

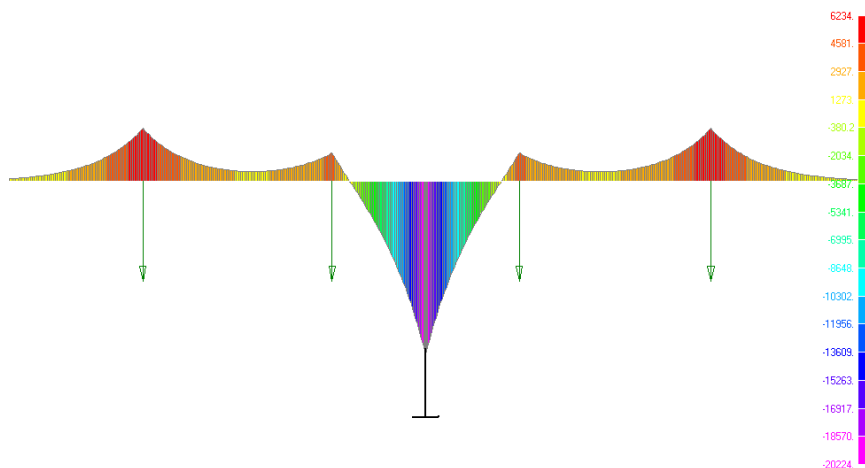


115487, Москва, ул. Нагатинская, 18/29
тел./факс: (495) 680-52-53, 116-15-48
e-mail: info@unitsky.ru
http: //www.unitsky.ru
skype: Anatoly Unitsky

ОТЧЕТ о выполнении расчетов на прочность, устойчивость и долговечность макроСТЮ в Хабаровске на участке «Ул. Дикопольцева — Ул. Гоголя»

Договор подряда № СТЮ-01/06 от 21 января 2006 г.

II этап: Создание расчетной схемы трассы макроСТЮ в Хабаровске «Ул. Дикопольцева — Ул. Гоголя» протяженностью 1 км как единой рамной конструкции для различного сочетания внешних воздействий и нагрузок (низкие и высокие температуры, ветер, гололед, статическое и динамическое воздействие подвижной нагрузки и др.) и выполнение расчетов на прочность, устойчивость и долговечность



РАЗРАБОТЧИК
Генеральный директор –
генеральный конструктор ООО «СТЮ»

А.Э. Юницкий
«22» июня 2006 г.

Содержание

1.	Цель работы и постановка задачи.....	4
2.	Исходные данные о материалах.....	8
2.1.	Материал струн	8
2.2.	Материал головки рельса	9
2.3.	Материал корпуса рельса	9
2.4.	Материал заполнителя.....	10
3.	Расчетная модель и этапы расчета.....	10
4.	Расчетное исследование жесткости струнной путевой структуры	11
4.1.	Расчет вертикальных деформаций от собственного веса структуры и при нагружении вертикальной силой от транспортного средства.....	11
4.2.	Расчет угла поворота и горизонтального перемещения рельса-струны при действии горизонтальных скручивающих сил.....	14
5.	Расчет напряженного состояния струн. Расчет прочности струн	17
5.1.	Расчет изменения усилий в струнах от температурного перепада (от +57,2 °С летом до –40,8 °С зимой).....	17
5.2.	Расчет изменений напряжений в струнах от собственного веса струнной путевой структуры и от проезда транспортного средства.....	20
5.3.	Расчет прочности струн	20
6.	Расчет напряженного состояния головки рельса и корпуса рельса. Расчет прочности и оценка выносливости головки рельса и корпуса рельса	25
6.1.	Расчет изменений напряжений растяжения (сжатия) от температурного перепада (от +57,2 °С летом до –40,8 °С зимой) в головке рельса и корпусе рельса	25

6.2.	Расчет напряжений изгиба от собственного веса струнной путевой структуры и при нагружении вертикальной силой от транспортного средства	27
6.3.	Расчет прочности и оценка выносливости рельса	28
7.	Выводы	36
8.	Список литературы.....	40
9.	Приложения.....	41
	Приложение 1. Схемы нагружения рельса-струны нагрузкой от подвижного состава	41
	Приложение 2. Эпюры продольных сил в струнах.....	45
	Приложение 3. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в рельсе-струне.....	51
	Приложение 4. Анализ наиболее опасных положений транспортных средств на пролете из условия обеспечения прочности рельса-струны на промежуточной опоре	79
	Приложение 5. Результаты расчетов прочности и выносливости головки рельса, корпуса рельса и струны.....	85

1. Цель работы и постановка задачи

После выполнения предпроектных работ и утверждения технических условий на струнную путевую структуру для условий Хабаровска*, были уточнены как конструкция струнной путевой структуры, так и трассировка макроСТЮ на участке «Ул. Дикопольцева — Ул. Гоголя».

По просьбе администрации г. Хабаровска были увеличены длины струнных пролетов между промежуточными опорами с 30 до 36 м. Дальнейшее увеличение пролетов привело бы к существенному удорожанию пролетных строений и промежуточных опор из-за необходимости более высоких предварительных натяжений струн, увеличения габаритов корпуса рельса-струны и повышения деформативности путевой структуры под воздействием расчетной подвижной нагрузки.

Уменьшение длины проектируемого участка макроСТЮ с 2 до 1 км и появление на нем двух поворотов с поворотными анкерными опорами, в которых также будут фиксироваться струны путевой структуры, примерно в 4 раза снизило расчетную длину рельсов-струн и, соответственно, снизило продольную деформативность и повысило продольную жесткость пути. Поскольку величина продольной нагрузки (вдоль пути), передаваемой на промежуточную опору при торможении и разгоне подвижного состава, обусловлена продольной жесткостью рельса-струны (при выполнении конструкции абсолютно жесткой вся продольная нагрузка передавалась бы на анкерные опоры, минуя промежуточные опоры), то при более короткой расчетной длине рельса-струны расчетная продольная нагрузка на промежуточную опору будет пропорционально более низкой. Эту расчетную нагрузку на верху опоры можно принять равной 179 кгс, как в технических условиях на струнную путевую структуру (при торможении сцепки из двух макро-юнибусов на участке между анкерными опорами, установленными на

* Этап III договора подряда № СТЮ-02/05 от 05.07.2005 г. «Разработка технических условий на струнную путевую структуру для условий Хабаровска», утвержден мэром г. Хабаровска А.Н. Соколовым 17.01.2006 г.

расстоянии 2 км друг от друга), что пойдет в запас прочности опор и не требует уточнения на стадии проектирования.

При размещении заказов на изготовление элементов путевой структуры СТЮ для г. Хабаровска была уточнена также и конструкция рельса-струны. Например, было выявлено, что на Дальнем Востоке России не производится черный прокат, который мог бы быть использован для корпуса и головки рельса СТЮ. Необходимый прокат выпускается только на заводах Череповецкого металлургического холдинга «Северсталь-метиз», с которым ООО «СТЮ» заключил договор на поставку продукции. При этом была уточнена конструкция корпуса рельса исходя из сортамента выпускаемого проката. В качестве корпуса принята электросварная прямоугольная труба с размерами поперечного сечения 160×80×5 мм из стали 09Г2 или S355J2H (по EN 10025-90-AI-93, EN 10219-1:1997), имеющей расчетную прочность по текучести $\sigma_{0,2} = 350$ МПа (данные завода-изготовителя).

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) оцинкованной канатной проволоки диаметром 3 мм по ГОСТ 7372-79 марки В 170-190 ОцЖ и испытал ее на разрыв. Результаты испытаний: минимальное временное сопротивление разрыву (из партии в 10 образцов) — $\sigma_{0,2} = 19.702$ кгс/см² = 1.933 МПа (усилие $P_{0,2} = 1.392$ кгс = 13.656 Н), минимальное разрывное усилие — $P = 1.400$ кгс, что соответствует прочности на разрыв $\sigma_p = 19.816$ кгс/см² = 1.944 МПа.

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.

Расчетный участок путевой структуры, с длиной пролетов по 36 метров, схематично изображен на рис. 1. Конструкция струнной путевой структуры крепится на промежуточных и анкерных опорах, причем на промежуточных опорах возможны два варианта крепления — жесткая заделка корпуса рельса или шарнирное опирание корпуса.

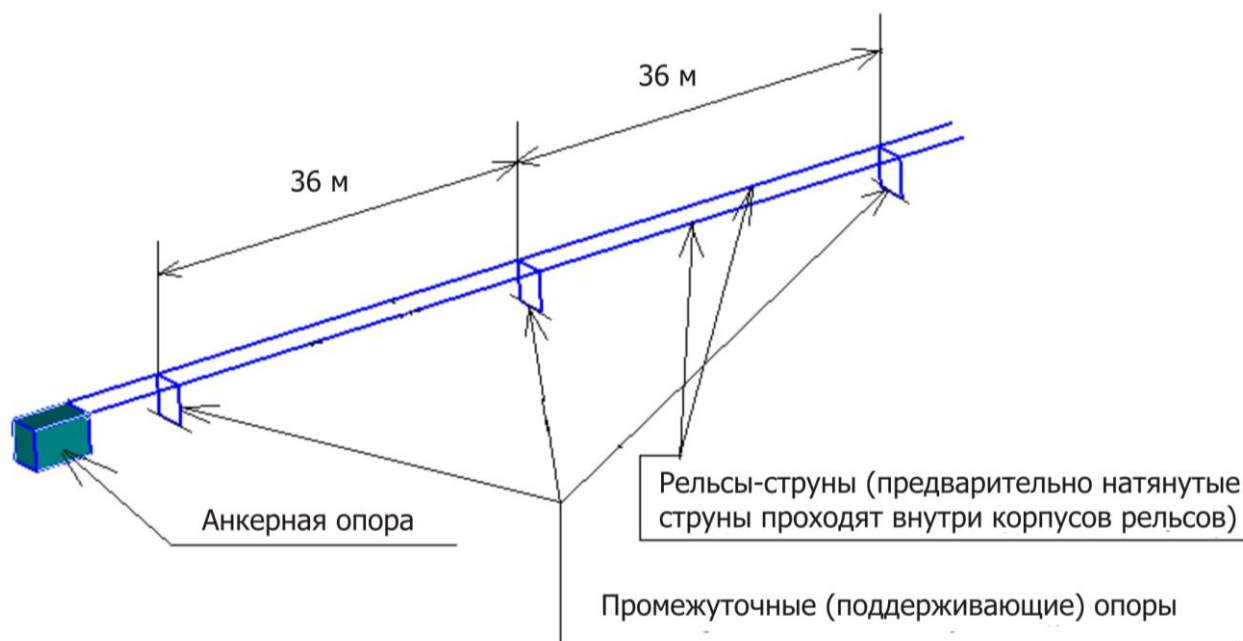


Рис. 1. Схема одного пути струнной путевой структуры

Однопутная путевая структура состоит из двух рельсов-струн, содержащих головку рельса, корпус рельса, струну и наполнитель. Двухпутная трасса содержит два пути и 4 рельса-струны.

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

Сечение рельса и находящихся внутри струн изображено на рис. 2.

На рис. 3 изображено сечение корпуса рельса с приваренной к нему головкой рельса.

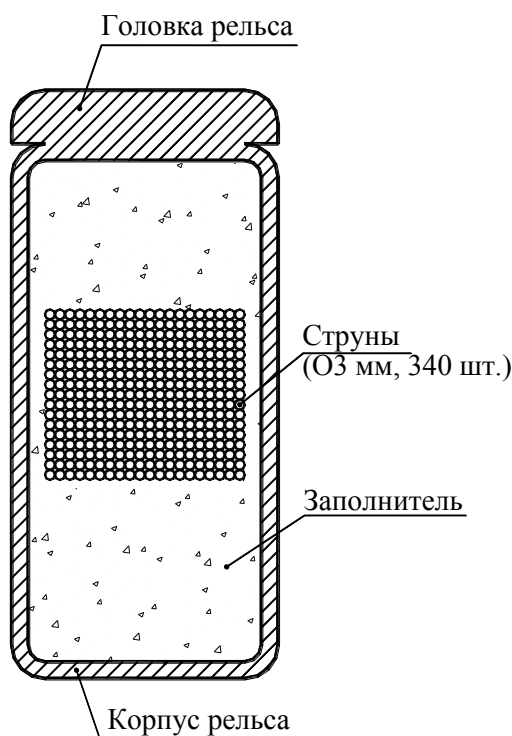


Рис. 2. Поперечное сечение рельса-струны

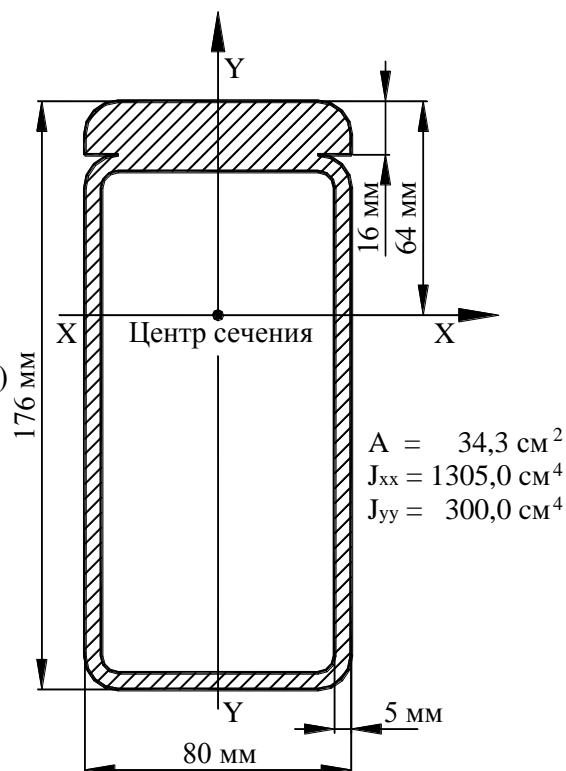


Рис. 3. Поперечное сечение корпуса рельса с прикрепленной головкой рельса

Погонный вес одного рельса-струны струнной путевой структуры составил 62,6 кг/м (26,9 кг/м — головка рельса и корпус, 18,9 кг/м — струна (340 проволок диаметром 3 мм в каждом рельсе) и 16,8 кг/м — заполнитель на основе цементобетона).

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

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

Для расчета на жесткость, прочность и выносливость струнной путевой структуры подвижной состав (один или два юнибуса массой по 6000 кг) располагался:

- в середине пролета (приложение 1, рис. 1.1 и 1.2);
- по одну сторону от промежуточной опоры на расстоянии 2 и 2,5 м для варианта жесткой заделки рельсов на опорах (наиболее опасные

- нагрузки показаны в приложении 1, рис. 1.3 и 1.5 и приложении 4, рис. 4.1—4.2 и рис. 4.3—4.4);
- симметрично над промежуточной опорой для варианта шарнирного закрепления рельсов на опорах (наиболее опасное нагружение показано в приложении 1, рис. 1.4 и приложении 4, рис. 4.5—4.6);
 - по одну сторону на расстоянии 5 м, считая от центра тяжести, и симметрично над промежуточной опорой для варианта шарнирного закрепления рельсов на опорах (наиболее опасные нагружения показаны в приложении 1, рис. 1.4 и 1.6 и приложении 4, рис. 4.5—4.6 и рис. 4.7—4.8).

При расчете струнной путевой структуры на жесткость и выносливость предполагалось, что транспортный модуль с учетом вертикальной динамики создает вертикальную силу 6 тонн (на половину струнной путевой структуры, т.е. на один рельс, приходится 3 тонны, а на каждое колесо по 1,5 тонны).

При расчете на прочность предполагалось, что транспортных модулей два, причем оба с полной загрузкой, они движутся друг за другом в сцепке и каждое создает вертикальную силу 6 тонн.

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

2. Исходные данные о материалах

2.1. Материал струн

Материал струн — стальные проволоки Ст 75-85 (оцинкованные) арматурные диаметром 3 мм (площадь поперечного сечения проволок 7,065 мм²); 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 177000 МПа
- плотность 7850 кг/м³
- предел прочности, не менее 1783 МПа
- коэффициент линейного температурного расширения $1,2 \times 10^{-5}$ 1/град

2.2. Материал головки рельса

Материал головки рельса — сталь 09Г2 при толщине проката 10—20 мм класса 345 по ГОСТ 27772-88. Механические свойства проката С345 приведены в выписке из табл. 51* СНиП II-23-81* «Стальные конструкции» и имеют следующие характеристики:

- модуль упругости 206000 МПа
- коэффициент Пуассона 0,3
- плотность 7850 кг/м³
- расчетное сопротивление текучести 315 МПа
- расчетное сопротивление прочности 470 МПа
- коэффициент линейного температурного расширения $1,2 \times 10^{-5}$ 1/град

2.3. Материал корпуса рельса

Материал корпуса рельса — сталь 09Г2 при толщине проката 2—10 мм класса 345 по ГОСТ 27772-88. Механические свойства проката С345 приведены в выписке из табл. 51* СНиП II-23-81* «Стальные конструкции» и имеют следующие характеристики:

- модуль упругости 206000 МПа
- коэффициент Пуассона 0,3
- плотность 7850 кг/м³
- расчетное сопротивление текучести 335 МПа
- расчетное сопротивление прочности 490 МПа
- коэффициент линейного температурного расширения $1,2 \times 10^{-5}$ 1/град

2.4. Материал заполнителя

Материал заполнителя представляет собой бетон с плотностью 2400 кг/м³. Предполагается, что заполнитель частично передает вертикальную нагрузку от головки рельса и корпуса рельса на струны (основная нагрузка передается посредством силовых поперечных стержней, т.е. специальных «шпал», установленных в корпусе рельса через каждые 2—3 м). Это соответствует случаю частично разрушенного заполнителя за длительный период эксплуатации. Тогда на местный изгиб работают только жестко соединенные между собой головка рельса и корпус (см. рис. 3), шарнирно опираясь на струны (происходит сдвиг между корпусом и струнами). В этом случае напряжения от местного изгиба в корпусе и головке рельса возрастают, и это идет в запас прочности головки рельса, корпуса рельса и путевой структуры в целом. На прочность струн такое предположение влияет незначительно.

3. Расчетная модель и этапы расчета

Конечно-элементная модель представляла собой пяти пролетную струнную путевую структуру длиной $36 \times 5 = 180$ м. В качестве конечных элементов использовались элементы типа ROD (струны) и Beam (рельс). Характеристики расчетной модели:

- число узлов 9714
- число элементов 9712

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 струн до усилия 272 тс для каждого рельса при предварительном натяжении головки рельса и корпуса до усилия 24 тс (натяжение при +20 °С летом) и в закреплении

корпуса и рельса на промежуточных опорах (либо жесткая заделка, либо шарнирное закрепление) и анкерных опорах (жесткая заделка).

Второй этап расчета — нагружение струн собственным весом путевой структуры (от веса головки рельса, корпуса рельса и заполнителя) при сборочной температуре $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ летом. При этом струны под действием сил тяжести дополнительно провисают внутри рельса. Сам рельс с применением технологических операций выставляется прямым без провиса между опорами (при сборке $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ летом).

Третий этап расчета заключался в пересчете усилий натяжения и провисов элементов путевой структуры от сил тяжести в зависимости от температурного режима ($+57,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ летом и $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ зимой).

Четвертый этап расчета заключался в нагружении вертикальными силами от одного транспортного модуля при расчете жесткости и выносливости путевой структуры и от двух транспортных модулей при расчете прочности для двух крайних температурных режимов: $+57,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ летом и $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ зимой.

4. Расчетное исследование жесткости струнной путевой структуры

4.1. Расчет вертикальных деформаций от собственного веса путевой структуры и при нагружении вертикальной силой от транспортного средства

В расчете струны в каждом рельсе предварительно натягивались до усилия 272 тс (натяжение струн при $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ летом). При наибольшей температуре ($+57,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ летом), вертикальные перемещения струнного пролетного строения будут самыми большими, поскольку при повышении температуры натяжение струн и корпуса с головкой рельса уменьшается.

Дополнительная вертикальная деформация участка струнной эстакады от собственного веса при наибольшей температуре ($+57,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ летом) изображена

относительно положения при монтажной температуре +20 °С в увеличенном виде на рис. 4. Дополнительный провис струнной эстакады от собственного веса (относительно температуры +20 °С) при этом составил в центре пролета 0,0026 метра (2,6 мм) независимо от вида крепежа на опорах (заделка или шарнир) и обусловлен только температурным снижением натяжения в рельсе-струне.

Общая вертикальная деформация участка струнной эстакады от собственного веса и при нагружении в центре пролета вертикальной силой от веса транспортного средства, равного 6 тонн (на половину струнной эстакады, т.е. на один рельс, приходится 3 тонны, а на каждое колесо — по 1,5 тонны), изображена в увеличенном виде на рис. 5 и 6.

Прогиб струнной эстакады в центре пролета составил 0,0952 метра (95,2 мм) для жесткой заделки на промежуточной опоре и 0,0976 метра (97,6 мм) для шарнирного закрепления на опоре.

Дополнительный вертикальный прогиб струнной эстакады в центре пролета, вызванный воздействием только веса транспортного модуля при жесткой заделке рельса на опоре, составил: $0,0952 - 0,0026 = 0,0926$ метра (92,6 мм). Отношение наибольшего прогиба, вызванного транспортным модулем, к длине пролета: $0,0926 / 36 = 1/389$.

Дополнительный вертикальный прогиб струнной эстакады в центре пролета, вызванный только весом транспортного модуля при шарнирном закреплении рельса на опоре составит: $0,0976 - 0,0026 = 0,095$ метра (95 мм). Отношение наибольшего прогиба, вызванного транспортным модулем, к длине пролета: $0,095 / 36 = 1/379$.

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

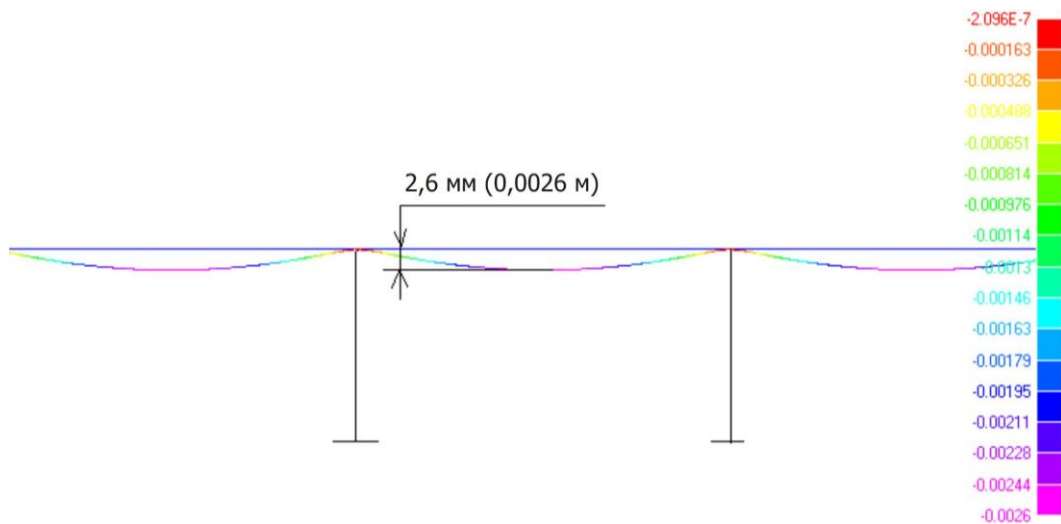


Рис. 4. Дополнительная вертикальная деформация участка струнной эстакады от собственного веса при наибольшей температуре $+57,2^{\circ}\text{C}$ летом (не зависит от вида крепежа на промежуточных опорах)

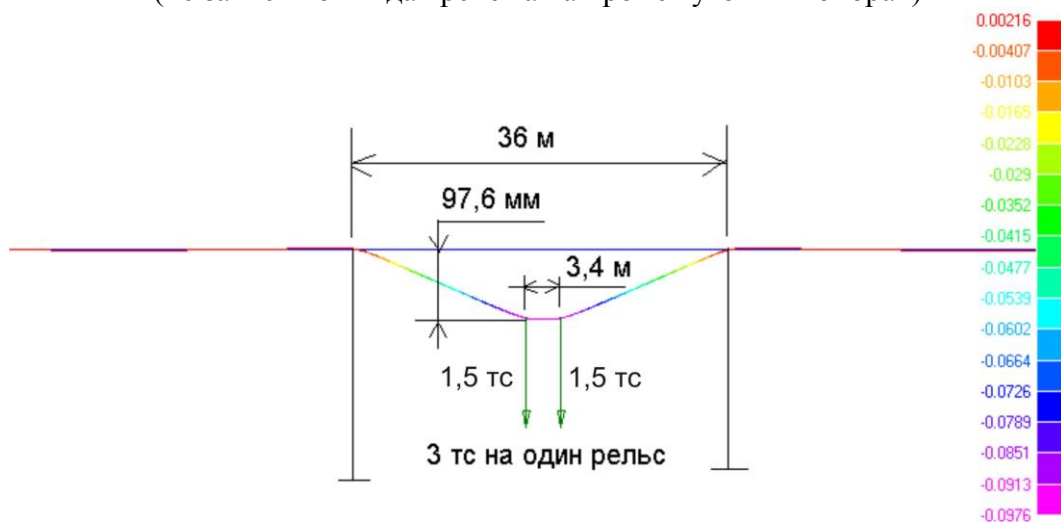


Рис. 5. Вертикальная деформация участка струнной эстакады от собственного веса и при дополнительном нагружении вертикальной силой от транспортного средства весом 6 тонн при наибольшей температуре $+57,2^{\circ}\text{C}$ летом (шарнирное закрепление рельса на опоре)

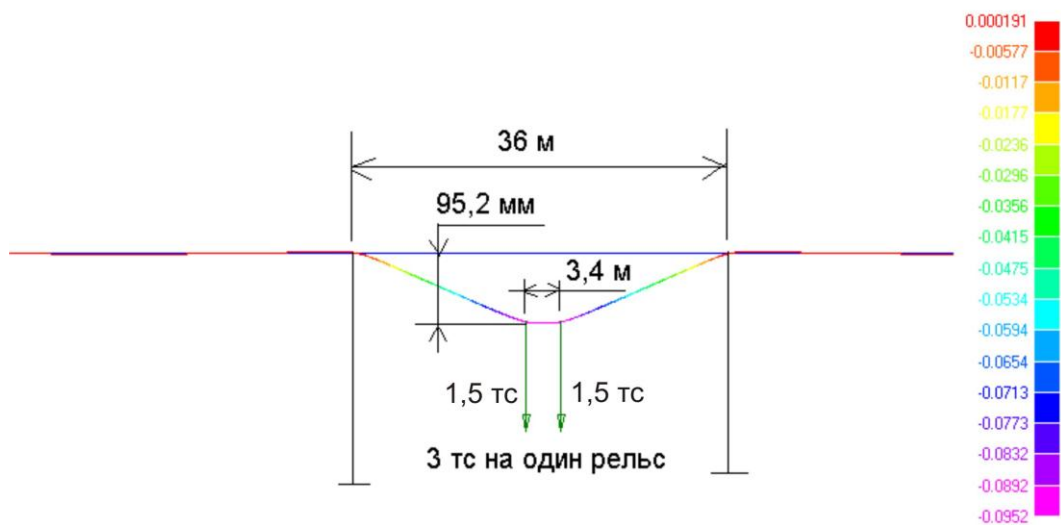


Рис. 6. Вертикальная деформация участка струнной эстакады от собственного веса и при дополнительном нагружении вертикальной силой от транспортного средства весом 6 тонн при наибольшей температуре $+57,2^{\circ}\text{C}$ летом (жесткая заделка рельса на опоре)

Расчет прогиба аналитическим методом

Исходные данные:

1. Вертикальная сила на один рельс: $P = 3000$ кгс
2. Сила натяжения в одном рельсе: $T = (253 - 7,53) \times 10^3$ кгс
3. Длина одного пролета: $L = 36$ м
4. База транспортного средства: $\lambda = 3,4$ м

Расчет прогиба путевой структуры в центре пролета от веса транспортного средства:

$$\Delta = \frac{P \times (L - \lambda)}{4 \times T} = \frac{3000 \times (36 - 3,4)}{4 \times 245470} = 0,0996 \text{ м} \quad (1)$$

Аналитический расчет дает схожие результаты, но отличающиеся в большую сторону по сравнению с численным расчетом для шарнирного закрепления на 2%, для заделки — 4,6%. Это объясняется учетом жесткости корпуса и головки рельса в численном расчете, что снижает деформативность системы при нагружении вертикальной нагрузкой.

