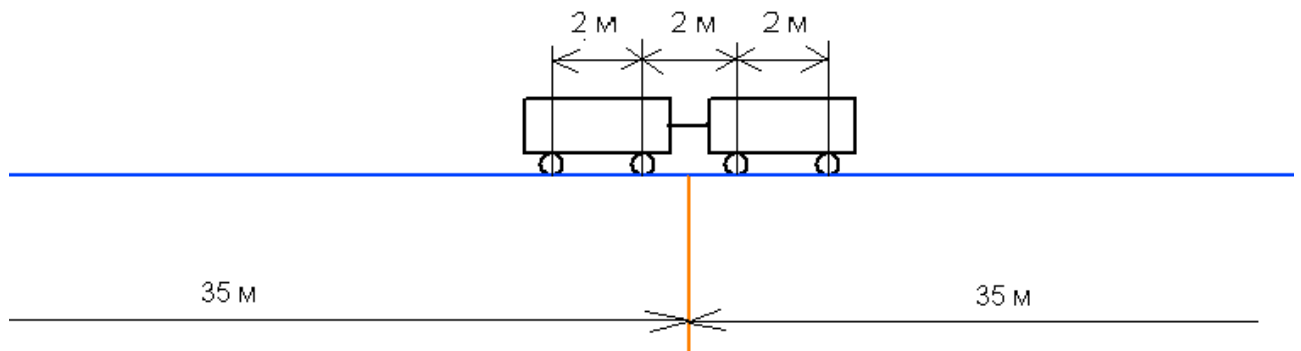


Рис. 4.1.3. Два рельсовых автомобиля располагаются симметрично над промежуточной опорой

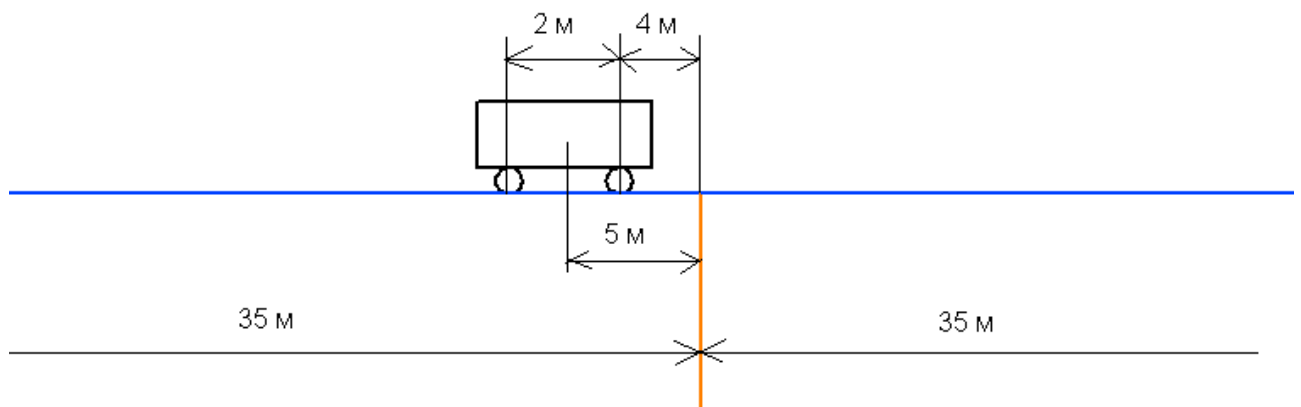


Рис. 4.1.4. Рельсовый автомобиль располагается по одну сторону от промежуточной опоры на расстоянии 5,0 м, считая то центра тяжести рельсового автомобиля (4,0 м от опоры до ближайшего колеса)

## 4.2. Эпюры продольных сил в струне

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

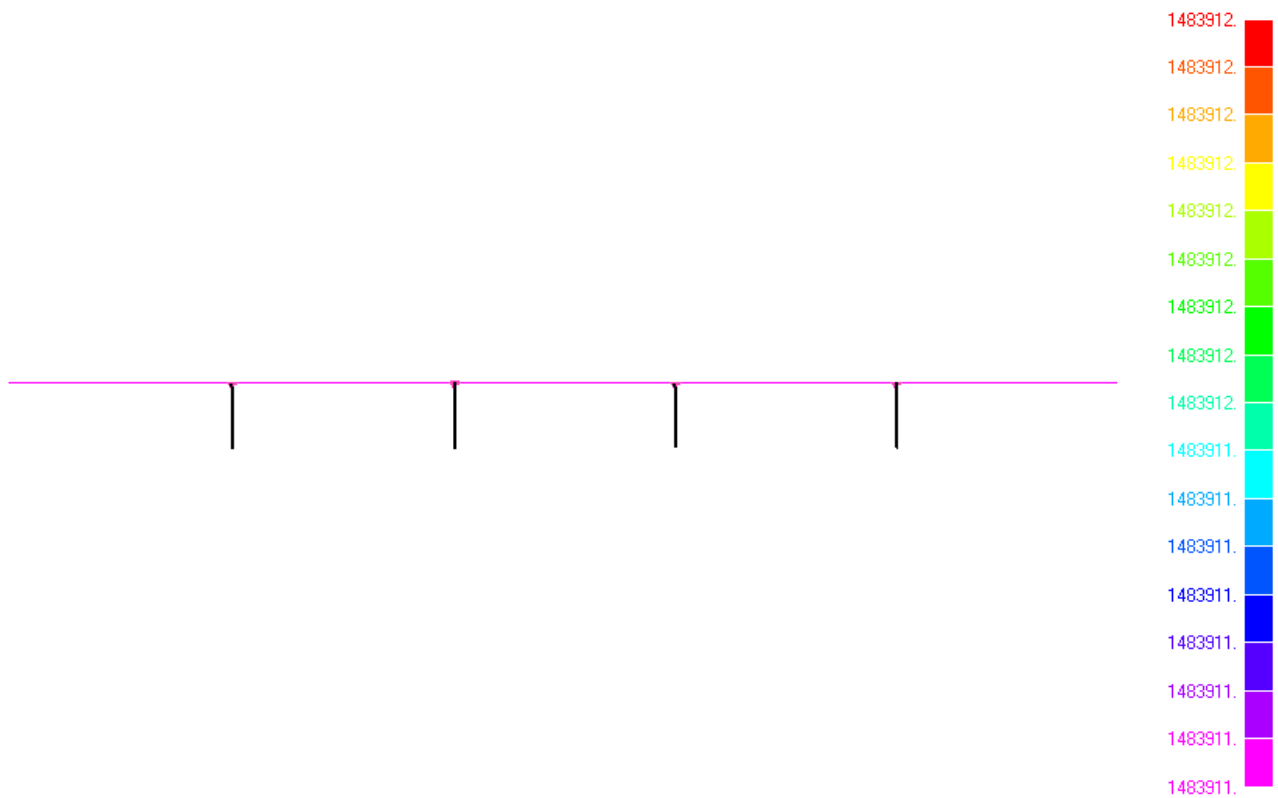


Рис. 4.2.1.1. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и без учета сил тяжести остальных элементов путевой структуры при температуре 0 °С (температура сборки)

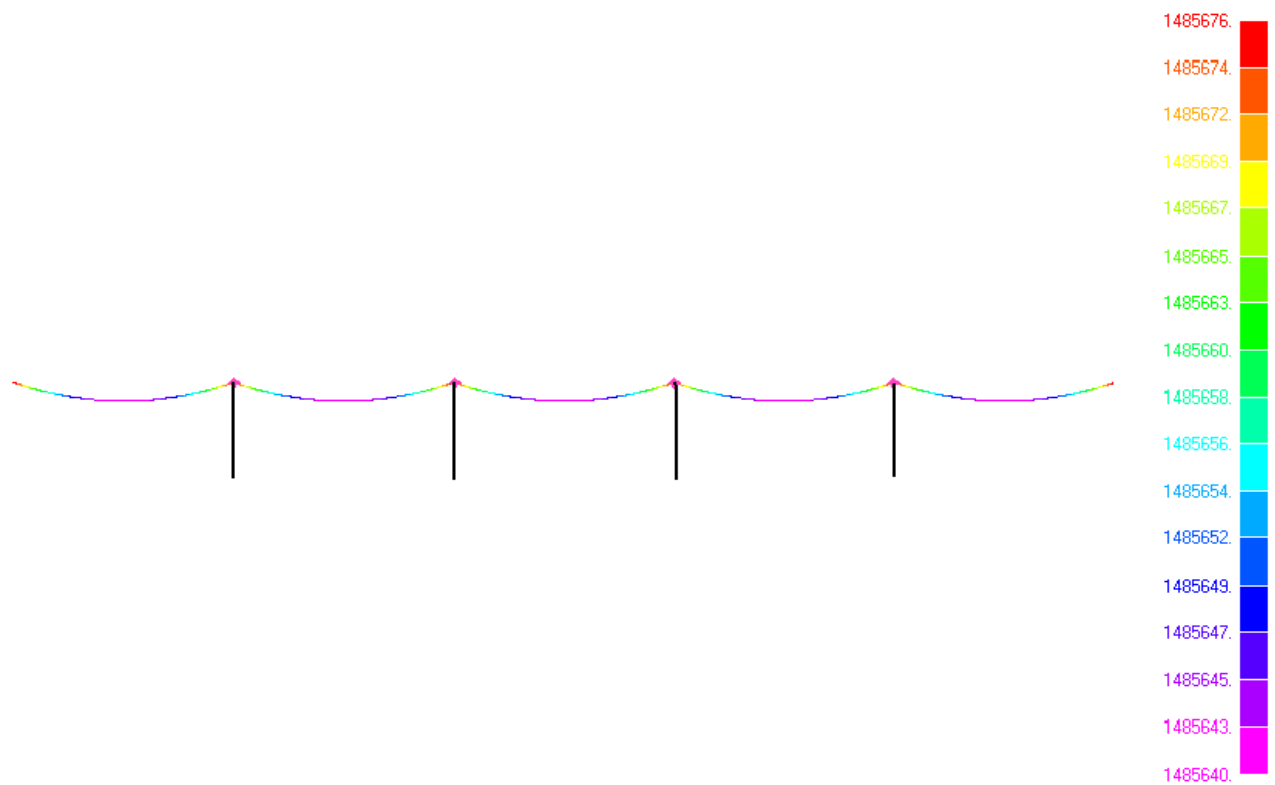


Рис. 4.2.1.2. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и с учетом сил тяжести всей путевой структуры при температуре 0 °С (температура сборки)

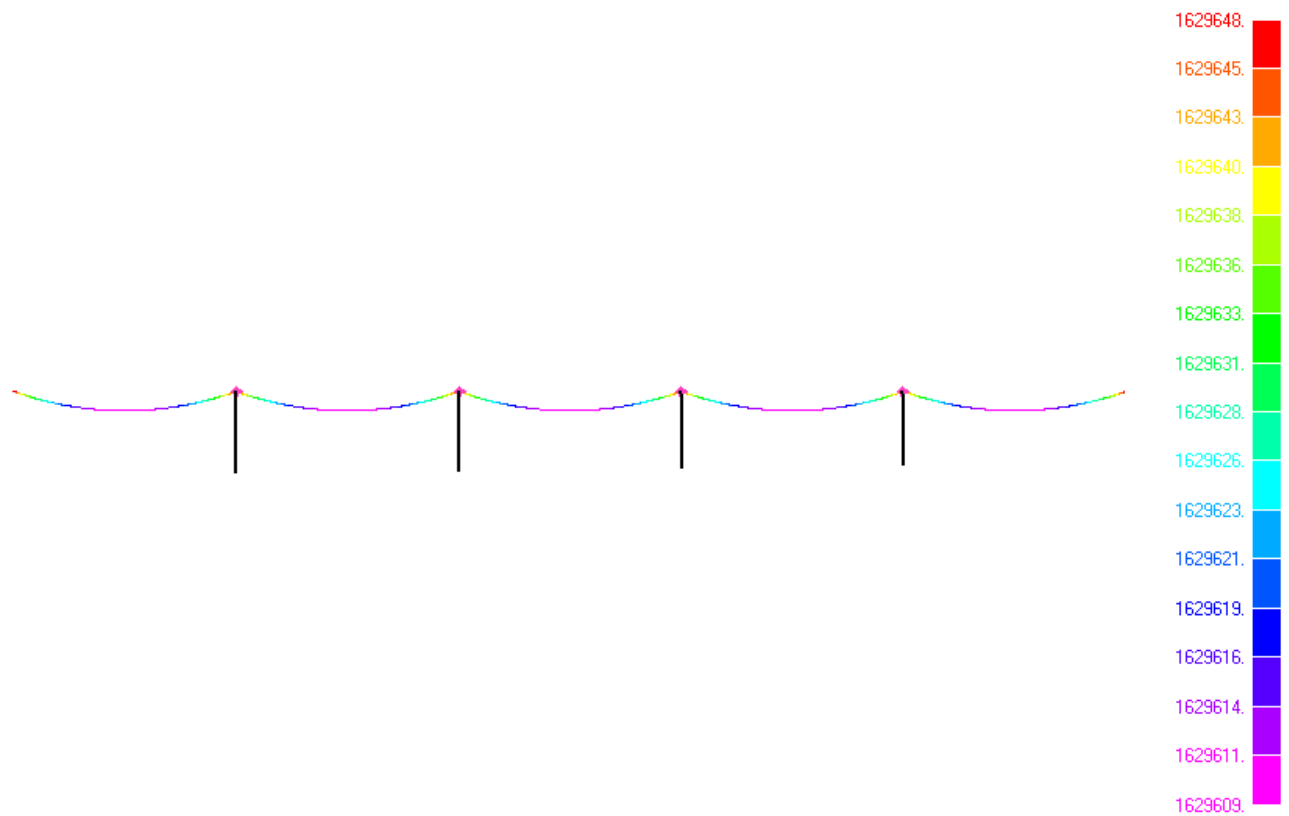


Рис. 4.2.1.3. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и с учетом сил тяжести путевой структуры при температуре  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$



