ООО «Струнный транспорт Юницкого»

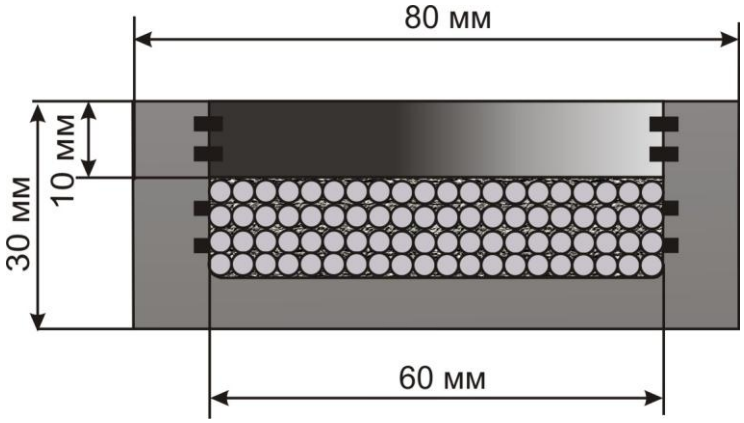
115487, Москва, ул. Нагатинская, 18/29
тел./факс: (495) 680-52-53, (499) 616-15-48
e-mail: info@unitsky.ru, http: //www.unitsky.ru

Выбор типа рельса-струны для принятого варианта однорельсового (монорельсового) СТЮ (моноСТЮ) (по расчетной подвижной нагрузке и скоростным режимам) 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 1.3.1.8. Выбор типа рельса-струны для принятого варианта однорельсового (монорельсового) СТЮ (моноСТЮ) (по расчетной подвижной нагрузке и скоростным режимам) 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
«05» декабря 2007 г.

Москва 2007

Список основных исполнителей

Ответственный исполнитель,
генеральный конструктор ООО «СТЮ» _____ А.Э. Юницкий

Главный инженер ООО «СТЮ» _____ А.В. Пархоменко

Исполнительный директор ООО «СТЮ» _____ Д.А. Юницкий

Начальник отдела прочностных расчетов
ООО «СТЮ» _____ А.Н. Комаров

Начальник конструкторского бюро
«Юнибус» ООО «СТЮ» _____ В.В. Даньщиков

Содержание

Резюме 6
1. Выбор типа рельса-струны для принятого варианта однорельсового городского СТЮ в г. Ханты-Мансийске 9
2. Расчетные нагрузки и воздействия 14
3. Предпроектные прочностные расчеты городского моноСТЮ применительно к природно-климатическим условиям г. Ханты-Мансийска 17
3.1. Построение расчетной схемы моноСТЮ с приложением нагрузок 17
3.2. Исходные данные о материалах 20
3.2.1. Материал струн 20
3.2.2. Материал головки и корпуса рельса 21
3.2.3. Материал заполнителя 21
3.3. Расчетная модель и этапы расчета 21
3.4. Расчетное исследование жесткости рельсо-струнной путевой структуры 22
3.4.1. Расчет вертикальных деформаций от собственного веса путевой структуры и при нагружении вертикальной силой от рельсового автомобиля 22
3.4.2. Расчет горизонтального поперечного перемещения рельса-струны при действии горизонтальных сил от ветра 26
3.4.3. Расчет суммарного перемещения рельса-струны при действии вертикальных и горизонтальных сил 30
3.5. Расчет напряженного состояния струн. Расчет прочности струн 31
3.5.1. Расчет изменения усилий в струне (высокопрочной проволоке) от температурного перепада (от +55 °С летом до –55 °С зимой) 31
3.5.2. Расчет изменений напряжений в струне от собственного веса рельсо-струнной путевой структуры, от проезда рельсового

автомобиля и ветровых нагрузок 34
3.5.3. Расчет прочности струны 34
3.6. Расчет напряженного состояния головки рельса и корпуса рельса. Расчет прочности и оценка выносливости головки рельса и корпуса рельса 39
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 39
3.6.2. Расчет напряжений изгиба и растяжения от собственного веса рельсо-струнной путевой структуры и при нагружении вертикальной силой от рельсового автомобиля с учетом ветровых нагрузок..... 41
3.6.3. Расчет прочности и оценка выносливости рельса-струны 42
3.7. Расчет контактных напряжений и оценка долговечности головки рельса-струны и сопротивления качению колеса рельсового автомобиля 45
3.8. Ровность рельсо-струнного пути под колесом рельсового автомобиля 47
3.8.1. Расчет вертикального перемещения рельса-струны и радиуса траектории движения рельсового автомобиля под действием собственного веса 47
3.8.2. Расчет горизонтального перемещения рельса-струны и радиуса траектории движения рельсового автомобиля под действием только силы ветра 51
4. Графические результаты расчетов 56
4.1. Схемы нагружения рельса-струны нагрузкой от подвижного состава 56
4.2. Эпюры продольных сил в струне 57
4.2.1. Эпюры продольных сил в струне, вызванных предварительным натяжением, собственным весом рельса-струны и ветром 57
4.2.2. Эпюры продольных сил в струне, вызванных весом рельса-

струны, двух рельсовых автомобилей и ветровых нагрузок от них 60
4.3. Эпюры растягивающих сил, изгибающих моментов и поперечных сил в корпусе рельса в середине пролета 62
4.3.1. Эпюры растягивающих сил в корпусе рельса от собственного веса путевой структуры, веса сцепки из двух рельсовых автомобилей и боковых ветровых нагрузок (для расчета прочности рельса-струны) 62
4.3.2. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в корпусе рельса от собственного веса путевой структуры и сцепки из двух рельсовых автомобилей (для расчета прочности рельса-струны) в вертикальной плоскости 64
4.3.3. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в корпусе рельса от боковых ветровых нагрузок на путевую структуру и от ветровых нагрузок на сцепку из двух рельсовых автомобилей (для расчета прочности рельса-струны) в горизонтальной плоскости 68
4.3.4. Эпюры растягивающих сил в корпусе рельса от собственного веса путевой структуры, веса одного рельсового автомобиля (для расчета выносливости рельса-струны) в середине пролета 72
4.3.5. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в корпусе рельса от собственного веса путевой структуры и одного рельсового автомобиля (для расчета выносливости рельса-струны) в вертикальной плоскости в середине пролета 74
4.4. Эпюры растягивающих сил в корпусе рельса в местах жесткой заделки к анкерным опорам 78
4.5. Результаты расчетов прочности и выносливости головки рельса, корпуса рельса и струны 80
5. Нормативная и справочная литература 86

Резюме

При создании городской транспортной системы «второго уровня» в г. Ханты-Мансийске на базе струнных технологий, наиболее сложным и ответственным техническим решением, с инженерной точки зрения, станет двухпутная рельсо-струнная путевая структура однорельсового (монорельсового) СТЮ (моноСТЮ), поднятая на высоту 10—20 м и более. А наиболее ответственным элементом, определяющим все основные технико-экономические показатели такой транспортной системы станет рельс-струна. Только от него, в частности, зависит надежность, долговечность и безопасность системы, ровность пути и комфортность движения скоростных подвесных рельсовых автомобилей — моно-юнибусов, технологичность монтажа и стоимость строительства и др.

Рельсы-струны, установленные на опорах пролетами от 200—300 м до 800—1000 м (в среднем 500 м) и жестко закрепленные в анкерных опорах, отстоящих друг от друга на расстоянии 1—2 км и более, отнесены к разновидности висячего моста, в котором растянутый элемент (струна) размещен внутри балки жесткости (корпус рельса) и омоноличен с ней специальным композитом. Это позволило определить методику статических и динамических расчетов рельсо-струнных пролетов моноСТЮ в условиях г. Ханты-Мансийска, максимальные и минимальные расчетные температуры (соответственно +55ºС и –55ºС), расчетные ветровые нагрузки на рельс-струну (74,5 кгс/м^2) и моно-юнибус (41 кгс/м^2), а также — другие нагрузки и воздействия и их опасные сочетания.

В качестве примера для расчета взята рельсо-струнная эстакада скоростной трассы городского среднего моноСТЮ в г. Ханты-Мансийске со средними моно-юнибусами массой 2,5 тонны и вместимостью до 20 пассажиров. 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 (+55ºС), минимальной (–55ºС), и температуре

сборки (0ºС).

Размах напряжений в струне рельсо-струнного пролета длиной 500 м городского моноСТЮ в г. Ханты-Мансийске, при аварийном нагружении (проезд двух моно-юнибусов в сцепке общей массой 5 тонн), составит 53,8 МПа зимой при –55ºС и 92,6 МПА летом при +55ºС, что составляет малую величину — менее 4% зимой и 8% летом от величины статических напряжений в струне. Это означает, что нагрузка на струны — близка к статической и циклической составляющей можно пренебречь. Поэтому по любым существующим сегодня в России и за рубежом методикам расчета струна рельсо-струнной путевой структуры моноСТЮ обеспечит срок службы по выносливости не менее 100 лет.

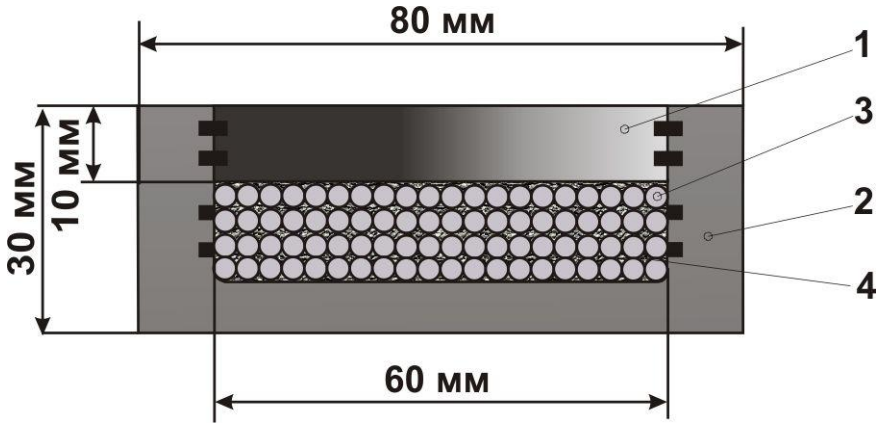
Основную вертикальную жесткость под расчетной нагрузкой рельсо-струнного пролетного строения в моноСТЮ определяет не рельс (изгибная жесткость корпуса и головки рельса), а — струна: соответственно менее 1% и более 99%. Это отвечает названию транспортной системы — струнная (а не рельсовая). Соответственно, требуемая ровность пути на пролете и вертикальные радиусы кривизны траектории движения моно-юнибуса (на большей части пролета — более 5000 м, за исключением участков у опор, где на протяжении 50 м радиус кривизны меняется от 100 м на ложементе опоры до 5000 м на расстоянии 50 м от опоры) обеспечивается, в основном, также струной, а не рельсом. В свою очередь это обеспечит комфортные условия движения не только для пассажиров (максимальные вертикальные ускорения в салоне юнибуса — до 0,8 м/с^2), но и для колеса — максимальные вертикальные ускорения в опорной части обода колеса будут до 1,5 м/с^2).

В качестве элемента струны рекомендована высокопрочная стальная проволока диаметром 3 мм производства Волгоградского завода «ВолгоМетиз» с пределом текучести 1932 МПа. Высокая прочность проволок позволяет увеличить допустимые напряжения в струне до 1545 МПа. При этом, благодаря иной схеме работы струны в моноСТЮ в сравнении с напрягаемой арматурой в мостах, несмотря на увеличенные на 365 МПа допустимые напряжения в струне в сравнении с мостовой арматурой, запас прочности по воздействию на струну аварийной подвижной нагрузки (более 7 раз) будет более высоким, нежели у несущей арматуры других известных строительных конструкций самого высокого уровня ответственности. Струна может быть разрушена аварийной подвижной нагрузкой (два груженых модуля в сцепке)

лишь при условной температуре –248ºС, т.е. при температуре, которая ниже температуры жидкого водорода. Поэтому моноСТЮ может быть рекомендован к строительству в самых суровых природно-климатических условиях ХМАО—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 моноСТЮ в паре «цилиндрическое колесо — плоская головка рельса» по сравнению с железной дорогой в 15—20 раз. Это повысит в несколько раз долговечность рельса, уменьшит его износы, снизит шумы при качении колеса, улучшит его сцепление с рельсом, в также существенно снизит затраты энергии и мощность привода на преодоление сопротивления качению колес скоростного подвижного состава моноСТЮ.

Оптимизированная в результате расчетов конструкция рельса-струны среднего моноСТЮ для г. Ханты-Мансийска (см. рисунок): струна набрана из 80 высокопрочных стальных проволок диаметром 3 мм, суммарное усилие предварительного натяжения которых — 69,2 тс (при температуре сборки 0ºС). С учетом же преднапряжения головки и корпуса рельса, выполненных из высокопрочного сплава алюминия, суммарное усилие натяжения рельса-струны при температуре сборки составит 129,1 тс.



Поперечное сечение рельса-струны моноСТЮ:

1 — головка из высокопрочного алюминиевого сплава рельса (1,71 кг/м);

2 —корпус из высокопрочного алюминиевого сплава (3,08 кг/м);

3 — стальная проволока диаметром 3 мм (струна), 80 проволок (4,44 кг/м);

4 — композит-герметик (0,31 кг/м). Масса рельса-струны — 9,54 кг/м.

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

Стандарты разработчика СТЮ — ООО «СТЮ» — предусматривают на настоящий момент пять типов однорельсового (монорельсового) СТЮ (моноСТЮ) (см. табл. 1.1).

Таблица 1.1

Типы моноСТЮ

Типы моноСТЮ	Вес перевозимого груза, т	Вместимость пассажиров, чел.
Сверхлегкий	До 0,5	До 3
Легкий	Свыше 0,5 до 1,0	До 10
Средний	Свыше 1,0 до 2,0	До 20
Тяжелый	Свыше 2,0 до 4,0	До 40
Сверхтяжелый	Свыше 4,0	Свыше 40

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

Поскольку срок службы СТЮ составит не менее 100 лет, то провозную способность трассы «второго уровня» необходимо определять исходя из перспективных транспортных целей и задач. Средний городской моноСТЮ, при относительно невысокой стоимости рельсо-струнной путевой структуры и опор (до 20 млн. руб./км), обеспечит в перспективе большой объем городских пассажирских и грузовых перевозок, соответственно, не менее 100 тыс. пасс./сутки и 10 тыс. тонн/сутки (в обоих направлениях).

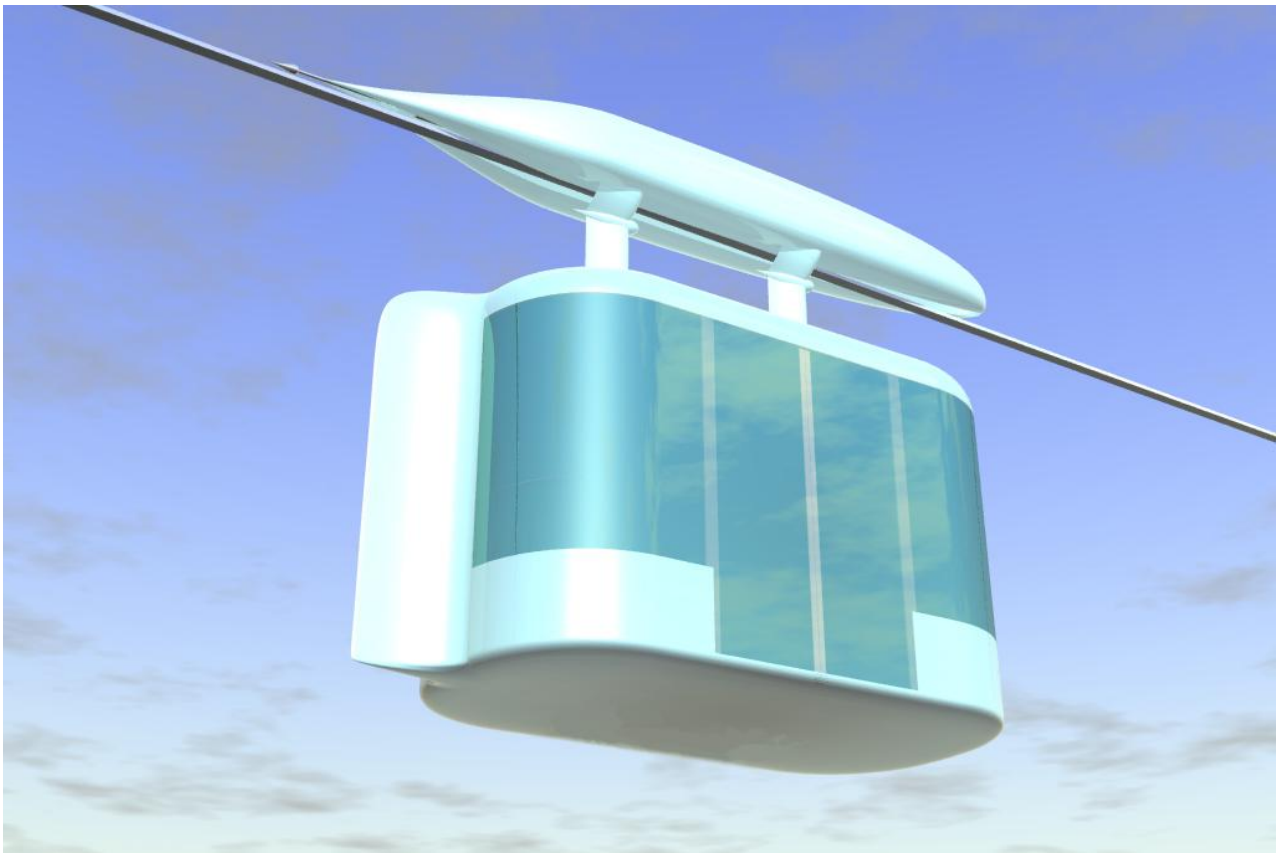


Рис. 1.1. Средний моноСТЮ

При оговоренной стандартом для среднего городского моноСТЮ полезной нагрузке 1000—2000 кг, средней массе пассажира 71 кг (согласно правил ЕЭК ООН № 52 «Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств категорий M_2, M_3 в отношении их общей конструкции») и ручной клади 4—6 кг, один юнибус, соответствующий среднему типу однорельсового СТЮ, может вместить с высокой комфортностью до 14 пассажиров, а в часы пик — до 21 пассажира. Разработанный ООО «СТЮ» двенадцатиместный моно-юнибус модели Ю-372 (в часы пик вместимость до 20 пасс.), предлагаемый Заказчику, как основа подвижного состава высотного городского электрифицированного моноСТЮ 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 моно-юнибусы легко могут быть переоборудованы для перевозок грузов в количестве до 1,5—2 т (при перевозке грузов допустим коэффициент перегрузки, равный 1,5).

Рассмотрим два характерных типа рельса-струны, разработанных для городской грузопассажирской трассы однорельсового СТЮ для природно-

климатических условий г. Ханты-Мансийска.

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

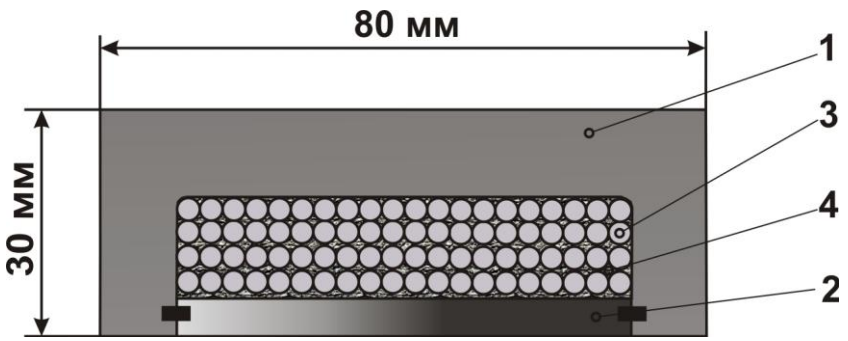


Рис. 1.2. Конструкция стального рельса-струны городской трассы моноСТЮ применительно к природно-климатическим условиям г. Ханты-Мансийска (масштаб 1:1): 1 — корпус рельса (30×80 мм); 2 — дно корпуса (60×10 мм); 3 — высокопрочная проволока (сталь, ∅3, 80 штук); 4 — заполнитель

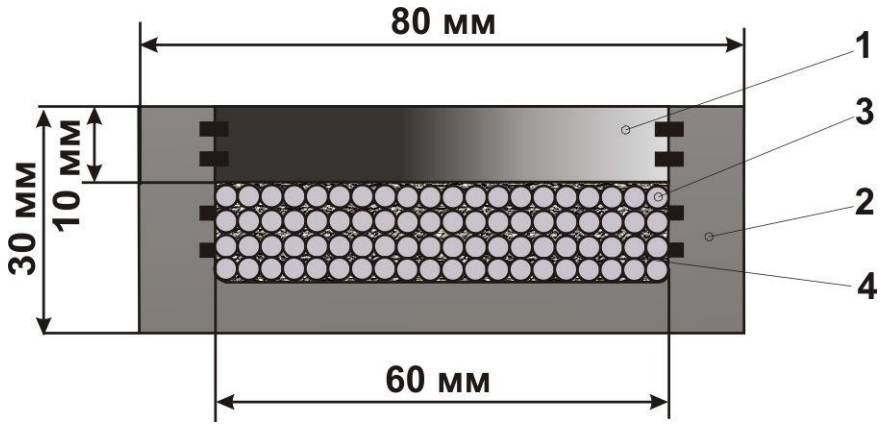


Рис. 1.3. Конструкция рельса-струны городского среднего моноСТЮ применительно к природно-климатическим условиям г. Ханты-Мансийска (масштаб 1:1): 1 —головка рельса (сплав алюминия, 10×60 мм); 2 — корпус (сплав алюминия, 80×30 мм); 3 — высокопрочная проволока (сталь, ∅3, 80 шт.); 4 — заполнитель

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, уменьшают массу рельса-струны, сокращают срок монтажа. Но при этом появляется необходимость изготовления фильер для получения корпуса, 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 склеивания (скрепления) деталей корпуса и головки рельса (в продольном направлении).

Стальные же детали (корпус и головка рельса) выполняются из существующих и изготавливаемых по ГОСТу стальных профилей, не зависят от конкретного завода-изготовителя, позволяют использовать менее дорогой материал, но на порядок увеличивают объем сварочных работ, а также увеличивают массу рельса-струны 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, корпус и головка которого выполнены из высокопрочного сплава алюминия (см. рис. 1.3).

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): σ = 22.220 кГс/см^2 = 2180 МПа (усилие $P_{0,2}$ = 1392 кГс = 13656 Н, что соответствует $\sigma_{0,2}$ = 19700 кгс/см^2 = 1932 МПа);
- минимальное разрывное усилие проволоки: P = 1570 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 моноСТЮ, 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 γ_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 моно-юнибуса

Расчеты пролетного строения						$\lambda = 90.00$	
№	Нагрузки	Ед. изм.	Норм.	коэффициент		Расчетные нагрузки	
				$1+\mu$	γ_f	прочность	выносливость
Груженый рельсовый автомобиль							
1	Давление колеса передней оси P_1	тс	0,54	1,15	1,183	0,625	0,639
2	Давление колеса задней оси P_2	тс	0,54	1,15	1,183	0,625	0,639

Расчеты пролетного строения						$\lambda = 90.00$	
№	Нагрузки	Ед. изм.	Норм.	коэффициент		Расчетные нагрузки	
				$1+\mu$	γ_f	прочность	выносливость
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 λ — длина загружения линии влияния.

Таблица 2.3

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

Конструктивный элемент	Нормативные давления, кг/м^2			Расчетные давления, кг/м^2		
	W_m	W_p	W_n	$W_m\gamma_f$	$W_p\gamma_f$	$\mathbf{W_n\gamma_f}$
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 моноСТЮ 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 ^{o}C;
- наименьшая: –54 ^{o}C;
- расчетная температурная амплитуда: 107,4 ^{o}C.

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 ^{o}C;

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

Таблица 2.4

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

Нагрузки и воздействия (варианты сочетаний)	Коэффициенты η при различных расчетных сочетаниях							
	Собственный вес конструкций	Воздействие усадки и ползучести	Временные нагрузки	Горизонтальная нагрузка от торможения	Ветровые воздействия	Температурные воздействия	Нагрузка от гололеда	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 моноСТЮ применительно к природно-климатическим условиям г. Ханты-Мансийска

3.1. Построение расчетной схемы моноСТЮ с приложением нагрузок

Выполнение расчетов рельсо-струнной путевой структуры моноСТЮ методом конечных элементов (МКЭ) позволяет проверить, уточнить и оптимизировать основные конструкторские и технологические решения, закладываемые в рельсо-струнную транспортную систему «второго уровня». Для расчетов взят один перегон (500 м) городской трассы моноСТЮ в двух вариантах нагружения:

а) груженный рельсовый автомобиль, осуществляющий аварийное торможение;

б) сцепка из двух груженых рельсовых автомобилей, осуществляющих аварийное торможение.