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

Ввиду неопределенности боковых сил, возникающих при движении транспортного средства из-за деформаций корпуса транспортного средства и его узлов, расчет конструкции проводился при действии только одной условной единичной горизонтальной силы. Величина условной единичной горизонтальной силы была принята равной 1 тс на каждый рельс (на одно колесо — 500 кгс) и прикладывалась в верхней точке рельса (точке контакта рельса с колесом). Для ухудшения условий приложения поперечной горизонтальной нагрузки (чтобы обеспечить более высокий запас прочности)

она приложена к рельсу в одной точке, в то время как у сцепки из двух модулей расчетная боковая нагрузка на рельс-струну прикладывается в четырех точках, отстоящих на расстоянии 3,4 м друг от друга (ее величина 0,263 тс на одно колесо от воздействия расчетной ветровой нагрузки на модуль в размере 76 кгс/м²).

Расчетная схема изображена на рис. 7. Предполагалось, что рельс жестко заделан от поворота на промежуточных опорах.

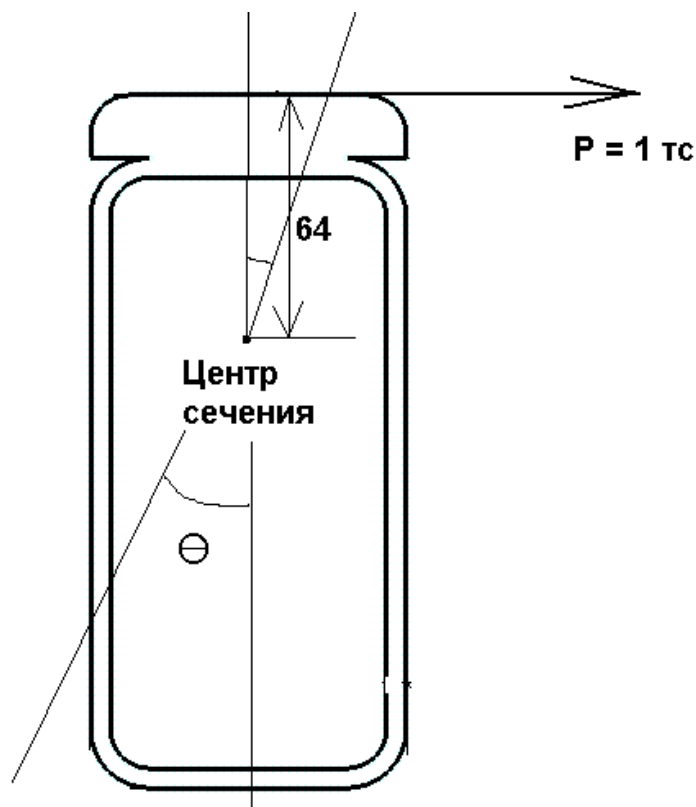


Рис. 7. Расчетная схема действия горизонтальной скручивающей силы

Для оценки угла поворота сечения рельса проведен аналитический расчет методом сопромата. Рельс жестко заделан от поворота на промежуточных опорах и работает на кручение один (без струн). В этом случае рельс поворачивается вокруг своего центра сечения. Крутящий момент, соответствующий центру сечения и силе 1 тс на рельс, равен 640 Н×м. Угол поворота рельса при этом составит 0,53 градуса.

Расчет на скручивание рельса крутящим моментом 640 Н×м

Исходные данные:

1. Полярный момент инерции сечения рельса: $J_{p_RELS} = 7,1 \times 10^{-6} \text{ м}^4$

2. Модуль сдвига стали: $G = 7,9 \times 10^{10}$ Па
3. Длина одного пролета: $L = 36$ м
4. База модуля: $\lambda = 3,4$ м
5. Крутящий момент на один рельс: $M = 640$ Н×м
- Расчет угла скручивания рельса:

$$\theta = \frac{M \times (L - \lambda)}{G \times J_{p_RELS}} \quad (2)$$

Расчет по формуле (2) дает следующие результаты:

$$\theta = 9,2993 \times 10^{-3} \text{ радиан, или } \theta \times \frac{180}{\pi} = 0,5328 \text{ градус.}$$

При этом необходимо отметить, что под колесом модуля рельс в действительности не сможет повернуться на угол $0,5^\circ$, т.к. возникнет восстанавливающий момент, обусловленный плоской поверхностью опирания головки рельса и цилиндрической поверхностью колеса.

Для оценки бокового увода сечения рельса-струны проведен аналитический расчет без учета жесткости рельса (при $+57,2$ °С летом, когда минимальное усилие натяжения струны). Боковой увод в этом случае составил 33,2 мм, что составит относительно длины пролета величину 1/1080. Радиусы кривизны пути при этом в плане составят 500—800 м, поэтому по такому искривленному ураганном ветром пути юнибус может двигаться, при допустимых боковых ускорениях $0,5$ м/с², со скоростью до 60—80 км/час.

Расчет перемещения рельса от боковой силы 1 тс

Исходные данные:

1. Боковая сила на один рельс: $P = 10000$ Н
2. Сила натяжения струн и рельса: $T = (253 - 7,5) \times 10^4$ Н

Расчет бокового перемещения рельса в центре пролета:

$$\Delta_{\text{бок}} = \frac{P \times \lambda}{4 \times T} \quad (3)$$

Расчет по формуле (3) дает следующий результат:

$$\Delta_{\text{бок}} = 0,0332 \text{ м} = 33,2 \text{ мм}$$

5. Расчет напряженного состояния струн. Расчет прочности струн

5.1. Расчет изменения усилий в струнах от температурного перепада (от +57,2 °С летом до –40,8 °С зимой)

Расчет температурных сил и напряжений в стальных проволоках

- | | |
|---|---|
| 1. Температура сборки: | $t_{\text{cb}} = 20 \text{ °С}$ |
| 2. Температура летом: | $t_{\text{L}} = +57,2 \text{ °С}$ |
| 3. Температура зимой: | $t_{\text{Z}} = -40,8 \text{ °С}$ |
| 4. Модуль упругости проволок: | $E_{\text{трос}} = 1,77 \times 10^{11} \text{ Па}$ |
| 5. Коэффициент линейного расширения: | $\alpha_{\text{stell}} = 1,2 \times 10^{-5} \text{ 1/°С}$ |
| 6. Площадь одной проволоки: | $F_{\text{троса}} = 7,065 \times 10^{-6} \text{ м}^2$ |
| 7. Всего проволок в рельсе: | $n = 340 \text{ шт.}$ |
| 8. Сила натяжения одной проволоки при +20 °С: | $N_{20} = 8000 \text{ Н}$ |

Напряжения в проволоке при температуре сборки +20 °С составят:

$$\sigma_{20} = \frac{N_{20}}{F_{\text{троса}}} \quad (4)$$

Тогда:

$$\sigma_{20} = 1,132 \times 10^9 \text{ Па} = 1.132 \text{ МПа}$$

9. Сила натяжения одной проволоки при температуре +57,2 °С (без учета воздействия подвижной нагрузки):

$$N_{57} = N_{20} + E_{\text{трос}} \times \alpha_{\text{стелл}} \times (t_{\text{cb}} - t_L) \times F_{\text{троса}} \quad (5)$$

Тогда:

$$N_{57} = 7.441 \text{ Н} = 758,5 \text{ кгс}$$

Напряжения в проволоке при +57,2 °С (без учета воздействия подвижной нагрузки):

$$\sigma_{57} = \frac{N_{57}}{F_{\text{троса}}} \quad (6)$$

Тогда:

$$\sigma_{57} = 1,053 \times 10^9 \text{ Па} = 1053 \text{ МПа}$$

10. Сила натяжения одной проволоки при –40,8 °С (без учета воздействия подвижной нагрузки):

$$N_{41} = N_{20} + E_{\text{трос}} \times \alpha_{\text{стелл}} \times (t_{\text{cb}} - t_Z) \times F_{\text{троса}} \quad (7)$$

Тогда:

$$N_{41} = 8.913 \text{ Н} = 908,6 \text{ кгс}$$

Напряжения в проволоке при –40,8 °С (без учета воздействия подвижной нагрузки):

$$\sigma_{41} = \frac{N_{41}}{F_{\text{троса}}} \quad (8)$$

Тогда:

$$\sigma_{41} = 1,261 \times 10^9 \text{ Па} = 1.261 \text{ МПа}$$

11. Сила натяжения всех проволок в рельсе при +57,2 °С (без учета воздействия подвижной нагрузки):

$$T_{57} = N_{57} \times n \quad (9)$$

Тогда:

$$T_{57} = 2,53 \times 10^6 \text{ Н} = 257.900 \text{ кгс} = 257,9 \text{ тс}$$

12. Сила натяжения всех проволок в рельсе при –40,8 °С (без учета воздействия подвижной нагрузки):

$$T_{41} = N_{41} \times n \quad (10)$$

Тогда:

$$T_{41} = 3,03 \times 10^6 \text{ Н} = 308.900 \text{ кгс} = 308,9 \text{ тс}$$

Как видно из расчета, наибольшая сила натяжения от предварительного натяжения и от перепада температур в струне составляет 308,9 тонн (зимой при –40,8 °С), что соответствует растягивающему напряжению 1261 МПа. Это значительно ниже предела текучести материала струн ($\sigma_{0,2} = 1.944 \text{ МПа}$).

5.2. Расчет изменений напряжений в струнах от собственного веса струнной путевой структуры и от проезда транспортного средства

Расчеты по изменению напряжений струн проводились для участка струнной путевой структуры, общей длиной 180 м (5 пролетов). Эпюры продольных сил в струне для различных нагрузок показаны в приложении 2. Наибольшее натяжение струн будет при движении двух транспортных средств, расположенных в середине пролета (см. приложение 1, рис. 2.5) при температуре $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$: $3033,9\text{ кН} = 309,3\text{ тс}$.

Расчет проводился для воздействия от двух модулей, весом 6 тс каждый, расположенных в середине пролета между промежуточными опорами. Результаты расчетов приведены в табл. 5.1 приложения 5.

5.3. Расчет прочности струн

Как видно из табл. 5.1 (приложение 5) наибольшее изменение напряжений в струнах от проезда двух груженых транспортных средств в сцепке произойдет летом при $+57,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, когда они меньше всего натянуты. Однако размах напряжений от проезда двух транспортных средств общим весом 12 тонн очень мал и составляет всего 1,17 МПа зимой при $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 2,59 МПа летом при $+57,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коэффициент асимметрии цикла напряжений $\rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ при этом составит:

$$\text{Летом } +57,2\text{ }^{\circ}\text{C}: \quad \rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 1053,16/1055,75 = 0,9975 \quad (11)$$

$$\text{Зимой } -40,8\text{ }^{\circ}\text{C}: \quad \rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 1261,05/1262,22 = 0,9991 \quad (12)$$

Коэффициент асимметрии цикла напряжений практически не отличаются от единицы. По любым существующим методикам расчета выносливости (СниПы, Нормы и т.д.) это означает, что нагрузка на струны статическая и

циклической составляющей можно пренебречь.

От одного транспортного средства размах напряжений в струнах 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. 5.1 (приложение 5), наибольшие напряжения в струнах будут зимой при $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ и соответствуют растягивающему напряжению 1262 МПа.

В табл. 1 представлены нормативные характеристики высокопрочной проволоки, используемой для струн, согласно ГОСТ 7348-81.

Таблица 1

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 — 12600 Н для 4,0 мм — 21400 Н для 5,0 мм — 32800 Н
Область применения	В строительстве для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций

Для проволоки диаметром 3 мм нормативное разрывное напряжение составит $R_{\text{ип}} = 12600/7,065 = 1783\text{ МПа}$ — напряжение при разрывном усилии 12600 Н, согласно ГОСТ 7348-81.

Предлагаемая к использованию в макроСТЮ в г. Хабаровске высокопрочная канатная оцинкованная проволока имеет значительно более высокие прочностные характеристики, чем рекомендуемые строительными нормативами. Поэтому при определении расчетных (допустимых) напряжений в струне необходимо руководствоваться требованиями долговечности конструкции и ее запасом прочности, а не рекомендациями по проектированию.

Предельные допустимые растягивающие напряжения в проволоках струны (производства завода «ВолгоМетиз») при расчетах по прочности примем равными:

$$R_y = 0,8 \times \sigma_{0,2} = 0,8 \times 1.944 = 1.555 \text{ МПа}, \quad (13)$$

где:

R_y — расчетное сопротивление материала (проволоки струны),

0,8 — понижающий коэффициент (при 20%-ном запасе прочности);

1944 МПа — прочность на разрыв канатной оцинкованной проволоки (данные заводских лабораторных испытаний).

Запас прочности струны при этом составит $\Delta R_{пр} = 1.944 - 1.555 = 389$ МПа, что превышает прочность большинства конструкционных сталей, например, 09Г2, применяемых в мостостроении. Поэтому такой запас прочности 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-П диаметром 3 мм в автодорожных и городских мостах на $1.555 - 1.180 = 375$ МПа (см. табл. 31* СНиП 2.05.03-84*).

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

В макроСТЮ благодаря другой схеме работы путевой структуры на пролете (она работает как жесткая нить, а не как балка), напряжения в струне не критичны к внешним поперечным воздействиям, как то: подвижная нагрузка, ветровая нагрузка, лед, снег и др. Кроме того, например, снег и лед, в отличие от мостов, вообще не могут образоваться на рельсе-струне, т.к. при каждом

проходе модуля они будут раздавливаться колесами и сбрасываться ими вниз.

Запас прочности традиционных мостов по воздействию расчетной подвижной нагрузки (при заниженных допустимых напряжениях в арматуре) не превышает 3—5 раз, в то время как в СТЮ даже при увеличении до 1.555 МПа допустимых напряжений в струне запас прочности составит (в самом напряженном состоянии, при $-40,8$ °С зимой):

- 1) для сцепки из двух модулей (6 тс + 6 тс): $n_1 = (1.944 - 1.555)/1,17 = 332$;
- 2) для одиночного модуля запас прочности n_2 струны превысит значение $n_2 = 500$ раз (при $-40,8$ °С),

где:

1,17 МПа — размах напряжений в струне при $-40,8$ °С от воздействия расчетной подвижной нагрузки (от двух модулей 6 тс + 6 тс) — см. приложение 5, табл. 5.1.

В настоящее время ни в одной строительной конструкции, даже самого высокого уровня ответственности, в том числе в висячих и вантовых мостах, ни в РФ ни за рубежом, не используются такие запасы прочности (300—500 раз), поэтому повышение допустимых расчетных напряжений в струне СТЮ, в сравнении с напрягаемой арматурой традиционных мостов, является оправданным и обоснованным. При этом расчетные напряжения в струне при воздействии расчетной подвижной нагрузки практически не отличаются от воздействия монтажных нагрузок и от состояния, когда вообще не действуют никакие нагрузки (кроме собственного веса). Эти отличия составляют всего 0,1—0,2%, поэтому в дальнейшем коэффициент условий работы струны принимается равным 1.

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

$$\sigma_s \leq R_y \times m, \quad (14)$$

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: $R_y = 1426$ МПа, $m \times R_y = 1426$ МПа.

Сопоставляя наибольшие действующие напряжения растяжения в струнах зимой при $-40,8$ °С 1262 МПа, которые приведены в таблице 5.1 (приложение 5), с расчетными сопротивлениями $m \times R_y = 1.555$ МПа, можно утверждать, что прочность струн при $-40,8$ °С обеспечена. При этом запас надежности по величине расчетных напряжений от подвижной нагрузки составит $n_3 = (1.555 - 1.262)/1,17 = 250$ (при $-40,8$ °С), а запас надежности по величине минимальной температуры составит $n_4 = (1.555 - 1.262)/2,12 = 138,2$ °С (где 2,12 МПа/°С — изменение напряжений в струне при изменении температуры на 1 °С).

Таким образом, допустимые напряжения в струне (1.555 МПа) при температуре $-40,8$ °С могут возникнуть либо от воздействия подвижной нагрузки величиной $(6 \text{ тс} + 6 \text{ тс}) \times 250 = 3.000$ тс, либо при снижении температуры до $[-40,8 \text{ °С} + (-138,2 \text{ °С})] = -179$ °С и воздействии подвижной нагрузки, равной $6 \text{ тс} + 6 \text{ тс} = 12$ тс.

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 на 389 МПа.

6. Расчет напряженного состояния головки рельса и корпуса рельса. Расчет прочности и оценка выносливости головки рельса и корпуса рельса

6.1. Расчет изменений напряжений растяжения (сжатия) от температурного перепада (от +57,2 °С летом до -40,8 °С зимой) в головке рельса и корпусе рельса

Расчет температурных сил и напряжений в рельсе

- | | |
|---|--|
| 1. Температура сборки: | $t_{cb} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| 2. Температура летом: | $t_L = +57,2 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| 3. Температура зимой: | $t_Z = -40,8 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| 4. Модуль упругости: | $E_k = 2,06 \times 10^{11} \text{ Па}$ |
| 5. Коэффициент линейного расширения: | $\alpha_{\text{stел}} = 1,2 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ |
| 6. Площадь сечения: | $F_k = 0,0034284 \text{ м}^2$ |
| 7. Сила натяжения корпуса рельса при температуре сборки +20 °С: | $2,4 \times 10^5 \text{ Н}$ |
- Усилие в корпусе и головке рельса при температуре сборки +20 °С:

$$N_{20} = \sigma_{20} \times F_k \quad (15)$$
$$\sigma_{20} = 70 \times 10^6 \text{ Па} = 70 \text{ МПа}$$

Тогда:

$$N_{20} = 2,4 \times 10^5 \text{ Н} = 24.460 \text{ кгс} = 24,46 \text{ тс}$$

8. Сила натяжения корпуса и головки рельса при температуре +57,2 °С:

$$N_{57} = N_{20} + E_k \times \alpha_{\text{стел}} \times (t_{cb} - t_L) \times F_k \quad (16)$$

Тогда:

$$N_{57} = -7,528 \times 10^4 \text{ Н} = -7.670 \text{ кгс} = -7,67 \text{ тс}$$

Температурные напряжения в корпусе рельса при +57,2 °С:

$$\sigma_{57} = \frac{N_{57}}{F_k} \quad (17)$$

Тогда:

$$\sigma_{57} = -2,196 \times 10^7 \text{ Па} = -21,96 \text{ МПа}$$

9. Сила натяжения корпуса и головки рельса при -40,8 °С:

$$N_{41} = N_{20} + E_k \times \alpha_{\text{st}} \times (t_{\text{cb}} - t_z) \times F_k \quad (18)$$

Тогда:

$$N_{41} = 7,553 \times 10^5 \text{ Н} = 76.990 \text{ кгс} = 76,99 \text{ тс}$$

Температурные напряжения корпуса и головки рельса при -40,8 °С:

$$\sigma_{41} = \frac{N_{41}}{F_k} \quad (19)$$

Тогда:

$$\sigma_{41} = 2,203 \times 10^8 \text{ Па} = 220,3 \text{ МПа}$$

6.2. Расчет напряжений изгиба от собственного веса струнной путевой структуры и при нагружении вертикальной силой от транспортного средства

Расчет напряжений изгиба от собственного веса струнной путевой структуры и при нагружении вертикальными силами от транспортных средств проводились для участка струнной путевой структуры, общей длиной 180 м (5 пролетов по 36 метров каждый).

Для расчета на прочность и выносливость струнной путевой структуры при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточных опорах, транспортное средство располагалось:

- для одиночного модуля и для сцепки из двух модулей — в середине пролета (приложение 1, рис. 1.1 и 1.2);
- для сцепки из двух модулей — по одну сторону от промежуточной опоры на расстоянии 2 м для расчета прочности (приложение 1, рис. 1.3). Обоснование наиболее опасного расположения подвижной нагрузки приведено в приложении 4, рис. 4.1—4.2;
- по одну сторону от промежуточной опоры на расстоянии 2,5 м для расчета выносливости (приложение 1, рис. 1.5) Обоснование наиболее опасного расположения подвижной нагрузки представлено в приложении 4, рис. 4.3—4.4.

Для расчета на прочность и выносливость струнной путевой структуры для варианта шарнирного закрепления корпуса рельса на промежуточных опорах, транспортное средство располагалось:

- для одного модуля и для сцепки из двух модулей — в середине пролета (приложение 1, рис. 1.1 и 1.2);
- для сцепки из двух модулей — симметрично над промежуточной опорой для расчета на прочность (приложение 1, рис. 1.4); обоснование наиболее опасного расположения подвижной нагрузки приведено в приложении 4, рис. 4.5;

- для одного модуля — по одну сторону от промежуточной опоры на расстоянии 5 м от нее, считая от центра тяжести (или 3,3 м до ближайшего колеса), для расчета выносливости (приложение 1, рис. 1.6); обоснование наиболее опасного расположения подвижной нагрузки приведено в приложении 4, рис. 4.7—4.8.

При расчете на прочность предполагалось, что транспортных модулей два, они движутся рядом в сцепке и каждое создает вертикальную силу 6 тонн. При расчете на прочность два транспортных модуля создавали вертикальную силу 12 тс (на половину струнной путевой структуры, т.е. на один рельс, приходится 6 тонн, а на каждое колесо — по 1,5 тонны). Результаты расчетов напряжений в головке и корпусе рельса для оценки его прочности приведены в приложении 5: для жесткой заделки рельса на опоре — табл. 5.2.1 и 5.2.2, для шарнирного закрепления рельса на опоре — табл. 5.3.1 и 5.3.2; данные приведены для двух нагружений — в центре пролета и у опоры.

При расчете струнной путевой структуры на выносливость предполагалось, что одиночный транспортный модуль с учетом вертикальной динамики создает вертикальную силу 6 тонн (на половину струнной путевой структуры, т.е. на один рельс, приходится 3 тонны, а на каждое колесо — по 1,5 тонны). Результаты расчетов напряжений в головке и корпусе рельса для оценки его выносливости приведены в приложении 5: для жесткой заделки рельса на опоре — табл. 5.4.1 и 5.4.2, для шарнирного закрепления рельса на опоре — табл. 5.5.1 и 5.5.2; данные приведены для двух нагружений — в центре пролета и у опоры.

Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил для корпуса и головки рельса показаны в приложении 3.

6.3. Расчет прочности и оценка выносливости рельса

6.3.1. Проверка прочности корпуса и головки рельса

Проверку прочности проводим по формуле (14) согласно СНиП 2.05.03-

84* (Мосты и трубы):

$$\sigma_s \leq R_y \times m, \quad (20)$$

где:

σ_s — нормальные напряжения от изгиба и растяжения;

R_y — расчетное сопротивление текучести материала;

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

Марка стали принята 09Г2 по ГОСТ 19281-89* класса 345 по ГОСТ 27772-88.

Механические свойства проката С345 приведены в табл. 2 (выписка из табл. 51* СНиП II-23-81*).

Таблица 2

Механические свойства проката С345

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

Исходя из данных, приведенных в табл. 2, расчетные сопротивления текучести следует принять равными:

– для головки рельса: $R_y = 315$ МПа, $m \times R_y = 299$ МПа;

– для корпуса рельса: $R_y = 335$ МПа, $m \times R_y = 318$ МПа.

Вариант жесткой заделки рельса на промежуточных опорах

1) Середина пролета

Сопоставляя наибольшие действующие для верхней точки головки рельса

напряжения растяжения зимой при $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, равные $+275\text{ МПа}$ в середине пролета, которые приведены в табл. 5.2.1, с расчетными сопротивлениями $m \times R_y = 299\text{ МПа}$ для стали 09Г2, можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям в головке рельса в середине пролета при $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ для этой стали обеспечена.

Так же сопоставляя наибольшие действующие для нижней точки корпуса рельса напряжения сжатия летом при $+57,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, равные $-62,7\text{ МПа}$ в середине пролета, которые приведены в табл. 5.2.1, с расчетными сопротивлениями $m \times R_y = 318\text{ МПа}$ для стали 09Г2, можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям корпуса рельса в середине пролета при $+57,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ для этой стали обеспечена.

2) На промежуточной опоре

Сопоставляя наибольшие действующие для верхней точки головки рельса напряжения растяжения зимой при $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, равные $+386,7\text{ МПа}$ на промежуточной опоре, которые приведены в табл. 5.2.2, с расчетными сопротивлениями $m \times R_y = 299\text{ МПа}$, можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям головки рельса при $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ не обеспечена.

Так же сопоставляя наибольшие действующие для нижней точки корпуса рельса напряжения сжатия летом при $+57,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, равные $-402,6\text{ МПа}$ на промежуточной опоре, которые приведены в табл. 5.2.2, с расчетными сопротивлениями $m \times R_y = 318\text{ МПа}$, можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям корпуса при $+57,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ не обеспечена.

Для обеспечения прочности корпуса и головки рельса необходимо либо усилить сечение рельса на промежуточной опоре, либо применить для рельса более прочную сталь (для корпуса с расчетным сопротивлением более 403 МПа , для головки рельса — более 387 МПа).

При усилении рельса над промежуточной опорой для корпуса рельса подойдет рассмотренная выше сталь 09Г2. При этом усиливать необходимо лишь достаточно короткий участок над опорой длиной $2\text{—}2,5\text{ м}$ (или по $1\text{—}1,25\text{ м}$ от центра опоры в обе стороны, т.к., например, на расстоянии $1\text{—}1,25\text{ м}$ от

центра опоры изгибающий момент в рельсе падает в 3—4 раза и не превышает его значения на остальной части пролета (см. рис. 3.15, приложение 3).

Вариант шарнирного закрепления рельсов на промежуточных опорах

1) Середина пролета

Сопоставляя наибольшие действующие для верхней точки головки рельса напряжения растяжения зимой при $-40,8^{\circ}\text{C}$, равные $+276$ МПа в середине пролета, которые приведены в табл. 5.3.1, с расчетными сопротивлениями $m \times R_y = 299$ МПа для стали 09Г2, можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям головки рельса при $-40,8^{\circ}\text{C}$ для этой стали обеспечена.

Так же сопоставляя наибольшие действующие для нижней точки корпуса рельса напряжения сжатия летом при $+57,2^{\circ}\text{C}$, равные $-61,3$ МПа в середине пролета, которые приведены в табл. 5.3.1, с расчетными сопротивлениями $m \times R_y = 318$ МПа для стали 09Г2, можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям корпуса рельса при $+57,2^{\circ}\text{C}$ для этой стали обеспечена.

2) На промежуточной опоре

Сопоставляя наибольшие действующие для верхней точки головки рельса напряжения растяжения зимой при $-40,8^{\circ}\text{C}$, равные $+320$ МПа на промежуточной опоре, которые приведены в табл. 5.3.2, с расчетными сопротивлениями $m \times R_y = 299$ МПа для стали 09Г2, можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям рельса при $-40,8^{\circ}\text{C}$ для этой стали не обеспечена. Для обеспечения прочности необходимо либо усилить сечение рельса на опоре (усилить на 7%), либо применить для головки рельса более прочную сталь (с расчетным сопротивлением более 320 МПа).

Сопоставляя наибольшие действующие для нижней точки корпуса рельса напряжения сжатия летом при $+57,2^{\circ}\text{C}$, равные -247 МПа на промежуточной опоре, которые приведены в табл. 5.3.2, с расчетными сопротивлениями $m \times R_y = 318$ МПа для стали 09Г2, можно утверждать, что прочность по нормальным напряжениям корпуса рельса при $+57,2^{\circ}\text{C}$ для этой стали обеспечена.

Таким образом, расчеты показывают, что шарнирное закрепление рельса на промежуточных опорах предпочтительней, т.к. при наиболее опасном

нагрузении (два модуля в сцепке общим весом 12 тс):

- максимальный изгибающий момент в рельсе-струне в сечении над промежуточной опорой при $+57,2$ °С будет меньше, чем при жесткой заделке корпуса рельса, на $4,44 - 2,63 = 1,81$ т×м (см. рис. 3.15 и 3.23 приложения 3);
- максимальный изгибающий момент при $+57,2$ °С в рельсе-струне в сечении под колесами модулей при их нахождении у опоры будет меньше, чем при жесткой заделке корпуса рельса, на $0,84 - 0,79 = 0,05$ т×м (см. рис. 3.15 и 3.23 приложения 3);
- максимальные напряжения растяжения в головке рельса над опорой при $-40,8$ °С будут ниже аналогичных напряжений при жесткой заделке рельса на опоре на $387 - 320 = 67$ МПа (см. табл. 5.2.2 и 5.3.2);
- максимальные напряжения сжатия в подошве корпуса рельса над опорой при $+57,2$ °С будут ниже аналогичных напряжений при жесткой заделке рельса на опоре на $403 - 247 = 156$ МПа (см. табл. 5.2.2 и 5.3.2);
- при шарнирном закреплении рельса усиливать над промежуточной опорой необходимо лишь головку рельса (корпус рельса удовлетворяет требованиям по прочности) на расстоянии до $0,4—0,6$ м от опоры, где изгибающий момент уменьшается на $40—50\%$.

6.3.2. Проверка выносливости рельса

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

Проверку выносливости будем проводить для наиболее ослабленного поперечного сечения рельса-струны — для поперечных сварных швов в головке и корпусе рельса по СНиП II-23-81* (Стальные конструкции). Сварные швы располагаются через каждые 12 метров по длине проката. На промежуточных опорах сварные швы существенно усиливаются, поэтому расчет проводим для поперечных сварных швов головки и корпуса рельса, расположенных между опорами. Расчет проводим для двух крайних температур: $-40,8$ °С и $+57,2$ °С. Напряженное состояние рельса-струны в сечении середины пролета под колесами модулей практически не отличается от напряженных состояний в других сечениях на расстояниях не ближе 3 метров от промежуточных опор. Так же имеются очень малые отличия напряженного состояния рельса (на указанных расстояниях от опор) от вида крепления рельса на опорах — жесткого или шарнирного (см. табл. 5.4.1—5.4.2 и 5.5.1—5.5.2 для середины пролета). Поэтому напряжения для расчетных сечений будем брать из таблицы 5.4.1 для середины пролета.

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

Расчет на выносливость следует производить по формуле:

$$\sigma_{\max} \leq \alpha \times R_v \times \gamma_v, \quad (20)$$

где:

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

α — коэффициент, учитывающий количество циклов нагружений n и при

$n \geq 3,9 \cdot 10^6$ принимается равным $\alpha = 0,77$;

γ_v — коэффициент, определяемый по табл. 33 СНиПа в зависимости от вида напряженного состояния и коэффициента асимметрии напряжений $\rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$; здесь σ_{\min} и σ_{\max} — соответственно наибольшее и наименьшее по абсолютному значению напряжения в рассчитываемом элементе.

Значения коэффициентов R_v и γ_v представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

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

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

Таблица 4

Значения коэффициента γ_v (таблица 33 СНиП II-23-81)

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

1) Выполним проверку выносливости поперечного сварного шва верха головки рельса зимой при $-40,8$ °С (данные из табл. 5.4.1, приложение 5, для середины пролета):

Верх головки рельса: $\sigma_{\min} = 189$ МПа (без подвижной нагрузки); $\sigma_{\max} = 220,6$ МПа (с подвижной нагрузкой на пролете), $\rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 189/220,6 = 0,86$.

$$\gamma_v = \frac{1,0}{1-\rho} = 7,1,$$

$$\alpha \times R_v \times \gamma_v = 0,77 \times 75 \times 7,1 = 410 \text{ МПа} > \sigma_{\max} = 220,6 \text{ МПа}.$$

Выносливость места сварки головки рельса зимой при $-40,8$ °С обеспечена.

2) Выполним проверку выносливости поперечного сварного шва низа корпуса рельса зимой при $-40,8$ °С (данные из табл. 5.4.1, приложение 5, для середины пролета):

Низ корпуса рельса: $\sigma_{\min} = 219,9$ МПа (без подвижной нагрузки); $\sigma_{\max} = 273,9$ МПа (с подвижной нагрузкой на пролете); $\rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 219,9/273,9 = 0,80$.

$$\gamma_v = \frac{1,0}{1-\rho} = 5,0,$$

$$\alpha \times R_v \times \gamma_v = 0,77 \times 75 \times 5,0 = 288,7 \text{ МПа} > \sigma_{\max} = 274,4 \text{ МПа}.$$

Выносливость места сварки корпуса рельса зимой при $-40,8$ °С обеспечена.

3) Выполним проверку выносливости поперечного сварного шва верха головки рельса летом при $+57,2$ °С (данные из табл. 5.4.1 для середины пролета):

Верх головки рельса: $\sigma_{\min} = -22,2$ МПа (без подвижной нагрузки); $\sigma_{\max} = -62$ МПа (с подвижной нагрузкой на пролете), $\rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = -22,2/-62 = 0,36$.

$$\gamma_v = \frac{2}{1-\rho} = 3,125,$$

$$\alpha \times R_v \times \gamma_v = 0,77 \times 75 \times 3,125 = 180,5 \text{ МПа} > \sigma_{\max} = 62 \text{ МПа.}$$

Выносливость места сварки головки рельса летом при +57,2 °С обеспечена.

4) Выполним проверку выносливости поперечного сварного шва низа корпуса рельса летом при +57,2 °С (данные из табл. 5.4.1 для середины пролета):

Низ корпуса рельса: $\sigma_{\min} = -21,6$ МПа (без подвижной нагрузки); $\sigma_{\max} = 47,6$ МПа (с подвижной нагрузкой на пролете); $\rho = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = -21,6 / 47,6 = -0,45$.

$$\gamma_v = \frac{2,5}{1,5 - \rho} = 1,28,$$

$$\alpha \times R_v \times \gamma_v = 0,77 \times 75 \times 1,28 = 73,9 \text{ МПа} > \sigma_{\max} = 48,2 \text{ МПа.}$$

Выносливость места сварки корпуса рельса летом при +57,2 °С обеспечена.

7. Выводы

1. Увеличение длины пролетов путевой структуры макроСТЮ с 30 м (предпроектное предложение) до 36 м не привело существенно к увеличению габаритов рельса-струны и напряжений в головке и корпусе рельса, но увеличило деформативность пролетного строения под воздействием расчетной подвижной нагрузки (юнибус массой 6 т) в центре пролета с 84,8 мм (при наибольшей температуре +57,2 °С) до 97,6 мм, что составляет относительную величину $0,0976 \text{ м} / 36 \text{ м} = 1/369$.

Для повышения ровности пути необходимо будет выполнить строительный подъем в каждом пролете. При дополнительном подъеме корпуса рельса с головкой в центре пролета относительно струны на 72 мм (или 1/500 от длины пролета) еще на стадии строительства путевой структуры, повысит

ровность рельса и, соответственно, плавность движения подвижного состава во всем возможном диапазоне эксплуатационных воздействий (температура от +57,2 °С до –40,8 °С, полезная нагрузка от ноля до 3 тонн) во время всего срока службы транспортной системы. Например, при температуре + 57,2 °С и груженом модуле относительная ровность пути будет равна в данном случае $(0,0976 \text{ м} - 0,072 \text{ м}) / 36 \text{ м} = 1/1400$.

2. Шарнирное закрепление рельса-струны на промежуточной опоре предпочтительнее жесткого закрепления (заделки), т.к. при наиболее опасном нагружении (два модуля в сцепке общим весом 12 тс):

- максимальный изгибающий момент в рельсе-струне в сечении над промежуточной опорой при +57,2 °С будет меньше, чем при жесткой заделке корпуса рельса, на 1,81 т×м;
- максимальный изгибающий момент при +57,2 °С в рельсе-струне в сечении под колесом модулей при их нахождении у опоры будет меньше, чем при жесткой заделке корпуса рельса, на 0,05 т×м;
- максимальные напряжения растяжения в головке рельса над опорой при –40,8 °С будут ниже аналогичных напряжений при жесткой заделке рельса на опоре на 67 МПа;
- максимальные напряжения сжатия в подошве корпуса рельса над опорой при +57,2 °С будут ниже аналогичных напряжений при жесткой заделке рельса на опоре на 156 МПа;
- при шарнирном закреплении рельса усиливать над промежуточной опорой необходимо лишь головку рельса (корпус рельса удовлетворяет требованиям по прочности) на расстоянии до 0,4—0,6 м от опоры, где изгибающий момент уменьшается на 40—50%; либо для головки рельса необходимо использовать более прочную сталь, чем 09Г2.

3. Для струны наиболее целесообразно использовать высокопрочную оцинкованную стальную проволоку диаметром 3 мм производства Волгоградского завода «ВолгоМетиз» с пределом текучести 1.933 МПа

(19.702 кгс/см²). Это позволит увеличить допустимые напряжения в струне до 1.555 МПа (15.850 кгс/см²). При этом, благодаря другой схеме работы струны в СТЮ по сравнению с напрягаемой арматурой в мостах, несмотря на увеличенные в сравнении с мостовыми конструкциями допустимые напряжения, запас прочности струны (более 300 раз) по воздействию подвижной нагрузки будет выше, чем в любой другой известной строительной конструкции. Запас надежности по величине минимальной температуры при этом составит: $(1.933 - 1.555)/2,12 = 178,3$ °С, (где 2,12 МПа/°С — изменение напряжений в струне при изменении температуры на 1 °С), т.е. струна будет разрушена расчетной подвижной нагрузкой лишь при температуре $[-40,8$ °С + $(-178,3$ °С)] = $-219,1$ °С. Это, в совокупности с более чем 300-кратным запасом прочности струны, и определяет чрезвычайно высокую надежность струнной транспортной системы к внешним воздействиям.

4. Уточненная в результате расчетов конструкция рельса-струны представлена на рис. 8 в масштабе 1:1 (количество высокопрочных проволок в струне уменьшено с 340 до 280 шт.).

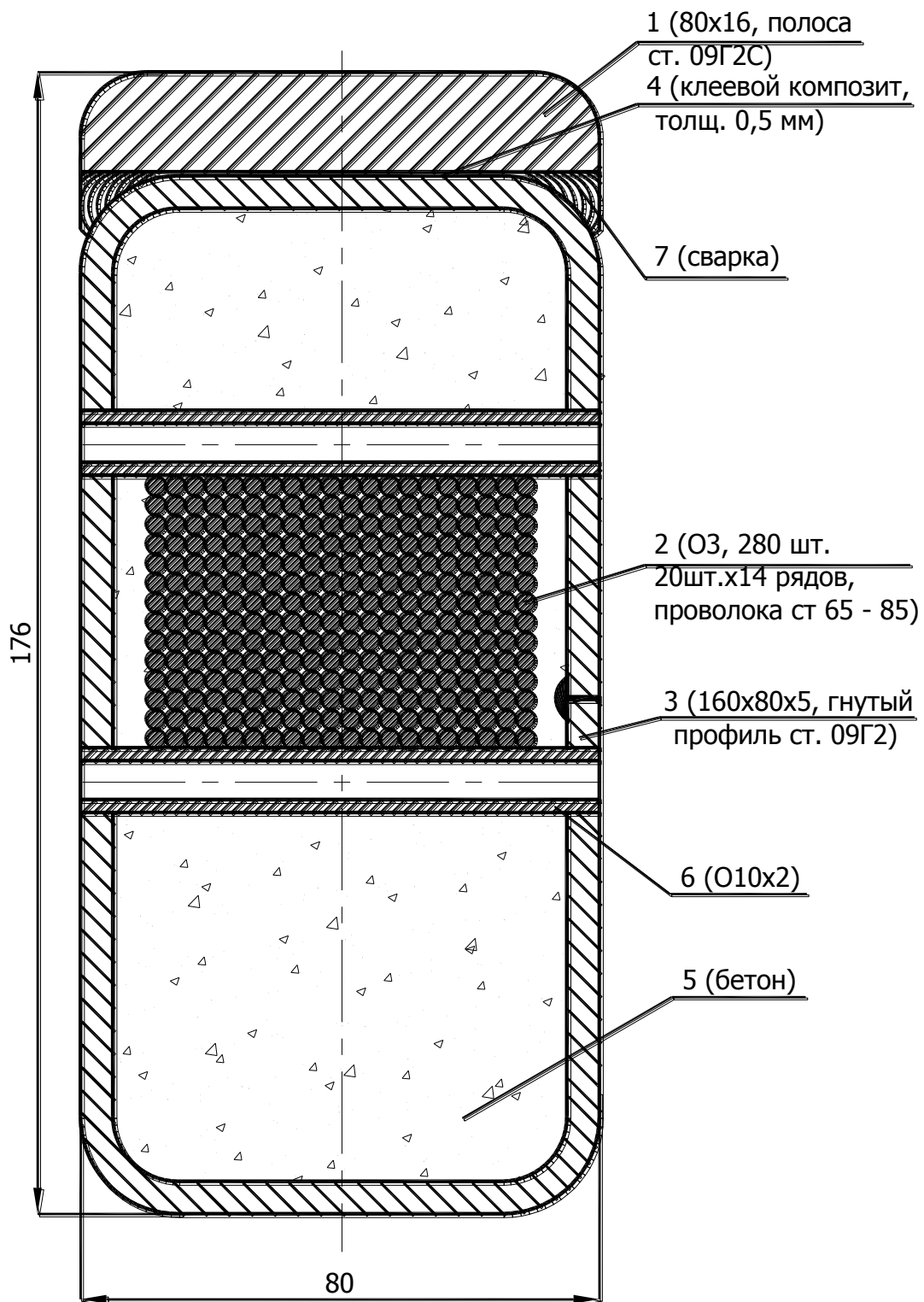


Рис. 8. Конструкция рельса-струны (масштаб 1:1) для участка трассы макроСТЮ в г. Хабаровске «Ул. Дикопольцева — Ул. Гоголя» (для пролетов 36 м и нагрузки от двух модулей массой 6 т каждый)

8. Список литературы

1. СНиП 23-01-99 «Строительная климатология».
2. СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия».
3. СНиП 2.05.03-84* «Мосты и трубы».
4. СНиП II-23-81* «Стальные конструкции».
5. СНиП 2.03.11-85 «Защита строительных конструкций от коррозии».
6. Мосты и трубы. Проектирование, строительство и приемка в эксплуатацию. 2-я редакция. М.: Госстрой России, 2001.
7. Юницкий А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в космосе. — Гомель: Инфотрибо, 1995. — 337 с.: ил.
8. ENV 1993-1 EUROCODE 3: Desing of Мосты и трубы. Проектирование, строительство и приемка в эксплуатацию. 2-я редакция. М.: Госстрой России, 2001steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings (Проектирование стальных конструкций. Общие правила и правила для строений.)
9. ENV 1992-2 EUROCODE 3: Desing of steel structures. Part 2: Steel Bridges (Проектирование стальных конструкций. Часть 2. Стальные мосты.)
10. AASHTO LRFD Bridge Design Specification, Published by American Association of State Highway and Transportation Officials, First Edition, 1996 (Нормы США по проектирования автодорожных мостов)
11. prEN 1993-1-11: Design of structures with tension components made of steel, 3 September 2002. (пред-Евро Нормы — Проектирование конструкций с растянутыми элементами, выполненными из стали).
12. Городецкий А.С., Шмуклер В.С., Бондарев А.В. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций. Учебное пособие. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. — 889 с.
13. Железнодорожный транспорт: Энциклопедия / Гл. редактор Н.С. Конарев. — М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия», 1994. — 559 с.