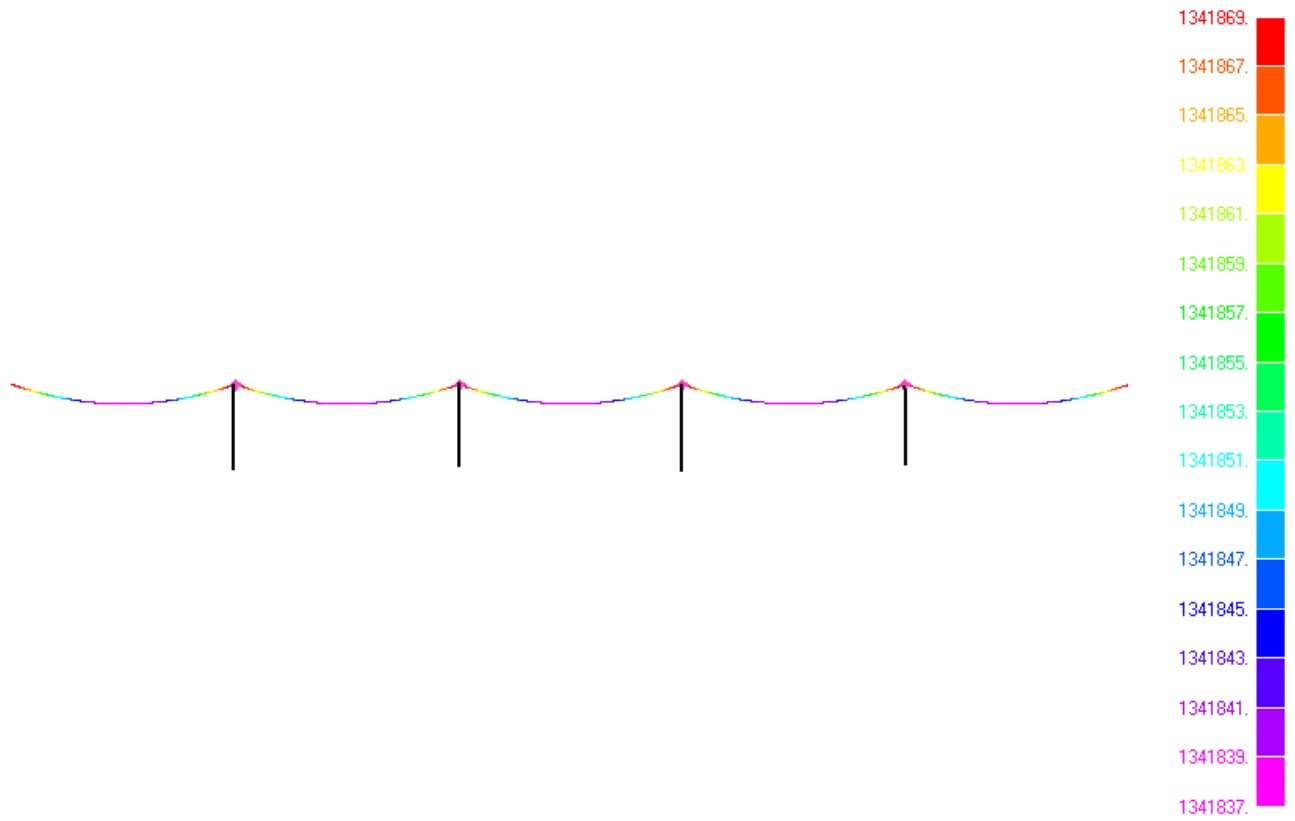


Рис. 4.2.1.4. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и с учетом сил тяжести путевой структуры при температуре +55 °С

#### 4.2.2. Эпюры продольных сил в струне, вызванных весом рельса-струны и весом двух рельсовых автомобилей

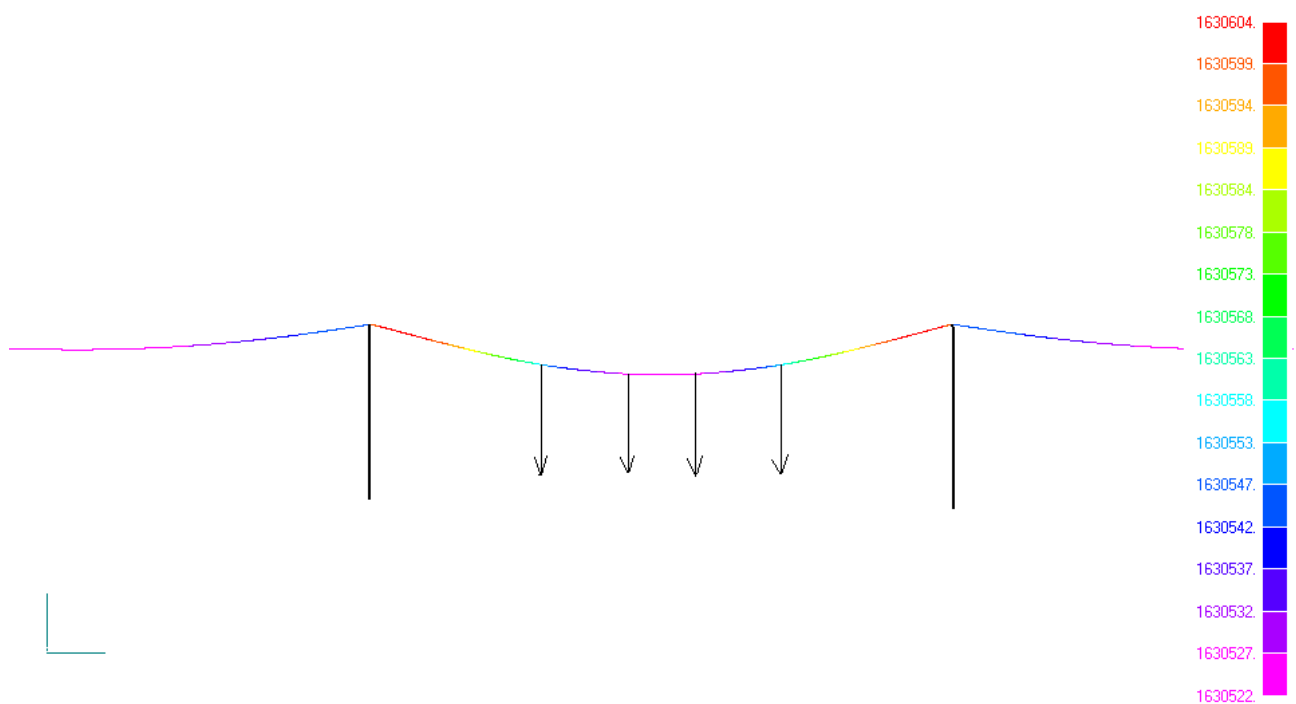


Рис. 4.2.2.1. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и с учетом сил тяжести путевой структуры и двух рельсовых автомобилей, расположенных в середине пролета (см. п. 4.1, рис. 4.1.2) при температуре  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

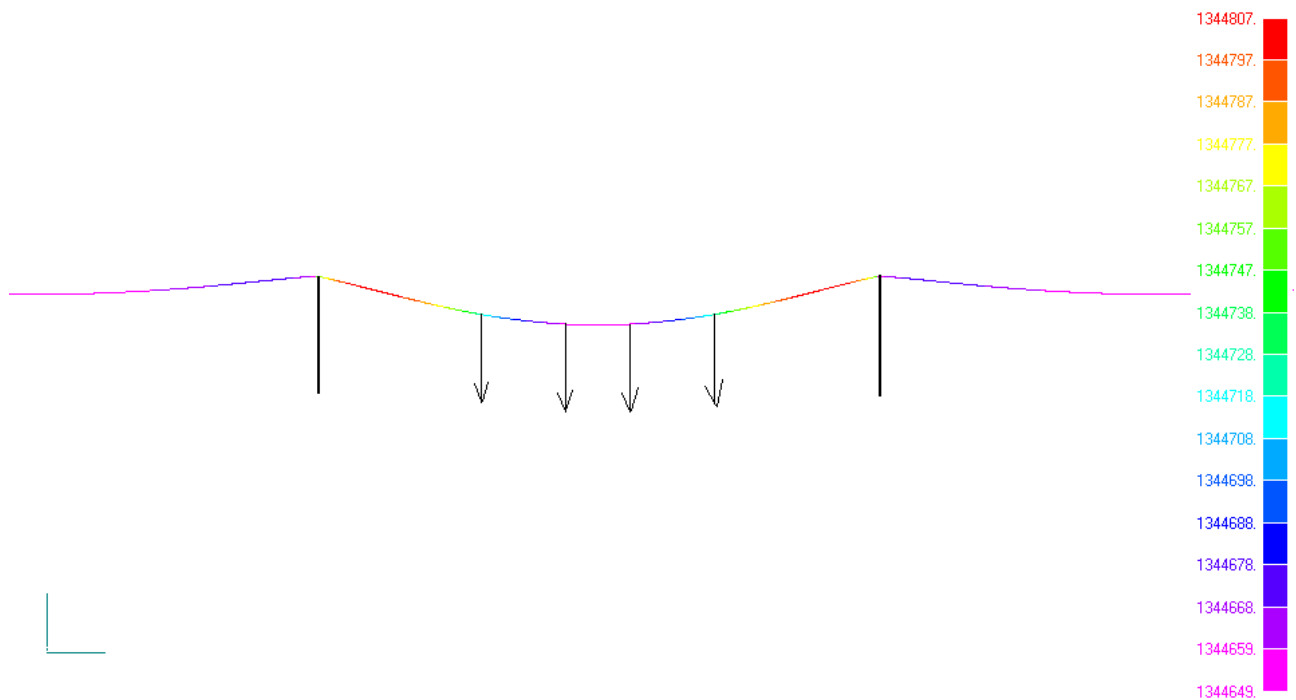


Рис. 4.2.2.2. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и с учетом сил тяжести  
путевой структуры и двух рельсовых автомобилей, расположенных в середине пролета  
(см. п. 4.1, рис. 4.1.2) при температуре +55 °С

### 4.3. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в рельсе-струне

#### 4.3.1. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в рельсе-струне, вызванных собственным весом

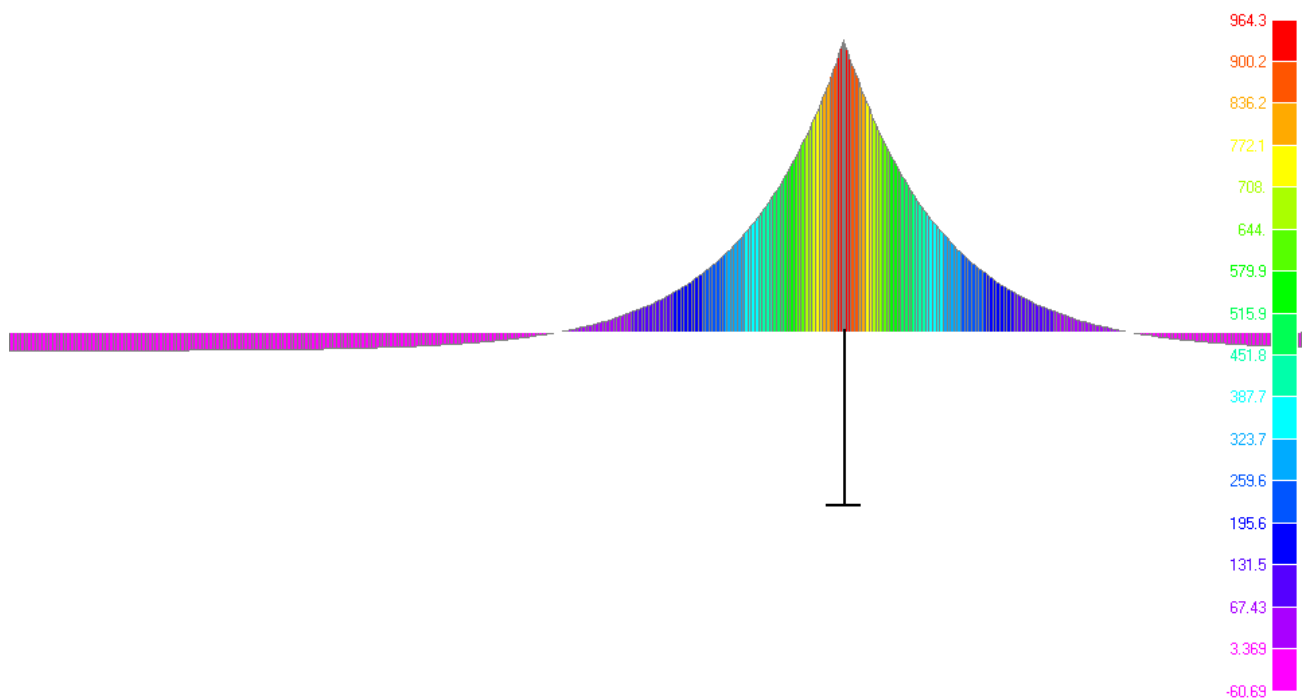


Рис. 4.3.1.1. Эпюра изгибающих моментов (Н×м) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