Для расчетов приняты температуры:

- минимальная зимой: –55 °С;
- максимальная летом (с учетом нагрева конструкции солнцем): +55 °С;
- перепад температур «зима — лето»: 110 °С.

Расчетная схема рельсо-струнной путевой структуры городской трассы моноСТЮ показана на рис. 3.1.1. На опорах рельс-струна устанавливается в специальные седла с вертикальным и горизонтальным радиусами 100 м. Заделка рельса-струны на опорах — жесткая, горизонтальная длина седел – 5 м.

Основные характеристики расчетной схемы трассы:

- расстояние между анкерными опорами 500 м;
- вес рельсового автомобиля, с учетом динамической перегрузки, — 2,5 тс.

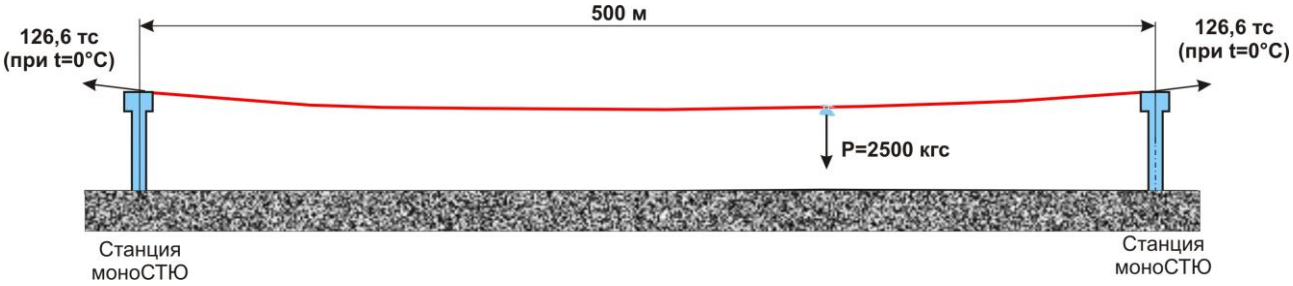


Рис. 3.1.1. Расчетная схема нагружения городской трассы моноСТЮ
в условиях г. Ханты-Мансийска:

Схема нагружения пути от рельсового автомобиля (юнибуса) показана на рис. 3.1.2.

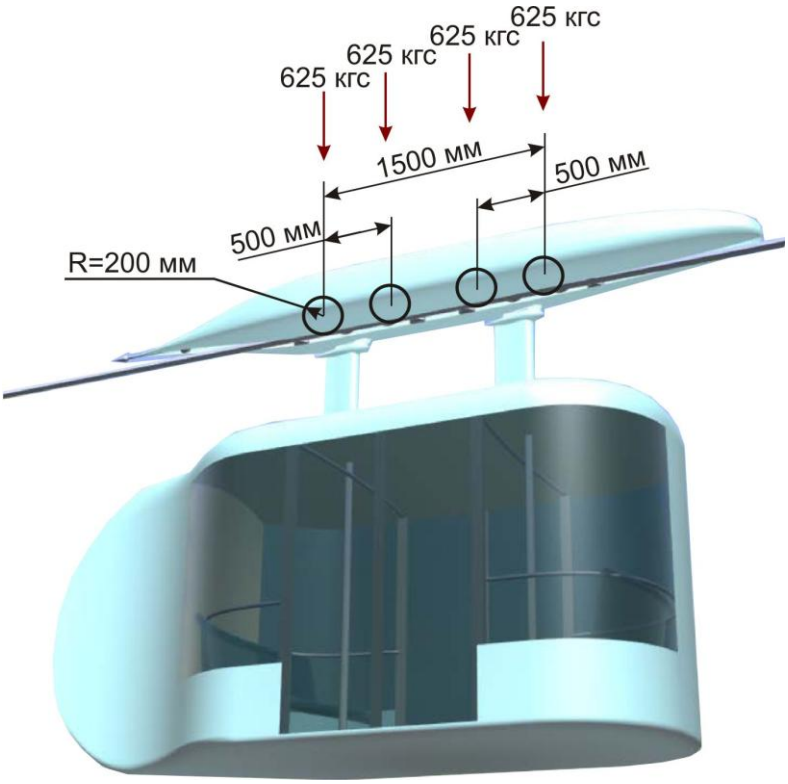


Рис. 3.1.2. Схема нагружения пути от городского рельсового автомобиля (юнибуса)

Габаритные размеры и расположение колес в приводном блоке моно-юнибуса (масса груженого моно-юнибуса 2500 кг; боковая парусность — 7,5 м^2; расстояние между передним колесом сзади идущего модуля и задним колесом впереди идущего модуля в сцепке — 2 м)

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

струны).

Расчетное сечение рельса-струны и находящихся внутри струн изображено на рис. 3.1.3.

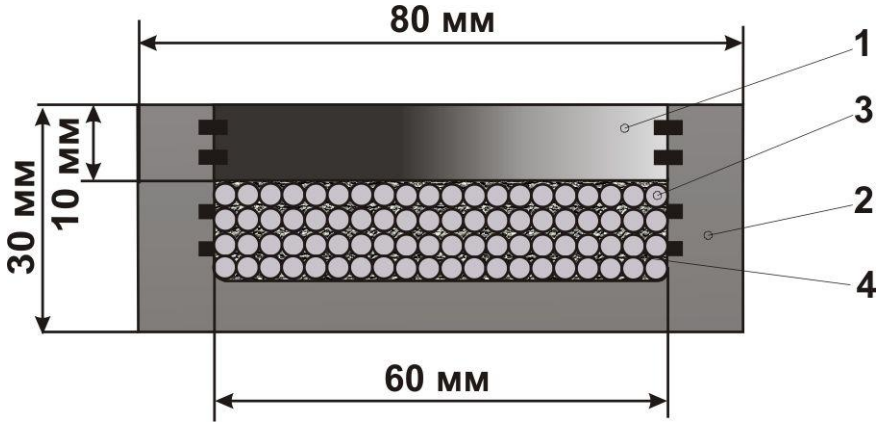


Рис. 3.1.3. Поперечное сечение рельса-струны моноСТЮ

Принятая к расчету конструкция рельса-струны городского среднего моноСТЮ: 1 —головка рельса из высокопрочного алюминиевого сплава (1,71 кг/м); 2 —корпус из высокопрочного алюминиевого сплава (3,08 кг/м); 3 — стальная проволока диаметром 3 мм (струна), 80 проволок (4,44 кг/м); 4 — композит – герметик (0,31 кг/м).

Масса рельса-струны — 9,54 кг/м.

Масса контактного провода и изоляторов, подвешенных на расстоянии 100 мм снизу рельса-струны — 1,2 кг/м; боковая парусность контактной сети — 120 см^2/м (0,012 м^2/м).

На рис. 3.1.4 изображено расчетное поперечное сечение корпуса рельса

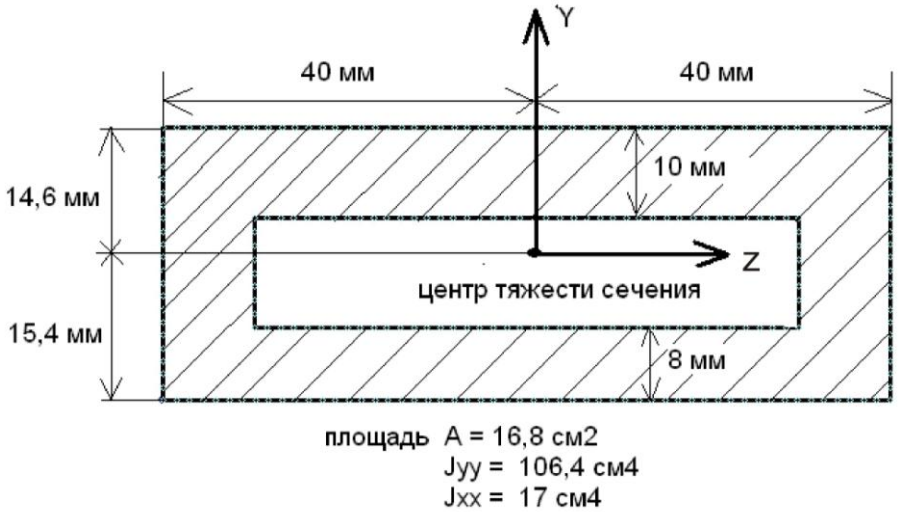


Рис. 3.1.4. Расчетное поперечное сечение корпуса рельса

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).

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 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. Так же учитывались ветровые нагрузки.

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

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 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^3
- предел текучести, не менее — 1932 МПа
- коэффициент линейного температурного расширения — $1{,}2\times10^{-5}$ 1/град

3.2.2. Материал головки и корпуса рельса

Материал головки и корпуса рельса — экономно легированный высокопрочный свариваемый алюминиевый сплав 01975 на основе системы Al — Zn — Mg — Cu с микродобавкой Sc и имеет следующие характеристики:

- модуль упругости 70000 МПа
- коэффициент Пуассона 0,35
- плотность 2850 кг/м^3
- расчетное сопротивление текучести 500 МПа
- коэффициент линейного температурного расширения $2{,}25\times10^{-5}$ 1/град

Сплав 01975 выпускается в промышленных объемах на российских заводах, в частности на заводах ОАО «Корпорация ВСМПО—АВИСМА» (г. Верхняя Салда, Свердловская обл.).

3.2.3. Материал заполнителя

Материал заполнителя представляет собой композит – герметик с погонной плотностью 0,31 кг/м. Предполагается, что на местный изгиб работают главным образом жестко соединенные между собой головка рельса и корпус (см. рис. 3.1.3), шарнирно опираясь на струны (при изгибе 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.

Расчетная модель и этапы расчета

Конечно-элементная модель представляет собой однопролетную рельсо-струнную путевую структуру длиной 500 м. В качестве конечных элементов использовались элементы типа ROD (струны) и Beam (рельс). На опорах рельс-струна устанавливается в специальные седла, контакт моделировался элементами типа GAP. Характеристики расчетной модели:

- число узлов 2258
- число элементов 2256

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 1200 МПа, головки рельса и корпуса до напряжений 350 МПа (натяжение расчетного поперечного сечения осуществляется при 0 °С). Далее — закрепление корпуса и рельса на анкерных опорах (жесткая заделка с установкой в специальные седла).

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

Третий этап расчета — нагружение струн собственным весом путевой структуры (от веса головки рельса, корпуса и заполнителя) при температурах (+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). Так же учитывались при расчете прочности ветровые нагрузки.

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 (80 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 69,17 + 59,94 = 129,11 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 до 61,33 + 45,11 = 106,44 тс (суммарное натяжение рельса-струны при +55 °С летом). Вертикальная деформация участка рельсо-струнной эстакады от собственного веса путевой структуры, при наибольшей температуре (+55 °С летом), изображена в увеличенном виде на рис. 3.4.1.1. Наибольший провис рельсо-струнной эстакады от собственного веса конструкции при этом составил в центре пролета 3,054 метра при наибольшей температуре (+55 °С летом).

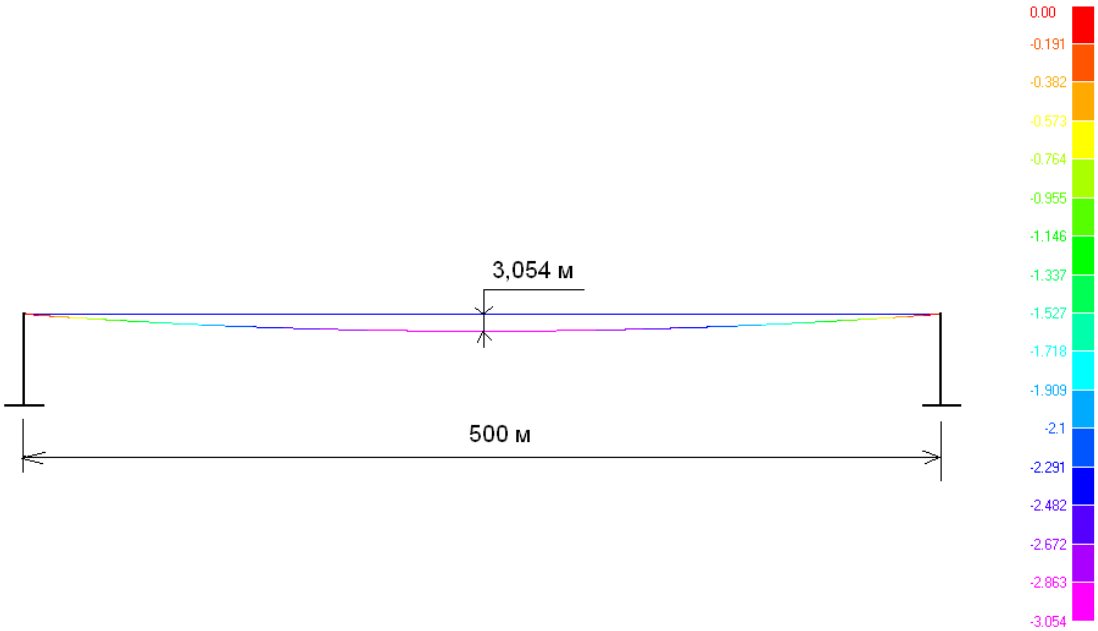


Рис. 3.4.1.1 Вертикальная деформация участка рельсо-струнной эстакады от собственного веса конструкции при наибольшей температуре +55 °С летом

<u>Расчет прогиба рельса-струны только от собственного веса аналитическим методом (при +55 °С)</u>

Исходные данные:

1. Распределенная вертикальная сила от собственного веса рельса:

$$q = 10{,}74 \text{ кГс/м}$$

2. Сила натяжения в рельсе (струна, корпус и головка рельса):

$$T = 106{,}44 \times 10^3 \text{ кГс}$$

3. Длина одного пролета:

$$L = 500 \text{ м}$$

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

$$\Delta_q = \frac{q \times L^2}{8 \times T} = \frac{10{,}74 \times 500^2}{8 \times 106440} = 3{,}15 \text{ м}. \qquad (2.1)$$

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, изображена в увеличенном виде на рис. 3.4.1.2. Прогиб рельсо-струнной эстакады в центре пролета при этом составит 5,712 метра.

Дополнительный вертикальный прогиб рельсо-струнной эстакады в центре пролета, вызванный только весом рельсового автомобиля, составит: 5,712 – 3,054 = 2,658 метра. Отношение наибольшего прогиба, вызванного рельсовым автомобилем, к длине пролета при этом составит: 2,658 / 500 = 1/188.

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.

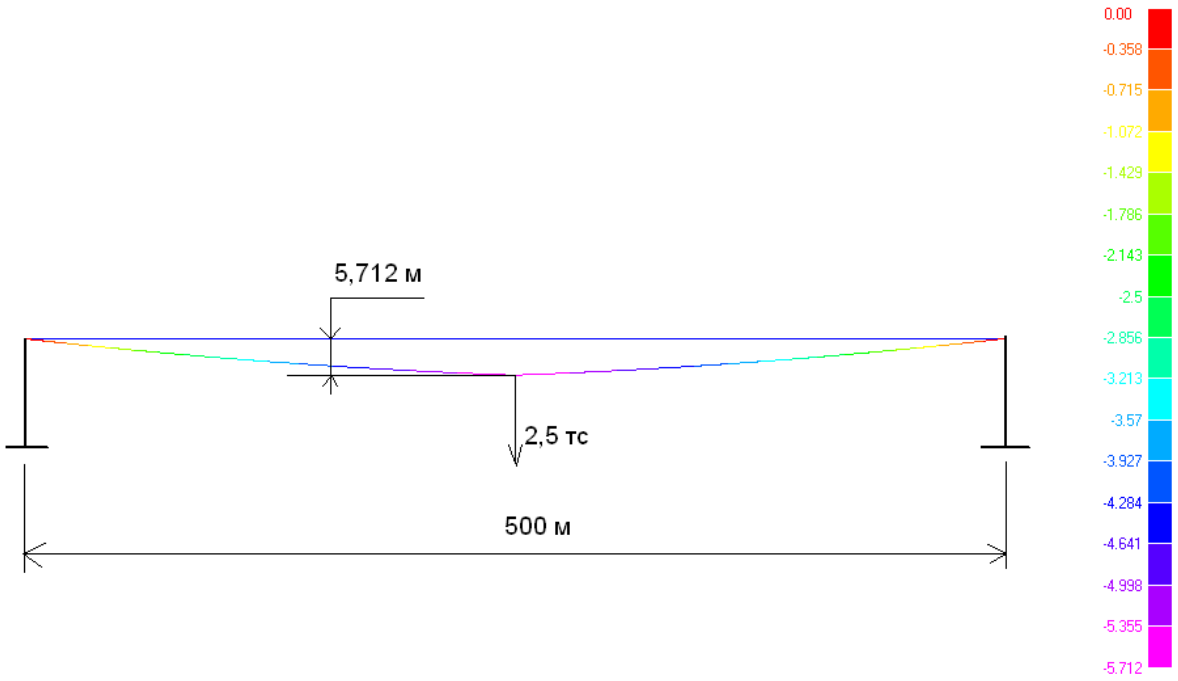


Рис. 3.4.1.2. Вертикальная деформация участка рельсо-струнной эстакады от собственного веса и при дополнительном нагружении вертикальной силой от рельсового автомобиля весом 2,5тс при наибольшей температуре +55 °С летом

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

Исходные данные:

1. Вертикальная сила на один рельс:

$$P = 2500 \text{ кГс.}$$

2. Сила натяжения в одном рельсе (струна, корпус и головка рельса):

$$T = 106{,}44 \times 10^3 \text{ кГс.}$$

3. Длина одного пролета:

$$L = 500 \text{ м.}$$

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

$$\Delta_P = \frac{P \times L}{4 \times T} = \frac{2500 \times 500}{4 \times 106440} = 2{,}93\,\text{м}. \qquad (2.2)$$

Полный вертикальный прогиб рельса-струны аналитическим методом (при +55 °С):

$$\Delta_P = \Delta_P + \Delta_q = 2{,}93 + 3{,}15 = 6{,}08\,\text{м} \qquad (2.3)$$

Таким образом, аналитический расчет по формуле (2.1) дает схожие результаты, но отличающиеся в большую сторону, по сравнению с численным расчетом, на 6% (при температуре +55°С). Это объясняется учетом небольшого увеличения натяжения струн, корпуса и головки рельса при деформации системы в численном расчете, что несколько снижает деформативность системы при нагружении вертикальной нагрузкой. В расчете аналитическим методом натяжение струн считается неизменным в процессе деформации пролетного строения.

При минимальной температуре (–55 °С) провис рельсо-струнной эстакады от собственного веса и при нагружении в центре пролета вертикальной силой от веса рельсового автомобиля, равного 2,5 тс, составил 4,174 м, что меньше аналогичного провиса пролета при температуре +55°С на 5,712 - 4,174 = 1,538 м, или на 27%.

3.4.2. Расчет горизонтального поперечного перемещения рельса-струны при действии горизонтальных сил от ветра

Расчетная ветровая нагрузка:

- рельс-струна: 74,5 кГс/м^2;
- юнибус: 41 кГс/м^2.

Распределенная погонная горизонтальная ветровая нагрузка на рельс-струну с подвешенной к нему контактной сетью составит:

$$(0{,}03+0{,}012) \times 74{,}5 = 3{,}13 \text{ кГс/м} = 30{,}7 \text{ Н/м}.$$

Горизонтальная деформация участка рельсо-струнной эстакады от силы ветра без юнибуса, при наибольшей температуре (+55°С летом), изображена в увеличенном виде на рис. 3.4.2.1. Перемещение рельсо-струнной эстакады от силы ветра без юнибуса при этом составили в центре пролета 0,914 метра при наибольшей температуре (+55 °С летом).

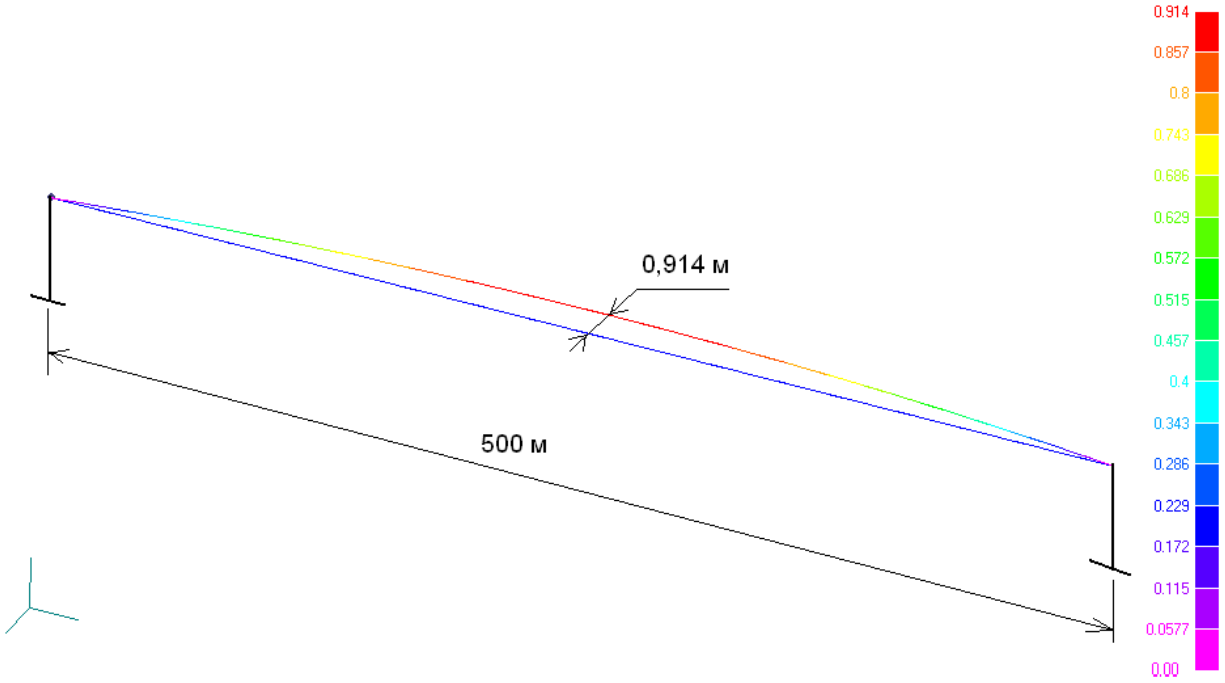


Рис. 3.4.2.1. Горизонтальные перемещения рельса-струны от силы ветра только на рельс (без юнибуса) (при +55 °С)

<u>Расчет горизонтальных перемещения рельса-струны только от силы ветра без юнибуса аналитическим методом (при +55 °С)</u>

Исходные данные:

1. Распределенная горизонтальная погонная сила ветра на рельс:

$$q = 3{,}13 \text{ кГс/м}.$$

2. Сила натяжения в рельсе (струна, корпус и головка рельса):

$$T = 106{,}44 \times 10^3 \text{ кГс.}$$

3. Длина одного пролета:

$$L = 500 \text{ м.}$$

Величина наибольшего прогиба рельсо-струнной путевой структуры в центре пролета от силы ветра на рельс (при +55 °С), без учета изгибной жесткости рельса, составит:

$$\Delta_q = \frac{q \times L^2}{8 \times T} = \frac{3{,}13 \times 500^2}{8 \times 106440} = 0{,}92 \text{ м}. \qquad (2.4)$$

Горизонтальная боковая ветровая нагрузка на юнибус будет равна:

$$7{,}5 \text{ м}^2 \times 41 \text{ кгс/м}^2 = 307{,}5 \text{ кГс} = 3016{,}6 \text{ Н},$$

а на одно колесо:

$$3016{,}6 \text{ Н}/4 = 754{,}15 \text{ Н}.$$

Горизонтальная деформация участка рельсо-струнной эстакады от воздействия силы ветра на рельс и юнибус, при наибольшей температуре (+55 °С летом), изображена в увеличенном виде на рис. 3.4.2.1. Перемещение рельсо-струнной эстакады с юнибусом от силы бокового ветра при этом составили в центре пролета 1,271 метра при наибольшей температуре (+55 °С летом).