**Схемы нагружения рельса-струны
нагрузкой от подвижного состава**

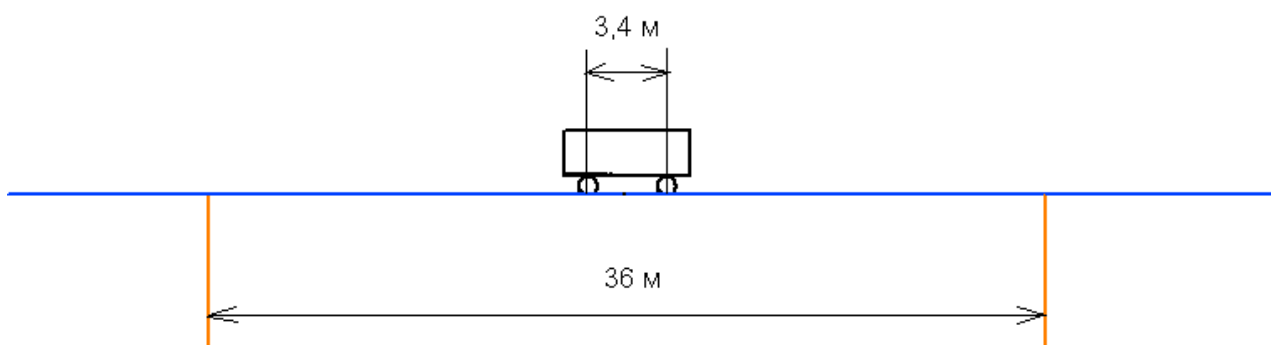


Рис. 1.1. Транспортное средство располагается в середине пролета

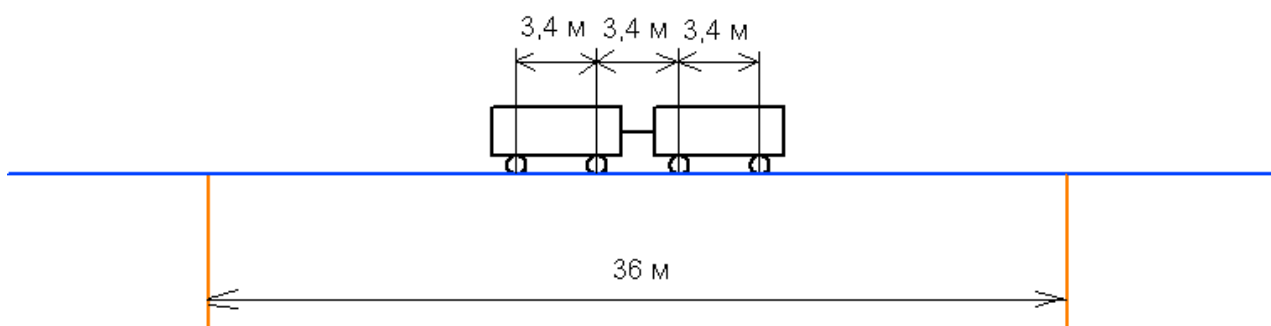


Рис 1.2. Два транспортных средства располагаются в середине пролета

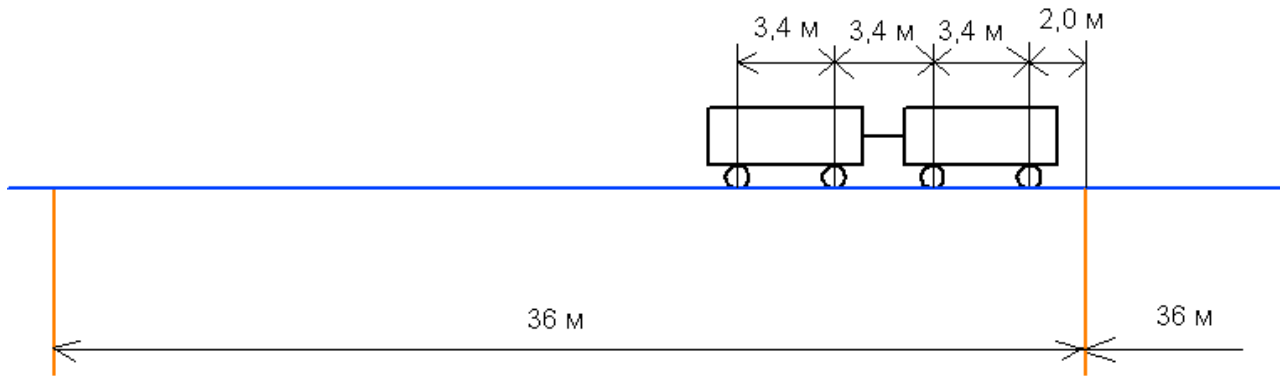


Рис. 1.3. Два транспортных средства располагаются по одну сторону от промежуточной опоры на расстоянии 2 м от нее

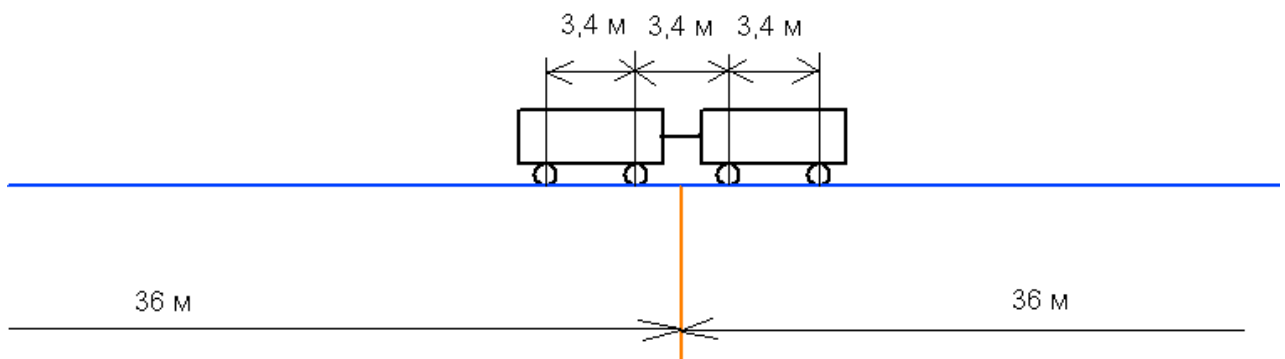


Рис. 1.4. Два транспортных средства располагаются симметрично над промежуточной опорой

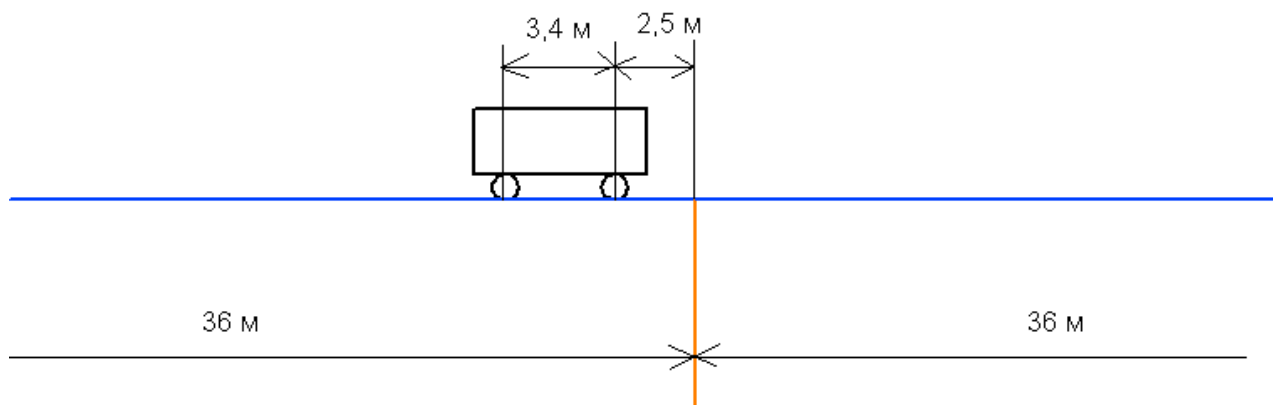


Рис. 1.5. Транспортное средство располагается по одну сторону от промежуточной опоры на расстоянии 2,5 м от нее до ближайшего колеса

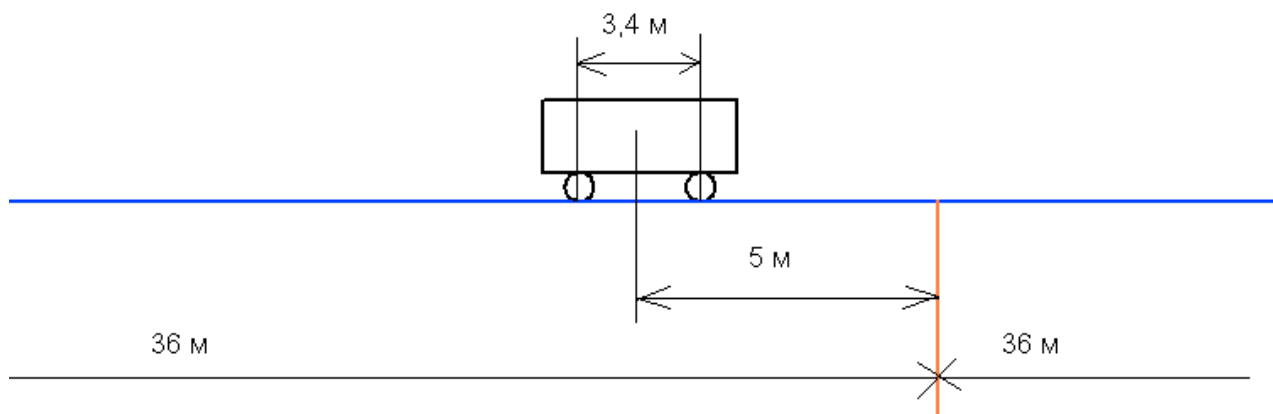


Рис. 1.6. Транспортное средство располагается по одну сторону от промежуточной опоры на расстоянии 5 м, считая то центра тяжести модуля

Эпюры продольных сил в струнах

2.1. Эпюры продольных сил в струнах, вызванных собственным весом и весом рельса-струны

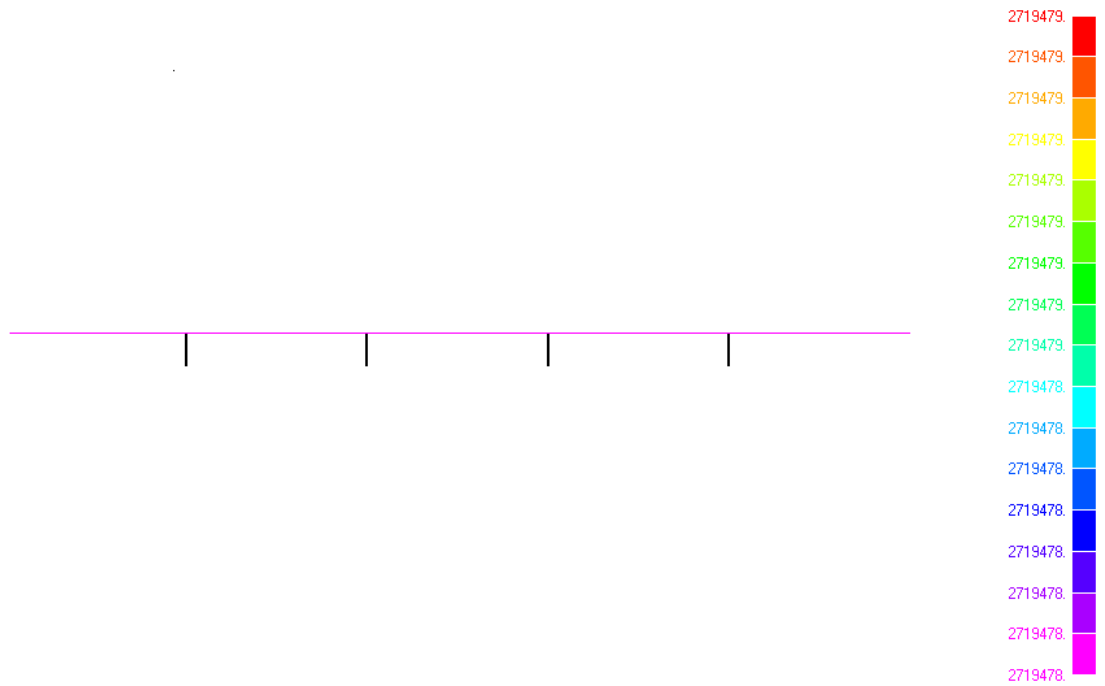


Рис. 2.1. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и без учета сил тяжести остальных элементов путевой структуры при температуре +20 °С (температура сборки)

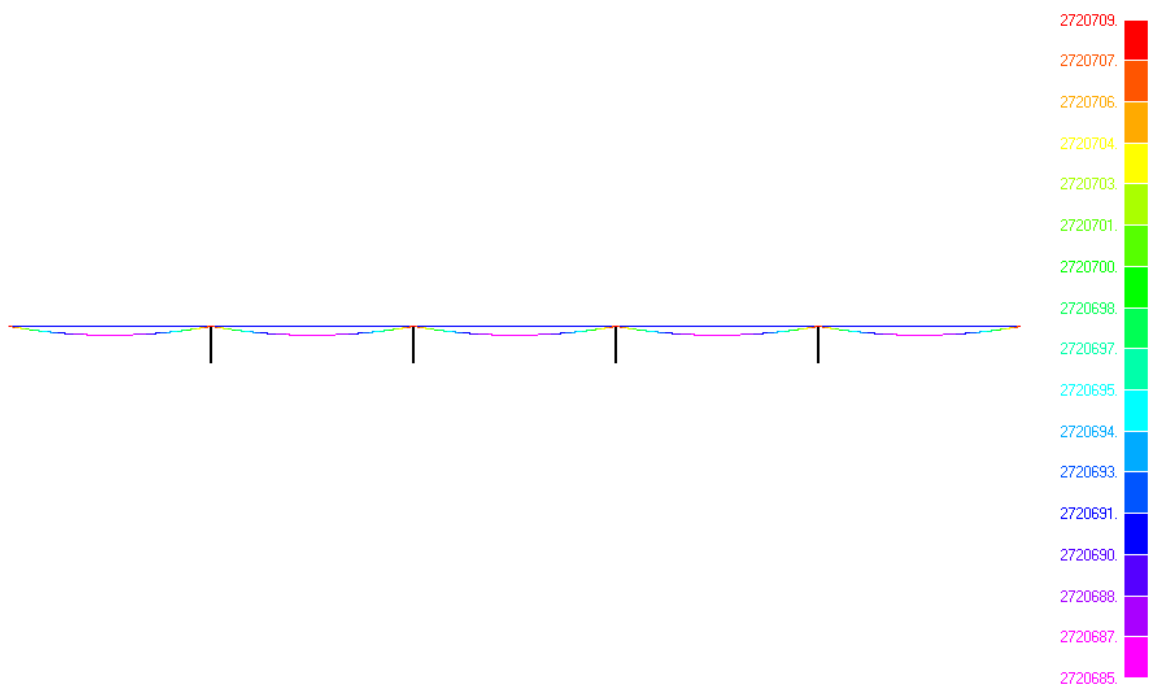


Рис. 2.2. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и с учетом сил тяжести всей путевой структуры при температуре +20 °С (температура сборки)

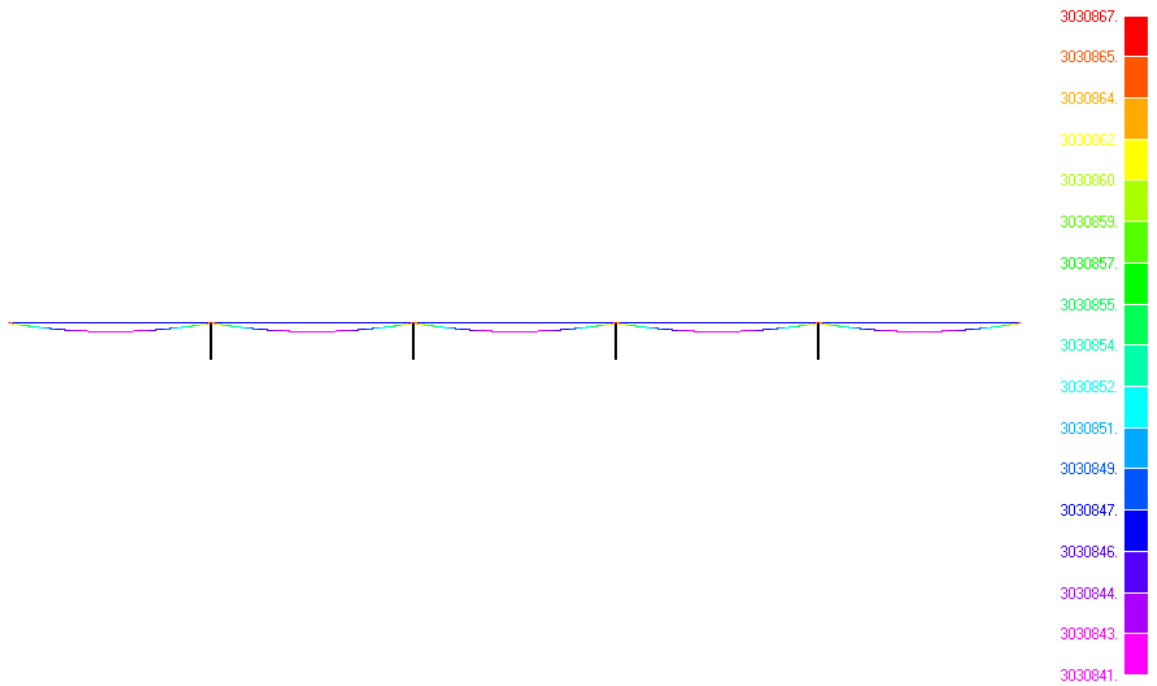


Рис. 2.3. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и с учетом сил тяжести путевой структуры при температуре $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$

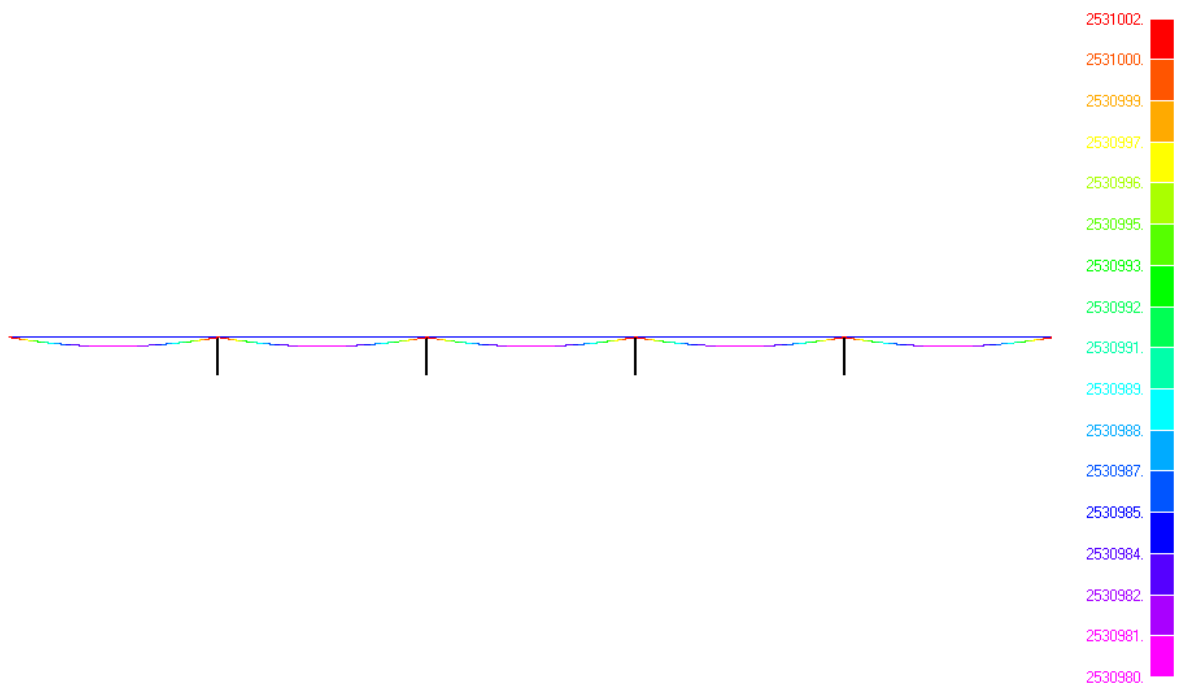


Рис. 2.4. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и с учетом сил тяжести путевой структуры при температуре $+57,2\text{ }^{\circ}\text{C}$

Эпюры продольных сил в струнах

2.2. Эпюры продольных сил в струнах, вызванных весом рельса-струны и весом двух транспортных средств

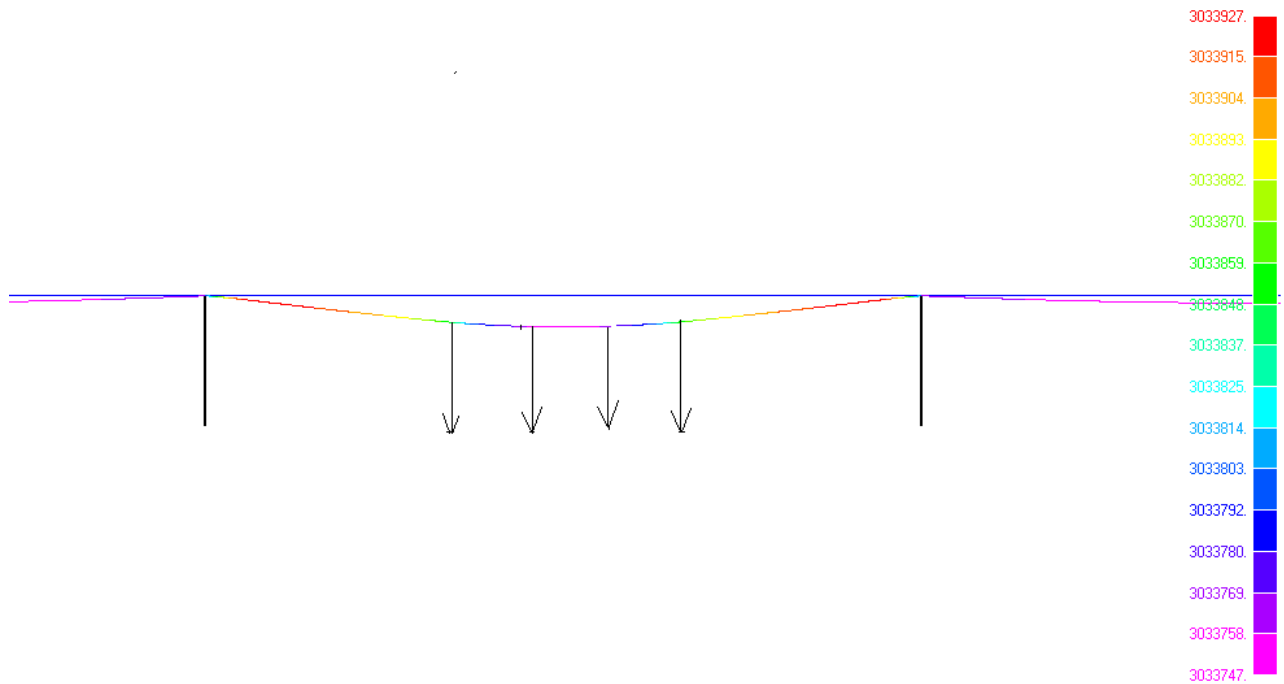


Рис. 2.5. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и с учетом сил тяжести путевой структуры и двух транспортных средств, расположенных в середине пролета (см. приложение 1, рис. 1.2) при температуре $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$

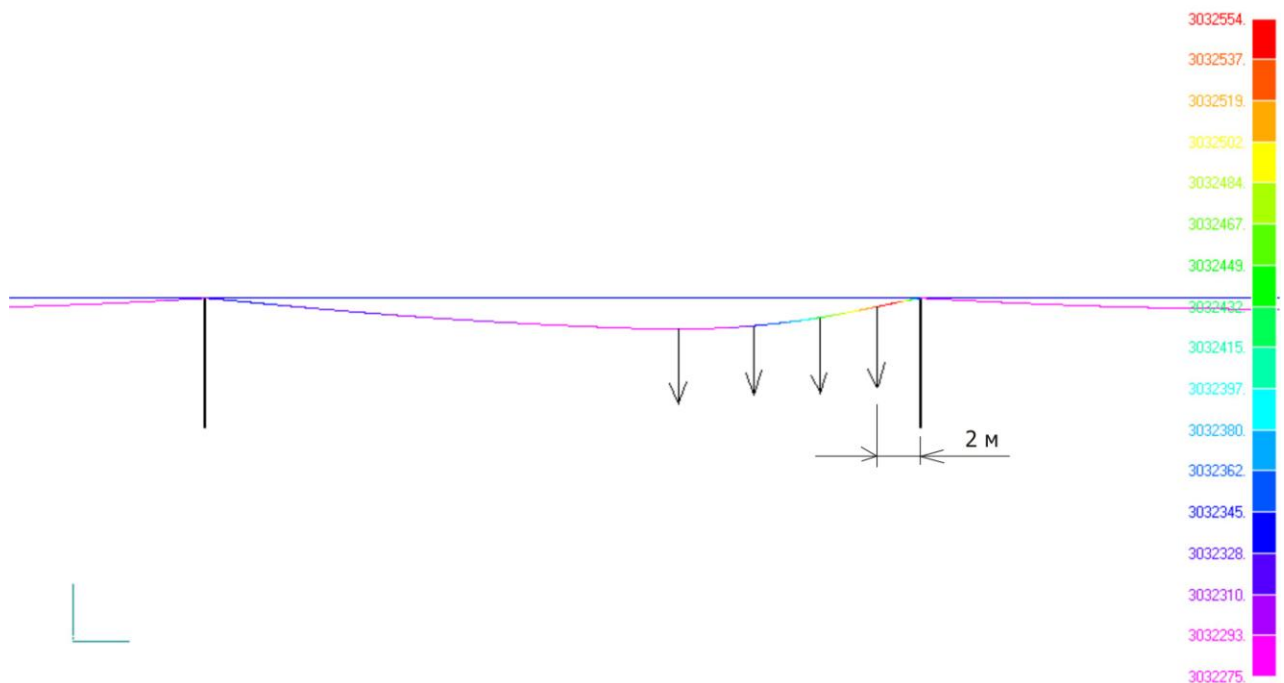


Рис. 2.6. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и с учетом сил тяжести путевой структуры и двух транспортных средств, расположенных возле промежуточной опоры на расстоянии 2 м от нее (см. приложение 1, рис. 1.3) при температуре $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$

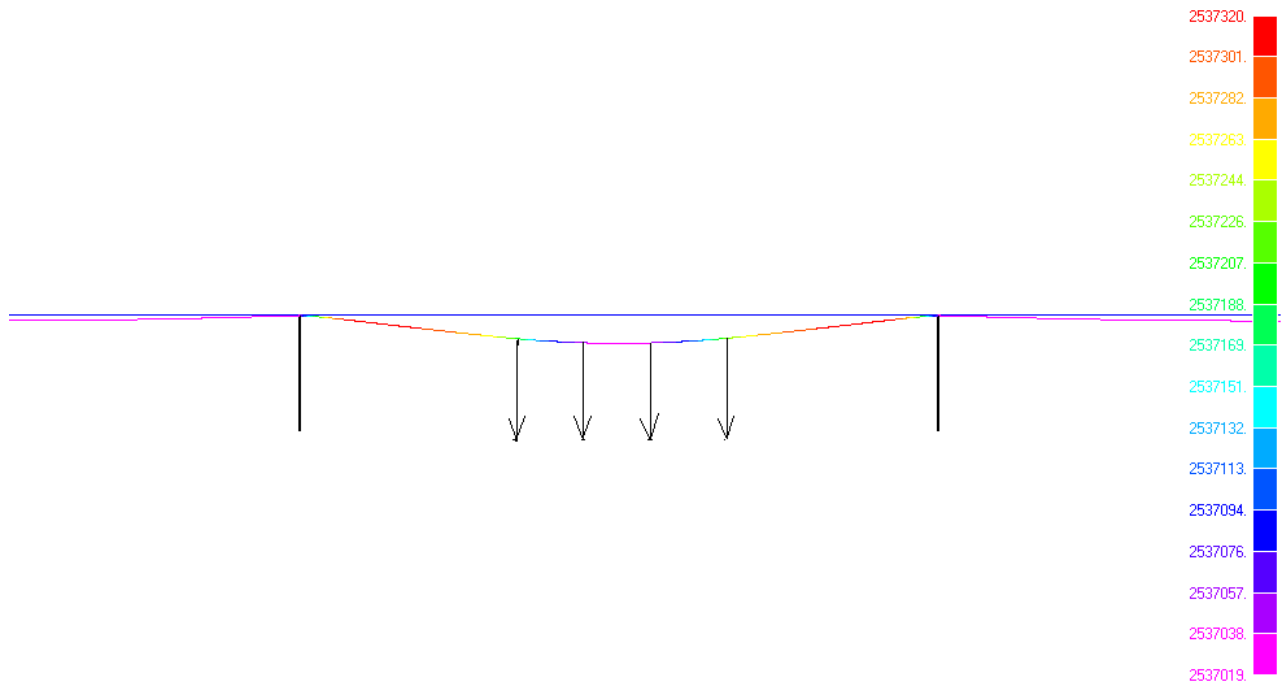


Рис. 2.7. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и с учетом сил тяжести путевой структуры и двух транспортных средств, расположенных в середине пролета (см. приложение 1, рис. 1.2) при температуре $+57,2\text{ }^{\circ}\text{C}$