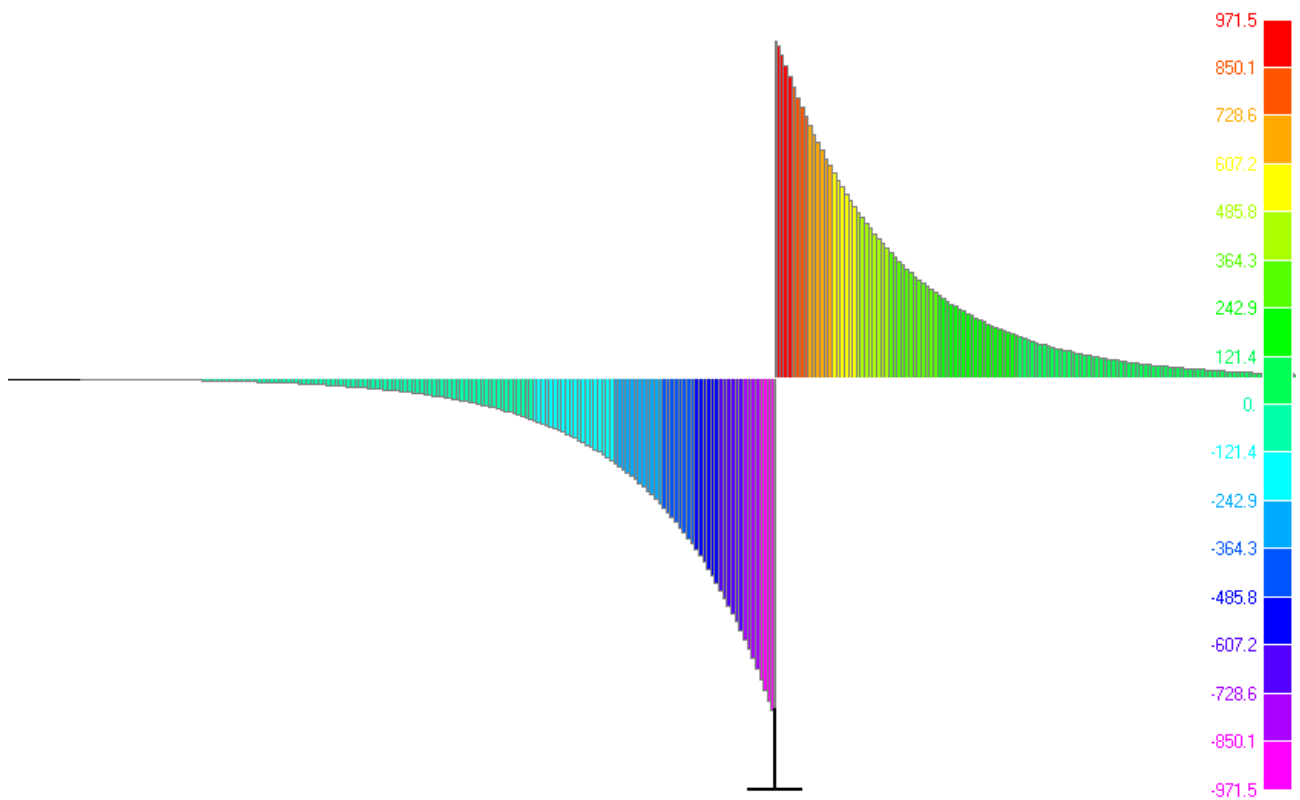


Рис. 4.3.1.2. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

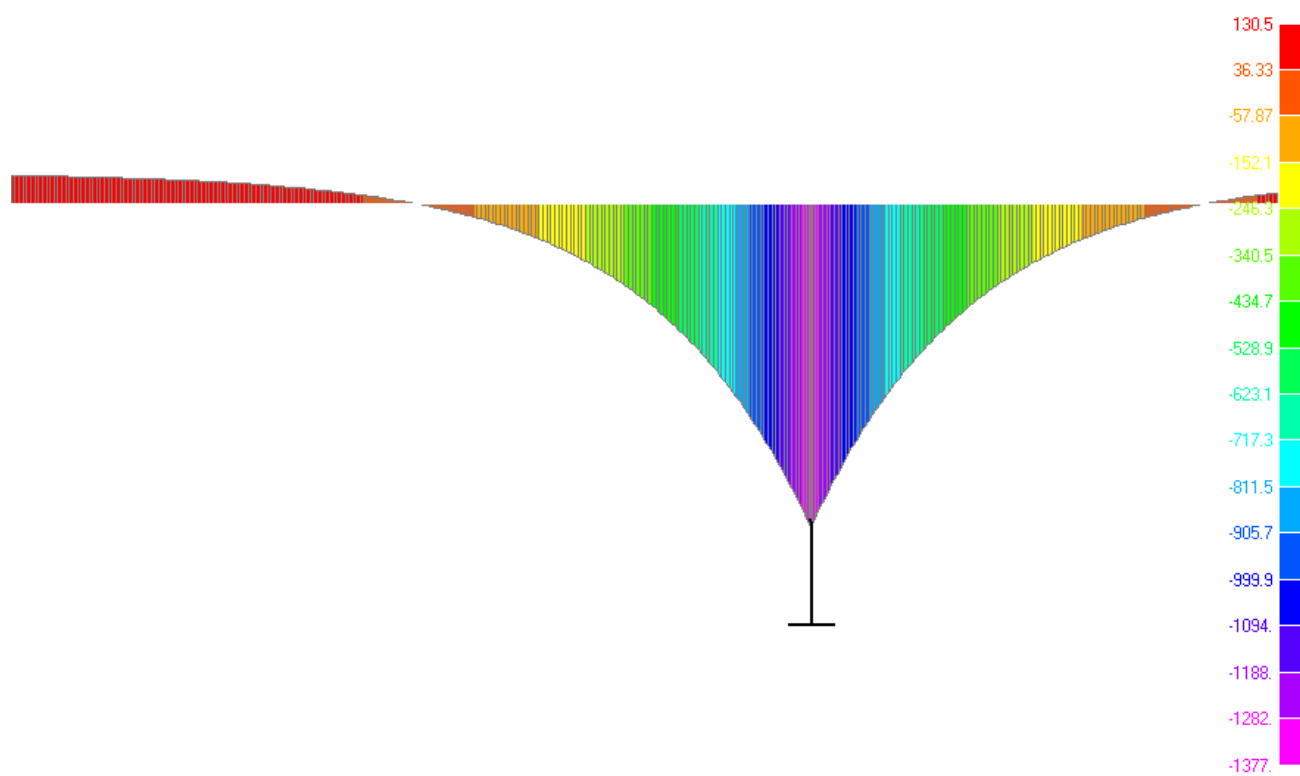


Рис. 4.3.1.3. Эпюра изгибающих моментов (Н×м) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны при +55 °С

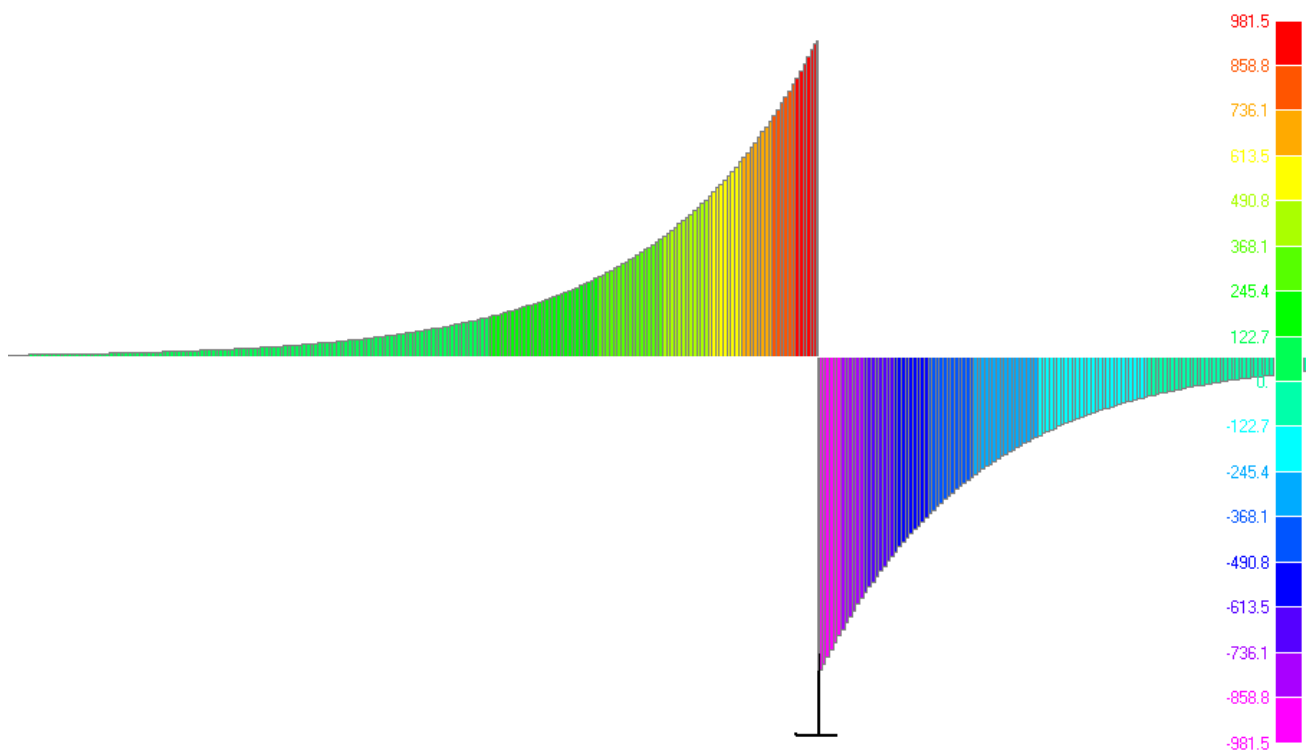


Рис. 4.3.1.4. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны при +55 °С

4.3.2. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в рельсе-струне от собственного веса путевой структуры и сцепки из двух рельсовых автомобилей (для расчета прочности рельса-струны)

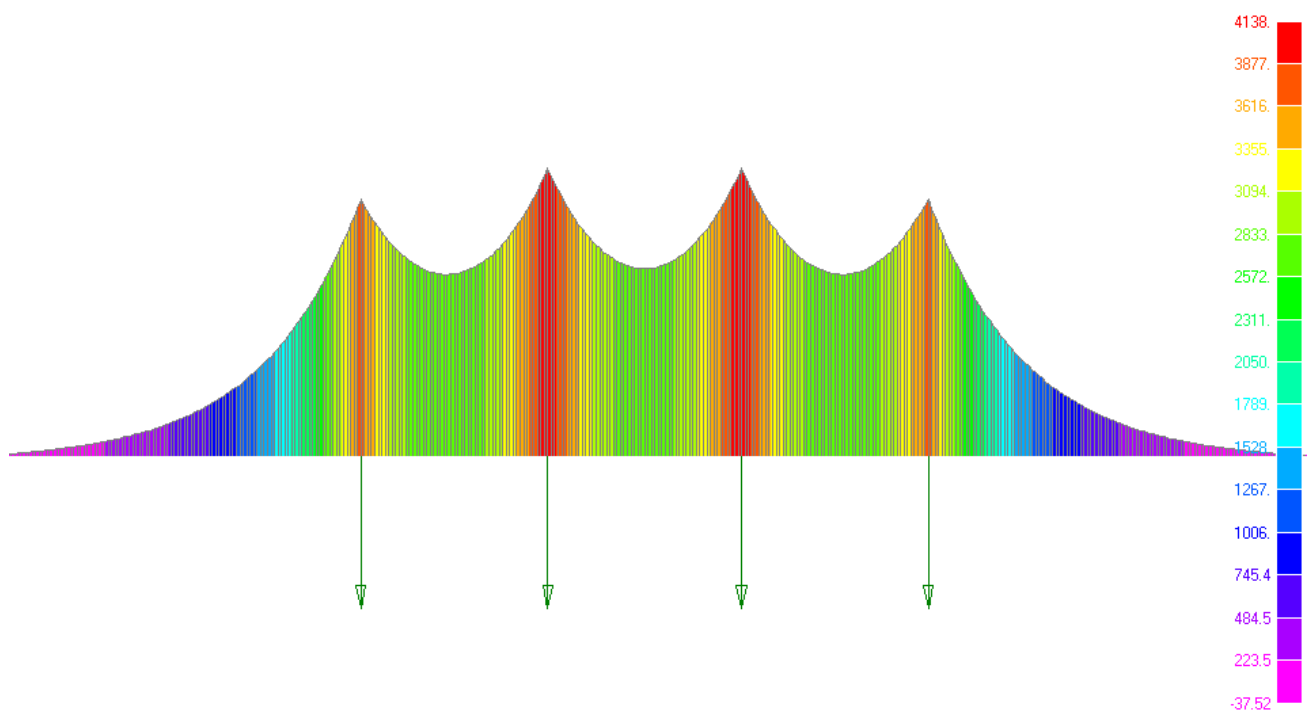


Рис. 4.3.2.1. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{H}\times\text{м}$ ) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и двух рельсовых автомобилей, размещенных в середине пролета при  $-55\text{ }^\circ\text{C}$