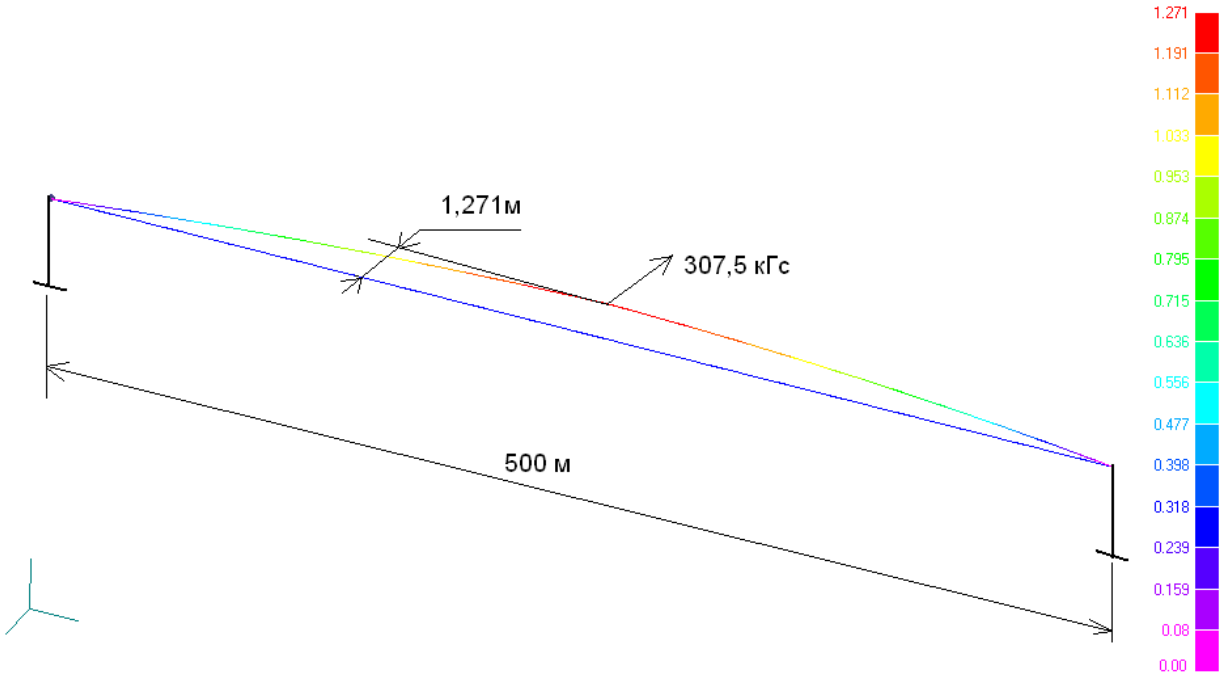


Рис. 3.4.2.2. Суммарное горизонтальное перемещение рельса-струны от силы ветра на рельс и юнибус (при +55 °С)

Расчет горизонтальных перемещения рельса-струны только от силы ветра на юнибус аналитическим методом (при +55 °С)

Исходные данные:

1. Горизонтальная сила воздействия ветра от юнибуса на рельс:

$$P = 307{,}5 \text{ кГс.}$$

2. Сила натяжения в одном рельсе (струна, корпус и головка рельса):

$$T = 106{,}44 \times 103 \text{ кГс.}$$

3. Длина одного пролета:

$$L = 500 \text{ м.}$$

Величина наибольшего перемещения рельсо-струнной путевой структуры в центре пролета от силы ветра на юнибус (при +55 °С), без учета изгибной жесткости рельса, составит:

$$\Delta_P = \frac{P \times L}{4 \times T} = \frac{307,5 \times 500}{4 \times 106440} = 0,36 \text{ м}. \quad (2.5)$$

Полные горизонтальные перемещения рельса-струны от силы ветра на юнибус аналитическим методом (при +55 °С):

$$\Delta_P = \Delta_P + \Delta_q = 0,92 + 0,36 = 1,28 \text{ м}, \quad (2.6)$$

что совпадает с численным расчетом (отличие равно 0,7%).

3.4.3. Расчет суммарного перемещения рельса-струны при действии вертикальных и горизонтальных сил

Перемещение в середине пролета рельса-струны при действии вертикальных и горизонтальных сил найдем как геометрическую сумму:

- численный метод:

$$\Delta = \sqrt{5,712^2 + 1,271^2} = 5,85 \text{ м}$$

- аналитический метод:

$$\Delta = \sqrt{6,08^2 + 1,28^2} = 6,21 \text{ м}$$

Реально из-за повышения натяжения струн и корпуса рельса в процессе деформации, перемещение в середине пролета будет несколько меньше: точный численный расчет дает результат 5,82 м.

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:	$t_{cb} = 0$ °C
2. Температура летом:	$t_L = +55$ °C
3. Температура зимой:	$t_Z = -55$ °C
4. Модуль упругости материала проволок:	$E_{tros} = 2{,}06\times10^{11}$ Па
5. Коэффициент линейного расширения:	$\alpha_{stell} = 1{,}2\times10^{-5}$ 1/°C
6. Площадь одной проволоки:	$F_{trosa} = 7{,}065\times10^{-6}$ м^2
7. Всего проволок в рельсе:	n = 80 шт.
8. Сила предварительного натяжения одной проволоки при 0 °C:	$N_0 = 8482$ Н

Напряжения в проволоке при температуре сборки 0 °C составят:

$$\sigma_0 = \frac{N_0}{F_{trosa}}. \qquad (2.7)$$

Тогда:

$$\sigma_0 = 1{,}2\times10^9 \text{ Па} = 1200 \text{ МПа}.$$

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

$$T_0 = N_0 \times n = 8482 \text{ Н} \times 80 = 678560 \text{ Н} = 69170 \text{ кгс} = 69{,}17 \text{ тс}.$$

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

$$N_{55} = N_0 + E_{tros} \times \alpha_{stell} \times (t_{cb} - t_L) \times F_{trosa}. \quad (2.8)$$

Тогда:

$$N_{55} = 7521 \text{ Н} = 766{,}67 \text{ кГс}.$$

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

$$\sigma_{55} = \frac{N_{55}}{F_{trosa}}. \quad (2.9)$$

Тогда:

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

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

$$N_{-55} = N_0 + E_{tros} \times \alpha_{stell} \times (t_{cb} - t_Z) \times F_{trosa}. \quad (2.10)$$

Тогда:

$$N_{-55} = 9443 \text{ Н} = 962{,}59 \text{ кГс}.$$

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

$$\sigma_{-55} = \frac{N_{-55}}{F_{trosa}}. \quad (2.11)$$

Тогда:

$$\sigma_{-55} = 1{,}336\times10^{9}\ \text{Па} = 1336\ \text{МПа}.$$

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

$$T_{55} = N_{55}\times n. \qquad (2.12)$$

Тогда:

$$T_{55} = 6{,}017\times10^{5}\ \text{Н} = 61335\ \text{кГс} = 61{,}33\ \text{тс}.$$

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

$$T_{-55} = N_{-55}\times n. \qquad (2.13)$$

Тогда:

$$T_{-55} = 7{,}554\times10^{5}\ \text{Н} = 77003\ \text{кГс} = 77{,}0\ \text{тс}.$$

Как видно из расчета, наибольшая суммарная сила натяжения всех проволок струны, от предварительного натяжения и от перепада температур, составляет 77,0 тонн (зимой при –55 °С), что соответствует растягивающему напряжению 1336 МПа. Это значительно ниже, на 596 МПа (или на 5847 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 МПа).

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

Расчеты по изменению напряжений в струне проводились для участка рельсо-струнной путевой структуры длиной 500 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 °С: 792,338 кН = 80,768 тс.

При этой же температуре –55 °С, усилие в струне на пролете, в отсутствие рельсовых автомобилей, составит 761,896 кН. Таким образом, сцепка из двух груженых рельсовых автомобилей увеличит усилие в струне на нагруженном пролете лишь на 792,338 – 761,896 = 30,442 кН = 3,1 тс, т.е. всего на 3,84%. Из полученных данных можно сделать важный вывод: в процессе эксплуатации рельсо-струнная путевая структура практически является статической системой, т.к. даже аварийное нагружение путевой структуры двумя движущимися на пролете гружеными рельсовыми автомобилями в сцепке приводит к увеличению напряжений в струне менее чем на 5%, чем можно пренебречь.

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

3.5.3. Расчет прочности струны

Как видно из табл. 4.5.1 (см. ниже п. 4.5), наибольшее изменение напряжений в струне от проезда двух груженых рельсовых автомобилей в сцепке произойдет летом при +55 С, когда струна меньше всего натянута. Однако размах напряжений от аварийного проезда двух транспортных средств общим весом 5 тонн мал и составляет 53,85 МПа зимой при –55 °С и 92,61 МПа летом при +55 °С, что составляет малую величину — менее 4% зимой и 8% летом от величины статических напряжений в струне. Коэффициент асимметрии цикла напряжений $\rho = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ при этом составит:

Летом +55 °С: $\rho = \sigma_{min}/\sigma_{max} = 1086{,}53/1179{,}14 = 0{,}921$ (2.14)

Зимой –55 °С: $\rho = \sigma_{min}/\sigma_{max} = 1347{,}53/1401{,}38 = 0{,}962$ (2.15)

Коэффициенты асимметрии цикла напряжений зимой и летом близки к единице. По существующим методикам расчета выносливости (СНиПы, Нормы и т.д. в России и других странах) это означает, что нагрузка на струны — близка к статической 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 °С и будут соответствовать растягивающему напряжению, равному 1401 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 $R_{ип} = 12600/7{,}065 = 1783$ МПа — напряжение при разрывном усилии 12600 Н, согласно ГОСТ 7348-81 (для проволоки, планируемой к использованию в СТЮ и выпускаемой отечественной промышленностью, $R_{ип} > 2200$ 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, нагружениями и принципами работы.

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

$$R_y = 0{,}8\times\sigma_{0,2} = 0{,}8\times1932 = 1545 \text{ МПа}, \qquad (2.16)$$

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. 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 некритичны к внешним поперечным воздействиям, как то: подвижная нагрузка, ветровая нагрузка, лед, снег и др. Кроме того, например, снег и лед, в отличие от мостов, вообще не могут образоваться на рельсе-струне, т.к. при каждом проходе рельсового автомобиля, они будут раздавливаться стальными колесами и сбрасываться ими вниз. К тому же струна в рельсе-струне надежна защищена прочным и герметичным корпусом рельса от механических воздействий и находится в герметике, исключающем 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 °С зимой):

1) для сцепки из двух рельсовых автомобилей (2,5 тс + 2,5 тс):

$$n_1 = (1932 – 1545)/53,85 = 7,2;$$

2) для одиночного рельсового автомобиля запас прочности n_2 струны превысит значение n_2 = 15 раз,

где:

53,85 МПа — размах напряжений в струне при –55 °С от воздействия расчетной подвижной нагрузки (от двух рельсовых автомобилей в сцепке: 2,5 тс + 2,5 тс) — см. ниже п. 4.5, табл. 4.5.1.

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

$$\sigma_S \le R_y \times m, \qquad (2.17)$$

где:

σ_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 струне зимой при –55 °С, равные 1401 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 для двух юнибусов составит n_3 = (1545 – 1401)/53,85 = 2,67 (при –55 °С), а запас надежности по величине минимальной температуры составит n_4 = (1545 – 1401)/2,47 = 58,3°С (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 1932 – 1545 = 387 МПа.

Таким образом, допустимые напряжения в струне, равные 1545 МПа, возникнут лишь при понижении температуры до (– 55) + (– 58,3) = –113,3°С, что нереально, т.к. на планете нет мест с такой низкой температурой. Разрушающие же напряжения в струне, равные 1932 МПа, возникнут лишь при температуре, которая еще на (1932 – 1545) / 2,47 = 156,7°С будет более низкой, т.е. при (–113,3) + (– 156,7) = 270°С, или при условной температуре, отличающейся от абсолютного нуля температур всего на 3°С.

Поскольку размах напряжений в струне от воздействия расчетной подвижной нагрузки (два рельсовых автомобиля общим весом 5 тонн) составит при –55 °С 53,85 МПа, то эта нагрузка разрушит струну лишь при условной температуре, которая будет на 53,85 / 2,47 = 21,8°С менее низкой, т.е. при температуре –270 + 21,8 = –248,2°С. На самом деле эта температура будет еще более низкой, т.к. размах напряжений в струне от проезда рельсовых автомобилей при снижении температуры падает: при +55 °С он равен 92,61 МПа, а при –55 °С — уже 53,85 МПа (см. табл.

4.5.1), поэтому при температуре ниже –200 °С этот размах будет не 53,85 МПа, как мы приняли, а — 30—40 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, выполненном из высокопрочного сплава алюминия

1. Температура сборки: $t_{cb} = 0$ °С
2. Температура летом: $t_L = +55$ °С
3. Температура зимой: $t_Z = -55$ °С
4. Модуль упругости: $E_k = 7{,}0\times10^{10}$ Па
5. Коэффициент линейного расширения: $\alpha_{stell} = 2{,}25\times10^{-5}$ 1/°С
6. Площадь сечения: $F_k = 0{,}00168$ м^2
7. Сила натяжения корпуса рельса при температуре сборки 0 °С:

Усилие предварительного натяжения в корпусе и головке рельса при температуре сборки 0 °С составит:

$$N_0 = 5{,}88\times10^5 \text{ Н} = 59939 \text{ кГс} = 59{,}94 \text{ тс}, \qquad (2.18)$$

а напряжения:

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

Тогда:

$$\sigma_0 = 350\times10^6 \text{ Па} = 350 \text{ МПа}.$$

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

$$N_{55} = N_0 + E_k \times \alpha_{stell} \times (t_{cb} - t_L) \times F_k. \quad (2.19)$$

Тогда:

$$N_{55} = 4{,}425 \times 10^5 \text{ Н} = 45107 \text{ кгс} = 45{,}11 \text{ тс},$$

Температурные напряжения в корпусе рельса при +55 °С:

$$\sigma_{55} = \frac{N_{55}}{F_k}. \quad (2.20)$$

Тогда:

$$\sigma_{55} = 2{,}634 \times 10^8 \text{ Па} = 263{,}4 \text{ МПа}.$$

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

$$N_{-55} = N_0 + E_k \times \alpha_{stell} \times (t_{cb} - t_Z) \times F_k. \quad (2.21)$$

Тогда:

$$N_{-55} = 7{,}335 \times 10^5 \text{ Н} = 74771 \text{ кгс} = 74{,}77 \text{ тс}.$$

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

$$\sigma_{-55} = \frac{N_{-55}}{F_k}. \quad (2.22)$$

Тогда:

$$\sigma_{-55} = 4{,}366 \times 10^8 \text{ Па} = 437 \text{ МПа}.$$

3.6.2. Расчет напряжений изгиба и растяжения от собственного веса рельсо-струнной путевой структуры и при нагружении вертикальной силой от рельсового автомобиля с учетом ветровых нагрузок

Расчет напряжений изгиба и растяжения от собственного веса рельсо-струнной путевой структуры и при нагружении вертикальными силами от рельсовых автомобилей проводились для участка путевой структуры, длиной 500 м.

Для расчета на прочность и выносливость рельсо-струнной путевой структуры, один рельсовый автомобиль или сцепка из двух рельсовых автомобилей располагались в середине пролета (см. ниже п. 4.1, рис. 4.1.1 и 4.1.2);

При расчете на прочность предполагалось, что рельсовых автомобилей два, они движутся вместе в механической сцепке и каждое создает вертикальную силу 2,5 тс, так же на всю путевую структуру и автомобили действуют ветровые нагрузки. При расчете на прочность два рельсовых автомобиля создавали вертикальную силу 5 тс (на рельс-струну приходится 5 тс , а на каждое колесо — по 0,625 тс). Ветровая погонная горизонтальная ветровая нагрузка на рельс-струну составила 3,13 кГс/м. Ветровая горизонтальная ветровая нагрузка на один рельсовый автомобиль составила 307,5 кГс, на два в сцепке — 615 кГс.

Результаты расчетов напряжений в головке и корпусе рельса-струны для оценки их прочности приведены ниже в п. 4.5 (см. табл. 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 каждое колесо — по 0,625 тс). Так же на всю путевую структуру и рельсовый автомобиль действуют ветровые нагрузки. Ветровая погонная горизонтальная ветровая нагрузка на рельс-струну составила 3,13кГс/м. Ветровая горизонтальная ветровая нагрузка на один рельсовый автомобиль составила 307,5 кГс. Результаты расчетов напряжений в головке и корпусе рельса-струны для оценки его выносливости приведены ниже в п. 4.5 (см. табл. 4.5.3.; данные приведены для одного нагружения — в центре пролета). У анкерной опоры рельс-струна опирается на ложемент и будет усилен, при предварительном расчетном исследовании считаем, что выносливость рельса и корпуса у опоры обеспечена.

Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил для корпуса и головки рельса-струны показаны ниже в п. 4.3. и п. 4.4.

3.6.3. Расчет прочности и оценка выносливости рельса-струны

Проверка прочности корпуса и головки рельса-струны

Проверку прочности проводим по формуле (2.17) согласно СНиП 2.05.03-84* «Мосты и трубы»:

$$\sigma_S \le R_y \times m, \qquad (2.23)$$

где:

σ_S — нормальные напряжения от изгиба и растяжения;

R_y — расчетное сопротивление текучести материала;

m = 1,0 — коэффициент условий работы корпуса и головки рельса.

Материал головки и корпуса рельса — экономно легированный высокопрочный свариваемый алюминиевый сплав 01975 на основе системы Al — Zn — Mg — Cu с микродобавкой Sc и имеет сопротивление текучести 500 МПа.

Исходя из данных, приведенных в п. 3.2.2, расчетные сопротивления текучести следует принять равными: R_y = 500 МПа, m×R_y = 500 МПа.

1) Середина пролета

Сопоставляя наибольшие действующие для нижней точки корпуса (точка 2, см. рис. 4.5.1), которые приведены в табл. 4.5.2, напряжения растяжения зимой при –55°С, равные +485,12 МПа в середине пролета, с расчетными сопротивлениями m×R_y = 500 МПа для высокопрочного свариваемого алюминиевого сплава 01975, можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям головки рельса при –55 °С для этого материала обеспечена.

Так же сопоставляя наибольшие действующие для нижней точки корпуса (точка 1, см. рис.4.5.1) рельса напряжения растяжения летом при +55 °С, равные +324,89 МПа в середине пролета, которые приведены в табл. 4.5.2, с расчетными сопротивлениями m×R_y = 500 МПа для высокопрочного свариваемого алюминиевого

сплава 01975, можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям корпуса рельса при +55 °С для этого материала обеспечена.

2) На заделке в анкерную опору

Расчет напряжений проводился численно-аналитическим методом. Численным методом определялись напряжения от растяжения в сечении рельса, а аналитическим методом – напряжения от изгиба на радиусах ложемента 100 м в двух плоскостях — вертикальной и горизонтальной.

Сопоставляя наибольшие действующие для верхней точки головки рельса (точка 4, рис.4.5.1) напряжения растяжения зимой при –55 °С, равные +496,9 МПа на анкерной опоре, которые приведены в табл. 4.5.3, с расчетными сопротивлениями $m \times R_y$ = 500 МПа для высокопрочного свариваемого алюминиевого сплава 01975, можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям рельса при –55 °С для этого материала обеспечена.

Сопоставляя наибольшие действующие для нижней точки корпуса рельса (точка 4, рис.4.5.1) напряжения растяжения летом при +55 °С, равные +340,3 МПа на анкерной опоре, которые приведены в табл. 4.5.3, с расчетными сопротивлениями $m \times R_y$ = 500 МПа для высокопрочного свариваемого алюминиевого сплава 01975, можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям корпуса рельса при +55 °С для этого материала обеспечена.

Проверка выносливости корпуса и головки рельса

Металлические конструкции и их элементы в транспортных сооружениях, к чему отнесен СТЮ, непосредственно воспринимают многократно действующие подвижные, вибрационные и другого вида нагрузки с количеством циклов нагружения 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 поперечного сечения рельса-струны. Сварные поперечные швы располагаются в путевой структуре через каждые 20—30 метров (по длине алюминиевого профиля). На опорах и в местах сварки

сварные швы существенно усиливаются (накладками, косынками и др.), поэтому расчет проводим для поперечного сечения головки и корпуса рельса, расположенных между опорами. Оценку выносливости 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 5 метров от промежуточных опор. Поэтому напряжения для расчетных сечений будем брать из табл. 4.5.4 для середины пролета.

Оценку выносливости конструкций из высокопрочного свариваемого алюминиевого сплава 01975 на выносливость следует производить по традиционным общим методикам (например, по книге И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич «Расчет на прочность деталей машин». Справочник, 1979). Эти методики требуют много исходных данных для алюминиевых сплавов. Для высокопрочного свариваемого алюминиевого сплава 01975, по данным Всероссийского института легких сплавов, проводились испытания на цикловую усталость. Максимальные напряжения цикла составляли 160 МПа, минимальные 16 МПа, размах напряжений: 160 – 16 = 144 МПа. Коэффициент асимметрии цикла 16/160 = 0,1 (цикл, близкий к пульсирующему). При таких условиях испытаний образцы выдержали 210.000 циклов.

Из табл. 4.5.4 для рельса-струны найдем параметры цикла для наиболее нагруженных изгибом точек низа корпуса:

Размах напряжений от проезда юнибуса:

Летом +55 °С: $\sigma_{max} - \sigma_{min} = 40{,}85$ МПа

Зимой –55 °С: $\sigma_{max} - \sigma_{min} = 30{,}13$ МПа

Коэффициент асимметрии цикла напряжений $\rho = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ при этом составит:

Летом +55 °С: $\rho = \sigma_{min}/\sigma_{max} = 270{,}42/311{,}14 = 0{,}869$

Зимой –55 °С: $\rho = \sigma_{min}/\sigma_{max} = 440{,}22/470{,}35 = 0{,}936$

Как видно из расчетов, коэффициенты асимметрии цикла намного больше, чем

при испытаниях образцов, нагрузка близка к статической. Размах напряжений от проезда юнибуса существенно меньше, в 3,52—4,78 раза, чем при испытаниях образцов. Следует ожидать значительно большую долговечность, чем при испытаниях образцов. Таким образом число циклов (от проезда юнибуса), которое выдержит корпус и рельс значительно превысит 210.000 циклов.

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

Максимальные контактные напряжения в пятне контакта в паре «цилиндрическое колесо — плоский рельс» можно определить по формуле (И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич «Расчет на прочность деталей машин» справочник, 1979):

$$\Theta_1 = (1-\mu_1^2)/E_1 \qquad \Theta_2 = (1-\mu_2^2)/E_2$$

$$\sigma_к = 0{,}798\,[P / (2\cdot b\cdot r\cdot(\Theta_1+\Theta_2))]^{1/2} \qquad (2.24)$$

Для: $E_1 = E_2 = E$ и $\mu_1 = \mu_2 = 0{,}3$ получим известную формулу Герца—Беляева:

$$\sigma_к = 0{,}798\,[P / (2\cdot b\cdot r\cdot((1-\mu^2)/E+(1-\mu^2)/E))]^{1/2} =$$

$$= 0{,}798\,[P / (2\cdot b\cdot r\cdot((1-0.3^2)/E+(1-0{,}3^2)/E))]^{1/2} =$$

$$= 0{,}798\,[P / (2\cdot b\cdot r\cdot(0{,}91/E+0{,}91/E))]^{1/2} = 0{,}798\,[P\cdot E / (2\cdot b\cdot r\cdot 0{,}91\cdot 2))]^{1/2} =$$

$$= 0{,}798\,[P\cdot E / (2\cdot b\cdot r\cdot 0{,}91\cdot 2))]^{1/2} = 0{,}418\,[P\cdot E / (b\cdot r))]^{1/2}$$

Поскольку в расчете колесо стальное, а головка рельса из алюминиевого сплава, то пользуемся общей формулой (2.24):

$$\Theta_1 = (1-\mu_1^2)/E_1 = 4{,}333\cdot 10^{-7}\ см^2/\ кГс$$

$$\Theta_2 = (1-\mu_2^2)/E_2 = 12{,}54\cdot 10^{-7}\ см^2/\ кГс$$

$$\sigma_к = 0{,}798\,[P / (2\cdot b\cdot r\cdot(\Theta_1+\Theta_2))]^{1/2} = 859\ кгс/см^2,$$

где:

P = 625 кГс — усилие прижима колеса;

E_1 = 2.060.000 кГс/см^2 — модуль упругости стали;

μ_1= 0,3 – коэффициент Пуассона стали;

E_2 = 700.000 кГс/см^2 — модуль упругости алюминиевого сплава;

μ_2= 0,35 – коэффициент Пуассона алюминиевого сплава;

b = 8 см — ширина контакта;

r = 20 см — радиус колеса рельсового автомобиля,

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

$$\ell_к = 1{,}596\ [2\cdot P\cdot r\cdot(\Theta_1+\Theta_2)/b]^{1/2} = 0{,}1 \text{ см} = 1{,}16 \text{ мм}.$$

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

$$F_k = \ell_к\cdot b = 0{,}928 \text{ см}^2.$$

По сравнению с железной дорогой контактные напряжения в паре «колесо — рельс» (они достигают там значений 20.000 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 10 мм), на узкую прямоугольную полоску (длиной 1,16 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

3.8.1. Расчет вертикального перемещения рельса-струны и радиуса траектории движения рельсового автомобиля под действием собственного веса

1) Сделаем оценку вертикальной ровности пути, используя результаты расчетов прогиба точки — середины между колесами модуля весом 2,5 тс — при температуре +55ºС (при температуре +55ºС прогибы наибольшие). Результаты расчетов движения точки — середины между колесами — изображены в виде графика на рис. 3.8.1.