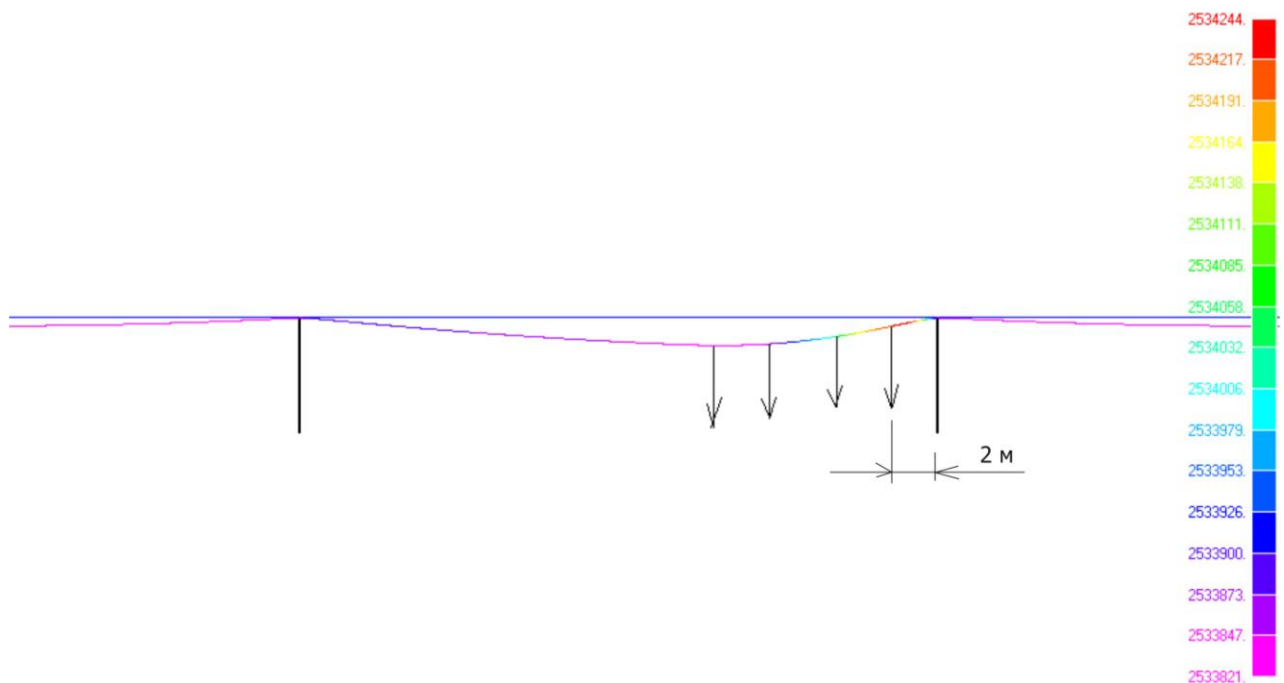


Рис. 2.8. Эпюра продольных сил (Н) в струне с учетом собственного веса и с учетом сил тяжести путевой структуры и двух транспортных средств, расположенных возле опоры на расстоянии 2 м от нее (см. приложение 1, рис. 1.3) при температуре $+57,2\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Эпюры изгибающих моментов
и поперечных сил в рельсе-струне**

**3.1. Эпюры изгибающих моментов и
поперечных сил в рельсе-струне,
вызванных собственным весом**

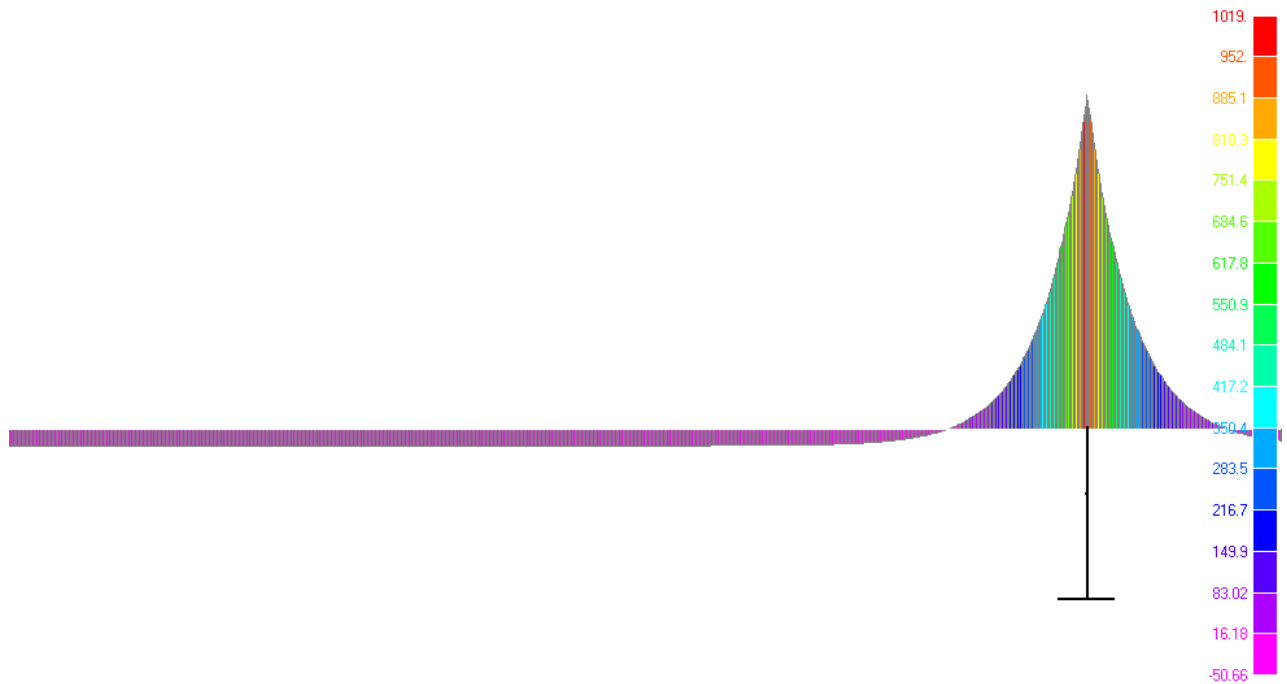


Рис. 3.1. Эпюра изгибающих моментов ($\text{H}\times\text{м}$) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при $-40,8\text{ }^\circ\text{C}$

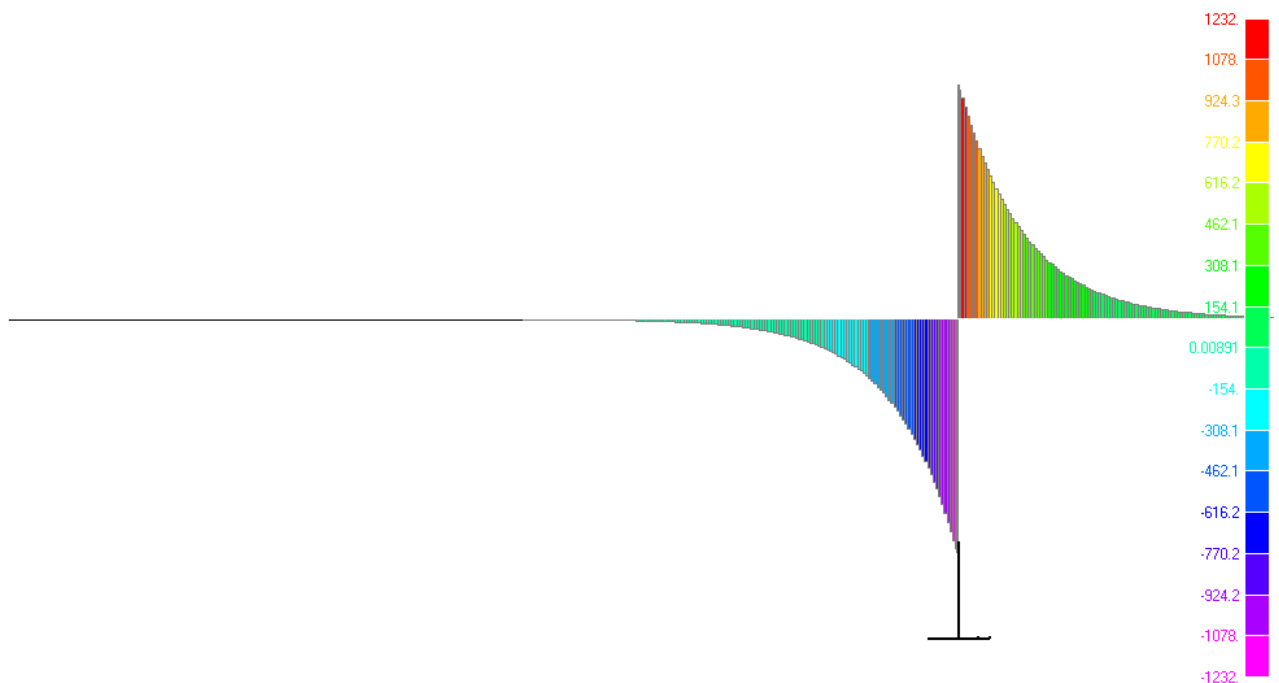


Рис. 3.2. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны при жесткой заделке рельса на промежуточной опоре и при $-40,8\text{ }^\circ\text{C}$

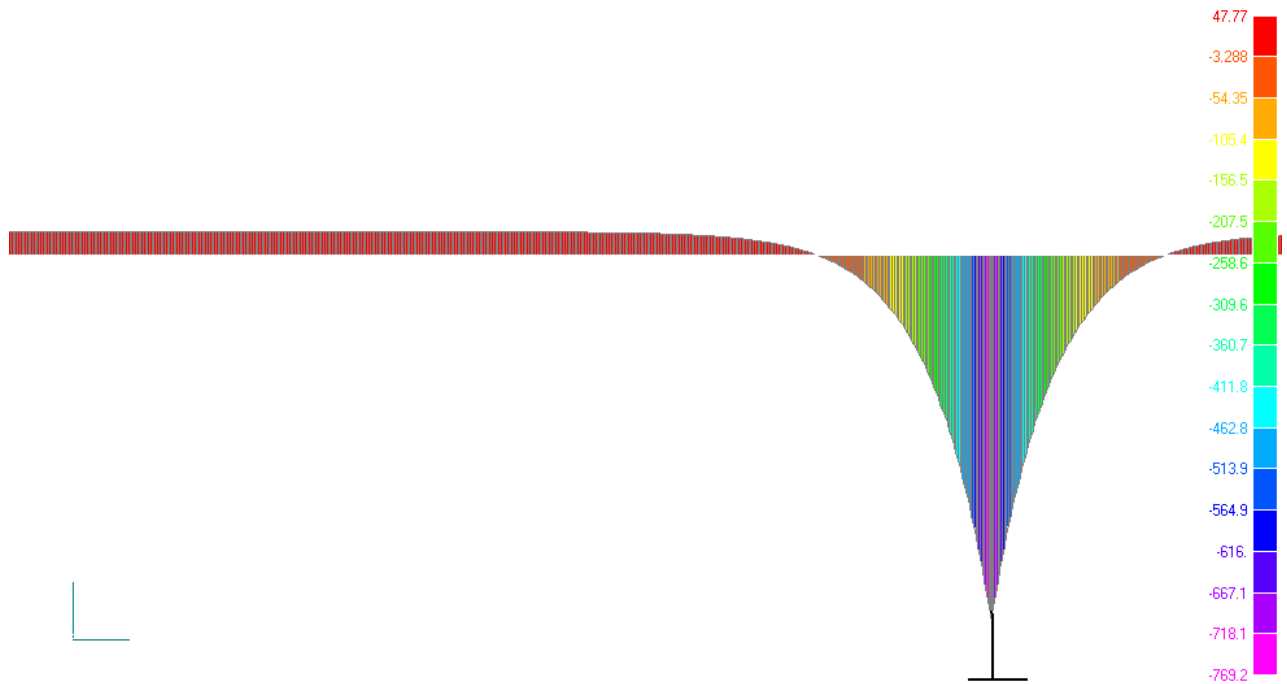


Рис. 3.3. Эпюра изгибающих моментов ($\text{H}\times\text{м}$) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при $+57,2\text{ }^\circ\text{C}$

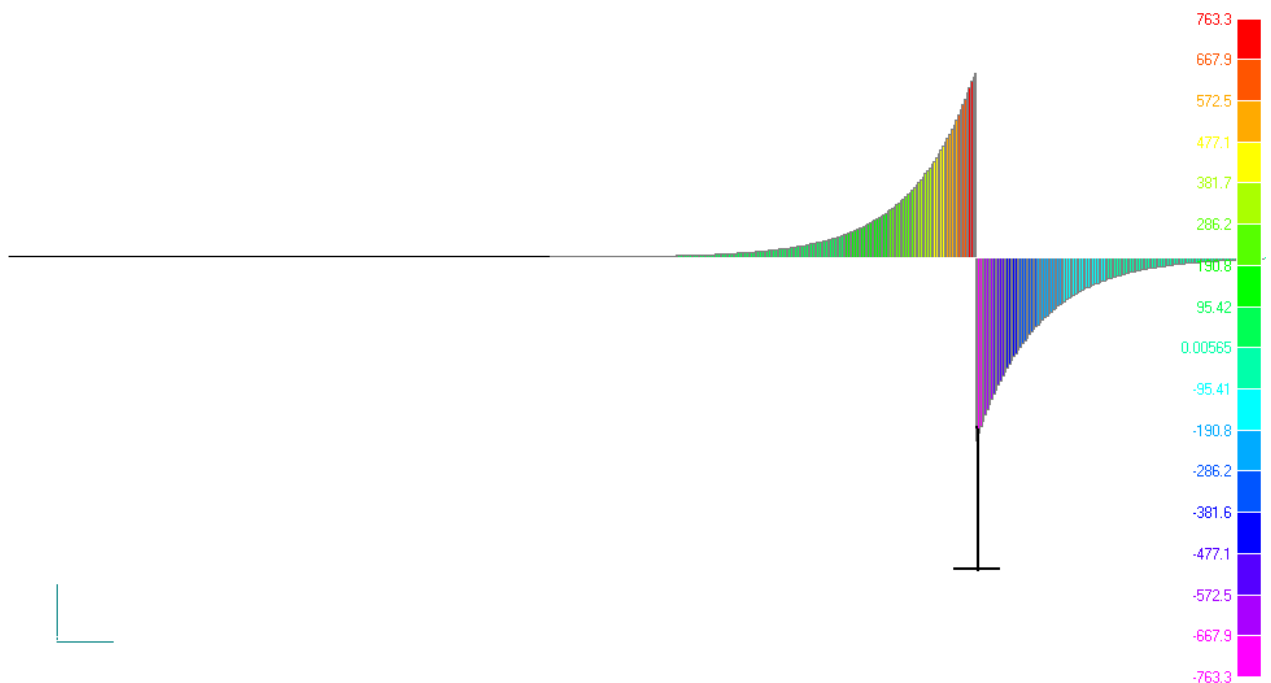


Рис. 3.4. Эпюра поперечных сил (H) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при $+57,2\text{ }^\circ\text{C}$

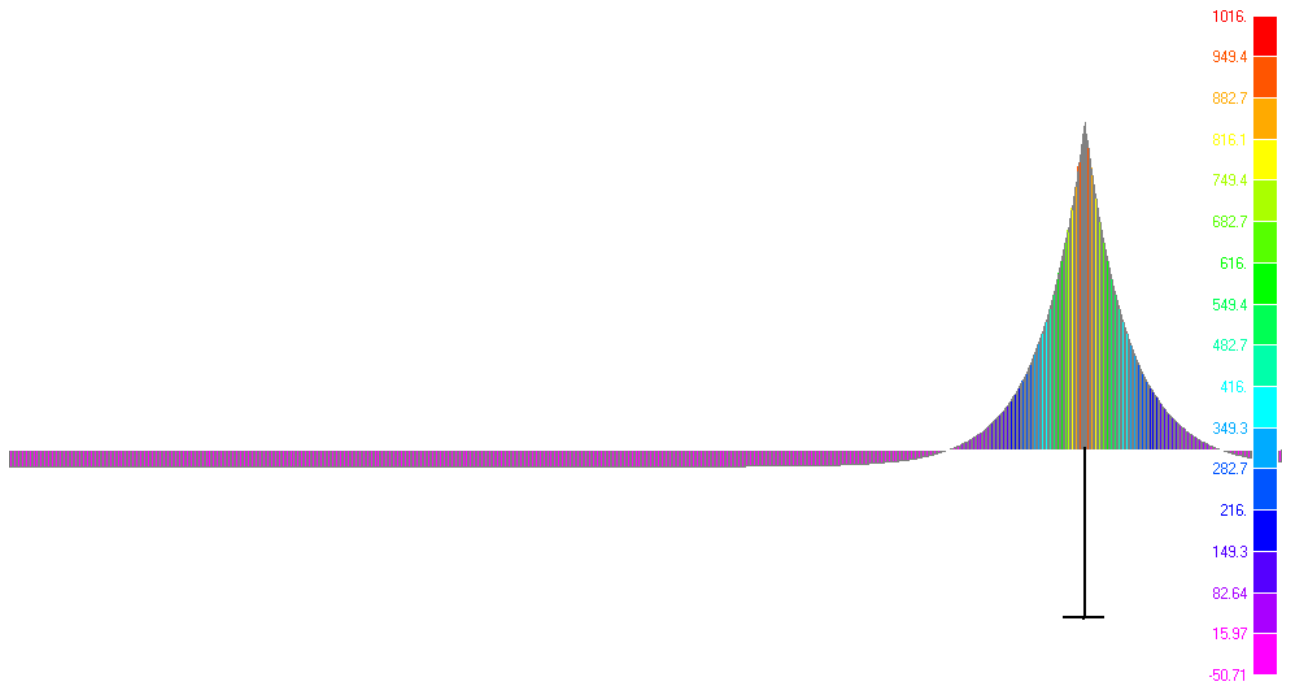


Рис. 3.5. Эпюра изгибающих моментов ($\text{H}\times\text{м}$) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при $-40,8\text{ }^\circ\text{C}$



Рис. 3.6. Эпюра поперечных сил (H) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при $-40,8\text{ }^\circ\text{C}$



Рис. 3.7. Эпюра изгибающих моментов ($\text{H}\times\text{м}$) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при $+57,2\text{ }^\circ\text{C}$

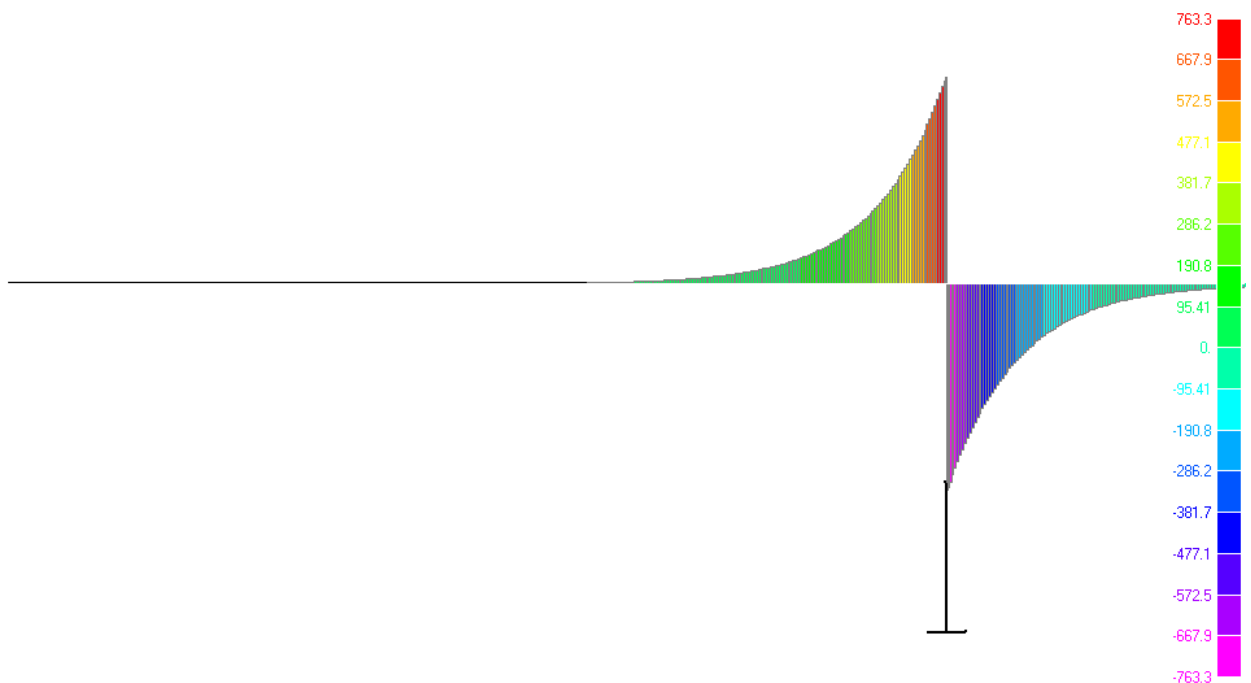


Рис. 3.8. Эпюра поперечных сил (H) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при $+57,2\text{ }^\circ\text{C}$

**3.2. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил
в рельсе-струне от собственного веса путевой
структуры и двух транспортных средств
(для расчета прочности рельса-струны)**

**3.2.1. Для жесткой заделки корпуса
рельса-струны на промежуточной опоре**

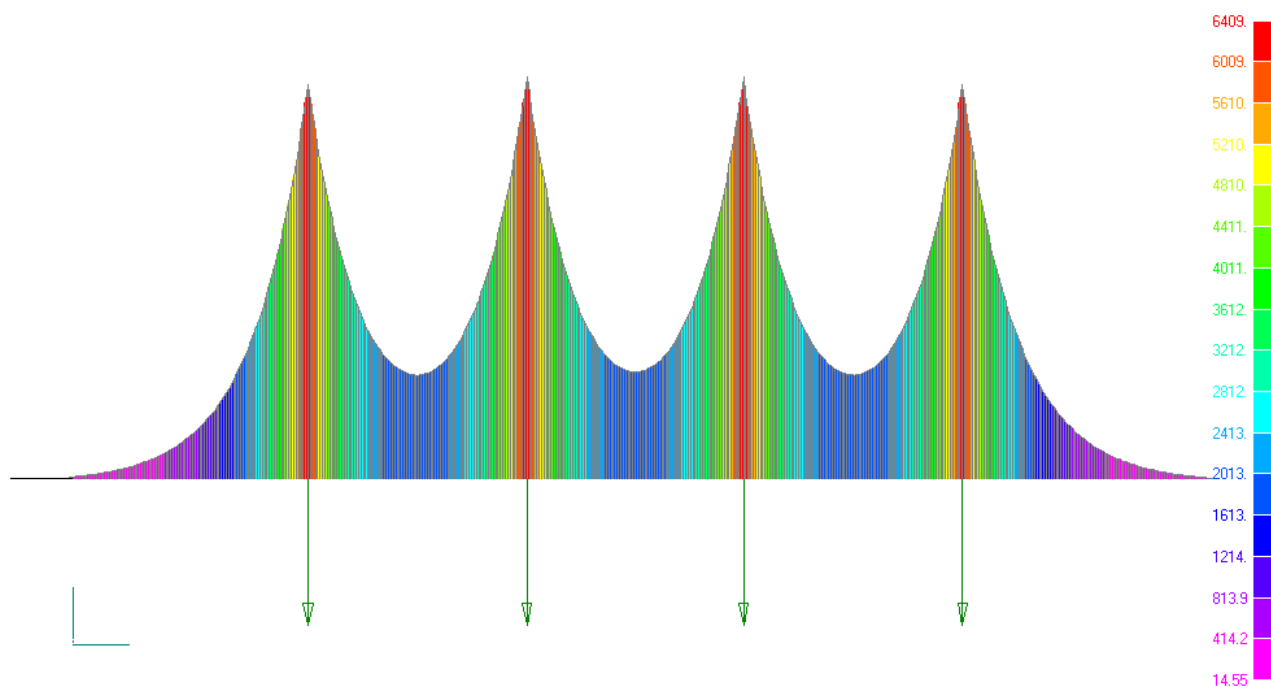


Рис. 3.9. Эпюра изгибающих моментов ($\text{H}\cdot\text{м}$) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и двух транспортных средств, размещенных в середине пролета, при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при $-40,8\text{ }^\circ\text{C}$