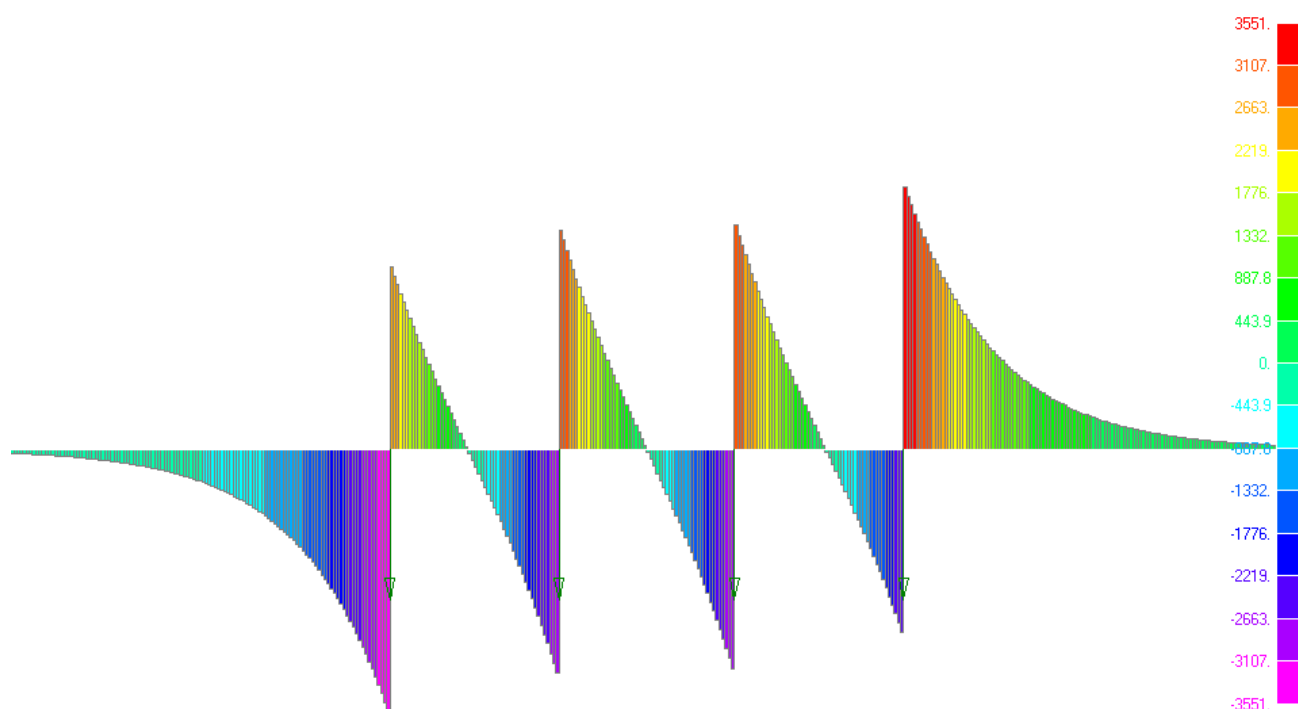


Рис. 4.3.2.2. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух рельсовых автомобилей, размещенных в середины пролета при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

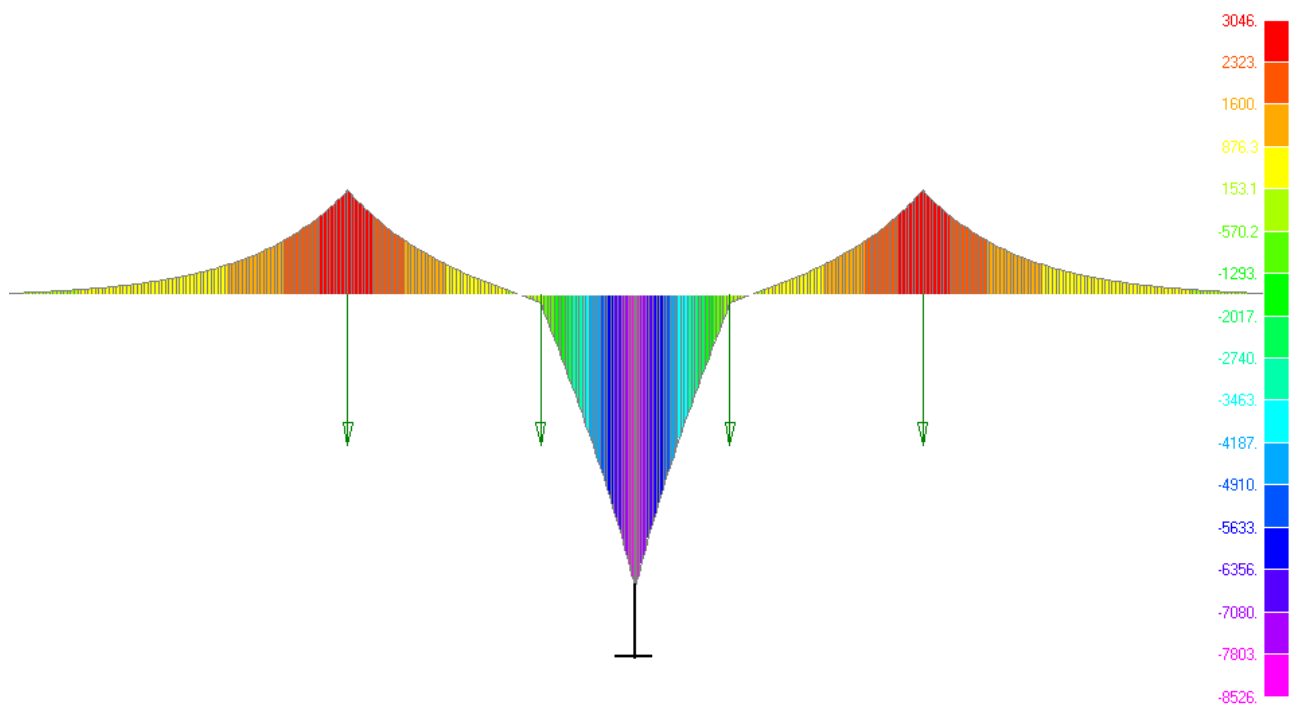


Рис. 4.3.2.3. Эпюра изгибающих моментов (Н×м) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и двух рельсовых автомобилей, размещенных симметрично на промежуточной опоре при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

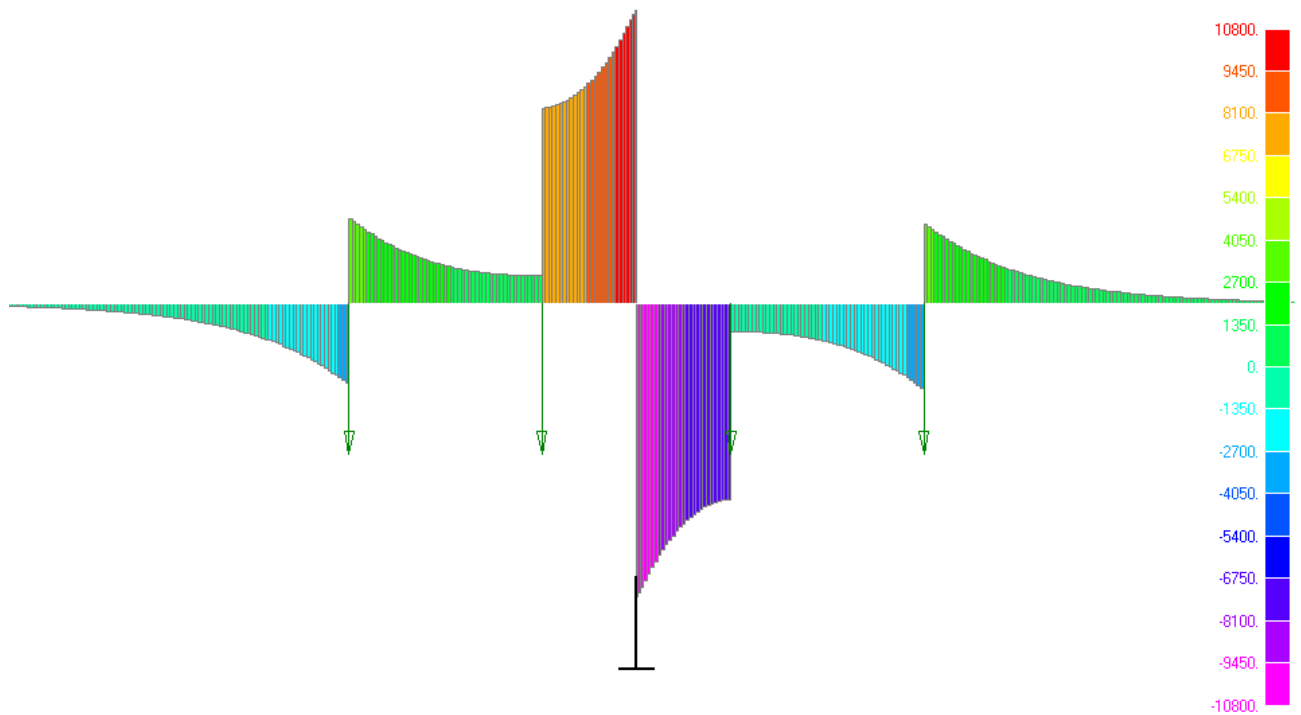


Рис. 4.3.2.4. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух рельсовых автомобилей, размещенных симметрично на промежуточной опоре при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

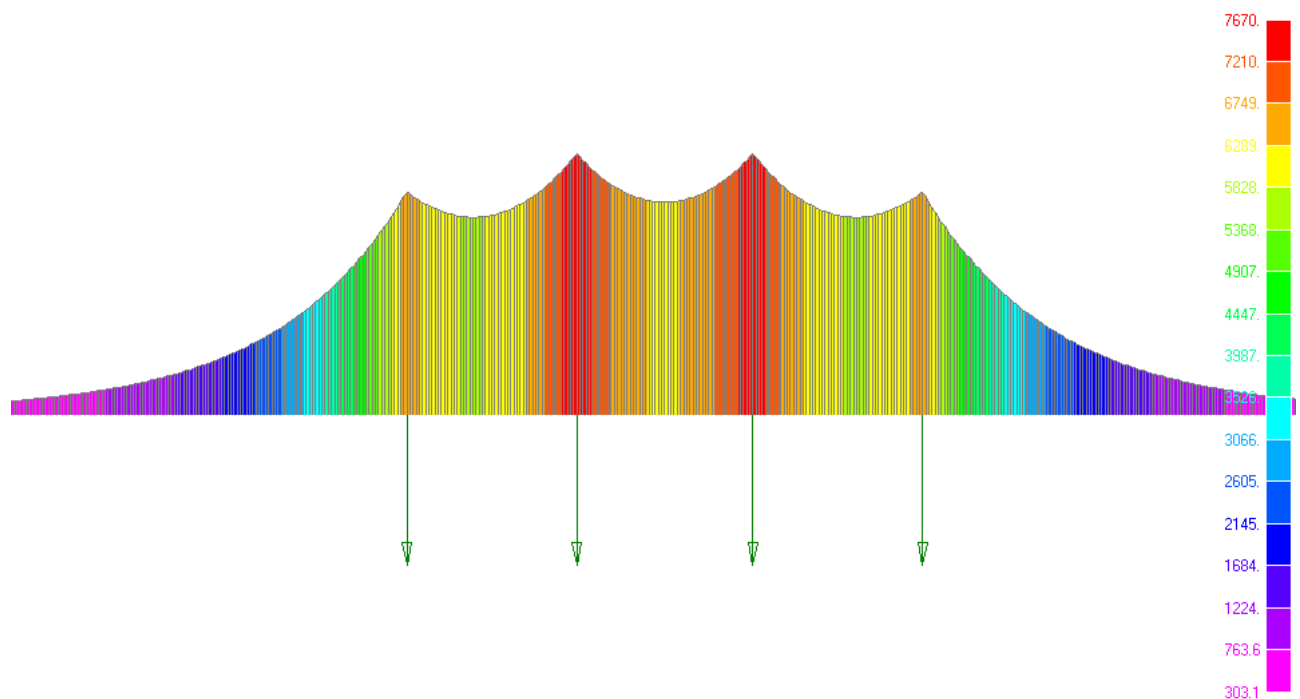


Рис. 4.3.2.5. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{H}\times\text{м}$ ) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и двух рельсовых автомобилей, размещенных в середине пролета при  $+55\text{ }^\circ\text{C}$