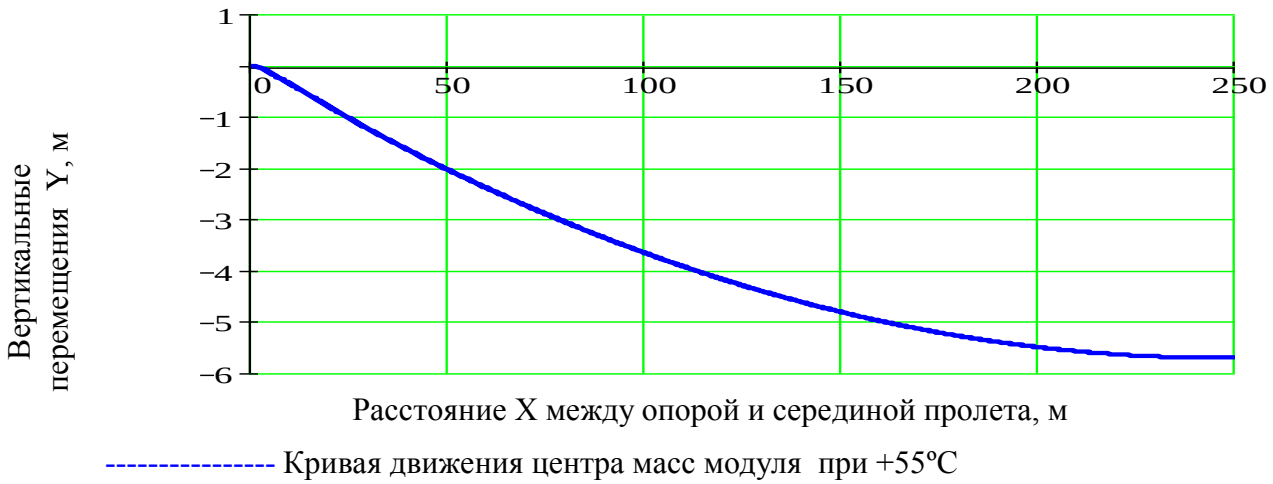


Рис. 3.8.1. Половина кривой движения точки — середины между колесами, от 0 метров (опора) до 250 метров (середина пролета) под действием веса модуля при +55ºС, вторая ветвь кривой симметрична относительно середины пролета

Радиусы кривизны этой вертикальной кривой при +55ºС показаны на рис. 3.8.2.

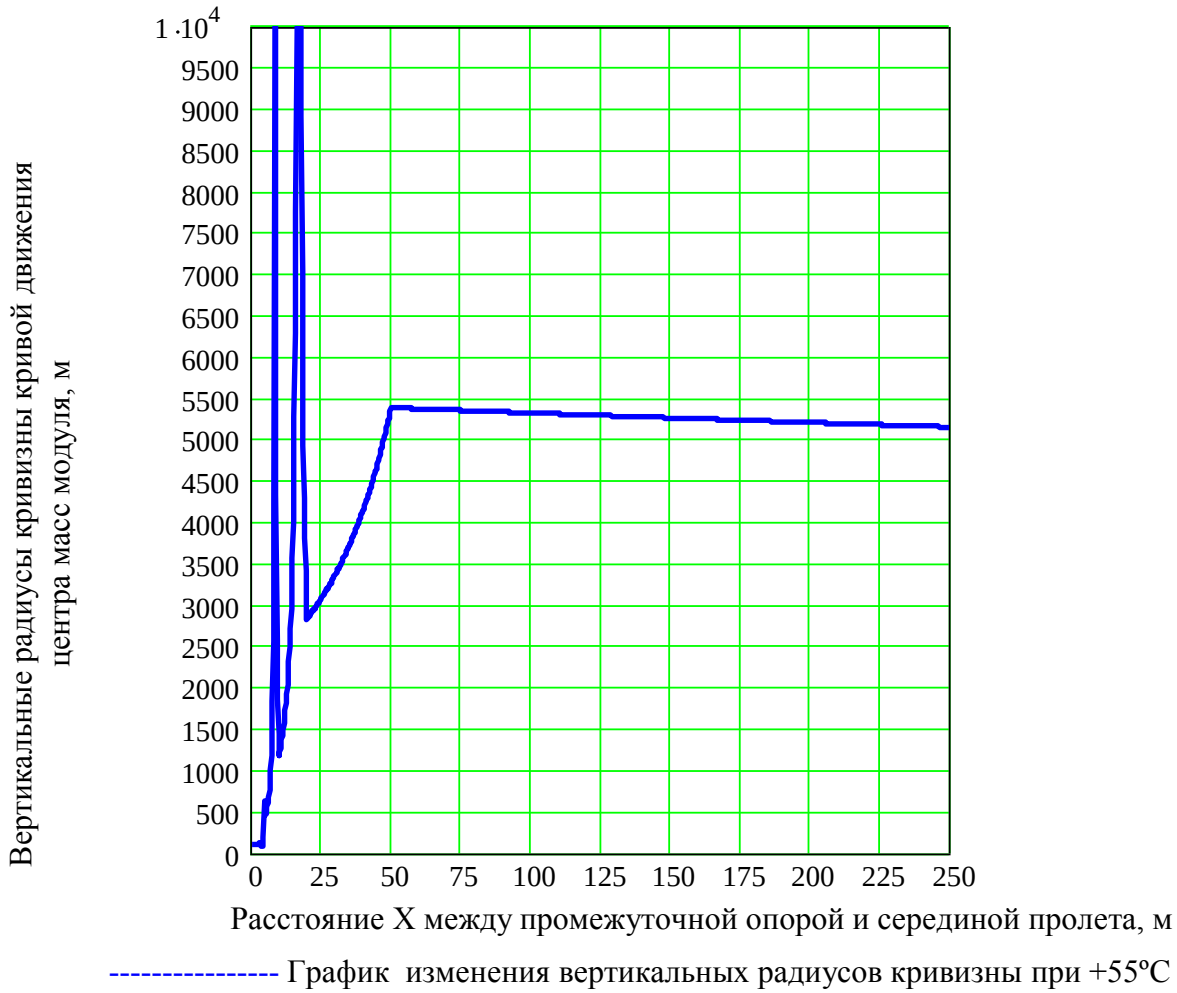


Рис. 3.8.2. График движения точки — середины между колесами модуля, от 0 метров (опора) до 250 метров (середина пролета) под действием веса модуля при +55ºС, вторая ветвь графика симметрична относительно середины пролета

Как видно из рисунка 3.8.2, вертикальные радиусы кривизны составляют на опоре 100 метров, далее изменяются от 5400 до 5100 метров в середине пролета.

2) Сделаем оценку вертикальной ровности пути, используя результаты расчетов прогиба точки — середины между колесами модуля весом 2,5 тс, при температуре 0ºС. Результаты расчетов движения точки — середины между колесами, изображены в виде графика на рис. 3.8.3.

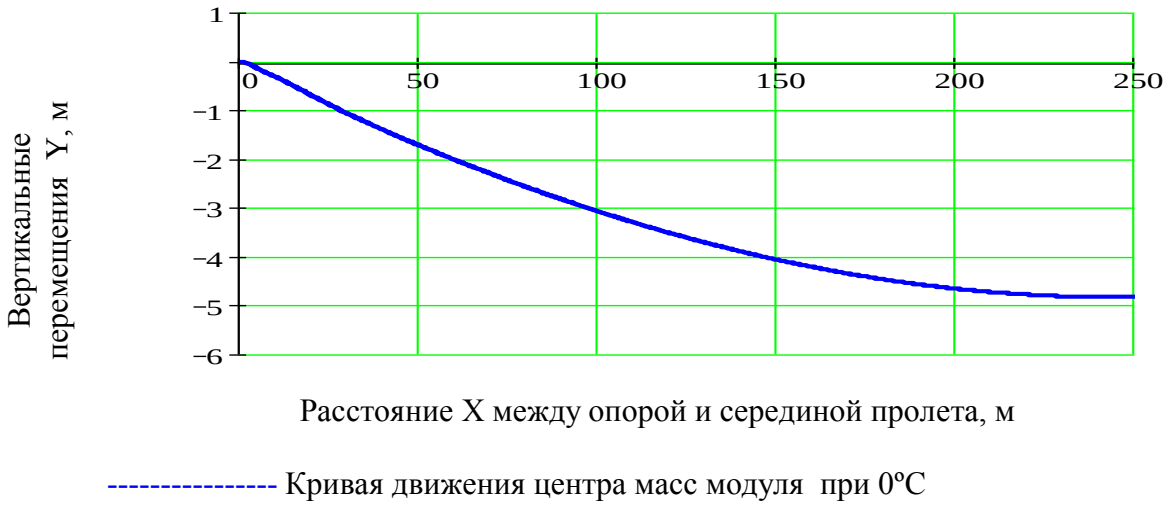


Рис. 3.8.3. Половина кривой движения точки — середины между колесами, от 0 метров (опора) до 250 метров (середина пролета) под действием веса модуля при 0ºС, вторая ветвь кривой симметрична относительно середины пролета

Радиусы кривизны этой вертикальной кривой при 0ºС показаны на рис. 3.8.4.

Как видно из рис. 3.8.4, вертикальные радиусы кривизны составляют на опоре 100 метров, далее изменяются от 7450 до 5500 метров в середине пролета.

3) Сделаем оценку вертикальной ровности пути, используя результаты расчетов прогиба точки — середины между колесами модуля весом 2,5 тс, при температуре –55ºС (при температуре –55ºС прогибы наименьшие). Результаты расчетов движения точки — середины между колесами, изображены в виде графика на рис. 3.8.5.

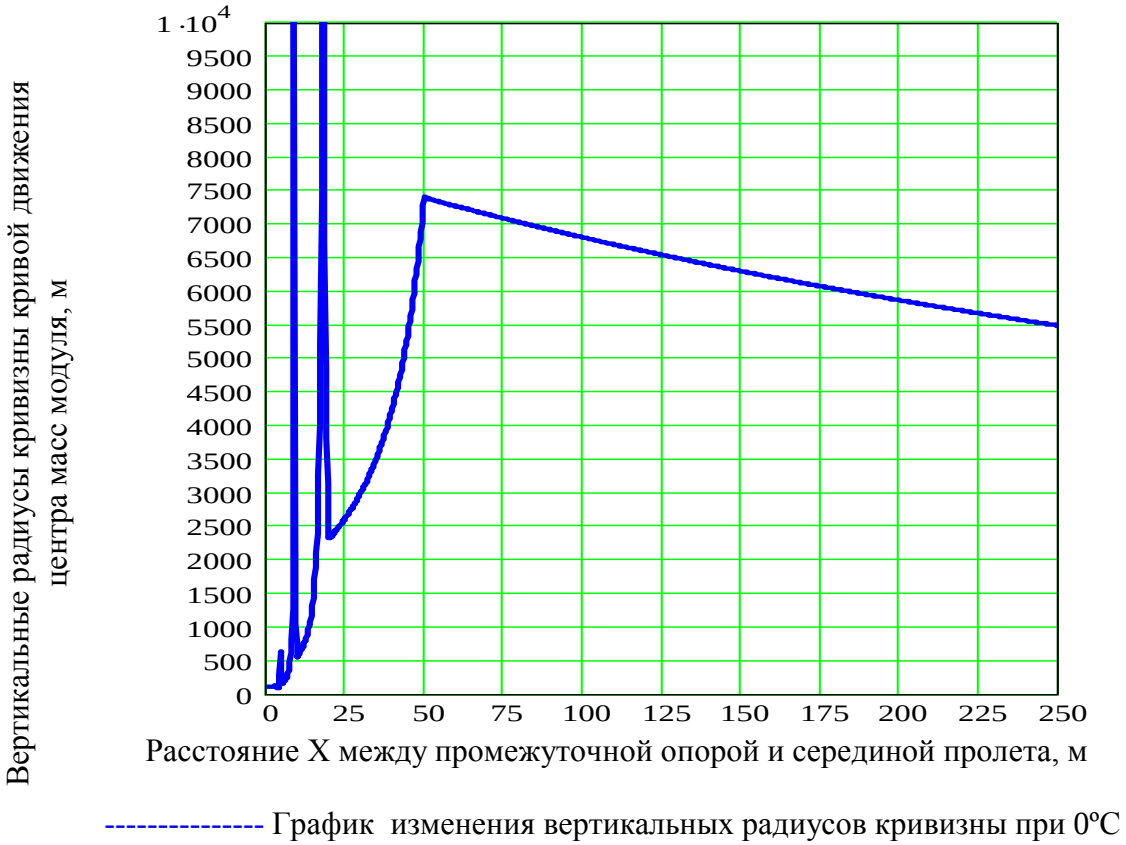


Рис. 3.8.4. График движения точки — середины между колесами модуля, от 0 метров (опора) до 250 метров (середина пролета) под действием веса модуля при 0ºС , вторая ветвь графика симметрична относительно середины пролета

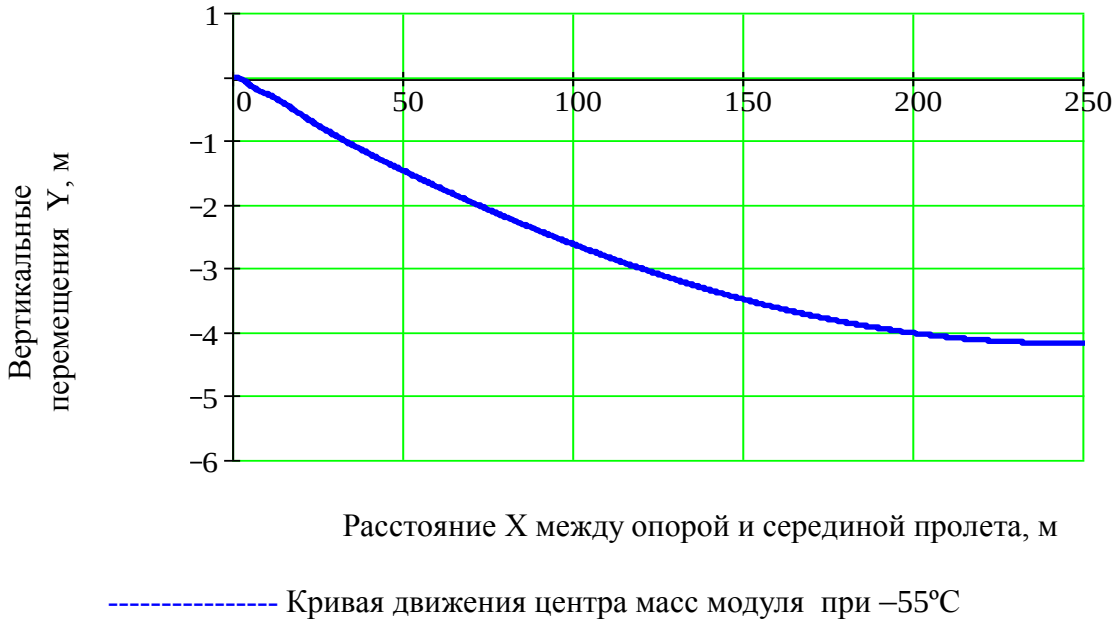


Рис. 3.8.5. Половина кривой движения точки — середины между колесами, от 0 метров (опора) до 250 метров (середина пролета) под действием веса модуля при –55ºС, вторая ветвь кривой симметрична относительно середины пролета

Радиусы кривизны этой вертикальной кривой при –55ºС показаны на рис. 3.8.6.

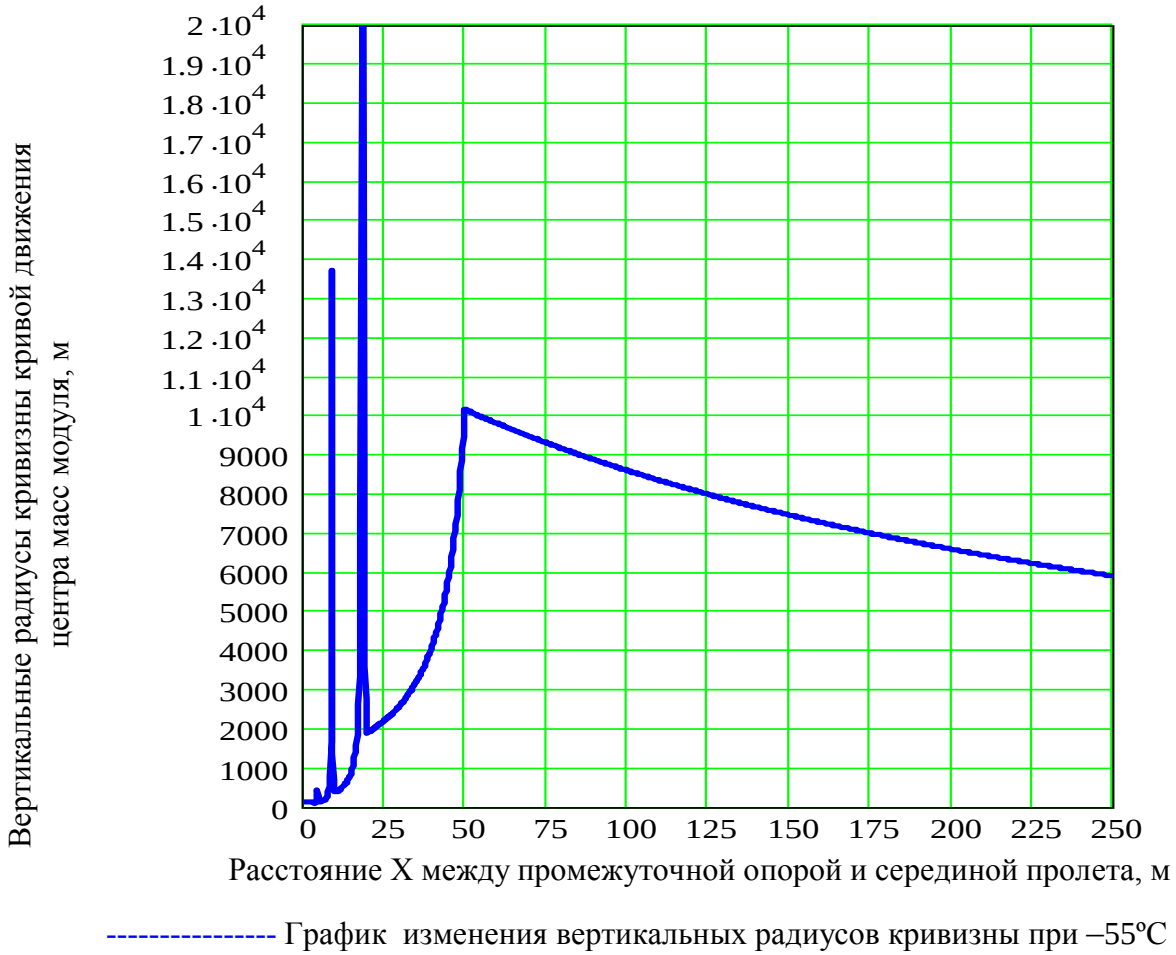
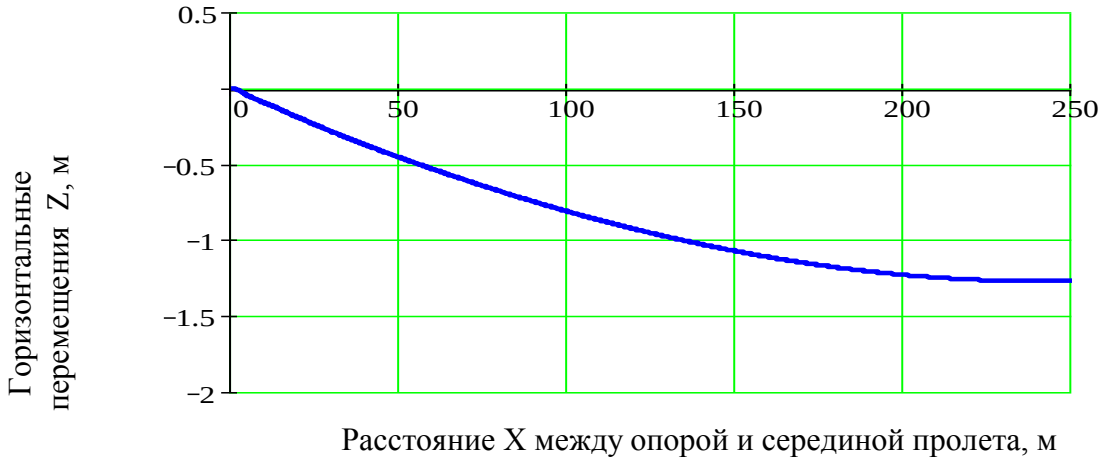


Рис. 3.8.6. График движения точки — середины между колесами модуля, от 0 метров (опора) до 250 метров (середина пролета) под действием веса модуля при –55ºС, вторая ветвь графика симметрична относительно середины пролета

Как видно из рисунка 3.8.6, вертикальные радиусы кривизны составляют на опоре 100 метров, далее изменяются от 11200 до 6000 метров в середине пролета.

3.8.2. Расчет горизонтального перемещения рельса-струны и радиуса траектории движения рельсового автомобиля под действием только силы ветра

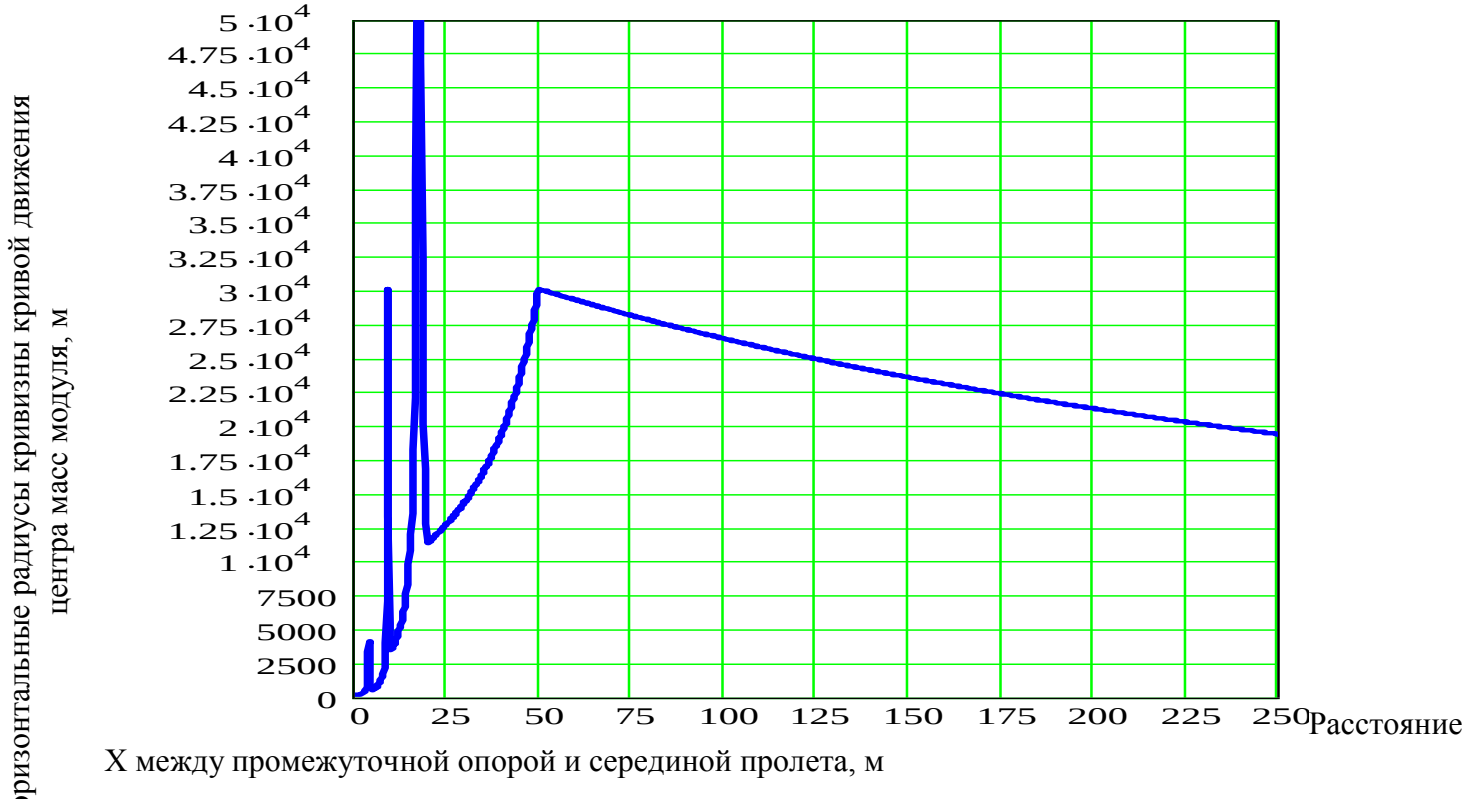
1) Сделаем оценку горизонтальной ровности пути, используя результаты расчетов прогиба точки — середины между колесами модуля от действия сил бокового ветра величиной 307,5 кГс при температуре +55ºС (при температуре +55ºС прогибы наибольшие). Результаты расчетов движения точки — середины между колесами, изображены в виде графика на рис. 3.8.7.