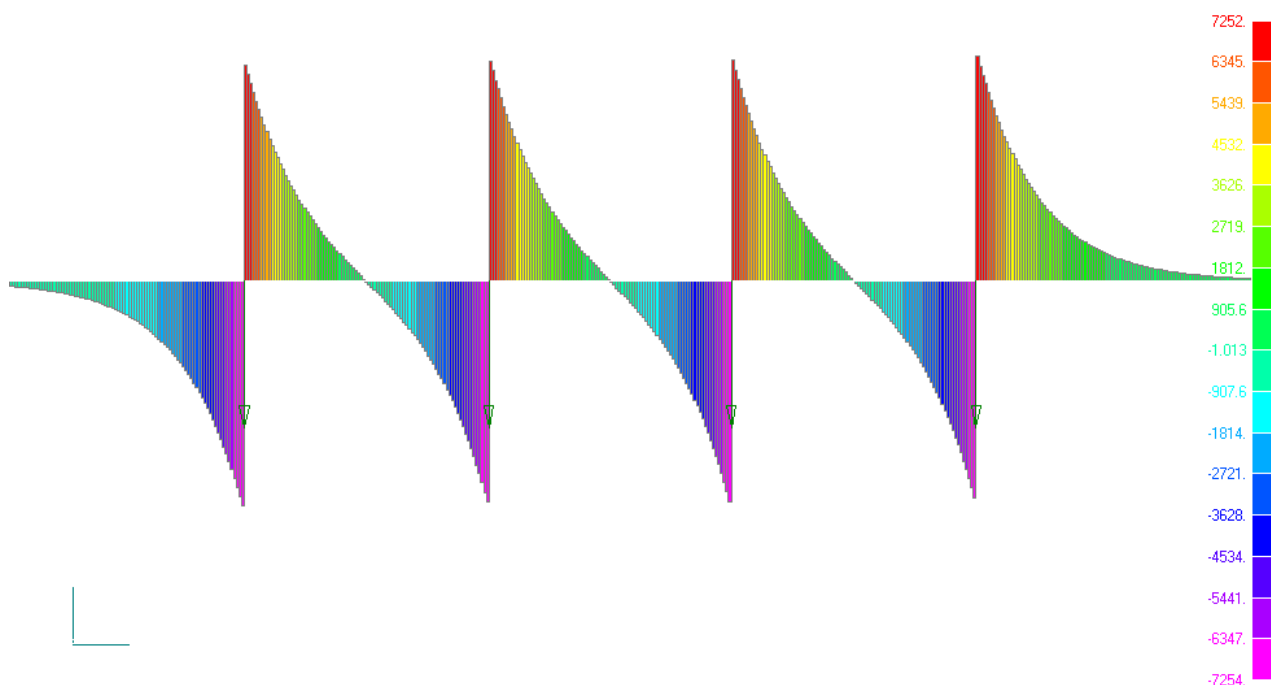


Рис. 3.10. Эпюра поперечных сил (H) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух транспортных средств, размещенных в середине пролета, при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при $-40,8\text{ }^\circ\text{C}$

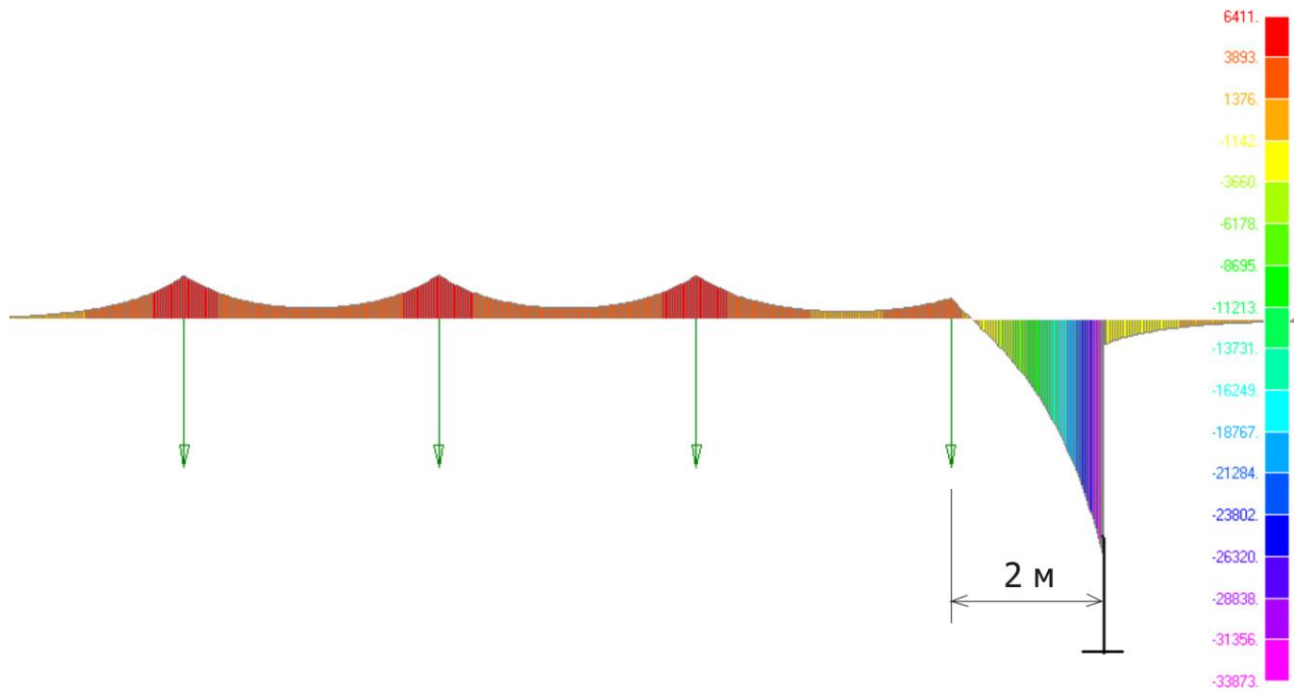


Рис. 3.11. Эпюра изгибающих моментов ($\text{H}\times\text{м}$) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и двух транспортных средств, размещенных на расстоянии 2 м от промежуточной опоры при жесткой заделке корпуса рельса на опоре и при $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$

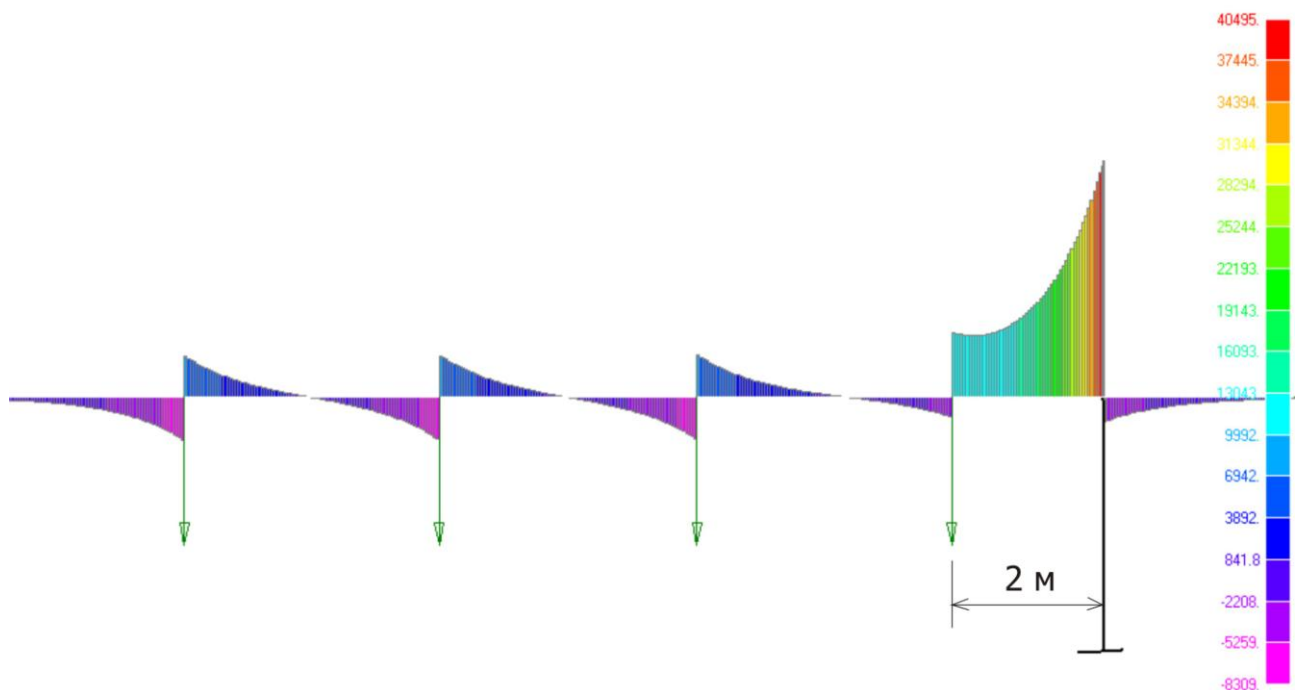


Рис. 3.12. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух транспортных средств, размещенных на расстоянии 2 м от промежуточной опоры, при жесткой заделке корпуса рельса на опоре и при $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$

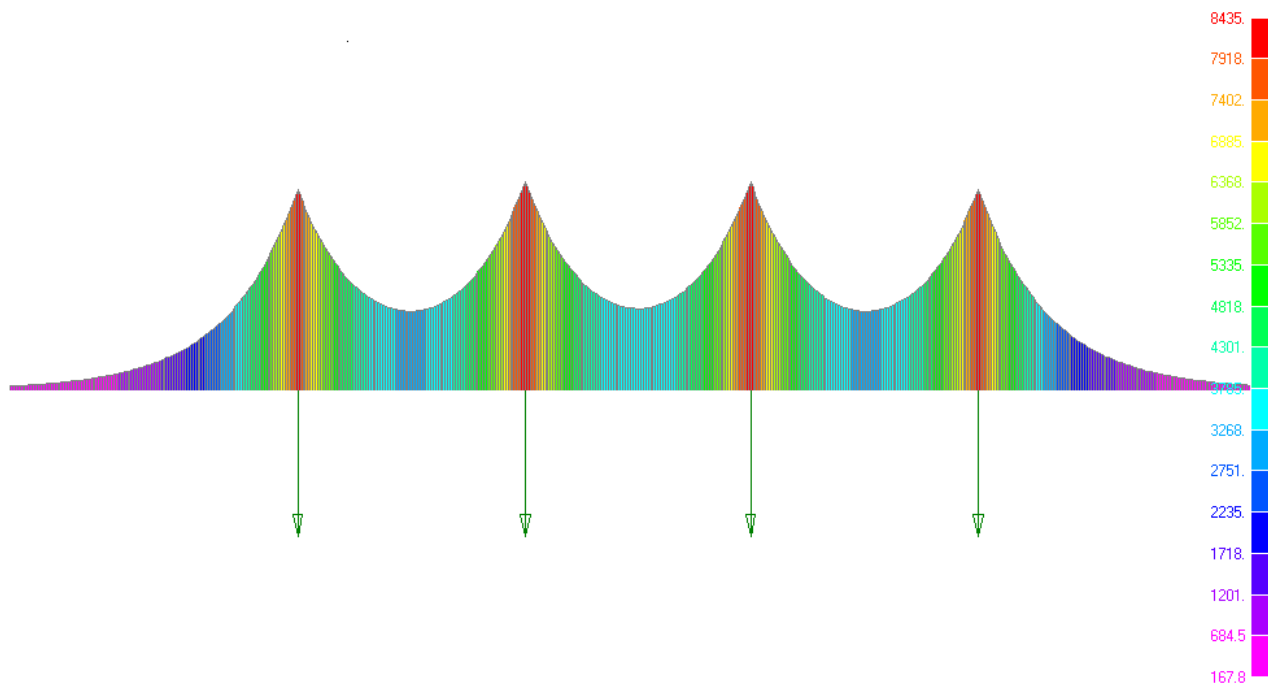


Рис. 3.13. Эпюра изгибающих моментов ($\text{H}\times\text{м}$) в рельсе струне от собственного веса рельса-струны и двух транспортных средств, размещенных в середине пролета, при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при $+57,2\text{ }^\circ\text{C}$

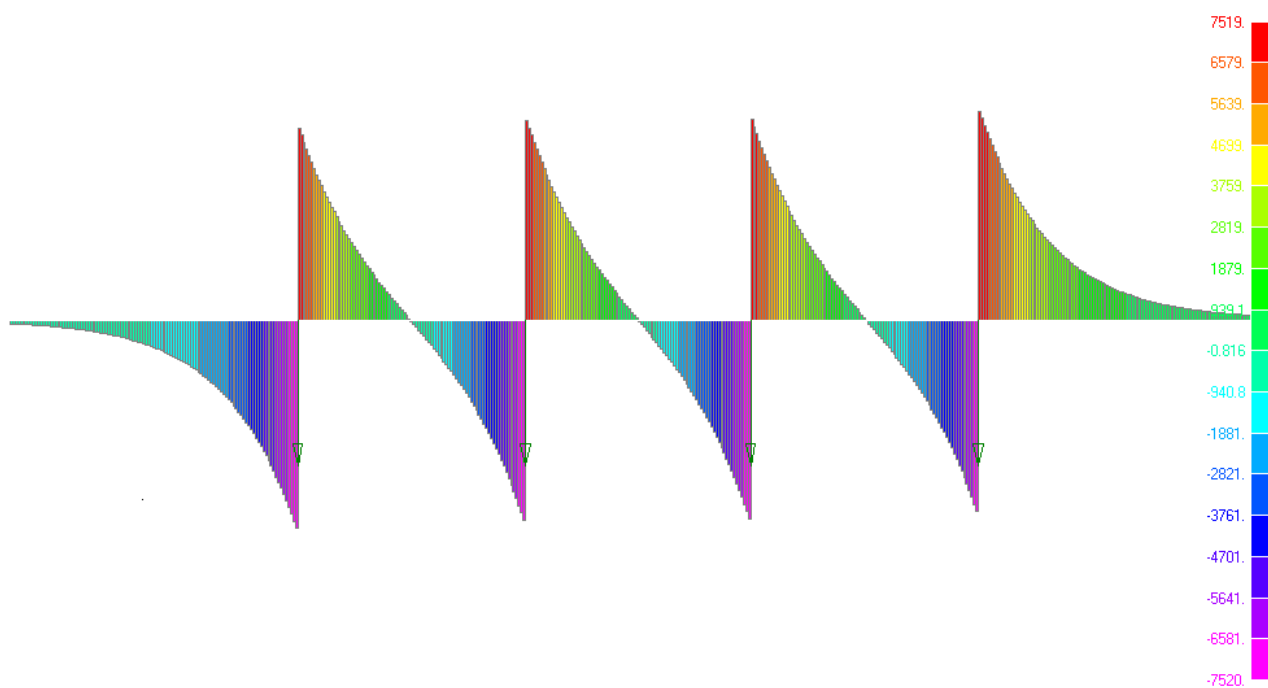


Рис. 3.14. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух транспортных средств, размещенных в середине пролета, при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при $+57,2\text{ }^\circ\text{C}$

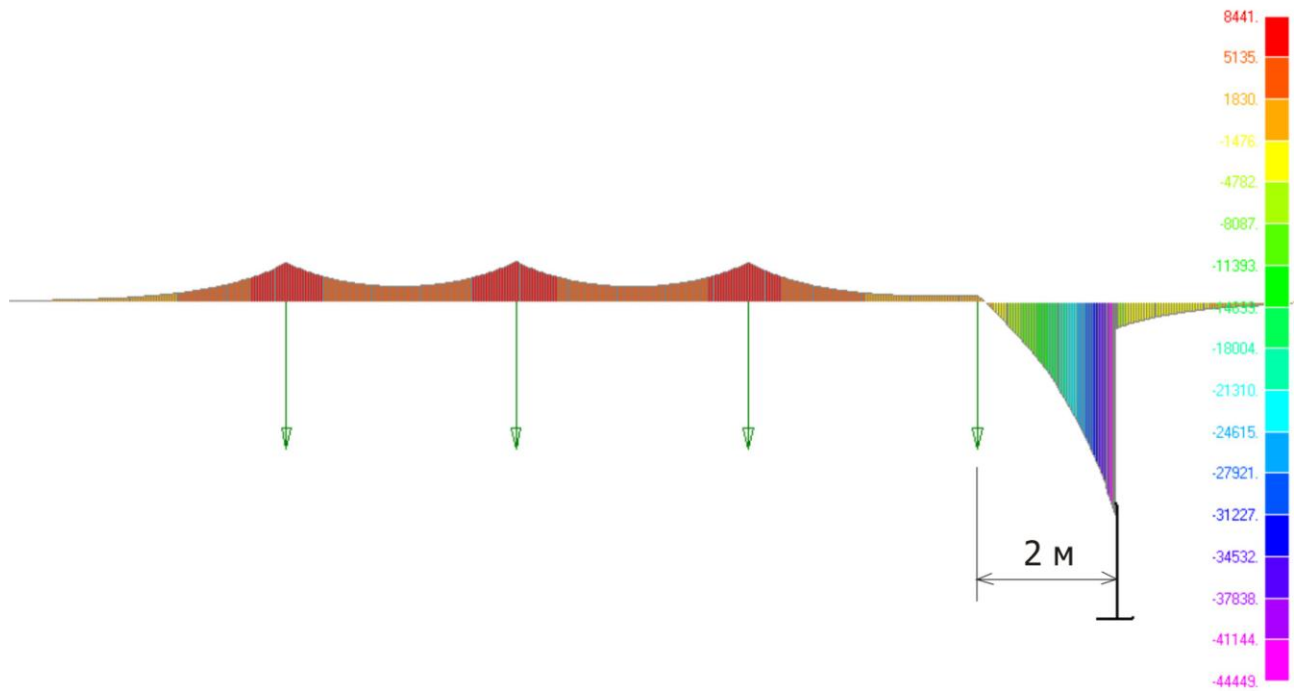


Рис. 3.15. Эпюра изгибающих моментов ($\text{H}\times\text{м}$) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и двух транспортных средств, размещенных на расстоянии 2 м от промежуточной опоры, при жесткой заделке корпуса рельса на опоре и при $+57,2\text{ }^\circ\text{C}$

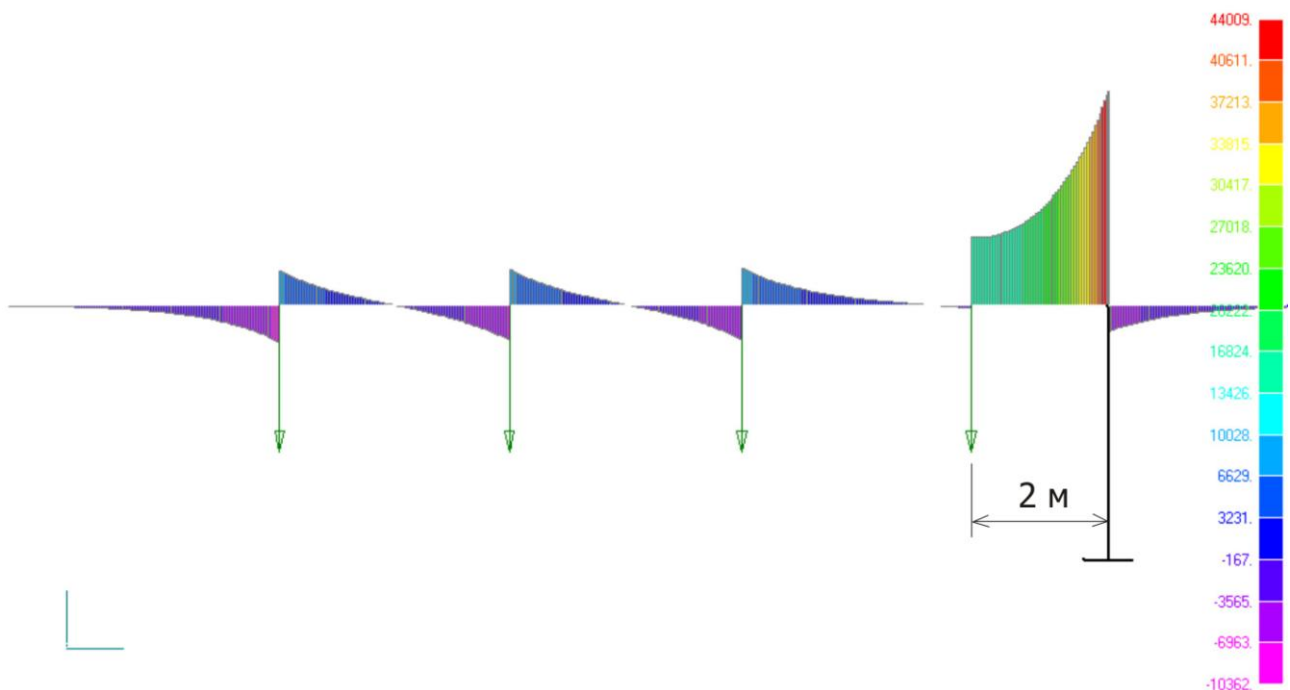


Рис. 3.16. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух транспортных средств, размещенных на расстоянии 2 м от промежуточной опоры, при жесткой заделке корпуса рельса на опоре и при $+57,2\text{ }^\circ\text{C}$

3.2.2. Для шарнирного закрепления корпуса рельса-струны на промежуточной опоре

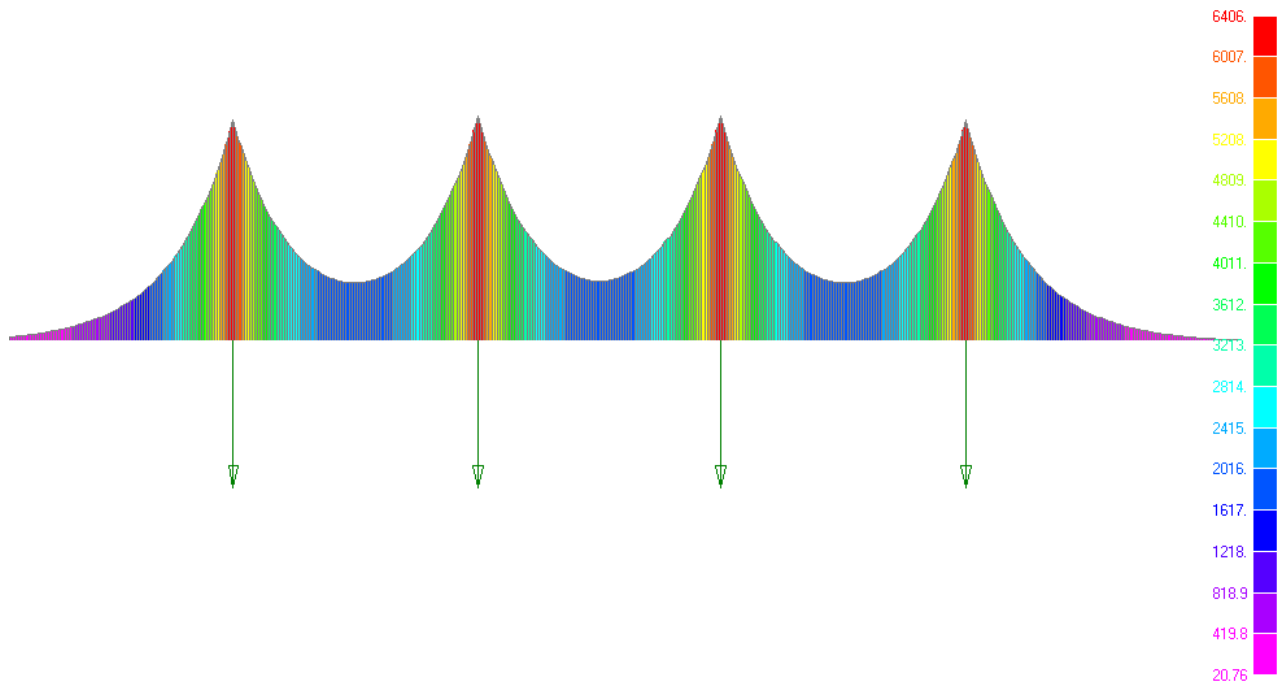


Рис. 3.17. Эпюра изгибающих моментов ($\text{H}\cdot\text{м}$) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и двух транспортных средств, размещенных в середине пролета, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при $-40,8\text{ }^\circ\text{C}$