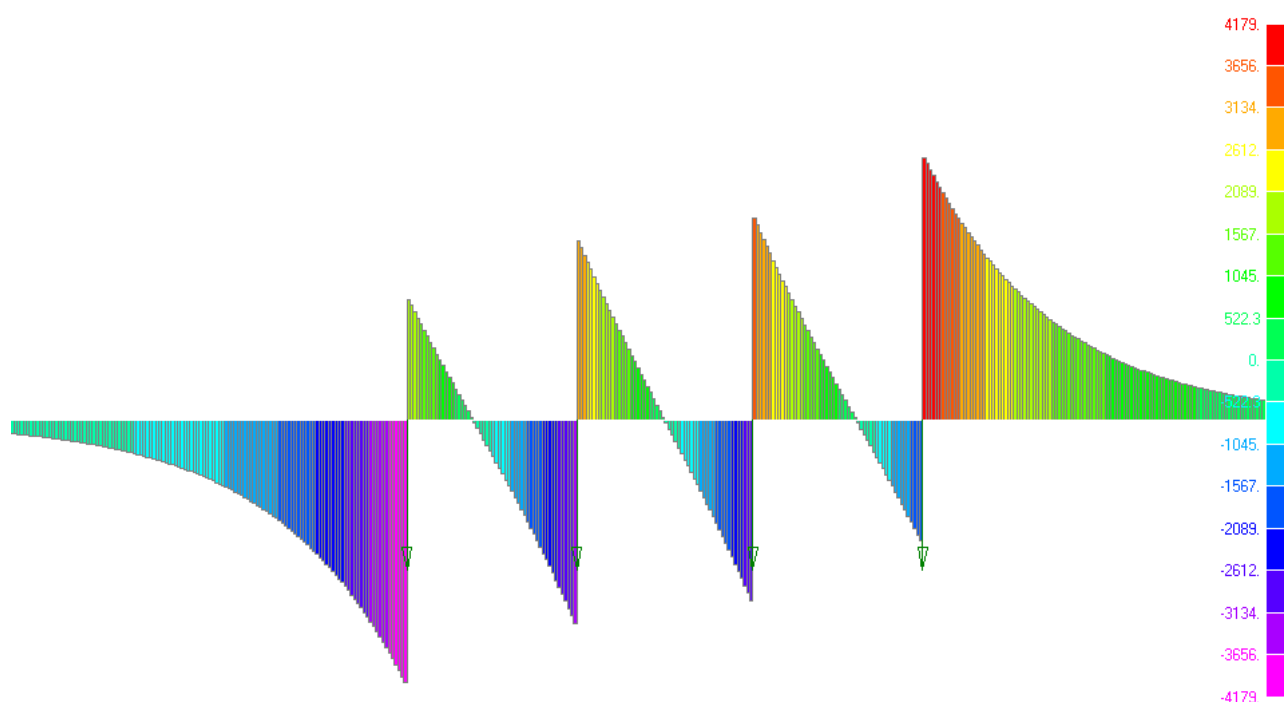


Рис. 4.3.2.6. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух рельсовых автомобилей, размещенных в середине пролета при +55 °С

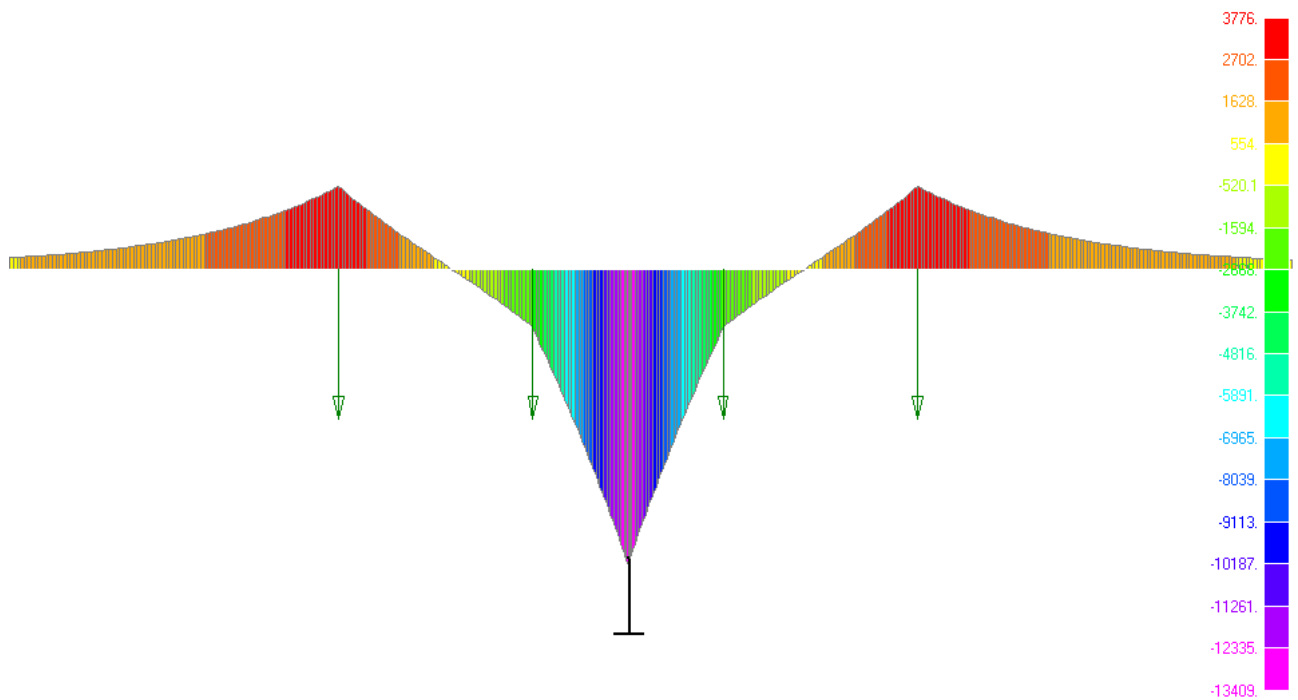


Рис. 4.3.2.7. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{H}\times\text{м}$ ) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и двух рельсовых автомобилей, размещенных симметрично на промежуточной опоре при  $+55\text{ }^\circ\text{C}$

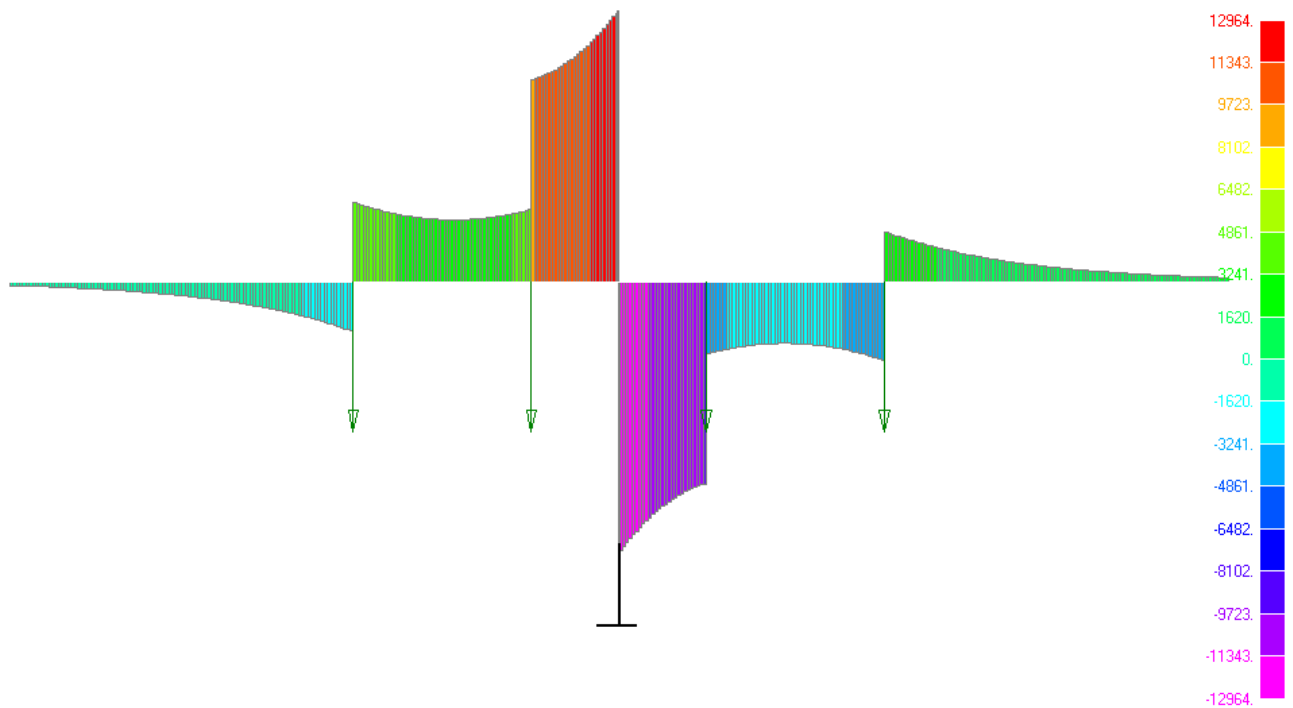


Рис. 4.3.2.8. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух рельсовых автомобилей, размещенных симметрично на промежуточной опоре при +55 °С

4.3.3. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в рельсе-струне от собственного веса путевой структуры и одного рельсового автомобиля (для расчета выносливости рельса-струны)

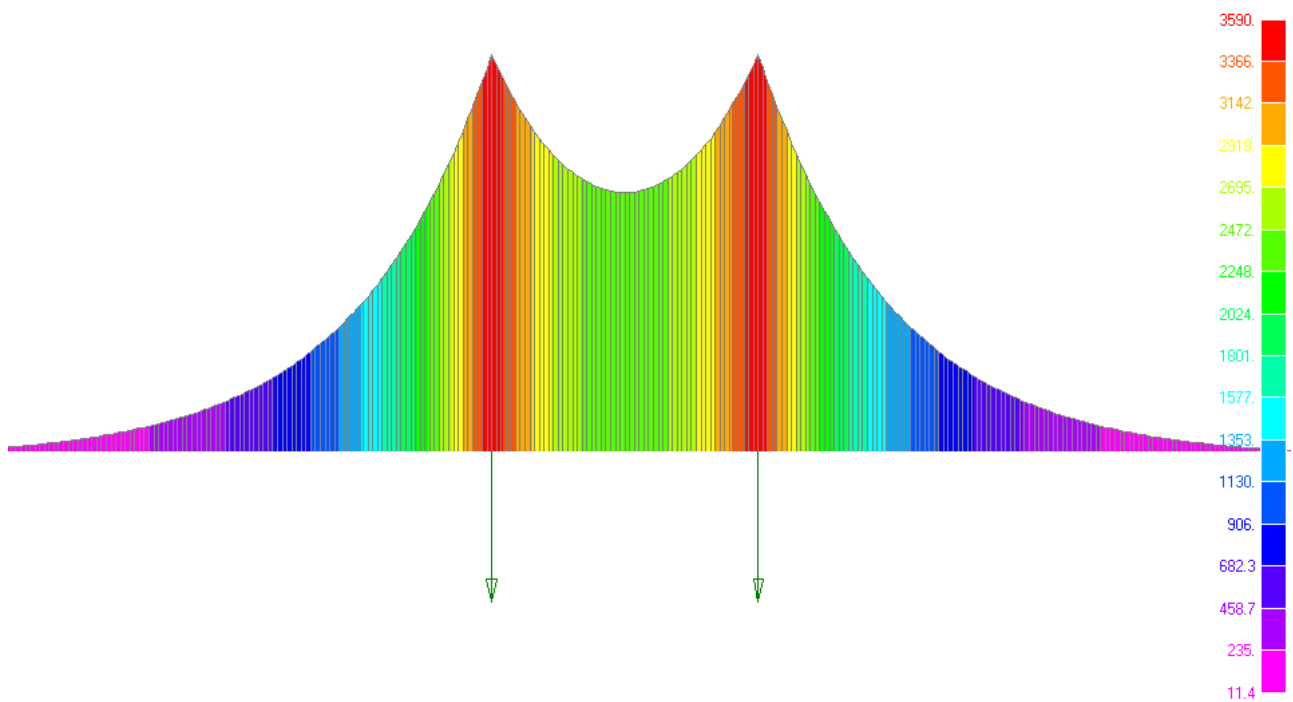


Рис. 4.3.3.1. Эпюра изгибающих моментов (Н×м) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и одного рельсового автомобиля, размещенного в середине пролета при  $-55^{\circ}\text{C}$



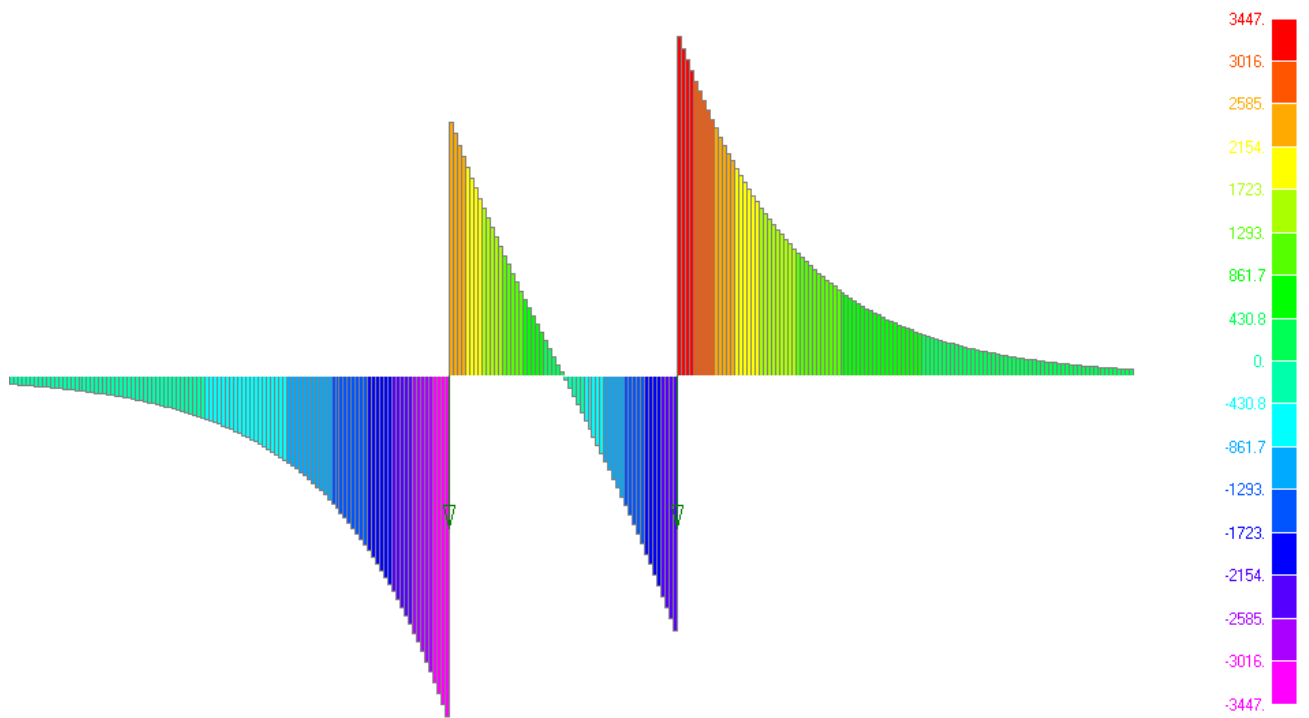


Рис. 4.3.3.2. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного рельсового автомобиля, размещенного в середине пролета при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