---------- Кривая движения центра масс модуля при +55ºС

Рис. 3.8.7. Половина кривой движения точки — середины между колесами, от 0 метров (опора) до 250 метров (середина пролета) под действием бокового ветра при +55ºС, вторая ветвь кривой симметрична относительно середины пролета

Радиусы кривизны этой горизонтальной кривой при +55ºС показаны на рис. 3.8.8.



---------- График изменения горизонтальных радиусов кривизны под действием бокового ветра при +55ºС

Рис. 3.8.8. График движения точки — середины между колесами модуля, от 0 метров (опора) до 250 метров (середина пролета) под действием бокового ветра при +55ºС, вторая ветвь графика симметрична относительно середины пролета

Как видно из рис. 3.8.8, горизонтальные радиусы кривизны при +55ºС составляют на опоре 100 метров, далее изменяются от 30000 до 19000 метров в середине пролета.

2) Сделаем оценку горизонтальной ровности пути, используя результаты расчетов прогиба точки — середины между колесами модуля от сил бокового ветра величиной 307,5 кГс при температуре 0˚С. Результаты расчетов движения точки — середины между колесами, изображены в виде графика на рис. 3.8.9:

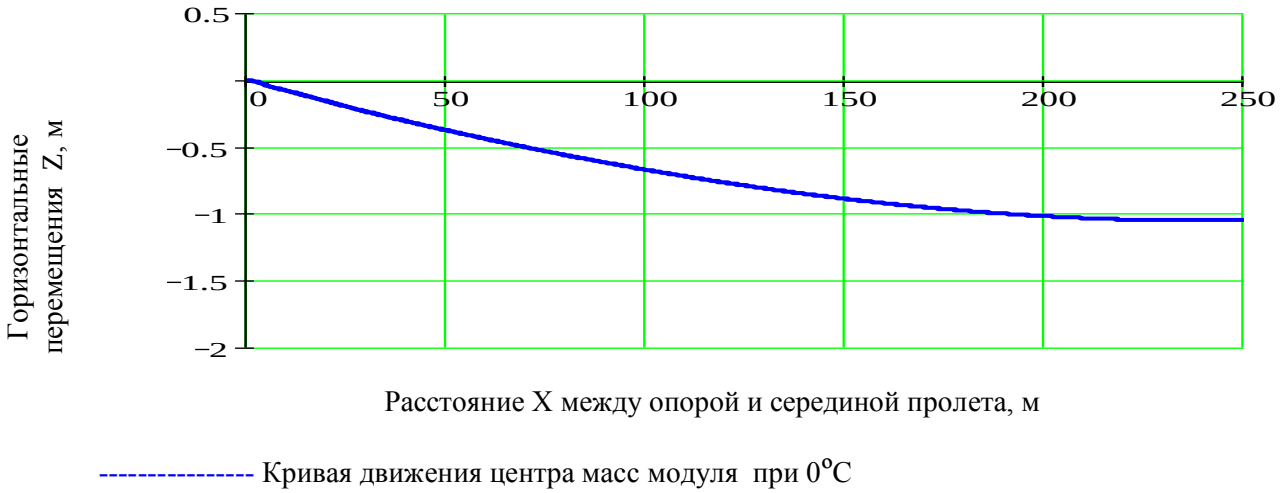
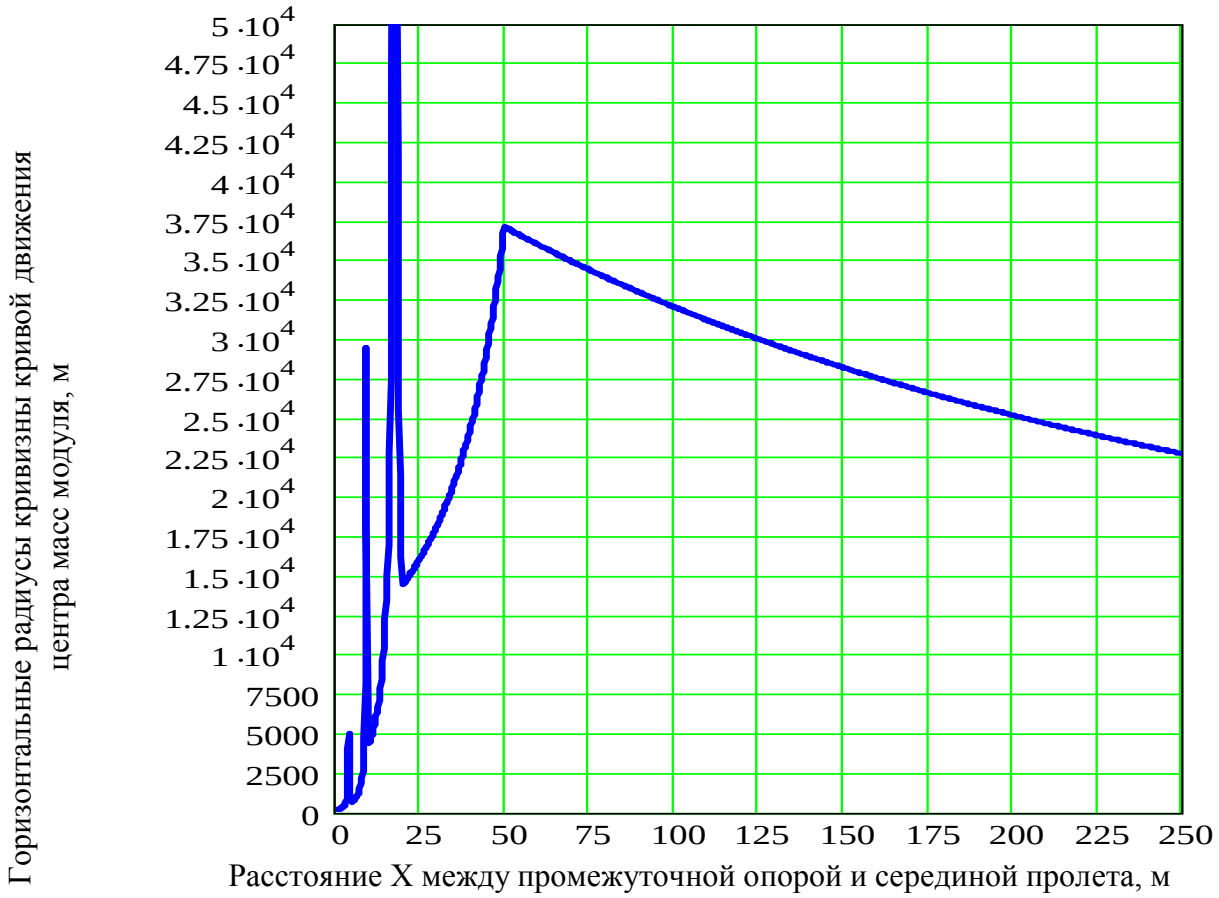


Рис. 3.8.9. Половина кривой движения точки — середины между колесами, от 0 метров (опора) до 250 метров (середина пролета) под действием бокового ветра при 0°С, вторая ветвь кривой симметрична относительно середины пролета

Радиусы кривизны этой горизонтальной кривой при 0ºС показаны на рис. 3.8.10.

Как видно из рис. 3.8.10, радиусы кривизны составляют на опоре 100 метров, далее изменяются от 37500 до 22500 метров в середине пролета.

3) Сделаем оценку горизонтальной ровности пути, используя результаты расчетов прогиба точки — середины между колесами модуля от сил бокового ветра величины 307,5 кГс при температуре –55ºС (при температуре –55ºС прогибы наименьшие). Результаты расчетов движения точки — середины между колесами, изображены в виде графика на рис. 3.8.11.



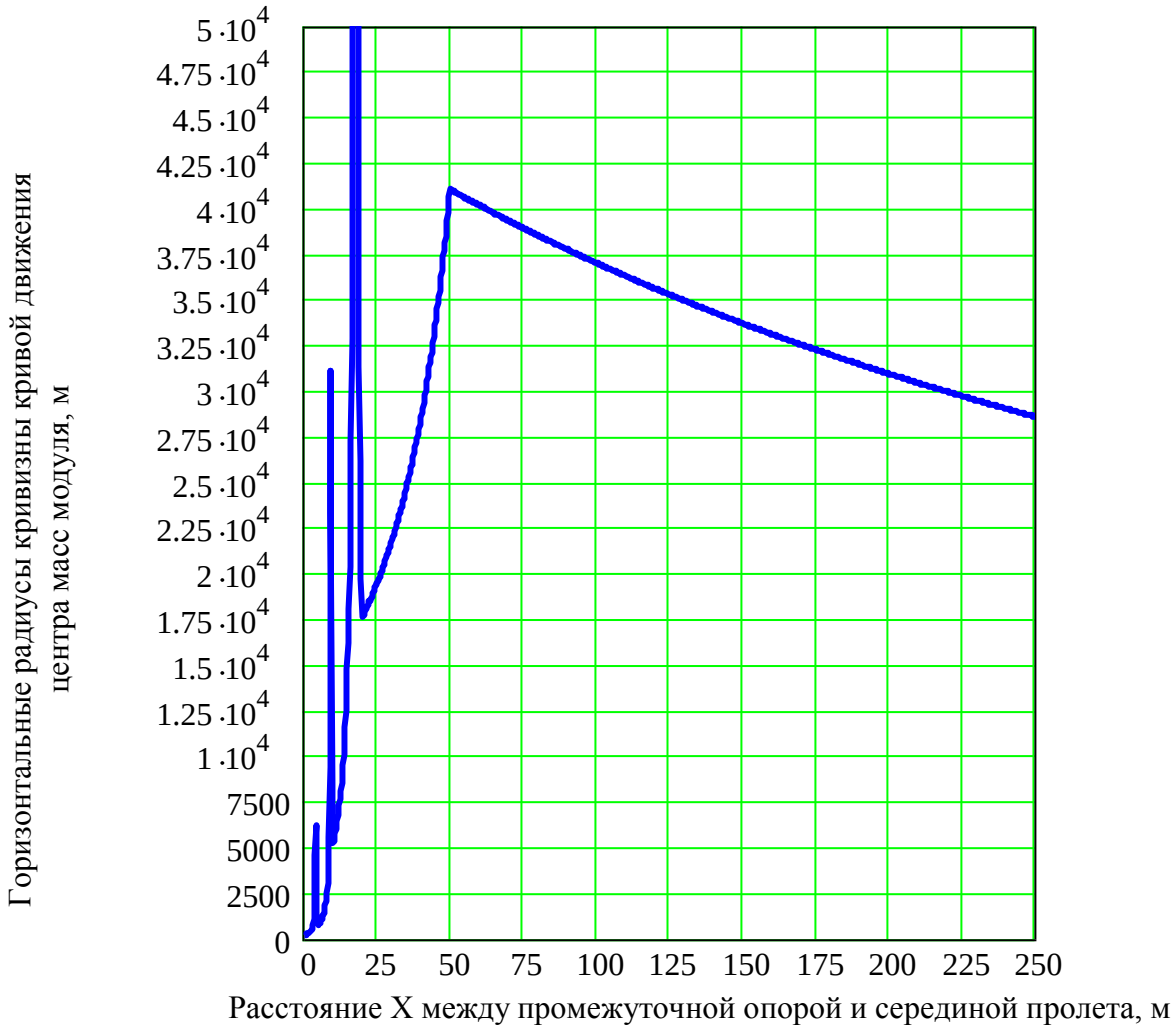
---------- График изменения горизонтальных радиусов кривизны под действием бокового ветра при 0ºС

Рис. 3.8.10. График движения точки — середины между колесами модуля, от 0 метров (опора) до 250 метров (середина пролета) под действием бокового ветра при 0ºС, вторая ветвь графика симметрична относительно середины пролета

---------- Кривая движения центра масс модуля при –55ºС

Рис. 3.8.11. Половина кривой движения точки – середины между колесами от 0 метров (опора) до 250 метров (середина пролета) под действием бокового ветра при –55ºС, вторая ветвь кривой симметрична относительно середины пролета

Радиусы кривизны этой горизонтальной кривой при –55ºС показаны на рис. 3.8.12.



---------- График изменения горизонтальных радиусов кривизны под действием бокового ветра при –55ºС

Рис. 3.8.12. График движения точки — середины между колесами модуля, от 0 метров (опора) до 250 метров (середина пролета) под действием бокового ветра при –55ºС, вторая ветвь графика симметрична относительно середины пролета

Как видно из рисунка 3.8.12, горизонтальные радиусы кривизны при –55ºС составляют на опоре 100 метров, далее изменяются от 41000 до 28500 метров в середине пролета.

4. Графические результаты расчетов

4.1. Схемы нагружения рельса-струны нагрузкой от подвижного состава

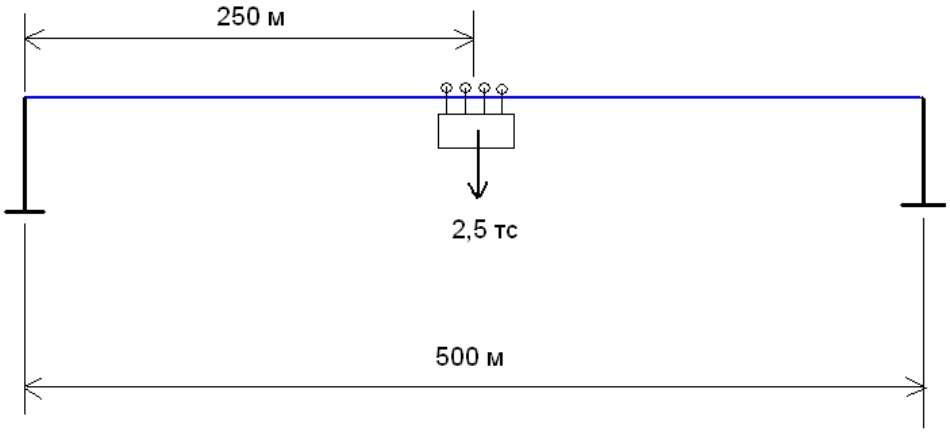


Рис. 4.1.1. Одиночный рельсовый автомобиль располагается в середине пролета

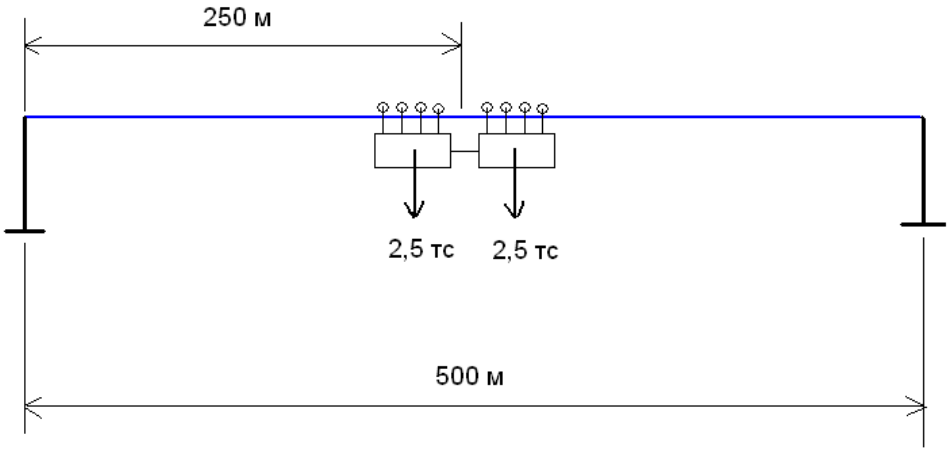


Рис 4.1.2. Два рельсовых автомобиля в сцепке располагаются в середине пролета

4.2. Эпюры продольных сил в струне

4.2.1. Эпюры продольных сил в струне, вызванных предварительным натяжением, собственным весом рельса-струны и ветром

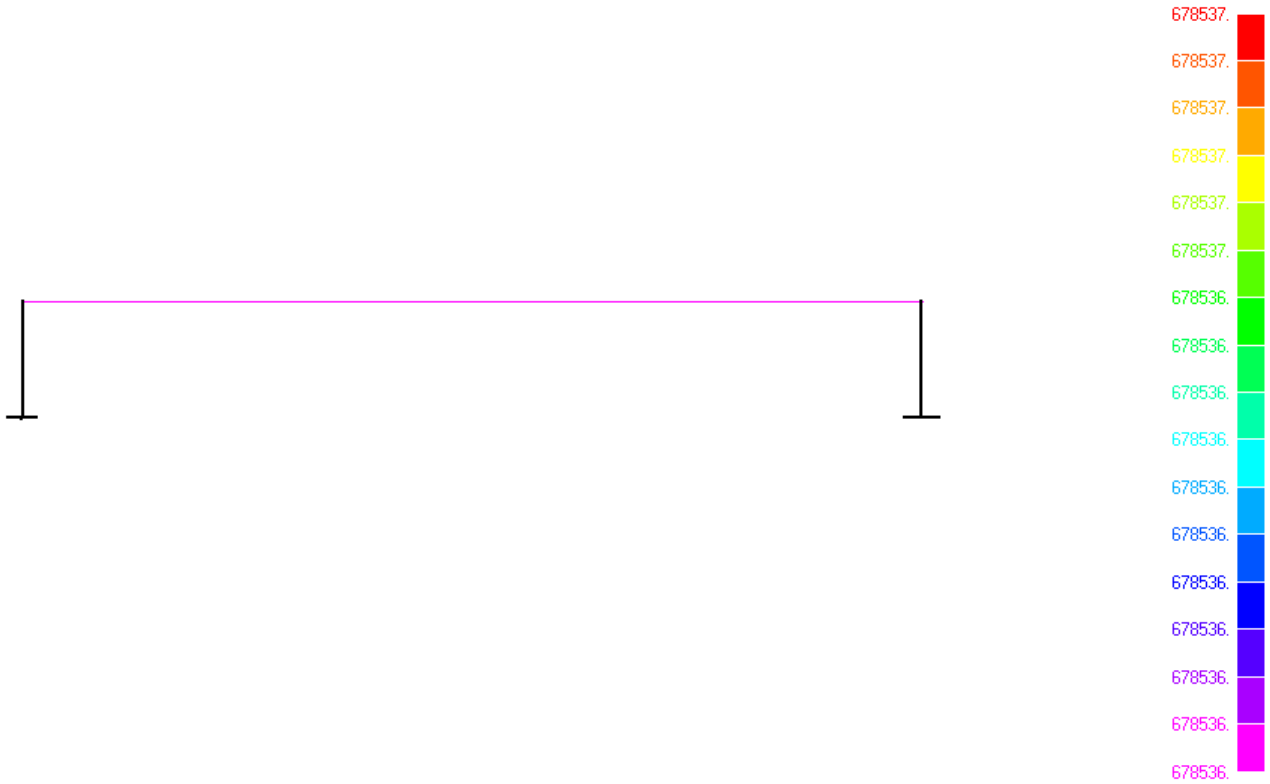


Рис. 4.2.1.1. Эпюра продольных сил (Н) в струне только от предварительного натяжения при температуре 0 °С (температура сборки)

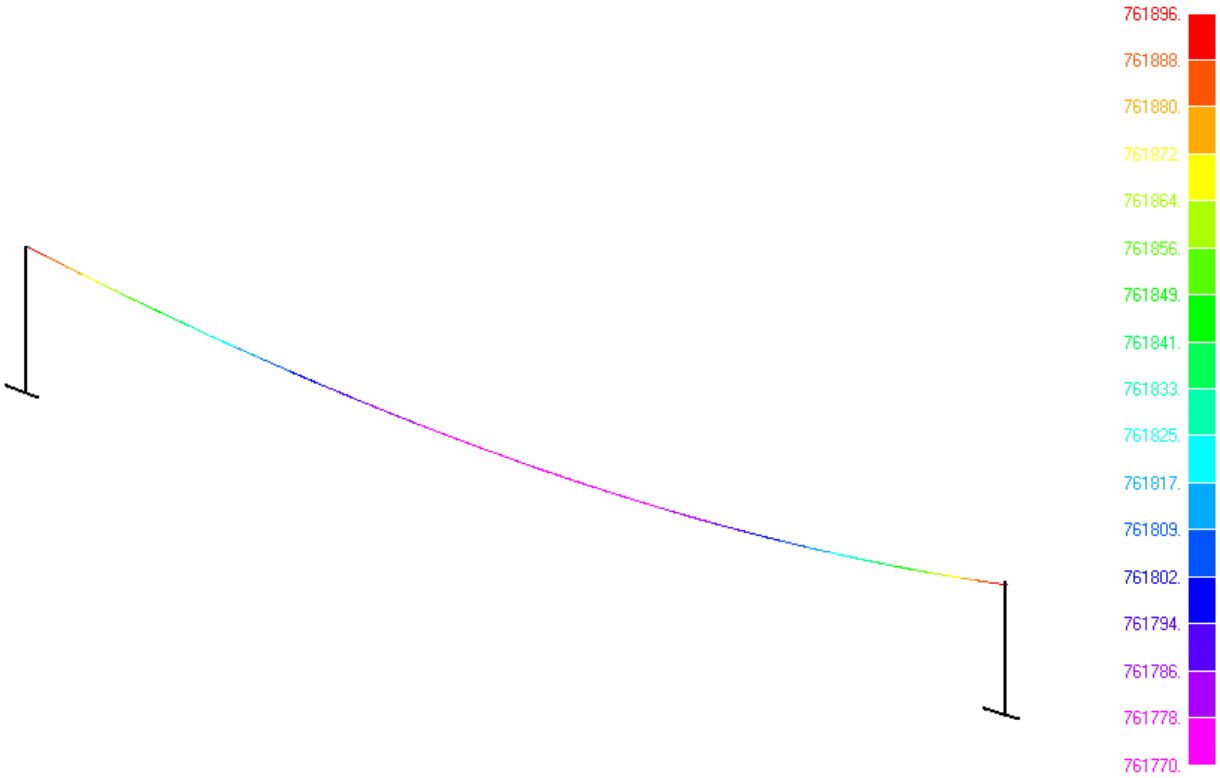


Рис. 4.2.1.3. Эпюра продольных сил (Н) в струне от предварительного натяжения с учетом собственного веса рельса-струны и с учетом бокового ветра при температуре –55°С