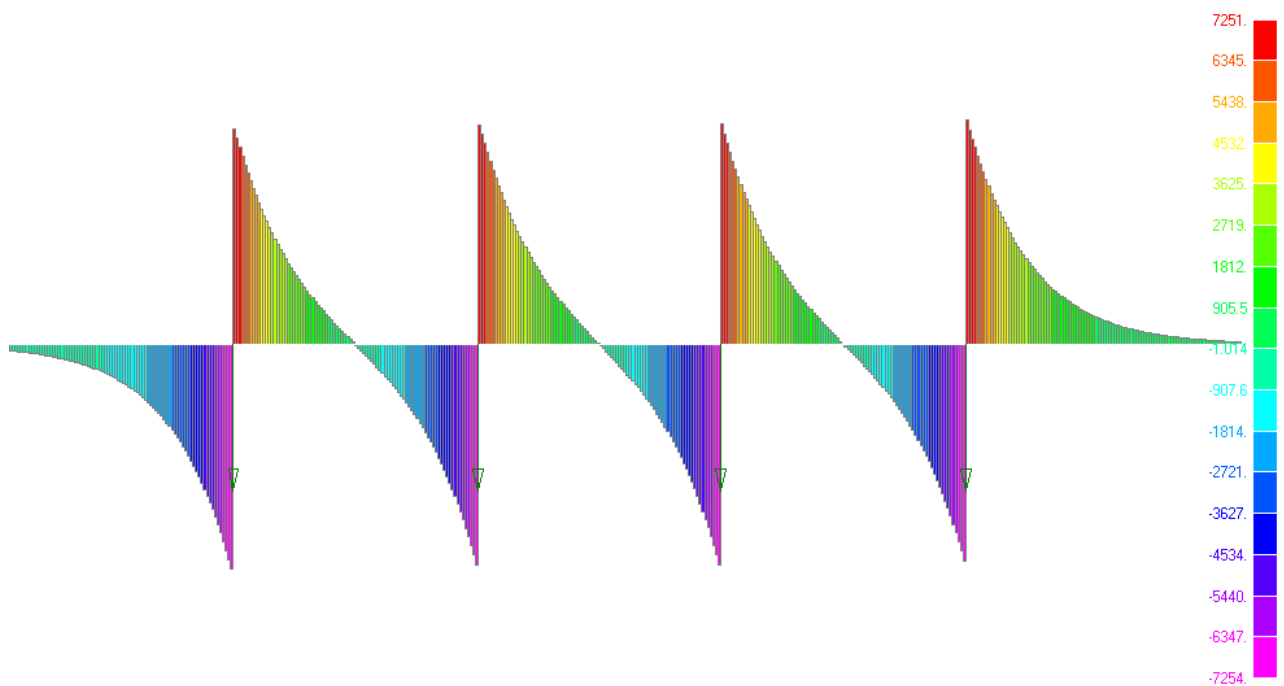


Рис. 3.18. Эпюра поперечных сил (H) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух транспортных средств, размещенных в середины пролета, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при $-40,8\text{ }^\circ\text{C}$

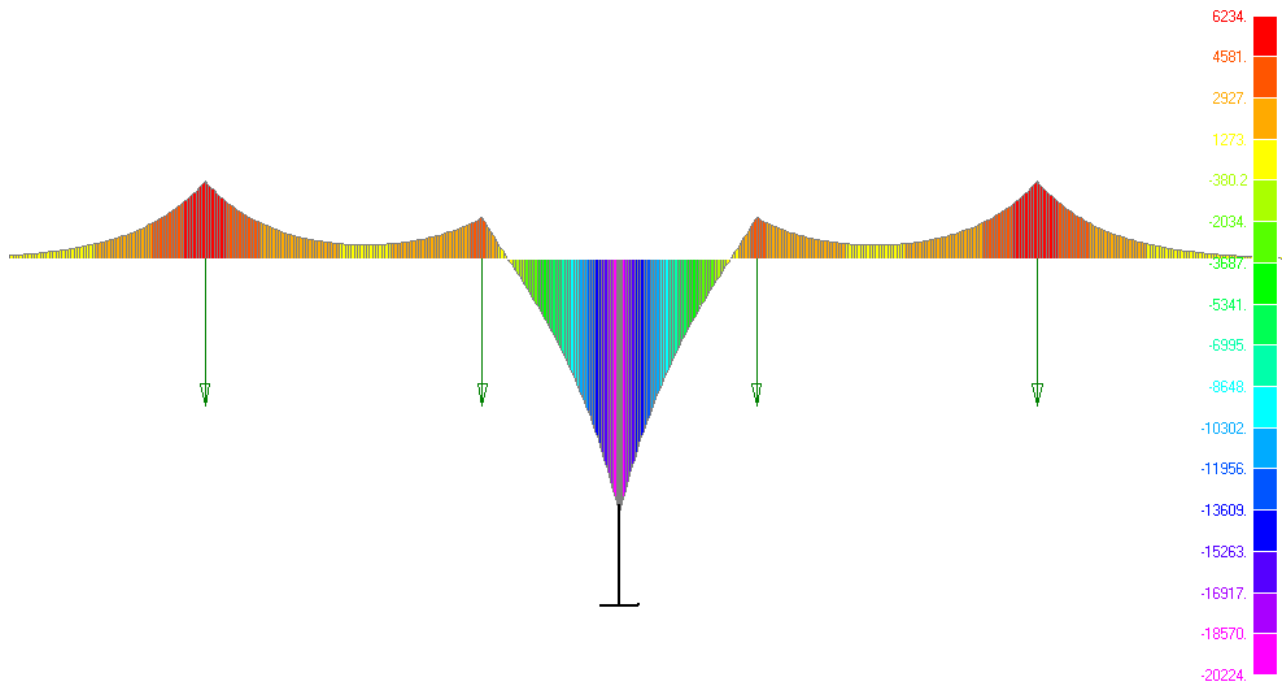


Рис. 3.19. Эпюра изгибающих моментов ($H \times m$) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и двух транспортных средств, размещенных симметрично на промежуточной опоре, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при $-40,8^\circ C$

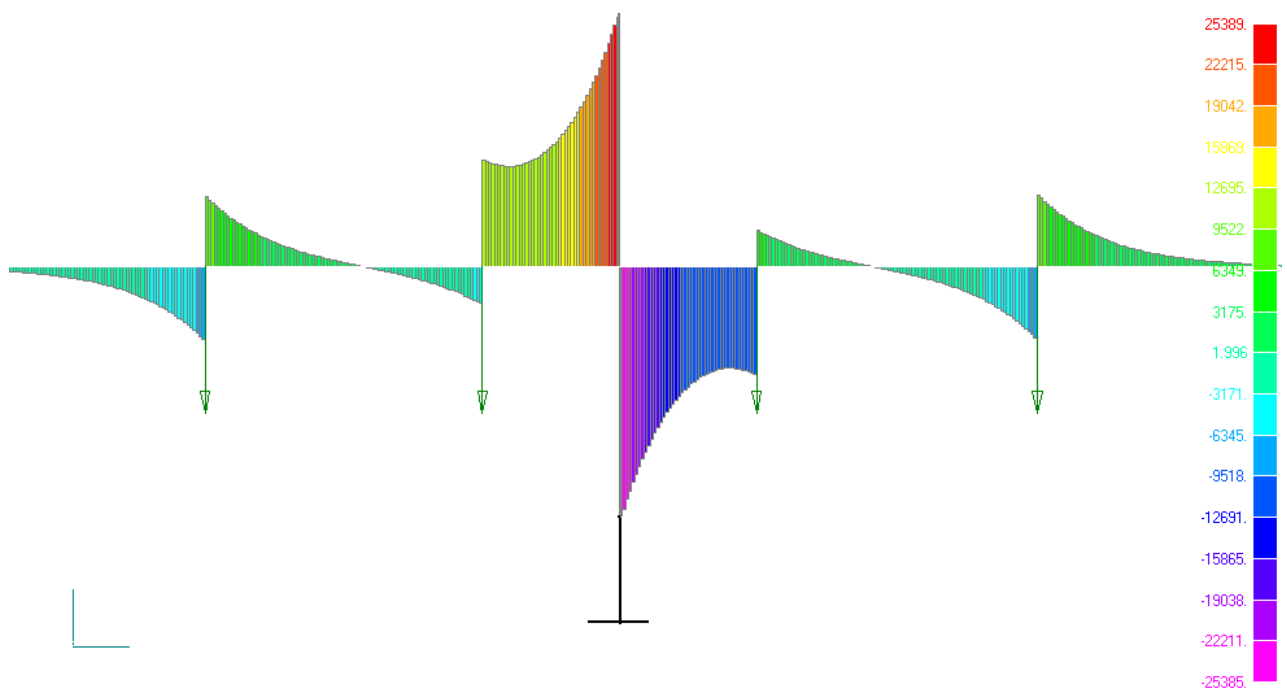


Рис. 3.20. Эпюра поперечных сил (H) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух транспортных средств, размещенных симметрично на промежуточной опоре, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при $-40,8^\circ C$

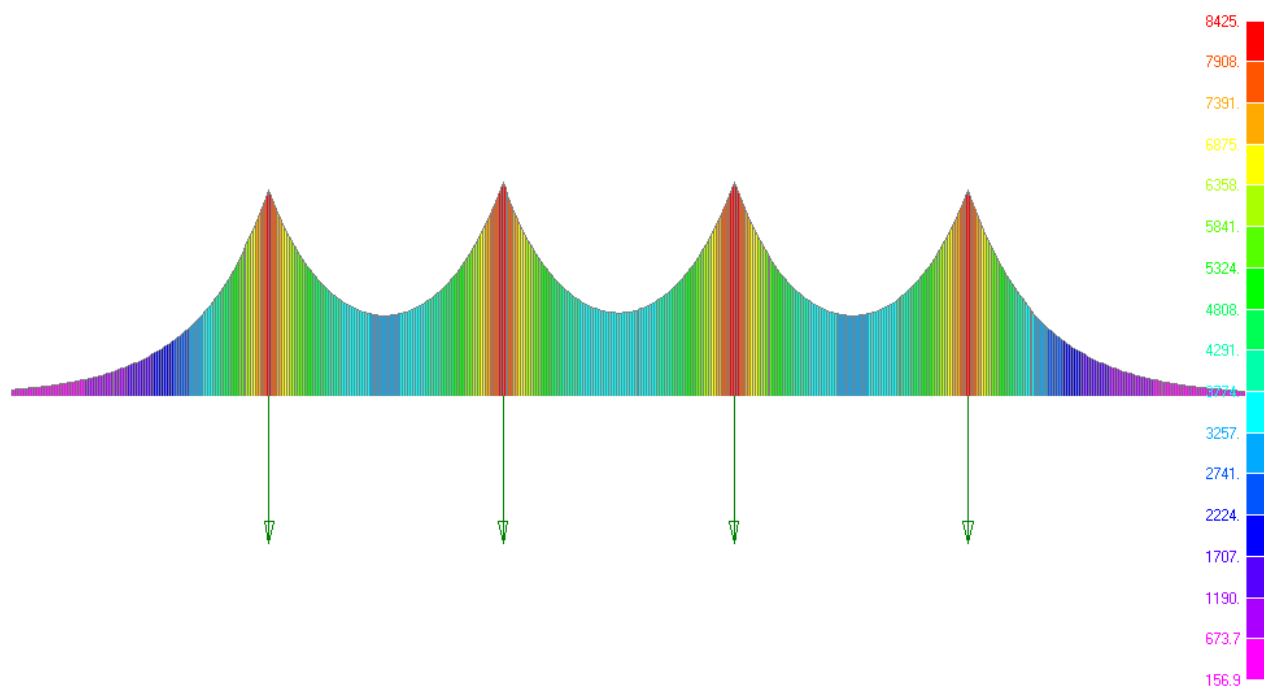


Рис. 3.21. Эпюра изгибающих моментов ($H \times m$) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и двух транспортных средств, размещенных в середине пролета, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при $+57,2 \text{ } ^\circ C$

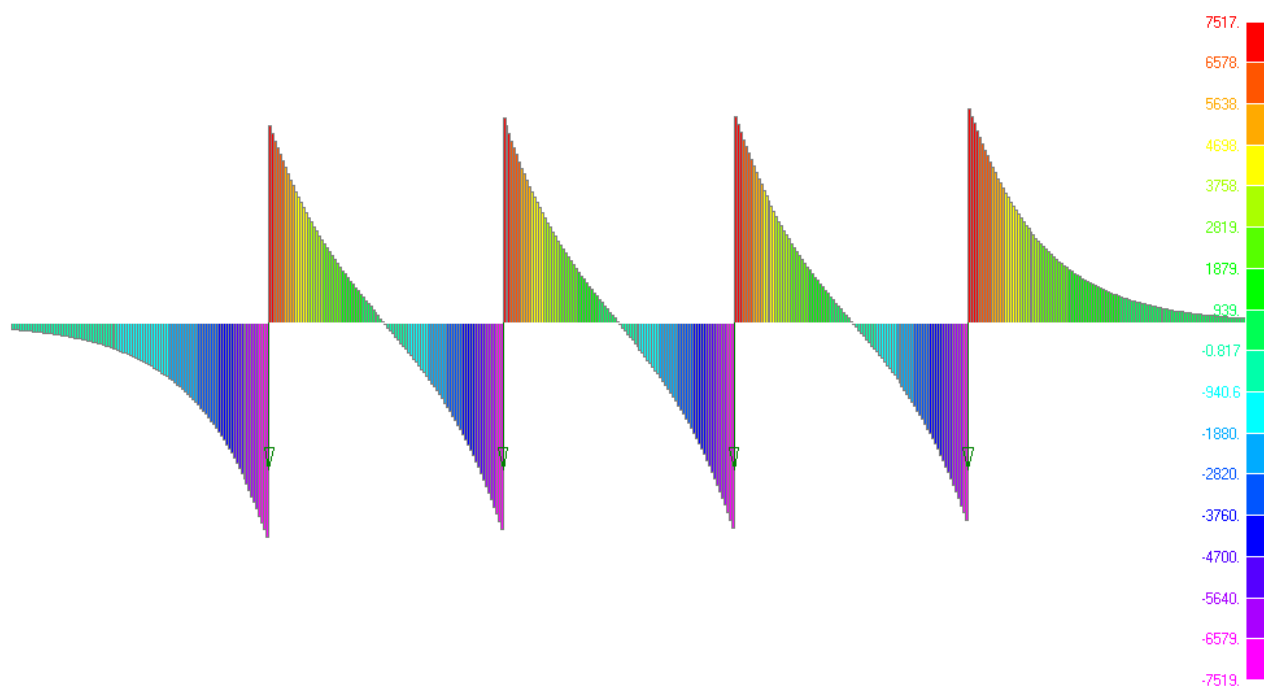


Рис. 3.22. Эпюра поперечных сил (H) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух транспортных средств, размещенных в середине пролета, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при $+57,2 \text{ } ^\circ C$

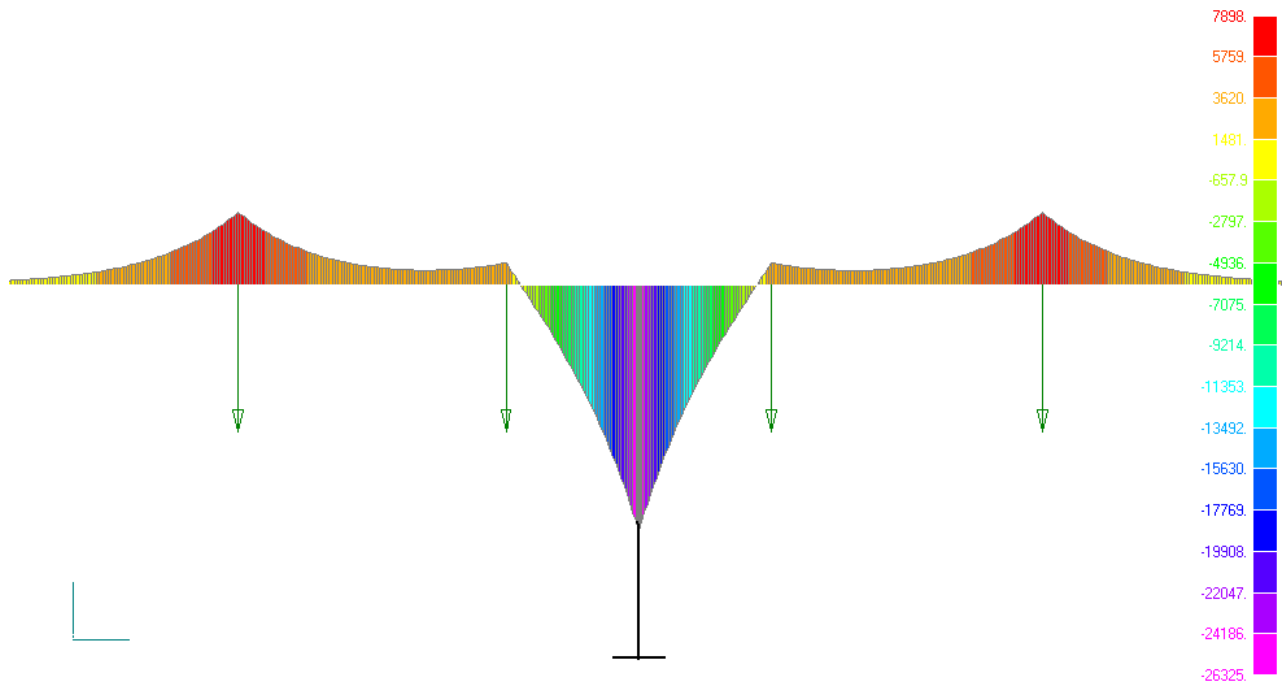


Рис. 3.23. Эпюра изгибающих моментов ($\text{H}\times\text{м}$) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и двух транспортных средств, размещенных симметрично на промежуточной опоре, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при $+57,2\text{ }^\circ\text{C}$

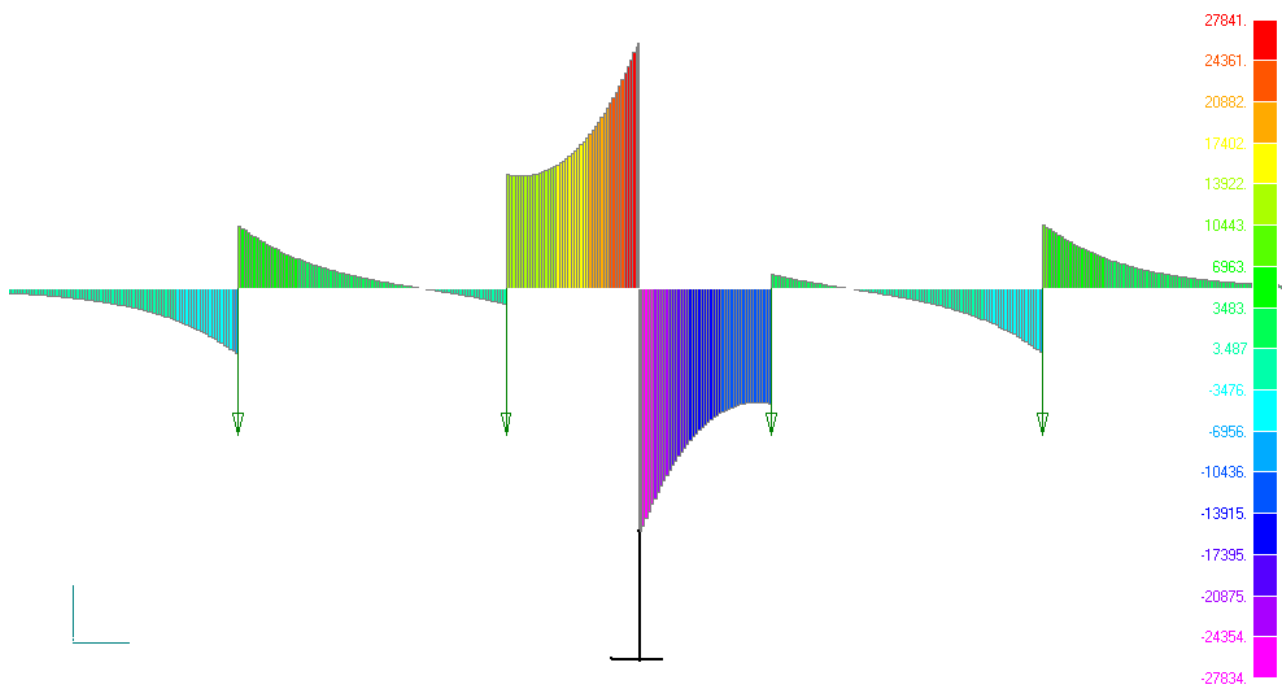


Рис. 3.24. Эпюра поперечных сил (H) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и двух транспортных средств, размещенных симметрично на промежуточной опоре, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при $+57,2\text{ }^\circ\text{C}$

**3.3. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил
в рельсе-струне от собственного веса путевой
структуры и одного транспортного средства
(для расчета выносливости рельса-струны)**

**3.3.1. Для жесткой заделки корпуса
рельса-струны на промежуточной опоре**

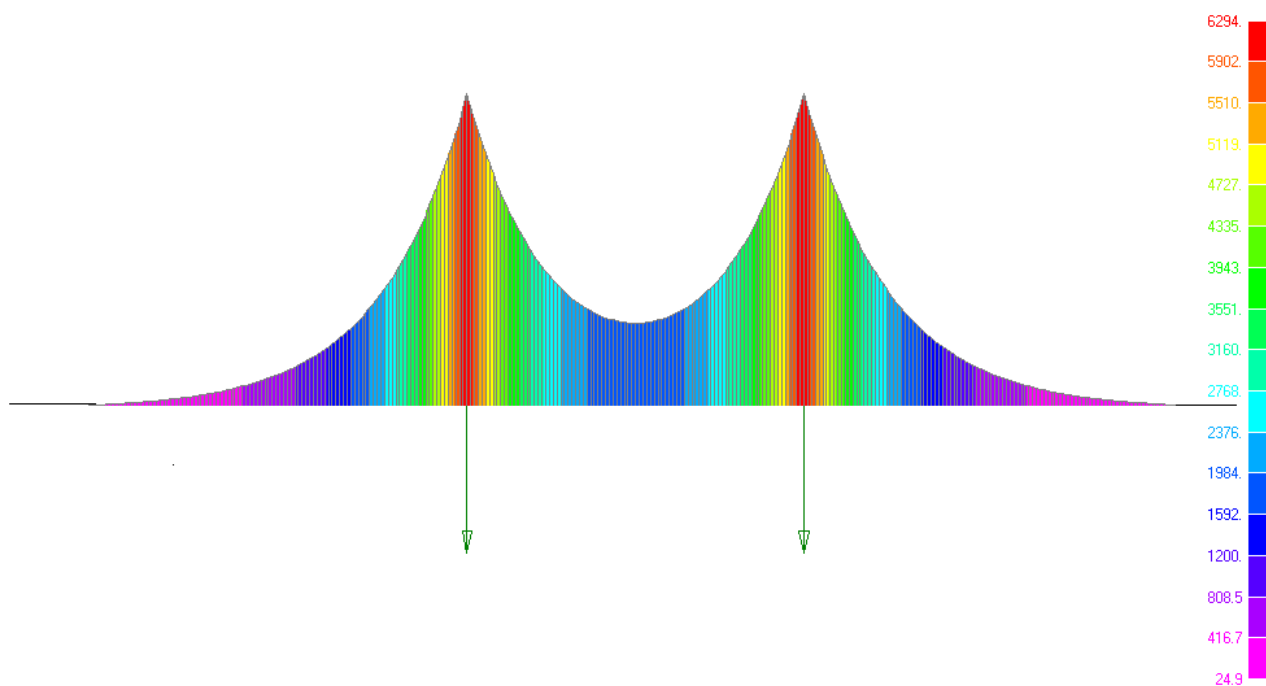


Рис. 3.25. Эпюра изгибающих моментов ($\text{H}\times\text{м}$) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и одного транспортного средства, размещенного в середине пролета, при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при $-40,8\text{ }^\circ\text{C}$

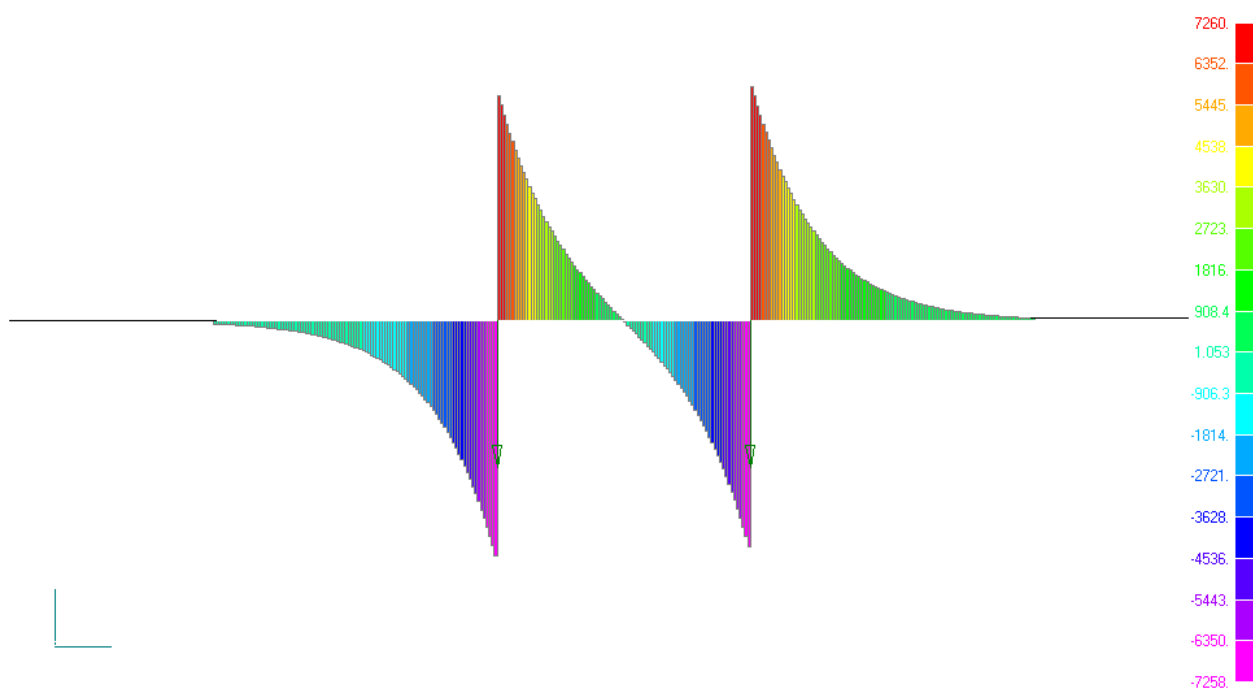


Рис. 3.26. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного транспортного средства, размещенного в середине пролета, при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при $-40,8\text{ }^\circ\text{C}$