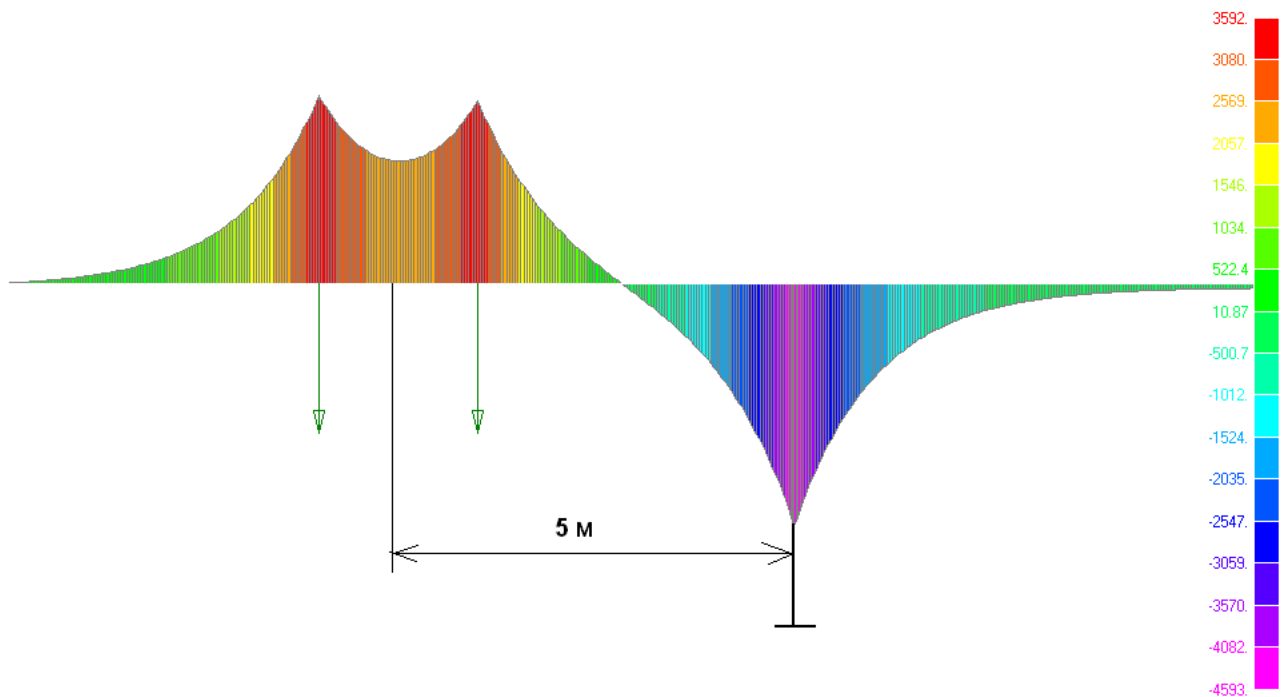


Рис. 4.3.3.3. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{H}\times\text{м}$ ) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и одного рельсового автомобиля, размещенного на расстоянии 5,0 м от промежуточной опоры при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

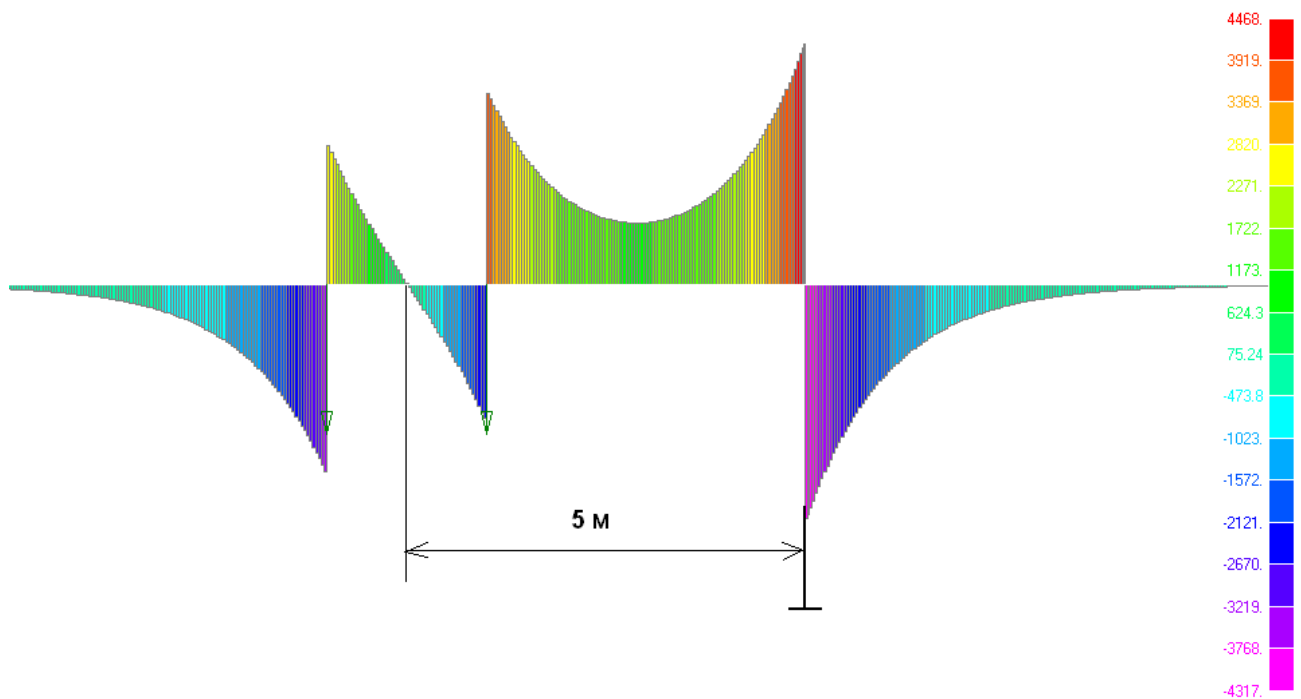


Рис. 4.3.3.4. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельсе от собственного веса рельса-струны и одного рельсового автомобиля, размещенного на расстоянии 5,0 м от промежуточной опоры при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$

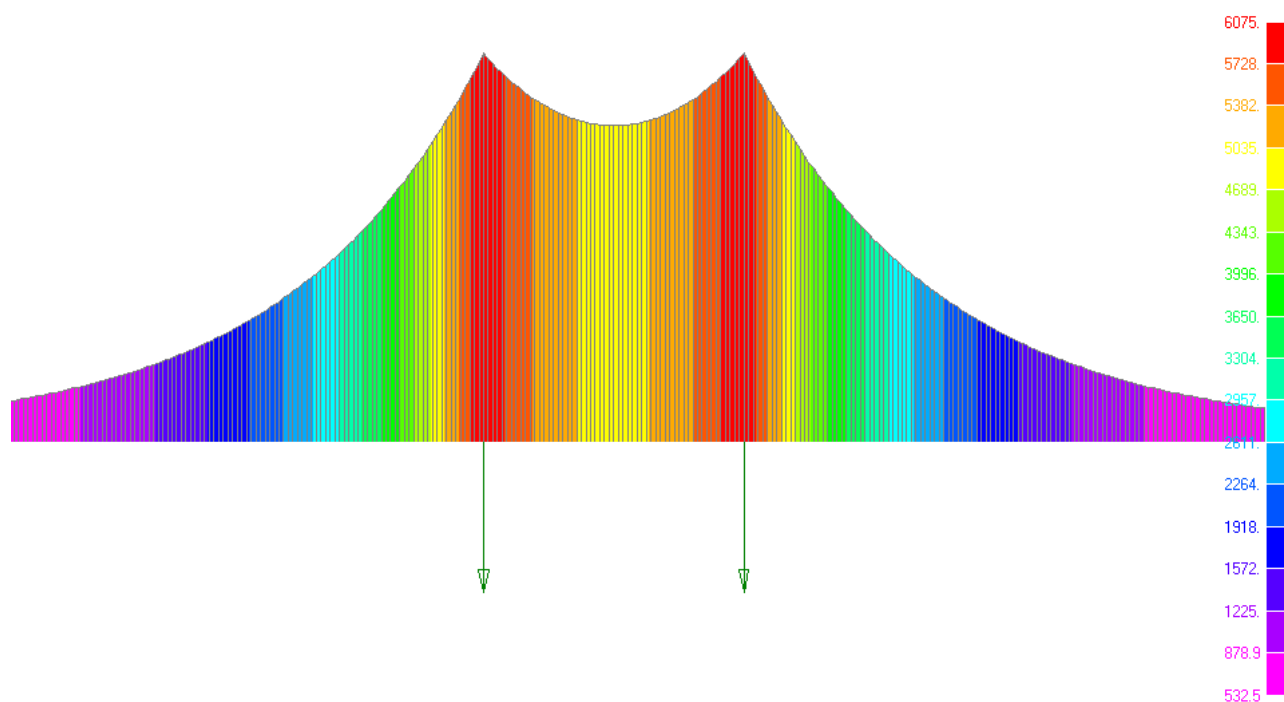


Рис. 4.3.3.5. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{H}\times\text{м}$ ) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и одного рельсового автомобиля, размещенного в середине пролета при  $+55\text{ }^\circ\text{C}$

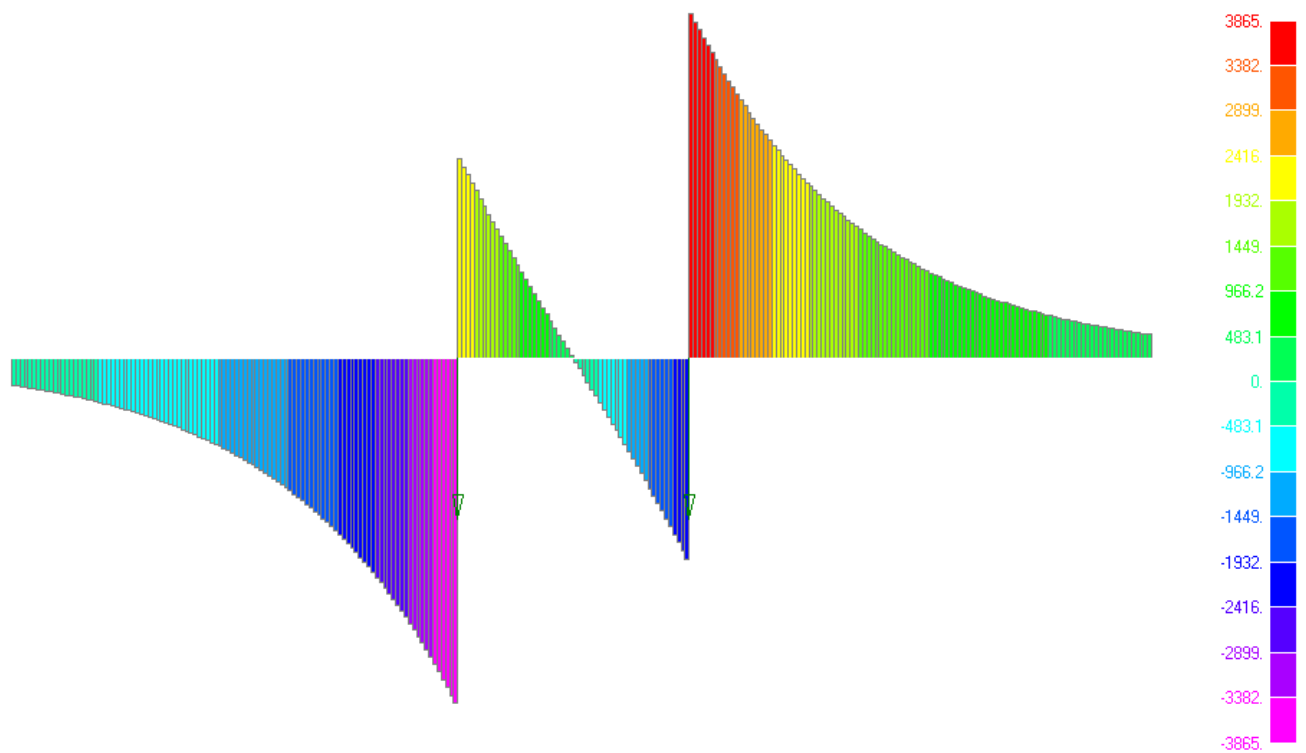


Рис. 4.3.3.6. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного рельсового автомобиля, размещенного в середине пролета при +55 °С