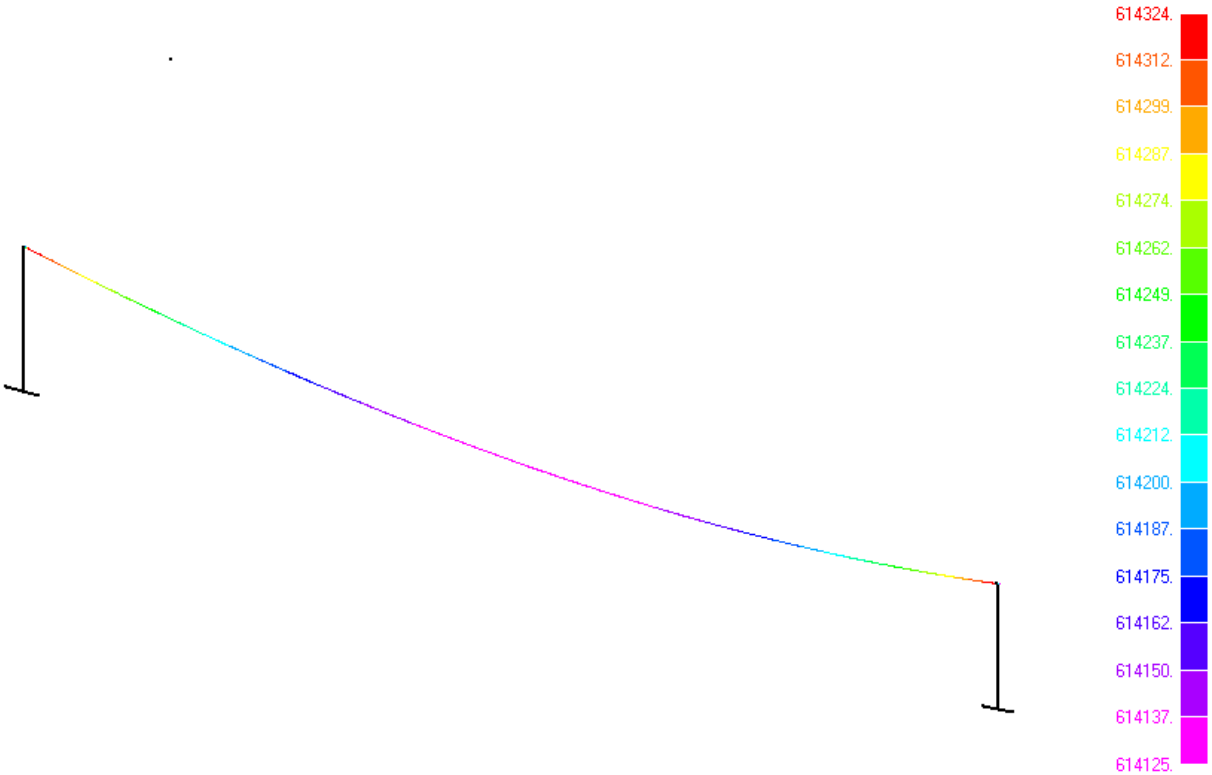


Рис. 4.2.1.4. Эпюра продольных сил (Н) в струне от предварительного натяжения с учетом собственного веса рельса-струны и с учетом бокового ветра при температуре +55°С

4.2.2. Эпюры продольных сил в струне, вызванных весом рельса-струны, двух рельсовых автомобилей в сцепке и ветровых нагрузок от них

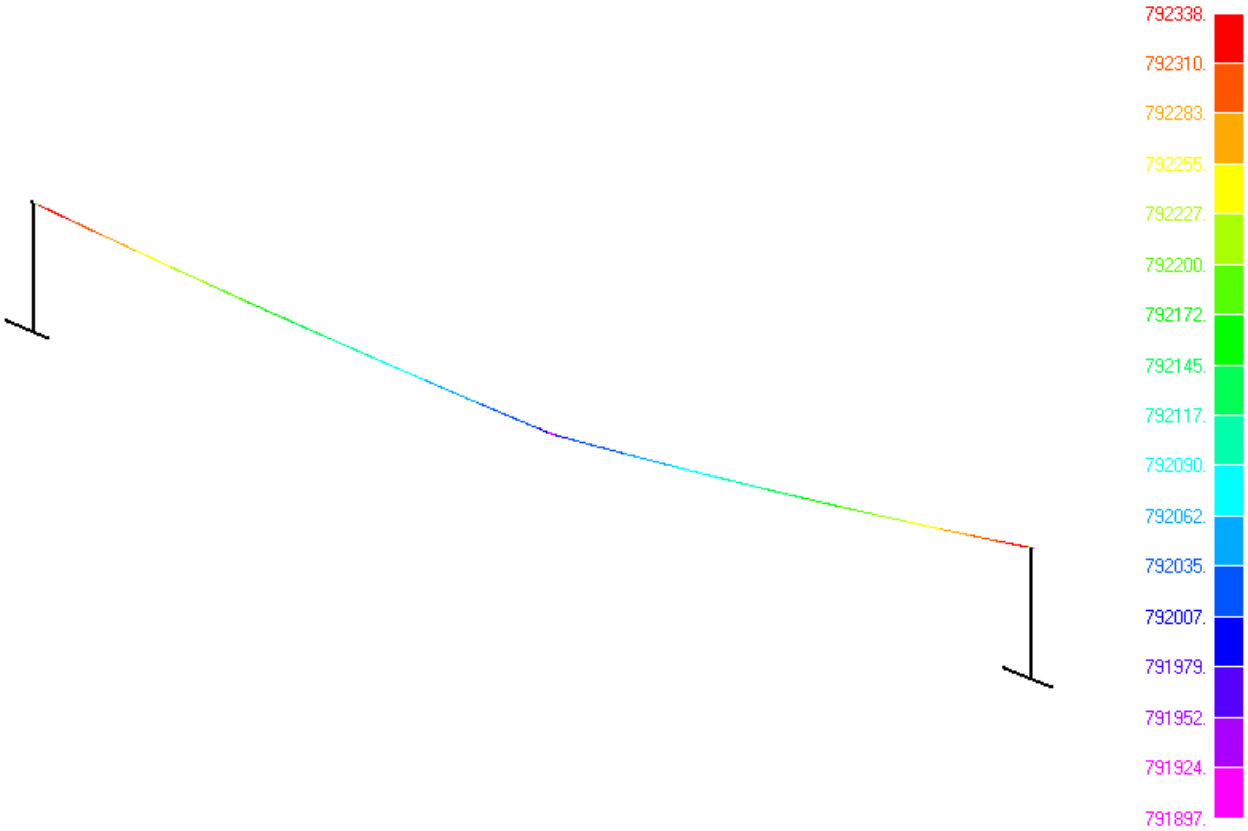


Рис. 4.2.2.1. Эпюра продольных сил (Н) в струне от предварительного натяжения с учетом собственного веса рельса-струны, двух рельсовых автомобилей в сцепке, расположенных в середине пролета, с учетом действия бокового ветра на рельс и автомобили при температуре –55°С

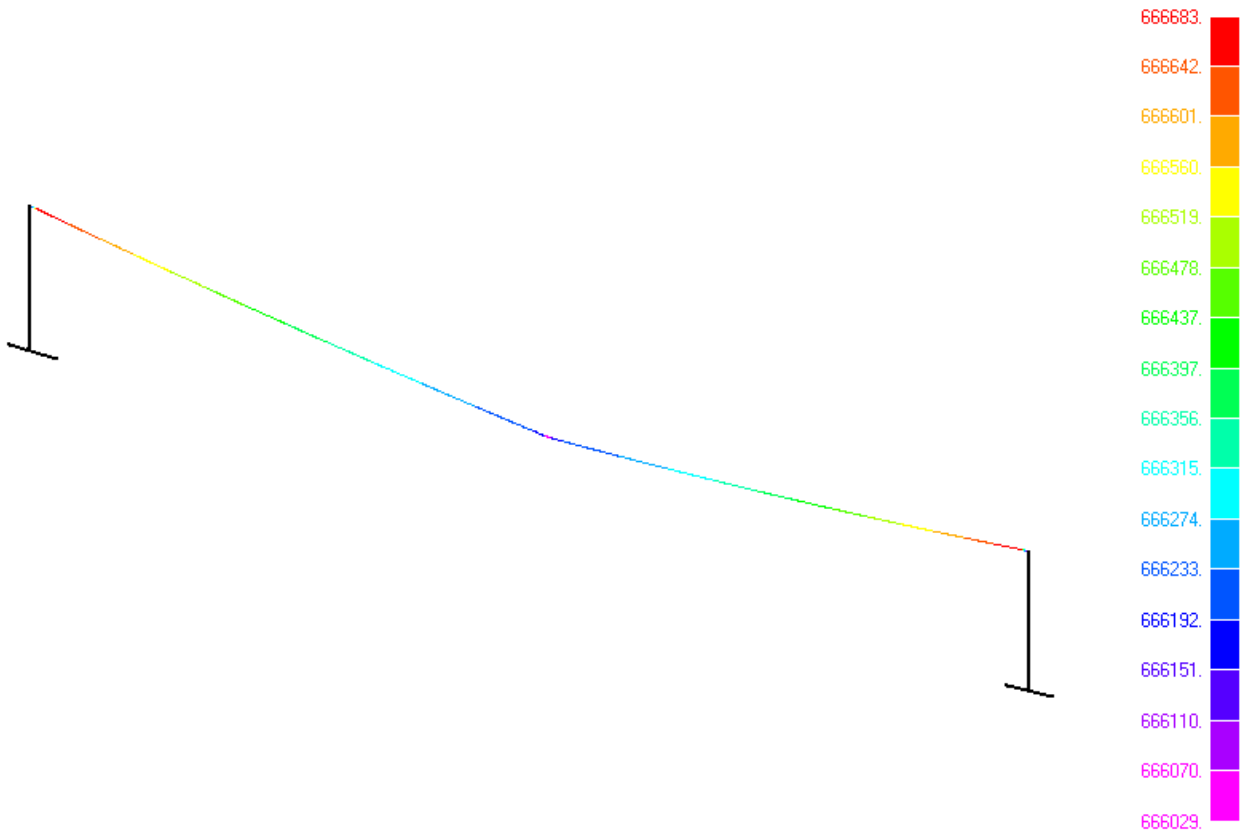


Рис. 4.2.2.2. Эпюра продольных сил (Н) в струне от предварительного натяжения с учетом собственного веса рельса-струны, двух рельсовых автомобилей в сцепке, расположенных в середине пролета, с учетом действия бокового ветра на рельс и автомобили при температуре +55°С

4.3. Эпюры растягивающих сил, изгибающих моментов и поперечных сил в корпусе рельса в середине пролета

Для расчета прочности

4.3.1. Эпюры растягивающих сил в корпусе рельса от собственного веса путевой структуры, веса сцепки из двух рельсовых автомобилей и боковых ветровых нагрузок (для расчета прочности рельса-струны)

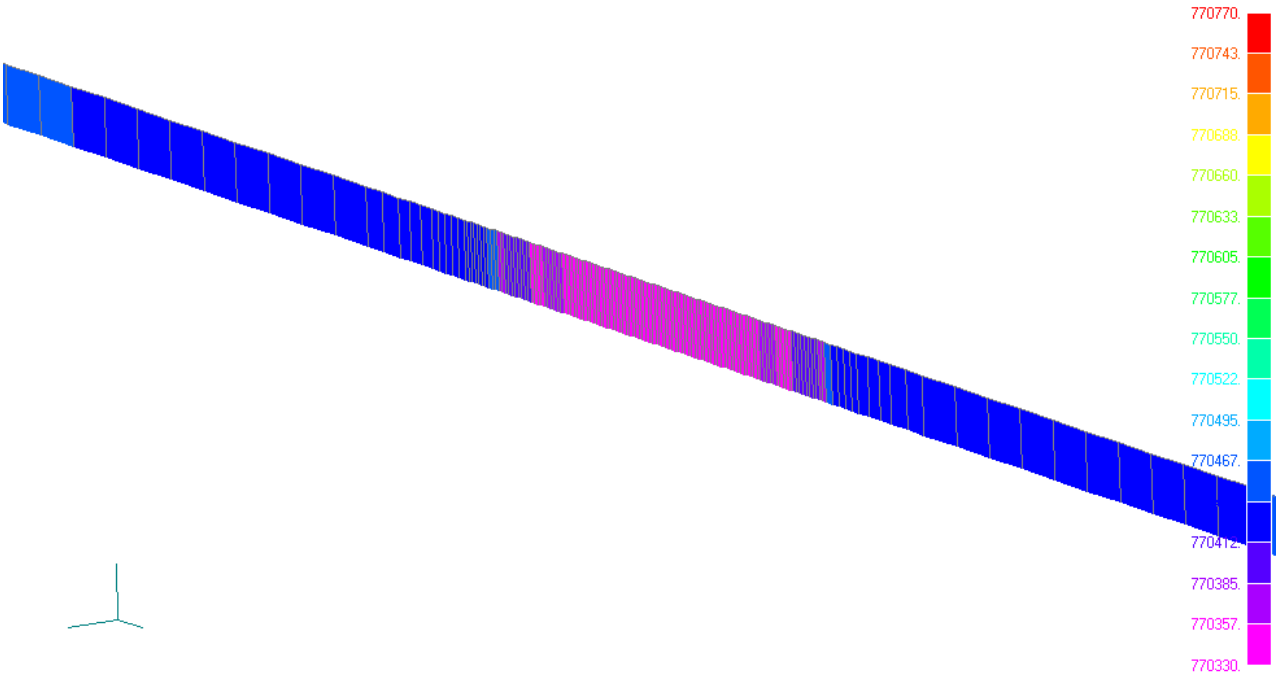


Рис. 4.3.1.1. Эпюра растягивающих сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны, веса двух рельсовых автомобилей, размещенных в середине пролета, и боковых ветровых нагрузок при –55 °С

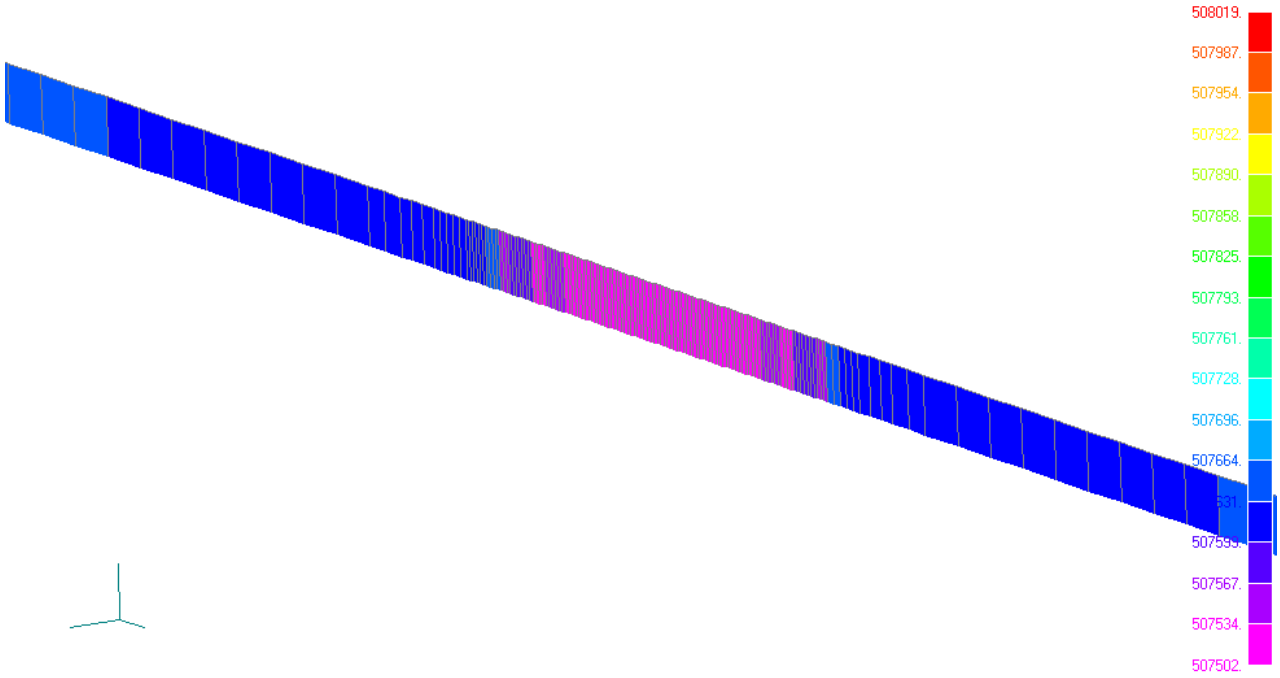


Рис. 4.3.1.2. Эпюра растягивающих сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны, веса двух рельсовых автомобилей, размещенных в середине пролета, и боковых ветровых нагрузок при +55° С

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

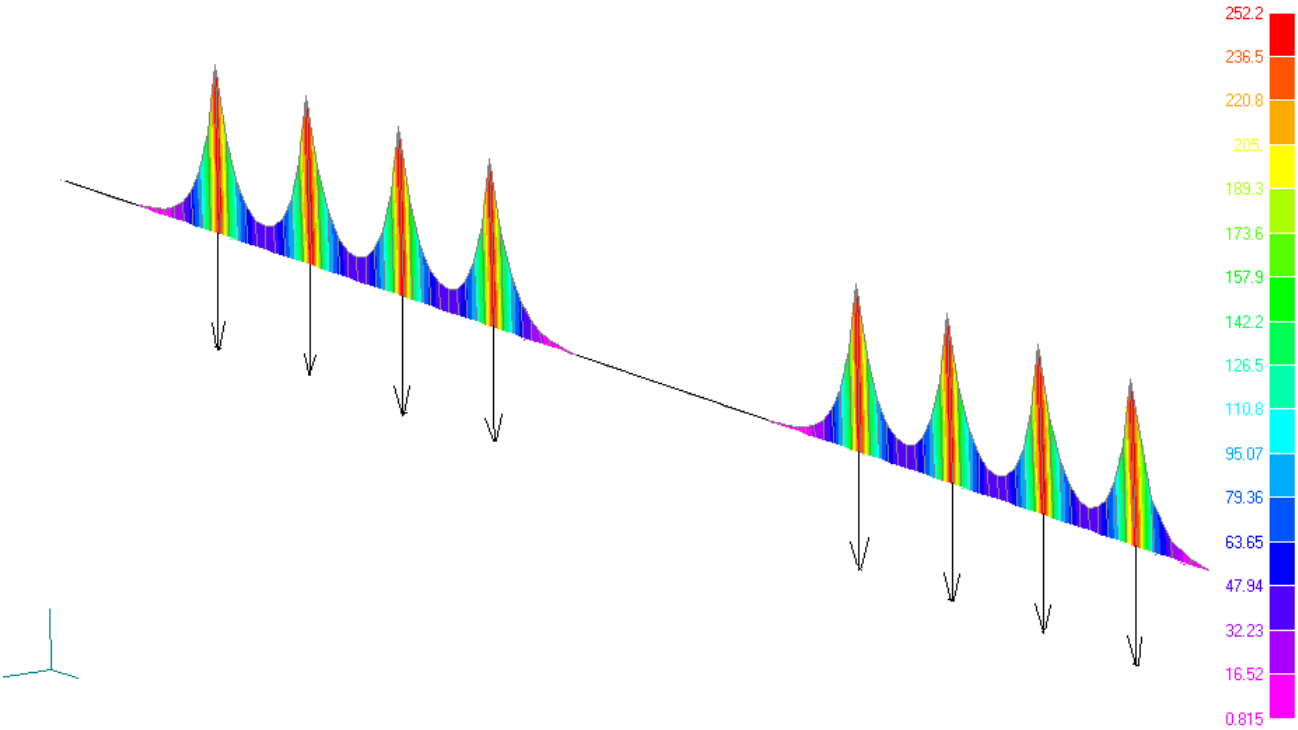


Рис. 4.3.2.1. Эпюра вертикальных изгибающих моментов (Н×м) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух рельсовых автомобилей, размещенных в середине пролета при –55 °С

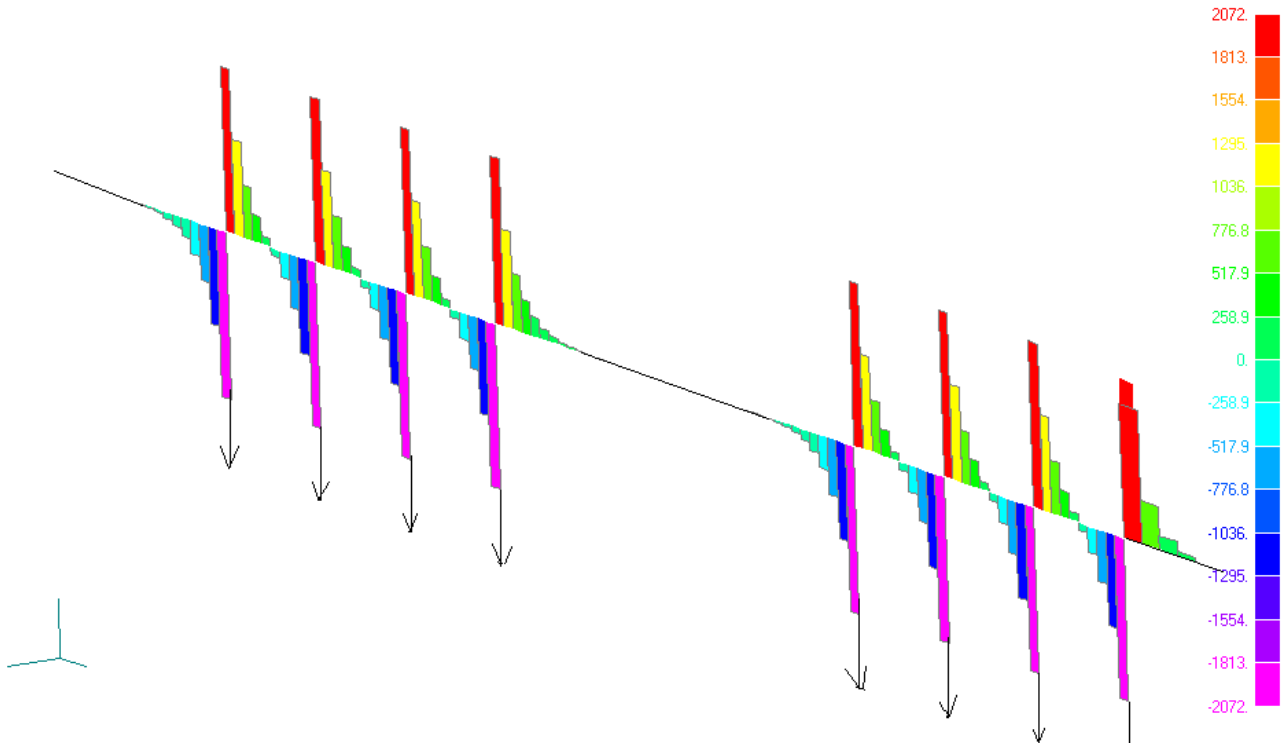


Рис. 4.3.2.2. Эпюра вертикальных поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух рельсовых автомобилей, размещенных в середины пролета при –55 °С

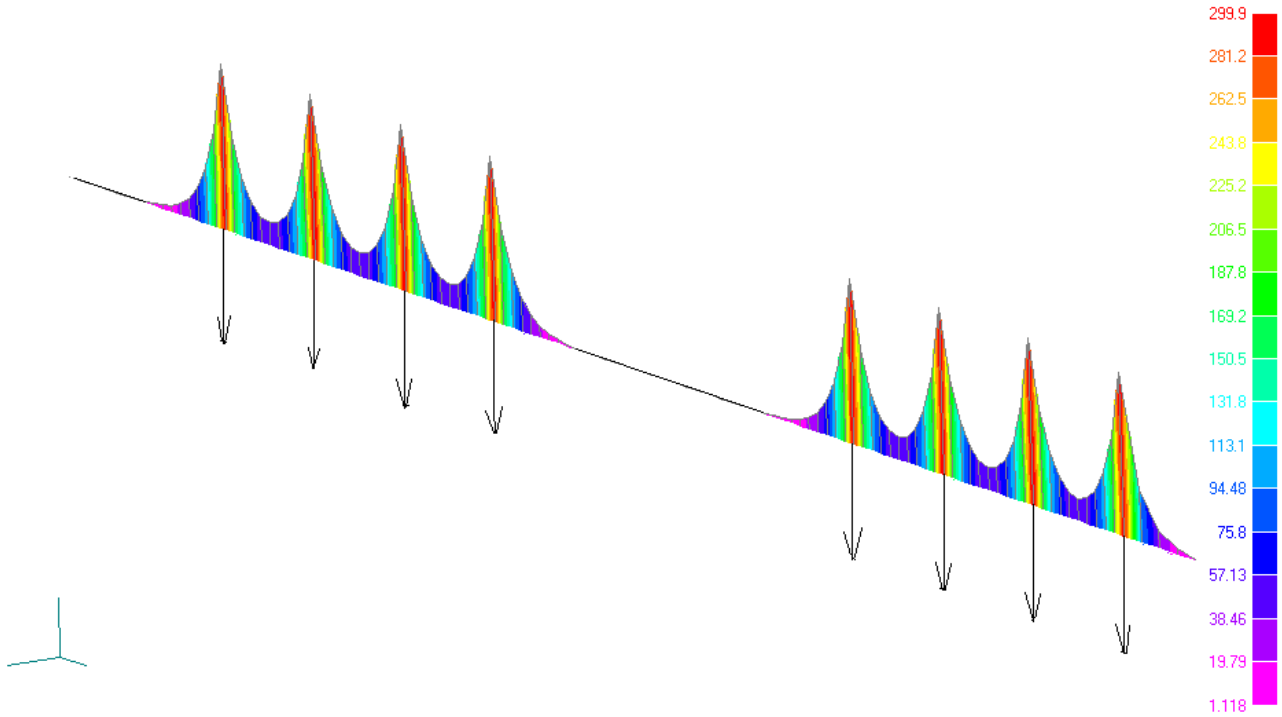


Рис. 4.3.2.3. Эпюра вертикальных изгибающих моментов (Н×м) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух рельсовых автомобилей, размещенных в середине пролета при +55 °С

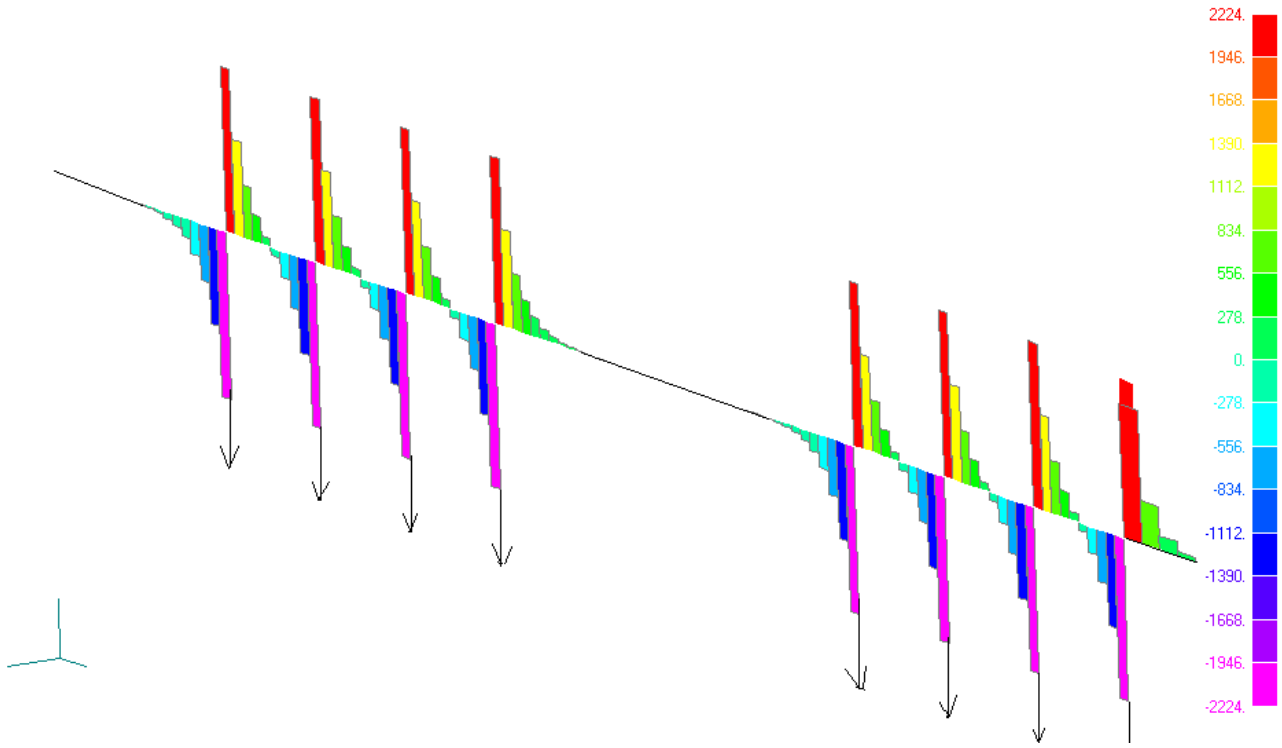


Рис. 4.3.2.4. Эпюра вертикальных поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух рельсовых автомобилей, размещенных в середине пролета при +55 °С

4.3.3. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в корпусе рельса от боковых ветровых нагрузок на путевую структуру и от ветровых нагрузок на сцепку из двух рельсовых автомобилей (для расчета прочности рельса-струны) в горизонтальной плоскости

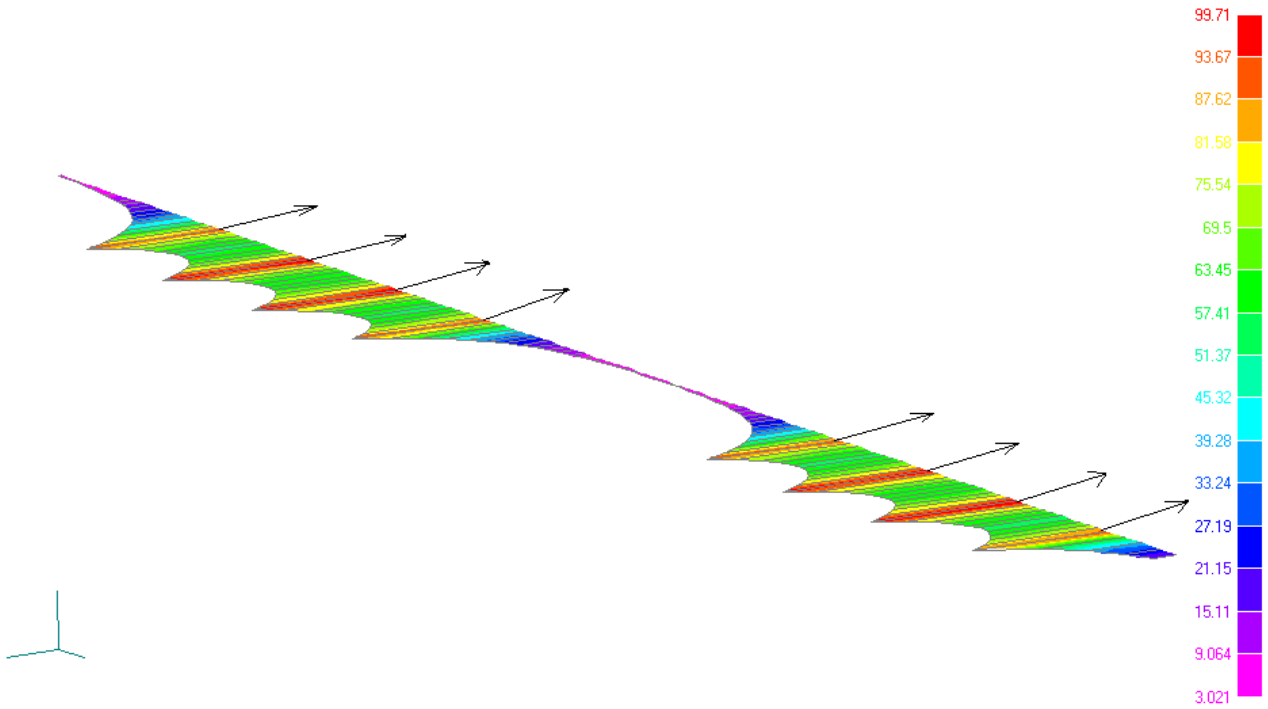


Рис. 4.3.3.1. Эпюра горизонтальных изгибающих моментов (Н×м) в корпусе рельса от ветровых нагрузок на путевую структуру и от ветровых нагрузок на сцепку из двух рельсовых автомобилей (для расчета прочности рельса-струны) в горизонтальной плоскости при –55 °С

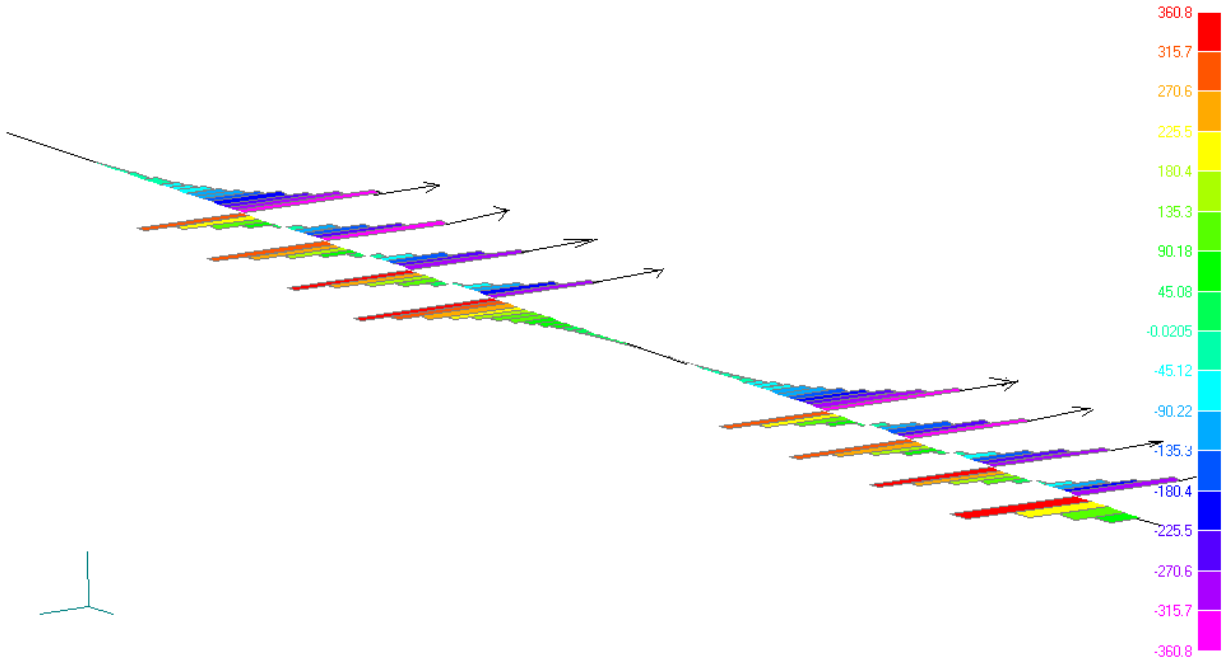


Рис. 4.3.3.2. Эпюра горизонтальных поперечных сил (Н) в корпусе рельсаот ветровых нагрузок на путевую структуру и от ветровых нагрузок на сцепку из двух рельсовых автомобилей (для расчета прочности рельса-струны) в горизонтальной плоскости при –55 °С

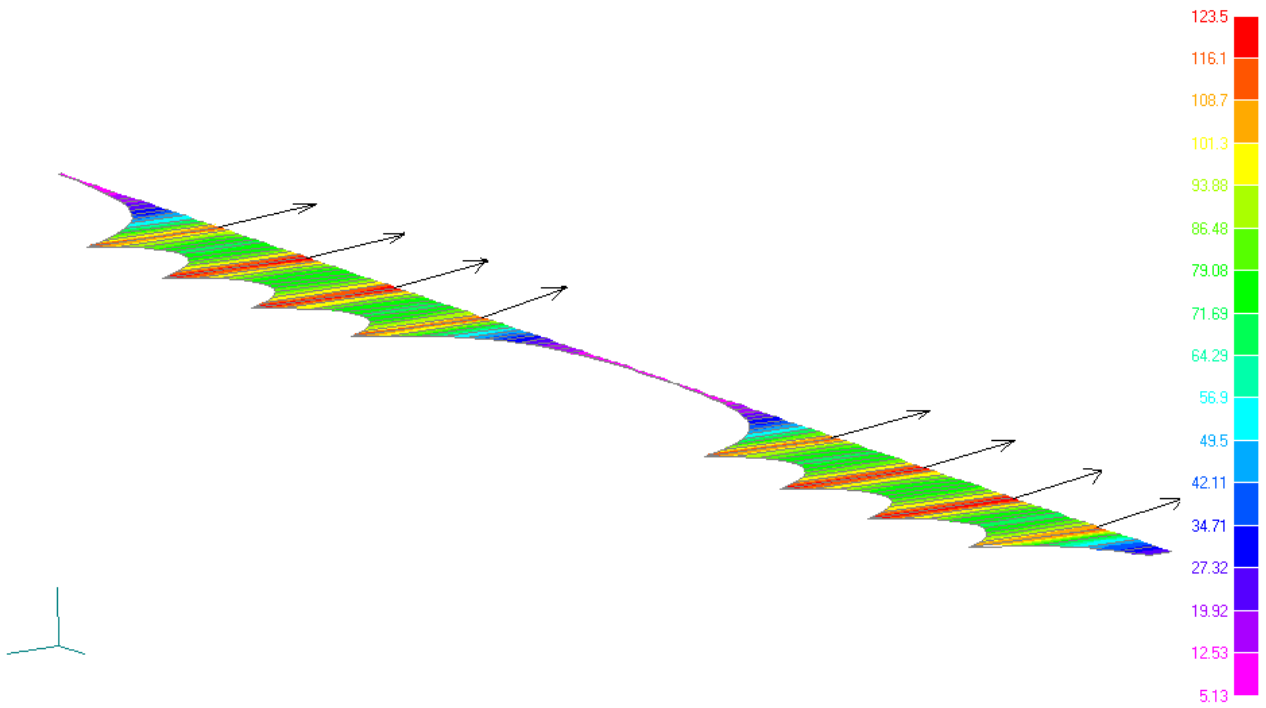


Рис. 4.3.3.3. Эпюра горизонтальных изгибающих моментов (Н×м) в корпусе рельса от ветровых нагрузок на путевую структуру и от ветровых нагрузок на сцепку из двух рельсовых автомобилей (для расчета прочности рельса-струны) в горизонтальной плоскости при +55 °С

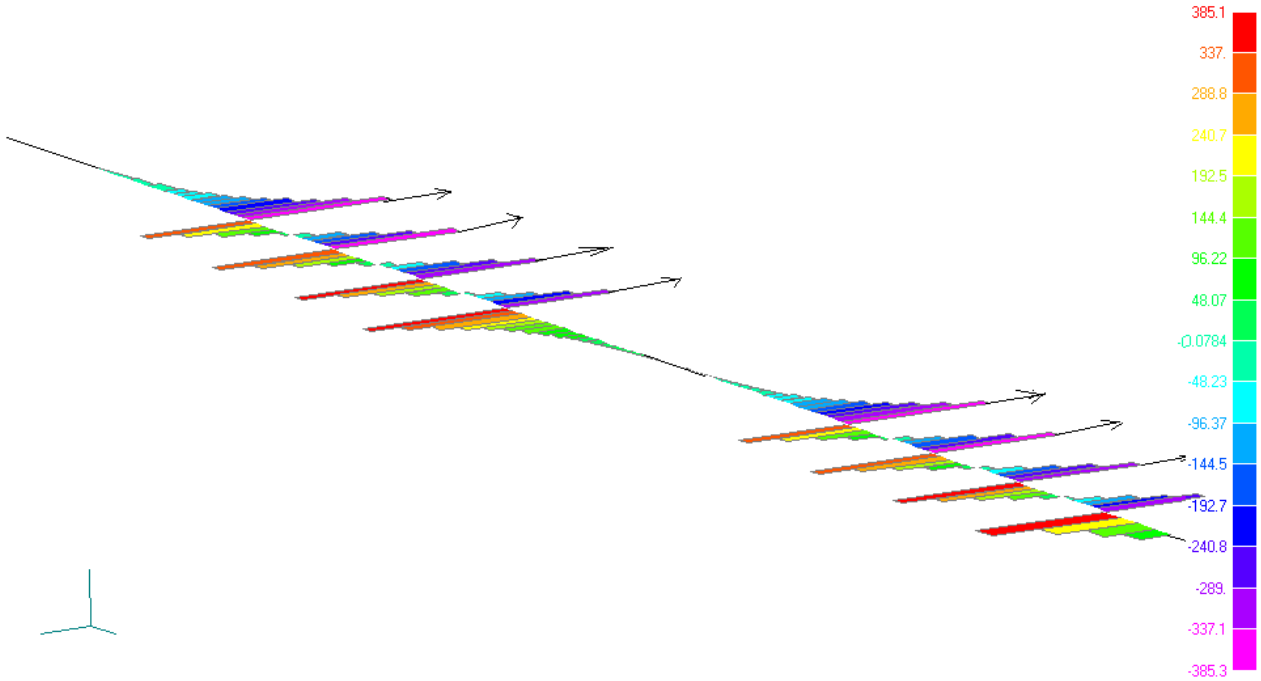


Рис. 4.3.3.4. Эпюра горизонтальных поперечных сил (Н) в корпусе рельса от ветровых нагрузок на путевую структуру и от ветровых нагрузок на сцепку из двух рельсовых автомобилей (для расчета прочности рельса-струны) в горизонтальной плоскости при +55 °С

Для расчета выносливости

4.3.4. Эпюры растягивающих сил в корпусе рельса от собственного веса путевой структуры, веса одного рельсового автомобиля (для расчета выносливости рельса-струны) в середине пролета

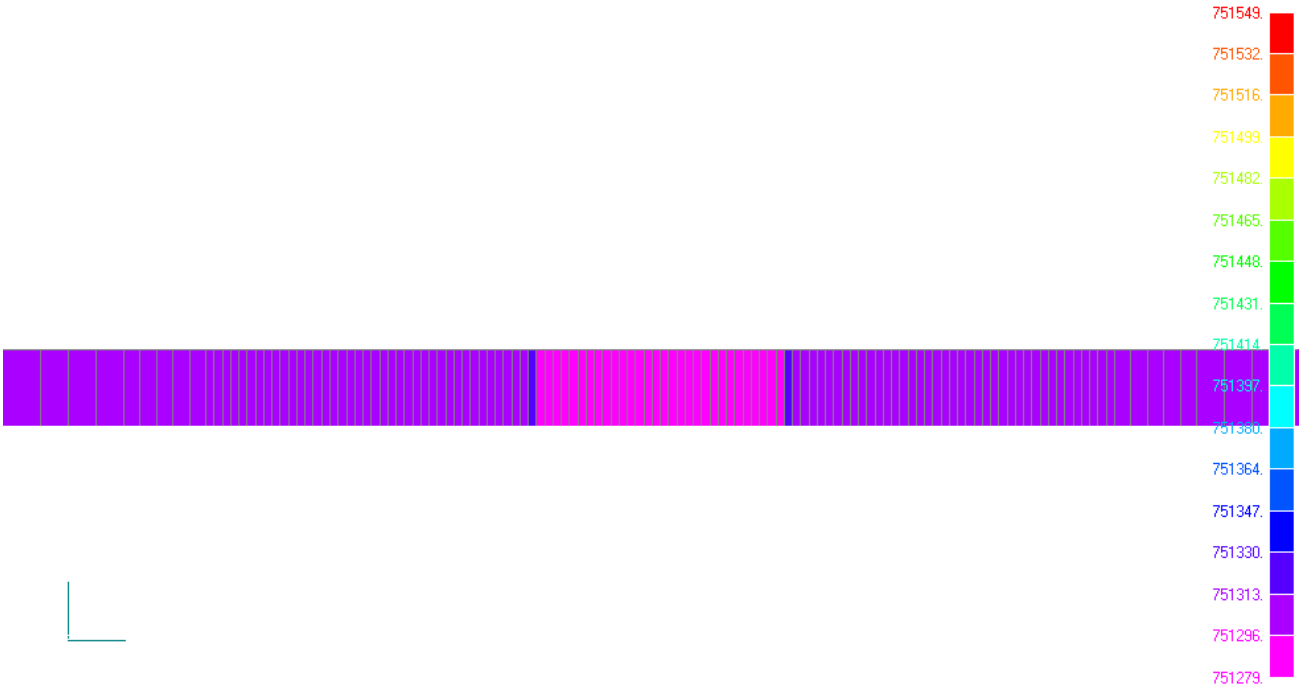


Рис. 4.3.4.1. Эпюра растягивающих сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного рельсового автомобиля, размещенного в середине пролета при –55° С

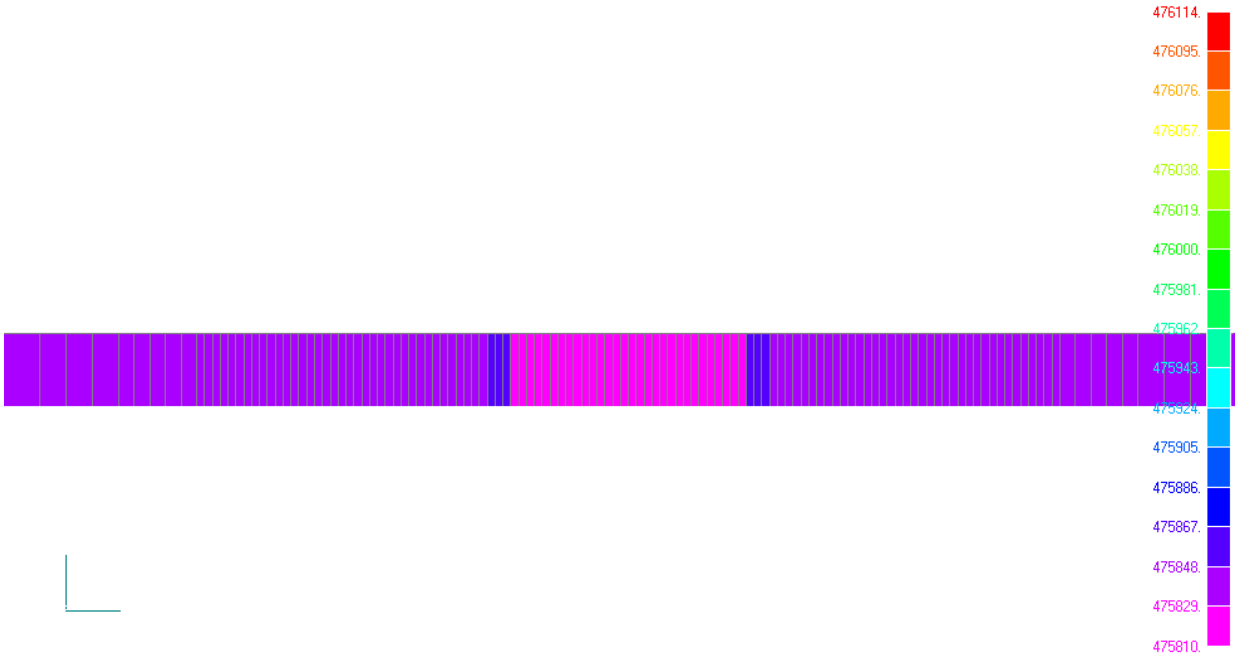


Рис. 4.3.4.1. Эпюра растягивающих сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного рельсового автомобиля, размещенного в середине пролета при +55° С

4.3.5. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в корпусе рельса от собственного веса путевой структуры и одного рельсового автомобиля (для расчета выносливости рельса-струны) в вертикальной плоскости в середине пролета