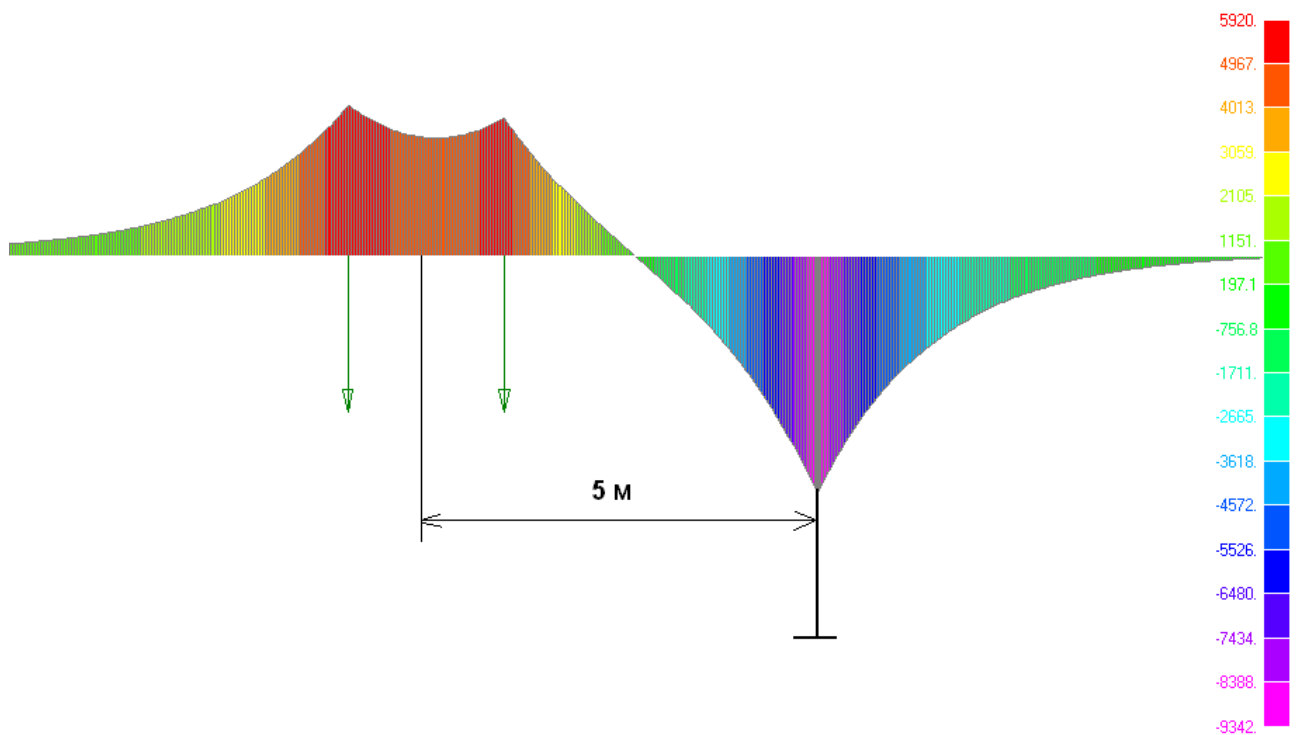


Рис. 4.3.3.7. Эпюра изгибающих моментов ( $\text{H}\cdot\text{м}$ ) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и одного рельсового автомобиля, размещенного на расстоянии 5,0 м от промежуточной опоры при  $+55^\circ\text{C}$

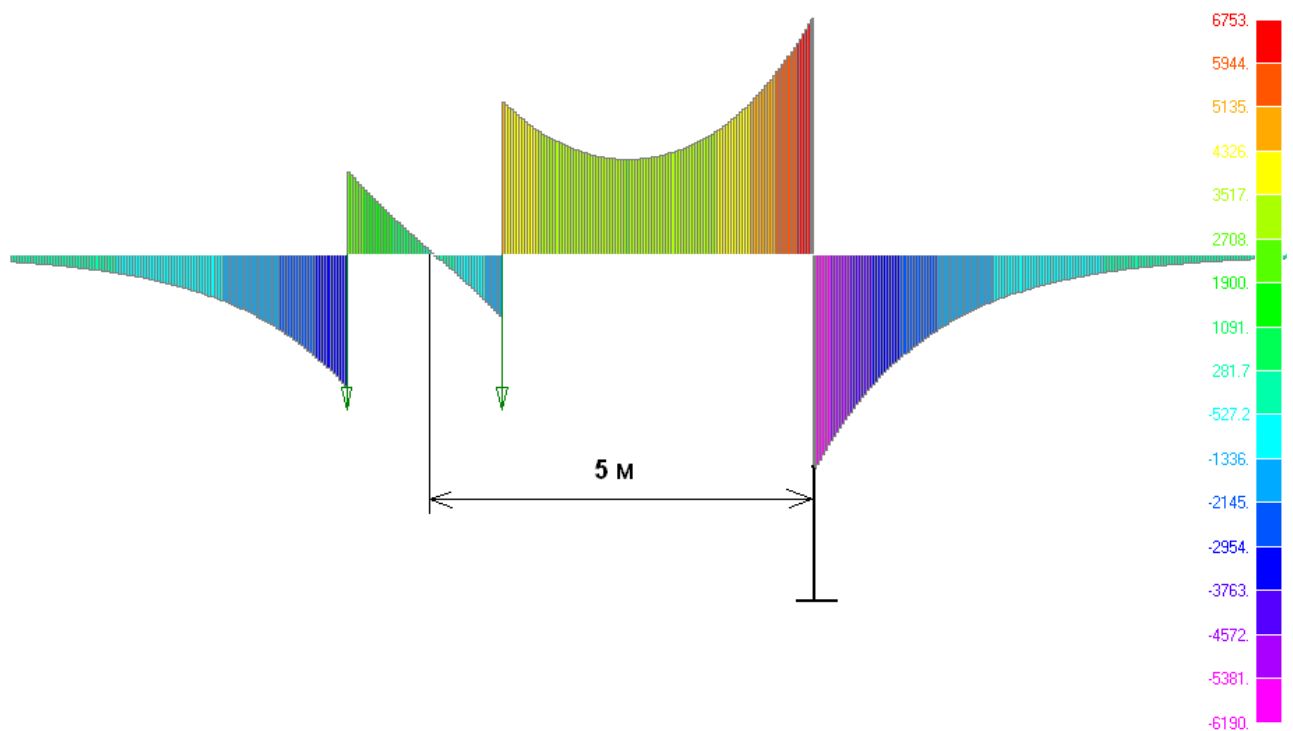


Рис. 4.3.3.8. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного рельсового автомобиля, размещенного на расстоянии 5,0 м от промежуточной опоры при +55 °С

#### 4.4. Анализ наиболее опасных положений рельсовых автомобилей на пролете из условия обеспечения прочности рельса-струны на промежуточной опоре

Схема размещения сцепки двух рельсовых автомобилей на пролете показана на рис. 4.4.1, а значения изгибающих моментов — на рис. 4.4.2.

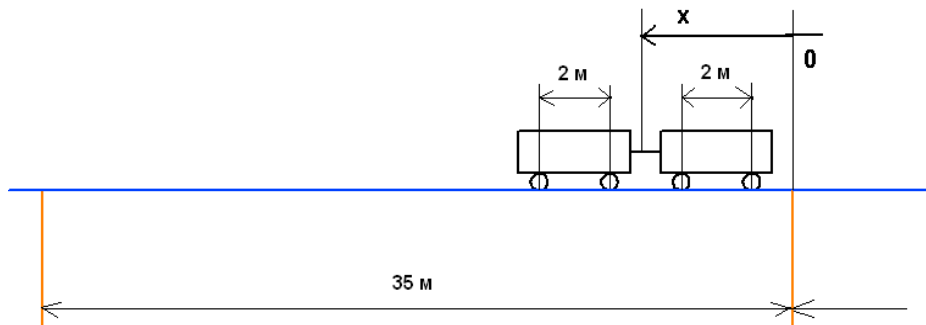


Рис. 4.4.1. Координаты расположения двух рельсовых автомобилей на пролете (для расчета на прочность рельса-струны)

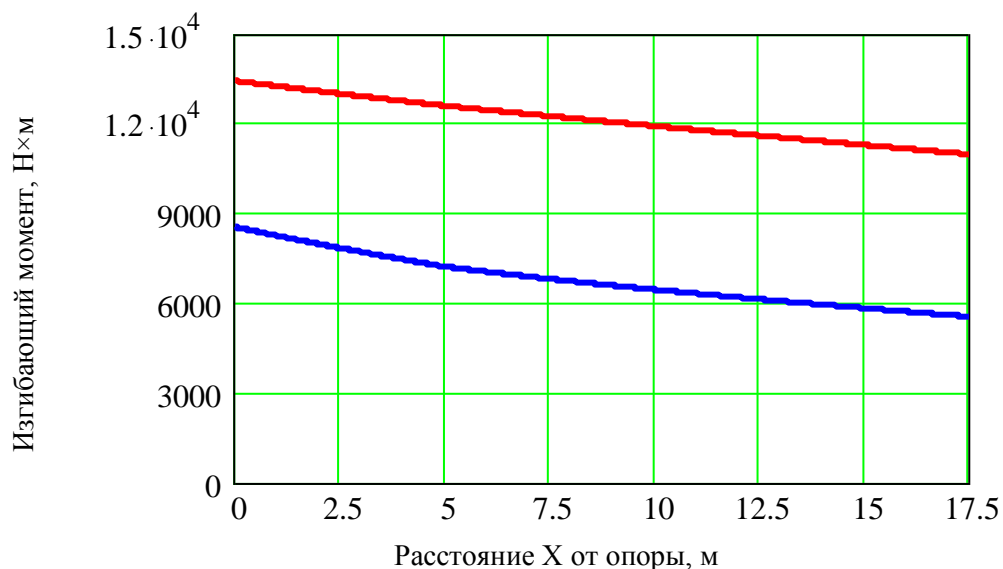


Рис. 4.4.2. Изменение величины изгибающего момента (Н×м) в сечении рельса-струны над промежуточной опорой в зависимости от расстояния (метры) до опоры при движении по пролету двух рельсовых автомобилей в сцепке (см. рис. 4.4.1):  
зимой: при  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ : --- летом: при  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ : ----



**Выводы:** Из графиков на рис. 4.4.2 следует, что при движении по пролету с шарнирным закреплением рельса-струны на промежуточной опоре двух рельсовых автомобилей в сцепке, максимум изгибающего момента в рельсе-струне (в его сечении над опорой) достигается при  $X = 0$  м, считая от центра тяжести сцепки, т.е. при нахождении сцепки рельсовых автомобилей над опорой, симметрично относительно нее, как для температуры  $+55$  °С, так и для  $-55$  °С.

Схема размещения одного рельсового автомобиля на пролете показана на рис. 4.4.3, а значения изгибающих моментов — на рис. 4.4.4.

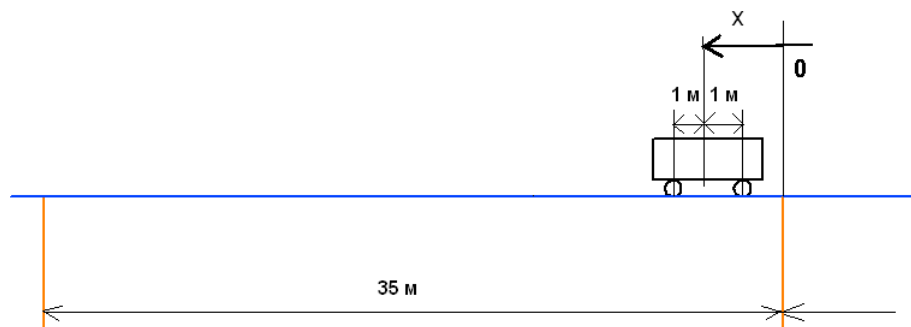


Рис. 4.4.3. Координаты расположения одного рельсового автомобиля на пролете (для расчета на выносливость рельса-струны)

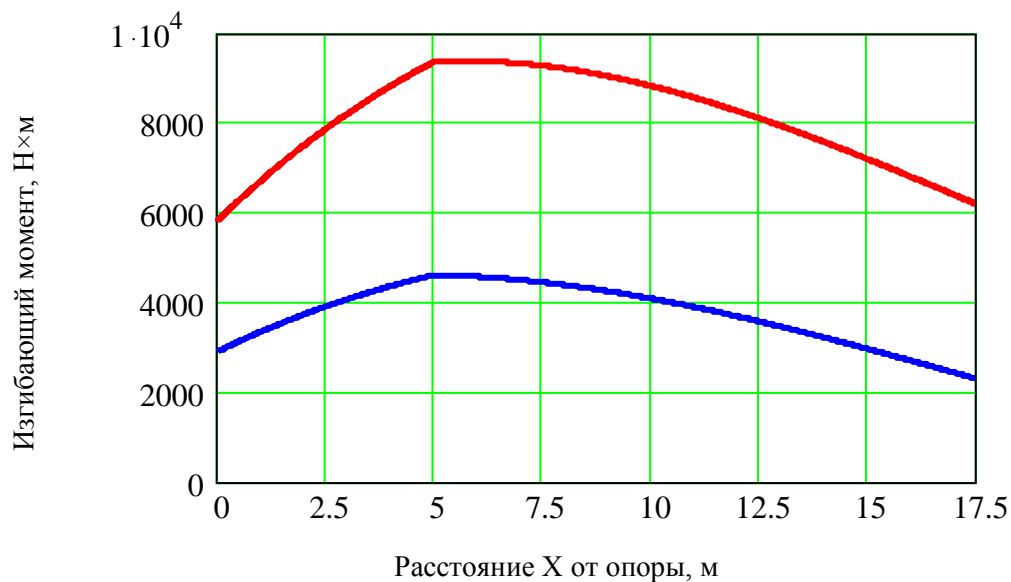


Рис. 4.4.4. Изменение величины изгибающего момента ( $\text{N} \cdot \text{m}$ ) в сечении рельса-струны над промежуточной опорой в зависимости от расстояния (метры) до опоры при движении по пролету одного рельсового автомобиля (см. рис. 4.4.3):  
зимой: при  $-55$  °С: ---- летом: при  $+55$  °С: ----

**Выводы:** Из графиков на рис. 4.4.4. следует, что при движении одного рельсового автомобиля по пролету с шарнирным закреплением рельса-струны на промежуточной опоре, максимум изгибающего момента в рельсе-струне (в его сечении над опорой) достигается при  $X = 5,0$  м, считая от его центра тяжести, или на расстоянии 4,0 м от опоры до ближнего колеса рельсового автомобиля, как для температуры  $+55$  °С, так и для  $-55$  °С.