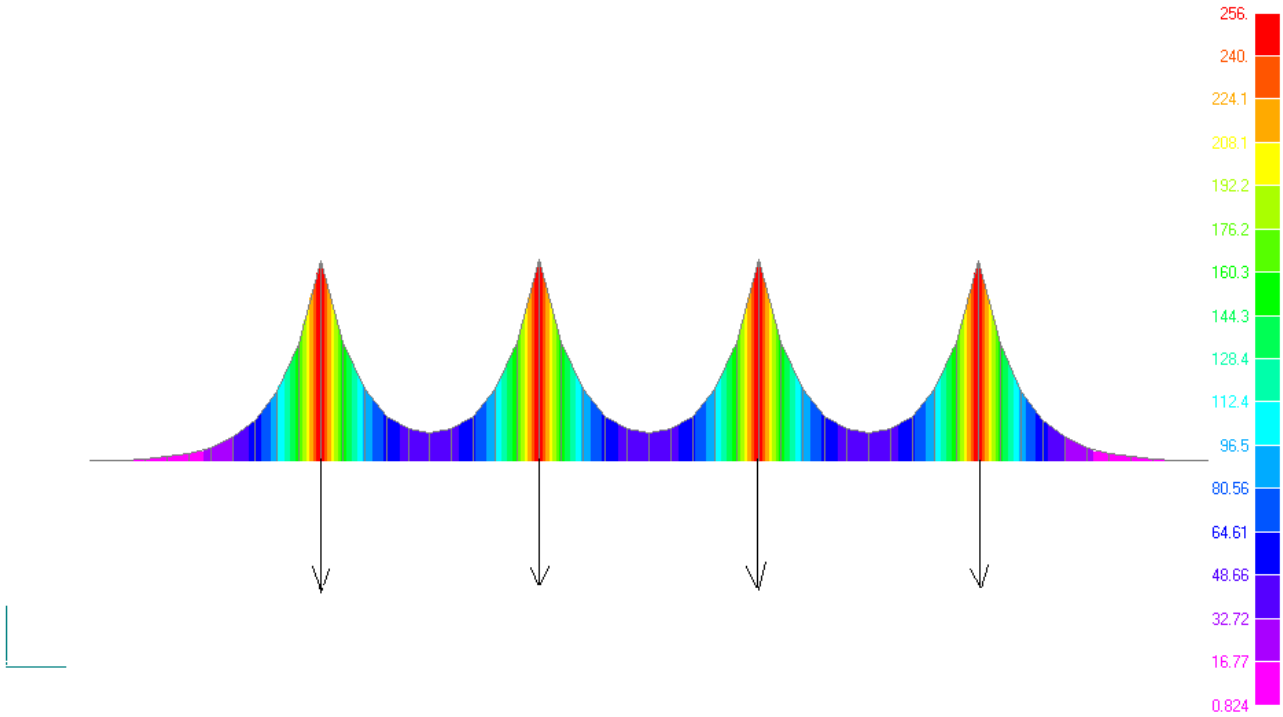


Рис. 4.3.5.1. Эпюра вертикальных изгибающих моментов (Н×м) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного рельсового автомобиля, размещенного в середине пролета при –55° С

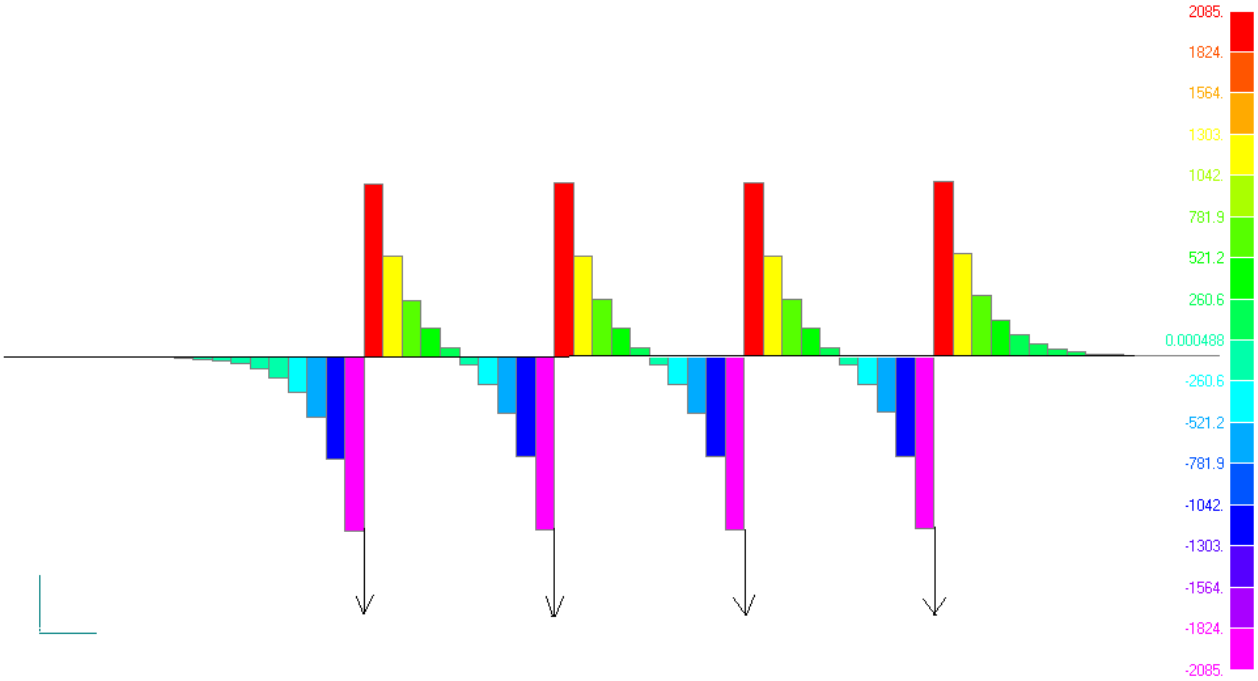


Рис. 4.3.5.2. Эпюра вертикальных поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного рельсового автомобиля, размещенного в середине пролета при –55 °С

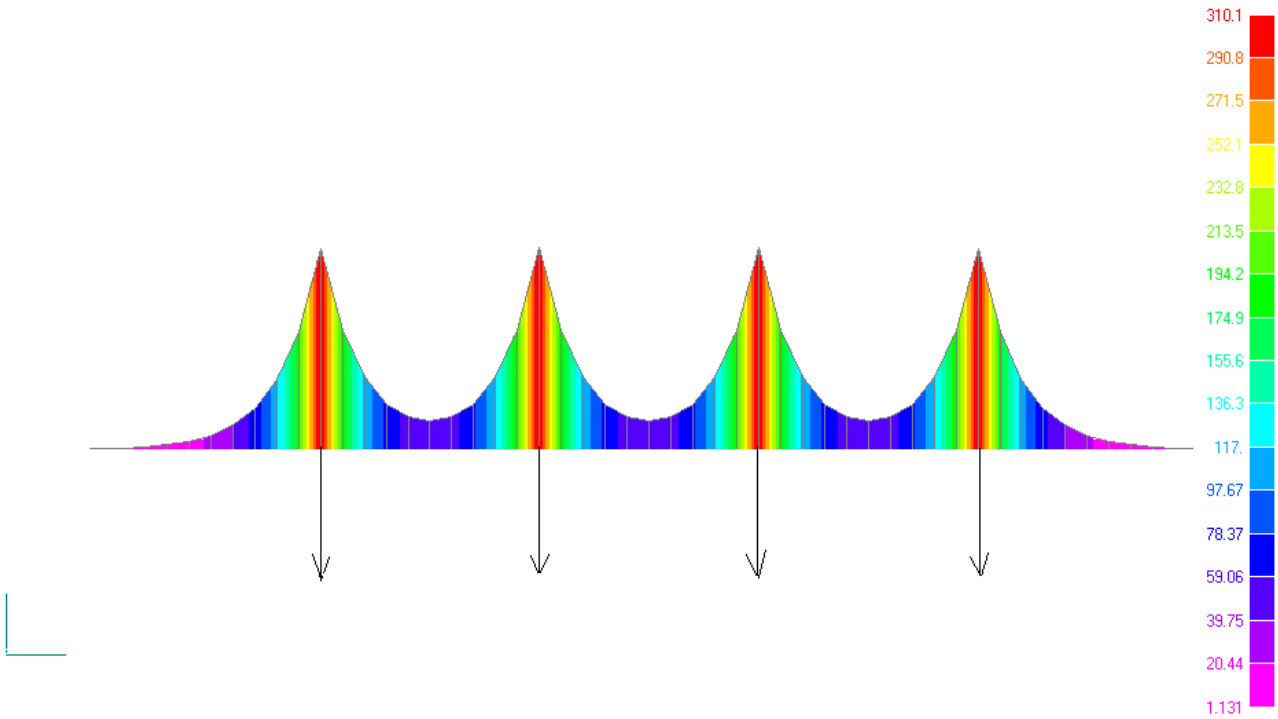


Рис. 4.3.5.3. Эпюра вертикальных изгибающих моментов (Н×м) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного рельсового автомобиля, размещенного в середине пролета при +55° С

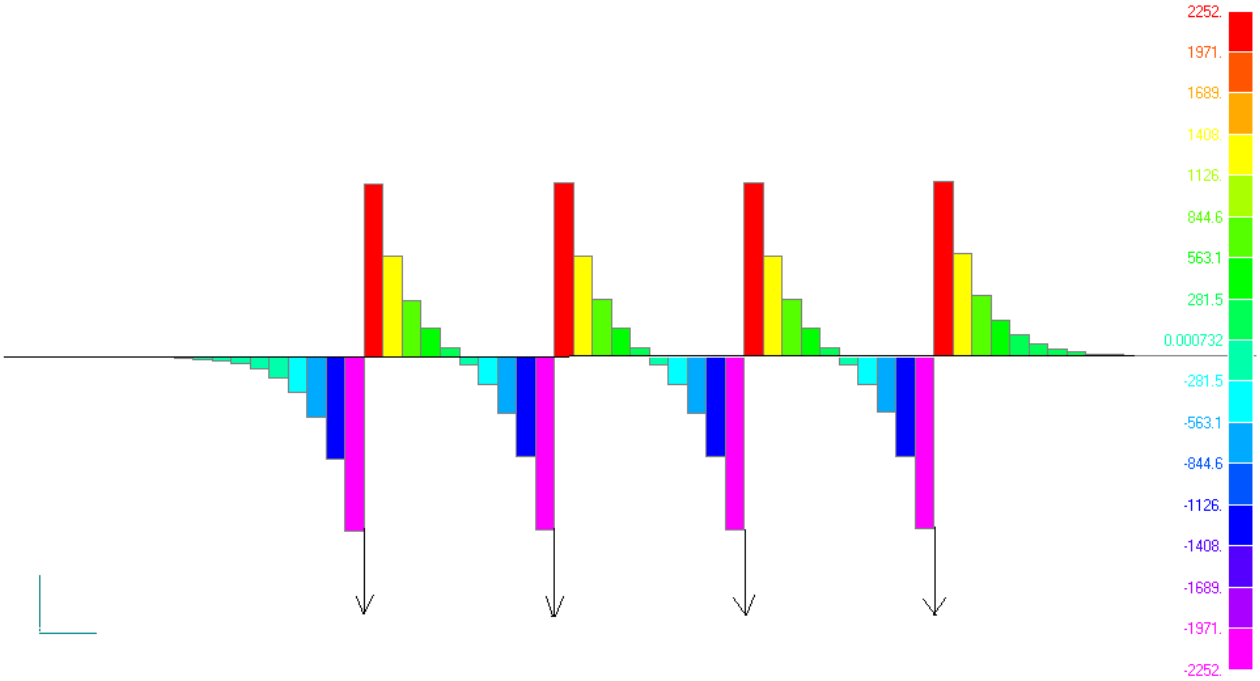


Рис. 4.3.5.4. Эпюра вертикальных поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного рельсового автомобиля, размещенного в середине пролета при –55 °С

4.4. Эпюры растягивающих сил в корпусе рельса в местах жесткой заделки к анкерным опорам

Для расчета прочности

Эпюры растягивающих сил в корпусе рельса от собственного веса путевой структуры, веса сцепки из двух рельсовых автомобилей и боковых ветровых нагрузок (для расчета прочности рельса-струны)

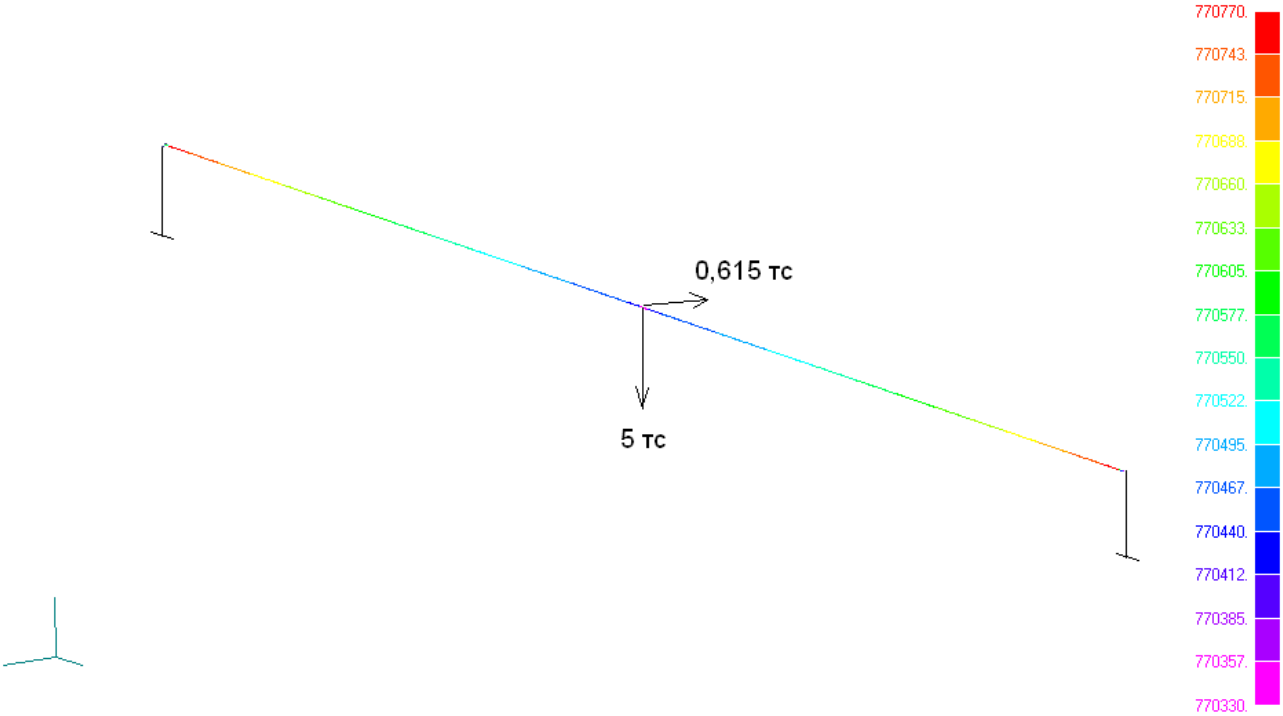


Рис. 4.4.1. Эпюра растягивающих сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны, веса двух рельсовых автомобилей, размещенных на расстоянии 100 метров от опор, и боковых ветровых нагрузок при –55° С

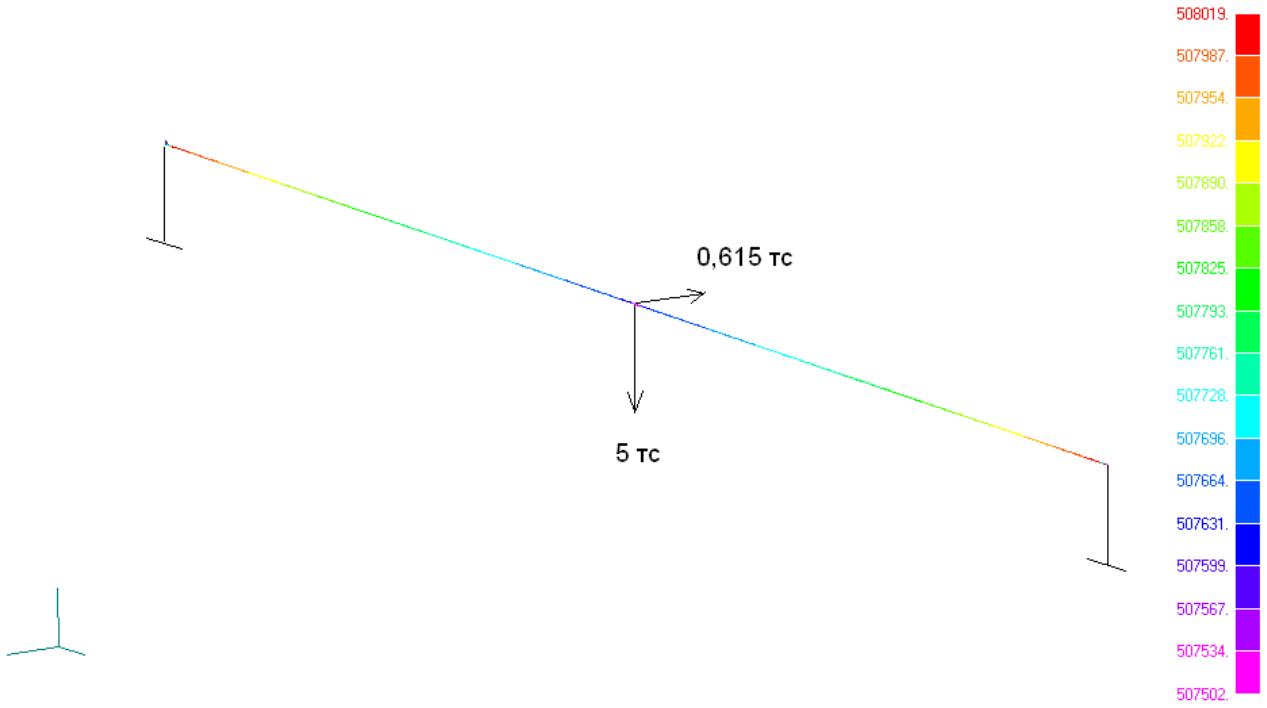


Рис. 4.4.2. Эпюра растягивающих сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны, веса двух рельсовых автомобилей, размещенных на расстоянии 100 метров от опор, и боковых ветровых нагрузок при +55° С

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—4.5.4. Головка рельса и корпус рельса представляют собой цельную конструкцию — корпус рельса, верхняя поверхность которого выполняет функции головки рельса (см. рис. 4.5.1).

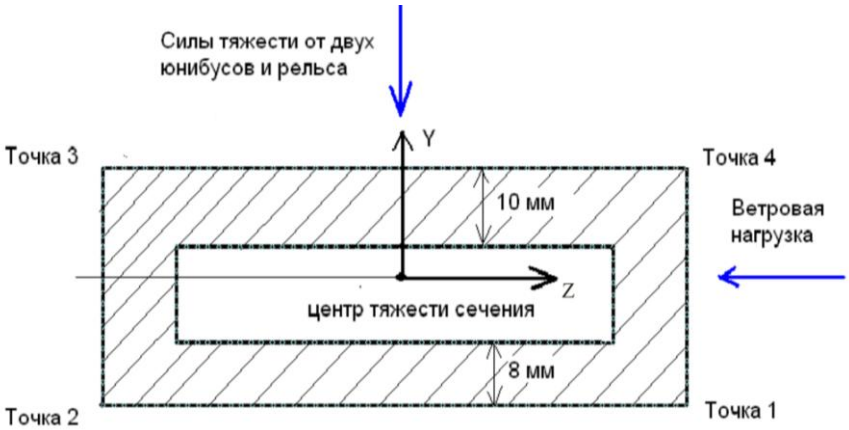


Рис. 4.5.1. Расчетное поперечное сечение корпуса рельса для расчета воздействия ветровой нагрузки

Таблица 4.5.1

Расчет прочности струн от воздействия двух рельсовых автомобилей весом 2,5 тс каждый и боковых ветровых нагрузок (сцепка рельсовых автомобилей — в середине пролета, напряжения — рядом с опорой)

№	Описание расчетного элемента	Напряжения в МПа												
		Предварительное натяжение (при 0°С)	От собственного веса и ветра (относительно 0°С)		От изменения температуры (относительно 0°С)		От временной нагрузки (двух рельсовых автомобилей) и ветра на них				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	
							От нагрузки	Без нагрузки	От нагрузки	Без нагрузки	От нагрузки	Без нагрузки	От нагрузки	Без нагрузки
1	Струна	1200	11,57	22,49	135,96	-135,96	53,85	0	92,61	0	1401,38	1347,53	1179,14	1086,53

Таблица 4.5.2

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

№	Описание расчетной точки	Напряжения в Мпа												
		Предварительное натяжение (при 0°С)	От собственного веса и ветровой нагрузки на рельс		От изменения температуры (относительно 0°С)		От временной нагрузки и ветровой нагрузки на сцепку рельсовых автомобилей				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	
							От нагрузки	Без нагрузки	От нагрузки	Без нагрузки	От нагрузки	Без нагрузки	От нагрузки	Без нагрузки
1	Верх головки рельса Точка 4	350	3,69	7,32	86,62	–86,62	–7,1	0	1,09	0	433,21	440,31	271,79	270,7
	Точка 3	350	3,81	7,48	86,62	–86,62	0,06	0	9,95	0	440,49	440,43	280,81	270,86
2	Низ корпуса рельса Точка 2	350	3,95	7,69	86,62	–86,62	44,55	0	62,82	0	485,12	440,57	333,89	271,07
	Точка 1	350	3,84	7,53	86,62	–86,62	37,4	0	53,98	0	477,86	440,46	324,89	270,91

Таблица 4.5.2.а

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 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	От нагрузки	Без нагрузки	От нагрузки	Без нагрузки	От нагрузки	Без нагрузки	От нагрузки	Без нагрузки
1	Верх головки рельса Точки 3 и 4	350	3,45	6,83	86,62	–86,62	–3,81	0	5,1	0	436,26	440,07	275,31	270,21
2	Низ корпуса рельса Точки 1 и 2	350	3,6	7,04	86,62	–86,62	40,49	0	57,81	0	480,71	440,22	328,23	270,42

Таблица 4.5.2.б

Расчет прочности головки рельса и корпуса рельса
от воздействия только ветровых нагрузок
(сцепка рельсовых автомобилей — в середине пролета, напряжения — под колесом)

№	Описание расчетной точки	Напряжения в МПа					
		От ветровых нагрузок на рельс		От ветровой нагрузки на два юнибуса			
		Зима –55°С	Лето +55°С	Зима –55°С		Лето +55°С	
				От нагрузки	Без нагрузки	От нагрузки	Без нагрузки
1	Верх головки рельса Точки 1 и 4	0,24	0,49	–3,19	0	–3,92	0
2	Низ корпуса рельса Точки 2 и 3	0,35	0,65	4,0	0	4,93	0

Таблица 4.5.3

Расчет прочности головки рельса и корпуса рельса
от воздействия двух рельсовых автомобилей весом 2,5 тс каждый
(сцепка рельсовых автомобилей — на пролете,
напряжения — заделка в опору)

№	Описание расчетной точки	Напряжения в МПа					
		Предварительное натяжение (при 0°С)	От растяжения рельса-струны всеми видами нагрузок		От изгиба рельса-струны на ложементе всеми видами нагрузок	Суммарные	
			Зима –55°С	Лето +55°С		Зима –55°С	Лето +55°С
1	Верх головки рельса Точка 4	350	108,6	–47,92	38,22	496,9	340,3
	Точка 3	350	108,6	–47,92	–17,78	440,9	284,3
2	Низ корпуса рельса Точка 2	350	108,6	–47,92	–38,78	419,9	263,3
	Точка 1	350	108,6	–47,92	17,22	475,9	319,3

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 натяжение (при 0°С)	От собственного веса		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	
							От нагрузки	Без нагрузки	От нагрузки	Без нагрузки	От нагрузки	Без нагрузки	От нагрузки	Без нагрузки
1	Верх головки рельса	350	3,45	6,83	86,62	–86,62	–14,78	0	–13,52	0	425,29	440,07	256,69	270,21
2	Низ корпуса рельса	350	3,6	7,04	86,62	–86,62	30,13	0	40,85	0	470,35	440,22	311,27	270,42

5. Нормативная и справочная литература

5.1. СНиП 23-01-99 «Строительная климатология».

5.2. СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия».

5.3. СНиП 2.05.03-84* «Мосты и трубы».

5.4. СНиП II-23-81* «Стальные конструкции».

5.5. СНиП 2.03.11-85 «Защита строительных конструкций от коррозии».

5.6. Мосты и трубы. Проектирование, строительство и приемка в эксплуатацию. 2-я редакция. М.: Госстрой России, 2001.

5.7. 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).

5.8. ENV 1992-2 EUROCODE 3: Desing of steel structures. Part 2: Steel Bridges (Проектирование стальных конструкций. Часть 2. Стальные мосты).

5.9. AASHTO LRFD Bridge Design Specification, Published by American Association of State Highway and Transportation Officials, First Edition, 1996 (Нормы США по проектирования автодорожных мостов).

5.10. 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).

5.11. ГОСТ 18105-86 «Бетоны. Правила контроля прочности».

5.12. ГОСТ 10178-85 «Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия».

5.13. ГОСТ 23732-79 «Вода для бетонов и растворов. Технические условия».

5.14. Городецкий А.С., Шмуклер В.С., Бондарев А.В. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций. Учебное пособие. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. — 889 с.

5.15. Железнодорожный транспорт: Энциклопедия / Гл. редактор Н.С. Конарев. — М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия», 1994. — 559 с.

5.16. Юницкий А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в космосе. — Гомель: ИнфоТрибо, 1995. — 337 с.: ил.

5.17. И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. Расчет на прочность деталей машин. Справочник, 1979