#### 4.5. 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. 4.5.1—4.5.5.

Таблица 4.5.1

Расчет прочности струн от воздействия двух рельсовых автомобилей весом 2,5 тс каждый (цепка рельсовых автомобилей — в середине пролета, напряжения — над опорой)

№	Описание расчетного элемента	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	Струна	1400	1,44	1,87	135,96	-135,96	0,91	0	2,78	0	1538,31	1537,4	1268,69	1265,91

Таблица 4.5.2

Расчет прочности головки рельса и корпуса рельса  
от воздействия двух рельсовых автомобилей весом 2,5 тс каждый  
(сцепка рельсовых автомобилей — в середине пролета, напряжения — под колесом)

№	Описание расчетной точки	Напряжения в МПа												
		Предварительное напряжение (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	120	0,26	-0,54	135,96	-135,96	0	-17,42	0	-30,28	256,22	238,8	-16,5	-46,78
2	Низ корпуса рельса	120	-0,49	1,07	135,96	-135,96	34,33	0	62,63	0	289,8	255,47	47,74	-14,89

Расчет прочности головки рельса и корпуса рельса  
от воздействия двух рельсовых автомобилей весом 2,5 тс каждый  
(цепка рельсовых автомобилей — симметрично над промежуточной опорой,  
напряжения — над опорой)

№	Описание расчетной точки	Напряжения в МПа													
		Предварительное натяжение (при 0°С)		От собст- венного веса (относи- тельно 0°С)		От изме- нения темпера- туры (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	120		-4,05	26,11	135,96	-135,96	40,06	0	30,55	0	291,97	251,91	40,7	10,15
2	Низ корпуса рельса	120		7,64	-11,1	135,96	-135,96	0	-76,7	0	-97,49	263,6	186,9	-27,06	-124,55

Таблица 4.5.4

Расчет выносливости головки рельса и корпуса рельса  
от циклического воздействия рельсового автомобиля весом 2,5 тс  
(рельсовый автомобиль — в середине пролета, напряжения — под колесом)

№	Описание расчетной точки	Напряжения в МПа												
		Предварительное напряжение (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
		Зима -55°С	Лето +55°С	Зима -55°С	Лето +55°С	max	min	max	min	max	min	max	min	
1	Верх головки рельса	120	0,26	-0,54	135,96	-135,96	0	-15,34	0	-24,65	256,22	240,88	-16,5	-41,15
2	Низ корпуса рельса	120	-0,49	1,07	135,96	-135,96	29,65	0	48,6	0	285,12	255,47	33,71	-14,89

Таблица 4.5.5

Расчет выносливости головки рельса и корпуса рельса  
от циклического воздействия рельсового автомобиля весом 2,5 тс  
(рельсовый автомобиль — на расстоянии 5,0 м от промежуточной опоры,  
считая от центра тяжести рельсового автомобиля, 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					
							max	min	max	min	max	min		
1	Верх головки рельса	120	-4,05	26,11	135,96	-135,96	13,5	0	23,47	0	275,38	251,91	23,65	10,15
2	Низ корпуса рельса	120	7,64	-11,1	135,96	-135,96	0	-44,83	0	-64,42	263,6	218,77	-27,06	-91,48

## **5. Выводы и оптимизация конструкции рельсо-струнной путевой структуры городского СТЮ колеей 1,5 м в г. Ханты-Мансийске**

5.1. Размах напряжений в струне в рельсо-струнном пролете длиной 35 м городского СТЮ в г. Ханты-Мансийске от проезда двух рельсовых автомобилей в сцепке общей массой 5 т, во всем диапазоне рабочих температур (от  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), составляет менее 0,3% 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 не менее 100 лет.

5.2. 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 городской трассе «второго уровня» для условий г. Ханты-Мансийска с колеей 1,5 м (см. рис. 5.1), вертикальную жесткость пути на пролете 35 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). Рельс-струна, показанная на рис. 5.1, по прочности, жесткости, ровности пути, устойчивости и долговечности удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым СНиП 2.05.03.-84\* «Мосты и трубы» к городским эстакадам для рельсового транспорта, и обеспечит срок ее службы не менее 100 лет.

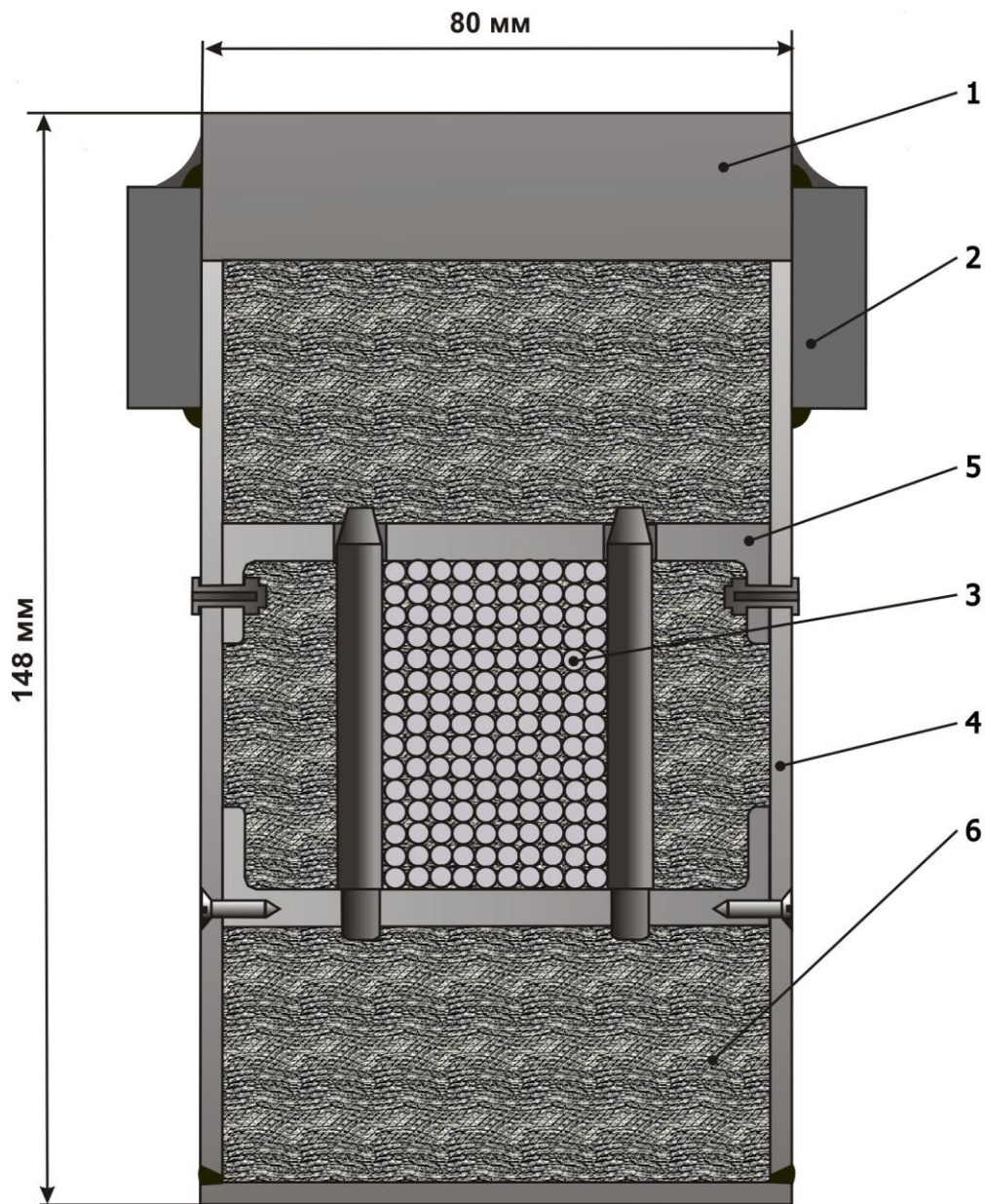


Рис. 5.1. Уточненная конструкция рельса-струны (масштаб 1:1):

- 1 — головка рельса (сталь 20×80 мм); 2 — боковые щеки (сталь 30×10 мм);  
3 — проволока (сталь  $\varnothing 3$ , 150 штук); 4 — корпус (сварной; швеллер сталь 128×80×3 мм);  
5 — крепление струны к корпусу рельса; 6 — наполнитель (модифицированный бетон).

Масса рельса-струны — 52,6 кг/м (масса бетона — 19 кг/м).

Усилие натяжения в рельсе-струне — 202 тс (при 0°C).



5.3. 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 (400—1.000 раз и более) по воздействию подвижной нагрузки будет беспрецедентно выше, чем в любой другой известной строительной конструкции. Запас надежности струны при этом по величине минимальной температуры составит:

$$n_t = (1932 - 1538) / 2,47 = 159 \text{ }^\circ\text{C},$$

где:

1932 МПа — предел прочности струны;

1538 МПа — максимальные напряжения в струне СТЮ;

2,47 МПа/°С — изменение напряжений в струне при изменении температуры на 1 °С).

Отсюда следует, что струна будет разрушена расчетной подвижной нагрузкой лишь при условной температуре:

$$[-55 \text{ }^\circ\text{C} + (-159^\circ\text{C})] = -214^\circ\text{C}.$$

Это, в совокупности с 400—1000-кратным запасом прочности струны, и определяет чрезвычайно высокую надежность рельсо-струнной транспортной системы «второго уровня» к внешним воздействиям, принципиально недостижимой в путевой структуре «второго уровня» других известных транспортных систем.

5.4. 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 скоростного городского подвижного состава СТЮ.

5.5. Для повышения ровности пути, при необходимости, на каждом пролете (35 м) корпус рельса-струны, при его монтаже, выполнен с выгибом вверх — примерно на 50 мм (в центре пролета) по определенной кривой. Тогда наихудшая на пролете неровность пути (при +55 °С и при –55 °С, что составит не более 2—3% от времени эксплуатации СТЮ в году) составит величину 15—20 мм (относительные неровности будут равны 1/1500—1/2000), а минимальные вертикальные радиусы кривизны головки рельса под колесом юнибуса будут не менее 1000 м. Поэтому колеса юнибуса не будут «прыгать» ни при движении по пролету, ни при переезде через опоры, а рельсо-струнная путевая структура скоростного городского СТЮ (в перспективе скорость до 100—120 км/ч) будет под расчетной подвижной нагрузкой жестче и ровнее, чем, например, железнодорожный путь высокоскоростных дорог, уложенный на «втором уровне» на традиционную балочную эстакаду. В диапазоне же температур от –25 °С до +25 °С рельсо-струнный путь СТЮ будет еще ровнее — в 1,5—2 раза. При этом комфортность проезда пассажиров в подвижном составе СТЮ будет наилучшей среди других известных видов транспорта, т.к. ускорения (вертикальные и горизонтальные) в салоне юнибуса будут в пределах 0,1—0,2 м/с<sup>2</sup> (допустимые ускорения на железной дороге в 10 раз выше).

## 6. Нормативная и справочная литература

- 6.1. СНиП 23-01-99 «Строительная климатология».
- 6.2. СНиП 2.01.07-85\* «Нагрузки и воздействия».
- 6.3. СНиП 2.05.03-84\* «Мосты и трубы».
- 6.4. СНиП II-23-81\* «Стальные конструкции».
- 6.5. СНиП 2.03.11-85 «Защита строительных конструкций от коррозии».
- 6.6. Мосты и трубы. Проектирование, строительство и приемка в эксплуатацию. 2-я редакция. М.: Госстрой России, 2001.
- 6.7. ENV 1993-1 EUROCODE 3: Desing of Мосты и трубы. Проектирование, строительство и приемка в эксплуатацию. 2-я редакция. М.: Госстрой России, 2001 steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings (Проектирование стальных конструкций. Общие правила и правила для строений).
- 6.8. ENV 1992-2 EUROCODE 3: Desing of steel structures. Part 2: Steel Bridges (Проектирование стальных конструкций. Часть 2. Стальные мосты).
- 6.9. AASHTO LRFD Bridge Design Specification, Published by American Association of State Highway and Transportation Officials, First Edition, 1996 (Нормы США по проектирования автодорожных мостов).
- 6.10. prEN 1993-1-11: Design of structures with tension components made of steel, 3 September 2002. (пред-Евро Нормы — Проектирование конструкций с растянутыми элементами, выполненными из стали).
- 6.11. ГОСТ 18105-86 «Бетоны. Правила контроля прочности».
- 6.12. ГОСТ 10178-85 «Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия».
- 6.13. ГОСТ 23732-79 «Вода для бетонов и растворов. Технические условия».
- 6.14. Городецкий А.С., Шмуклер В.С., Бондарев А.В. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций. Учебное пособие. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. — 889 с.

- 6.15. Железнодорожный транспорт: Энциклопедия / Гл. редактор Н.С. Конарев. — М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия», 1994. — 559 с.
- 6.16. Юницкий А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в космосе. — Гомель: ИнфоТрибо, 1995. — 337 с.: ил.