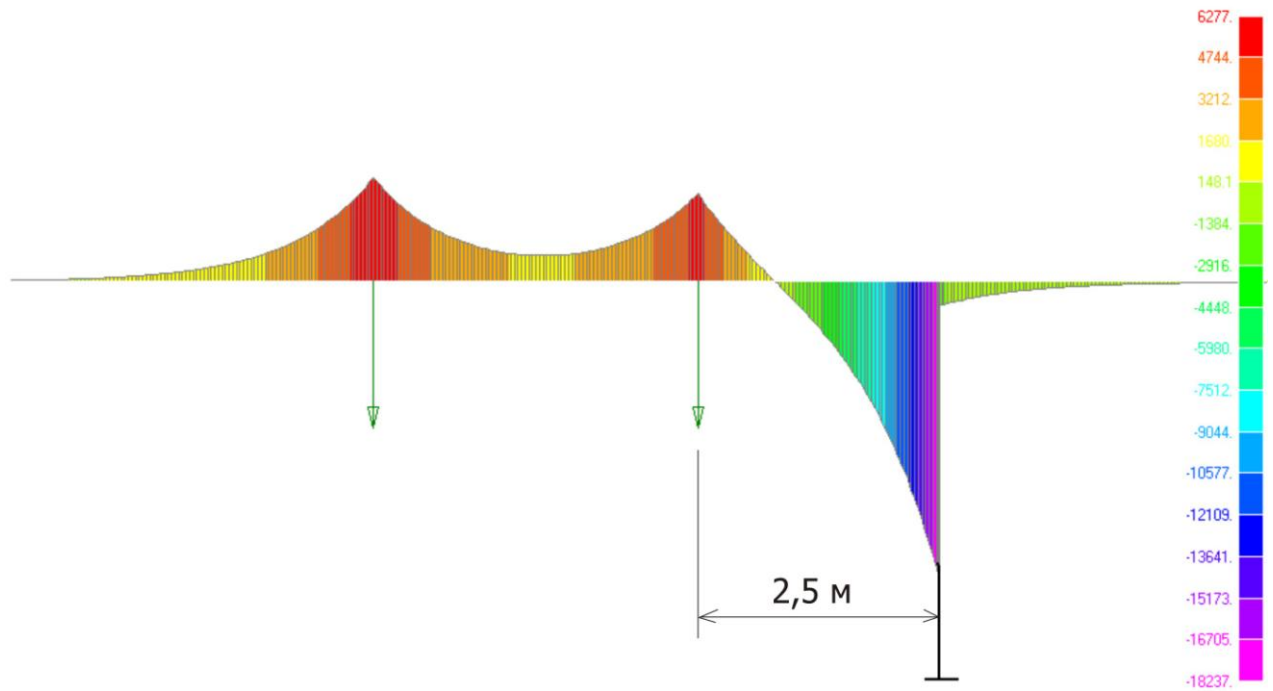


Рис. 3.27. Эпюра изгибающих моментов (Н×м) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и одного транспортного средства, размещенного на расстоянии 2,5 м от промежуточной опоры, при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$

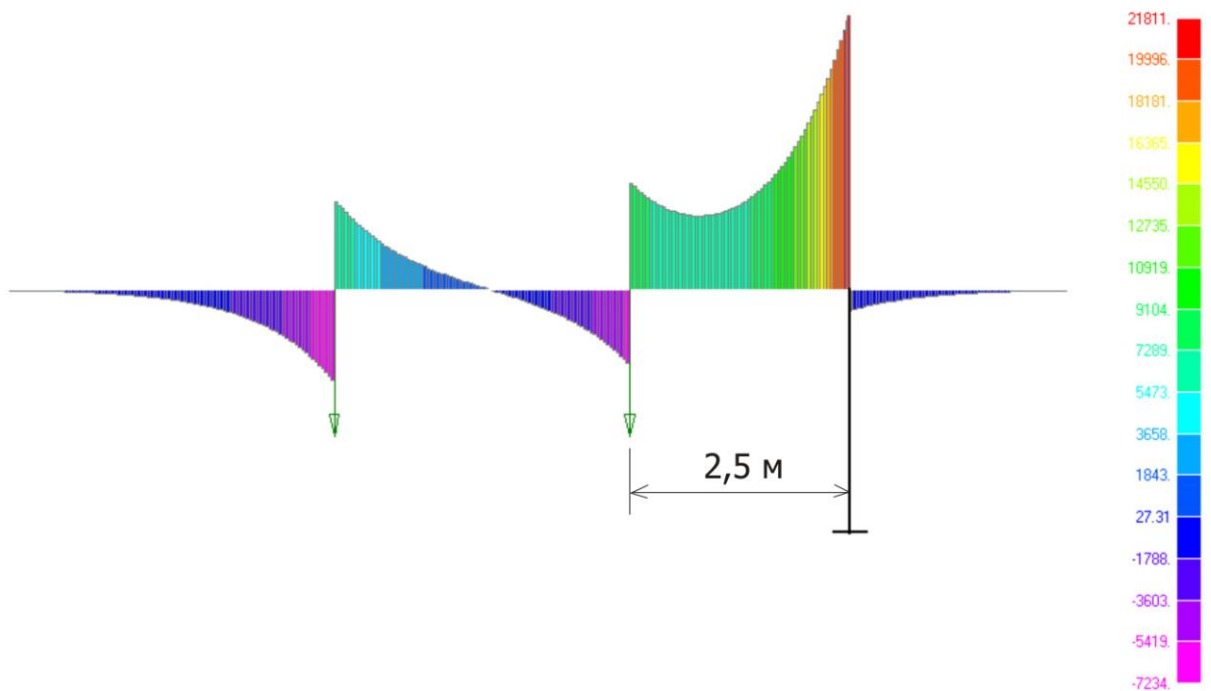


Рис. 3.28. Эпюра поперечных сил (Н) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и одного транспортного средства, размещенного на расстоянии 2,5 м от промежуточной опоры, при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$

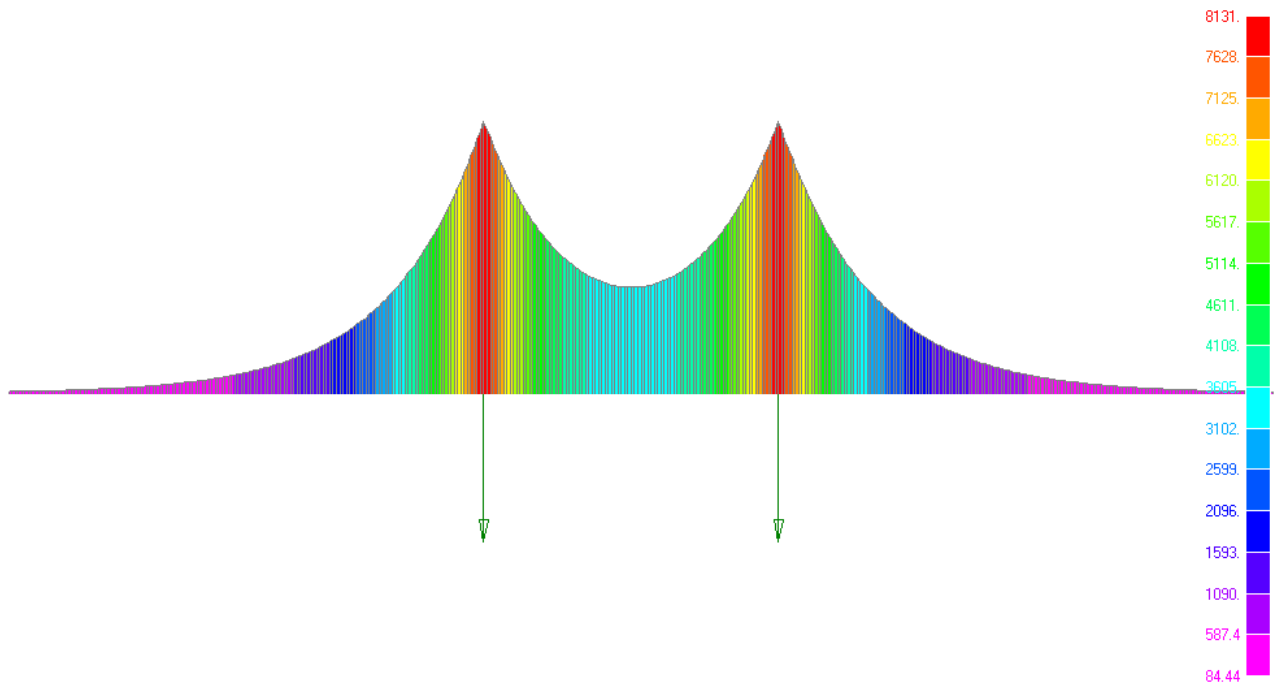


Рис. 3.29. Эпюра изгибающих моментов ($\text{H}\times\text{м}$) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и одного транспортного средства, размещенного в середине пролета, при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при $+57,2\text{ }^\circ\text{C}$

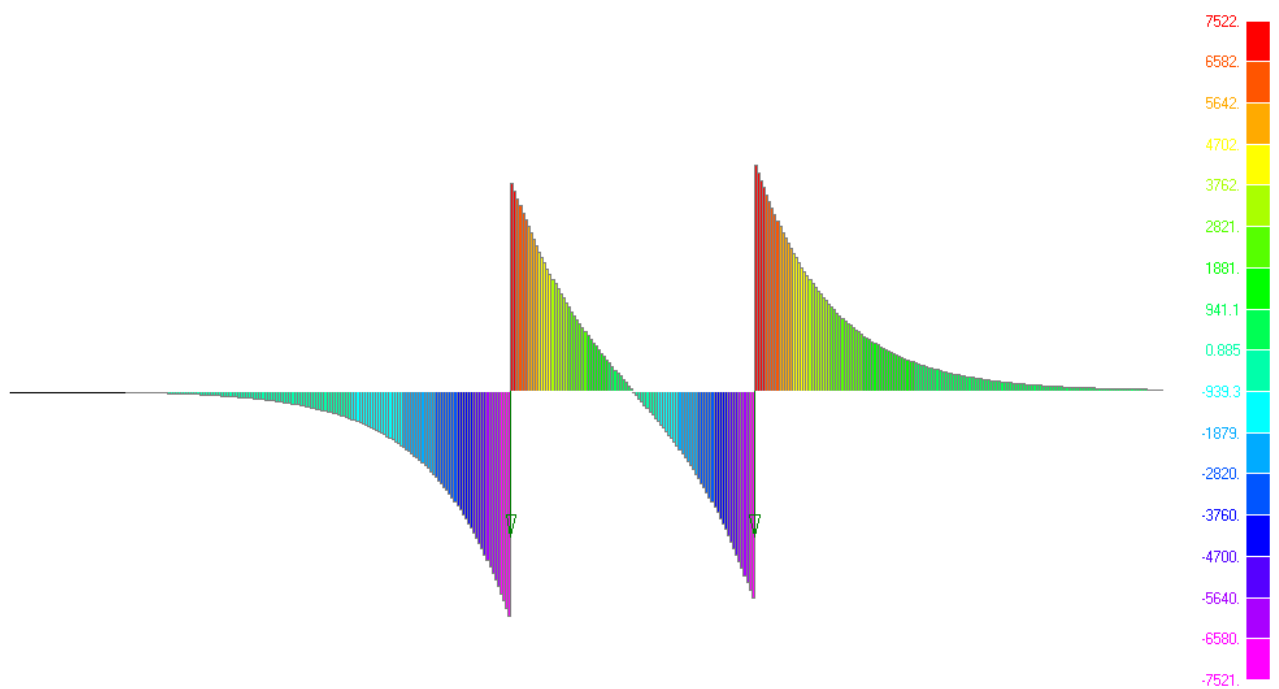


Рис. 3.30. Эпюра поперечных сил (H) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного транспортного средства, размещенного в середине пролета, при жесткой заделке корпуса рельса на промежуточной опоре и при $+57,2\text{ }^\circ\text{C}$

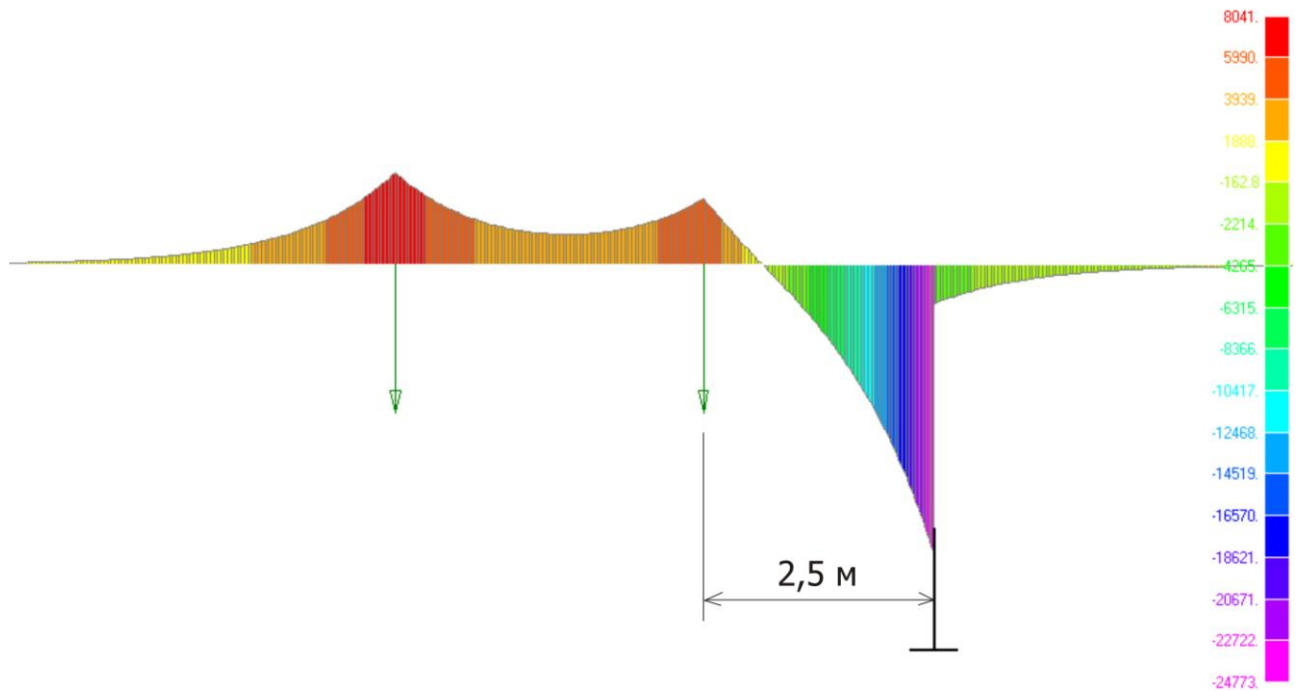


Рис. 3.31. Эпюра изгибающих моментов ($\text{H}\times\text{м}$) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и одного транспортного средства, размещенного на расстоянии 2,5 м от промежуточной опоры, при жесткой заделке корпуса рельса на опоре и при $+57,2\text{ }^\circ\text{C}$

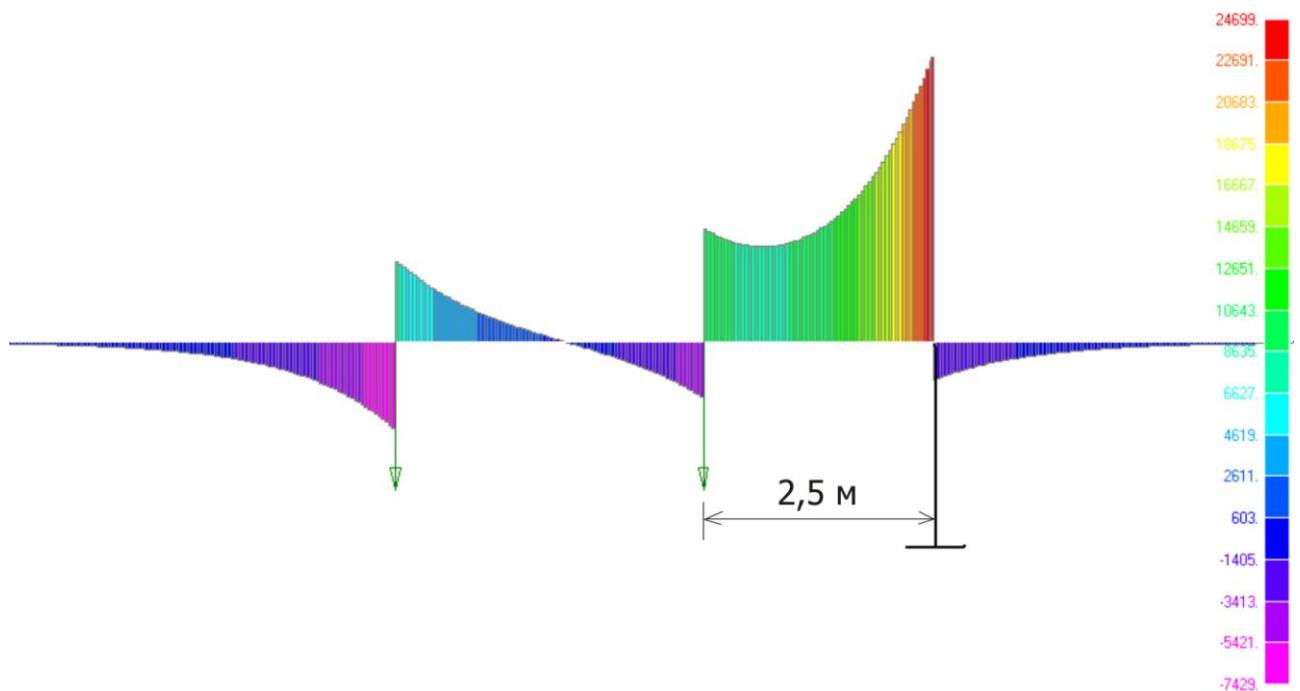


Рис. 3.32. Эпюра поперечных сил (H) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного транспортного средства, размещенного на расстоянии 2,5 м от промежуточной опоры, при жесткой заделке корпуса рельса на опоре и при $+57,2\text{ }^\circ\text{C}$

3.3.2. Для шарнирного закрепления корпуса рельса-струны на промежуточной опоре

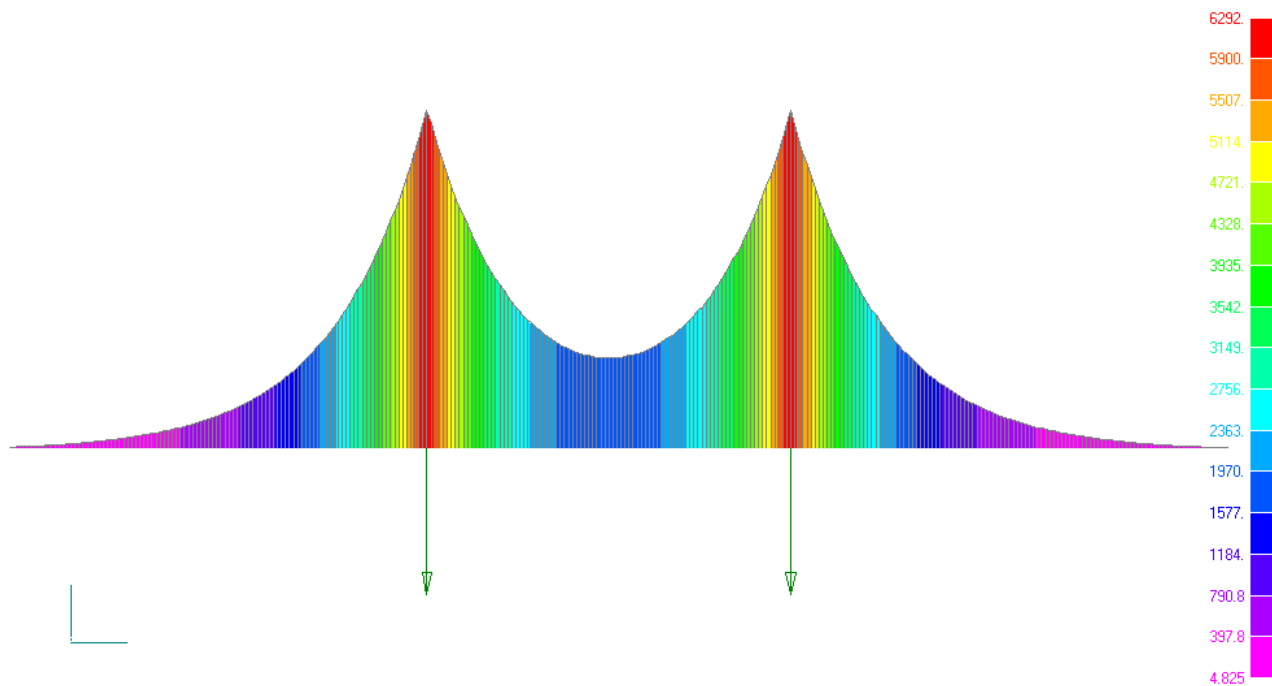


Рис. 3.33. Эпюра изгибающих моментов ($H \times m$) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и одного транспортного средства, размещенного в середине пролета, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при $-40,8^\circ C$

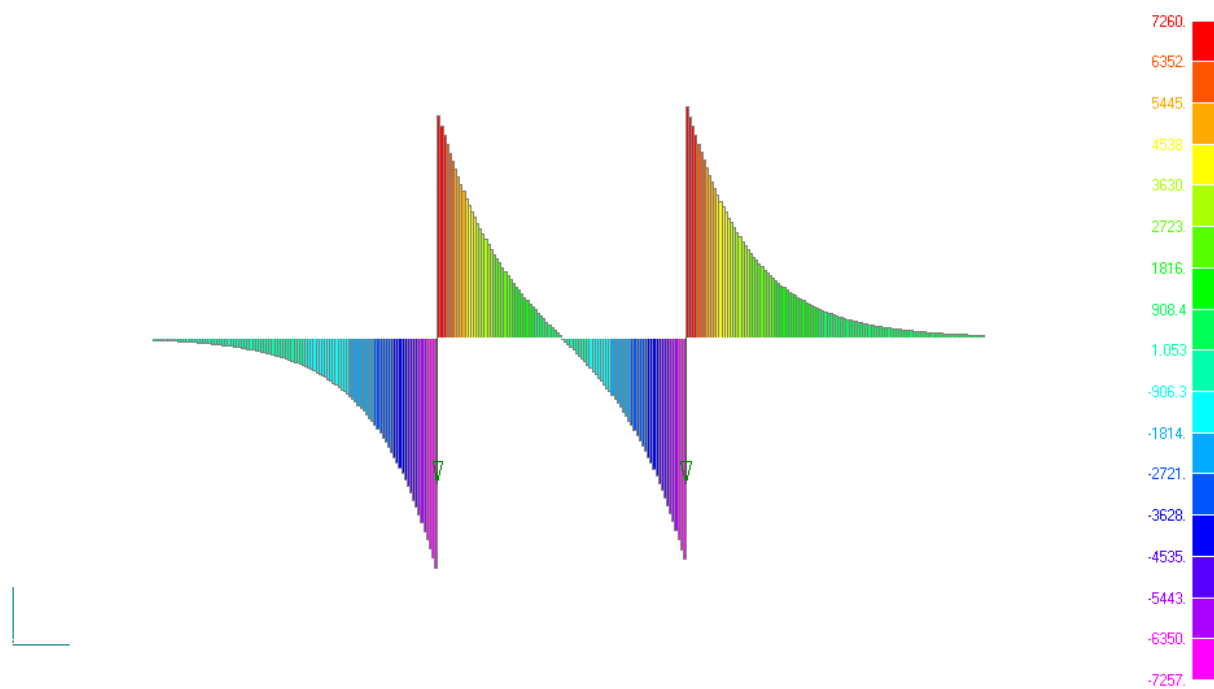


Рис. 3.34. Эпюра поперечных сил (H) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного транспортного средства, размещенного в середине пролета, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при $-40,8^\circ C$

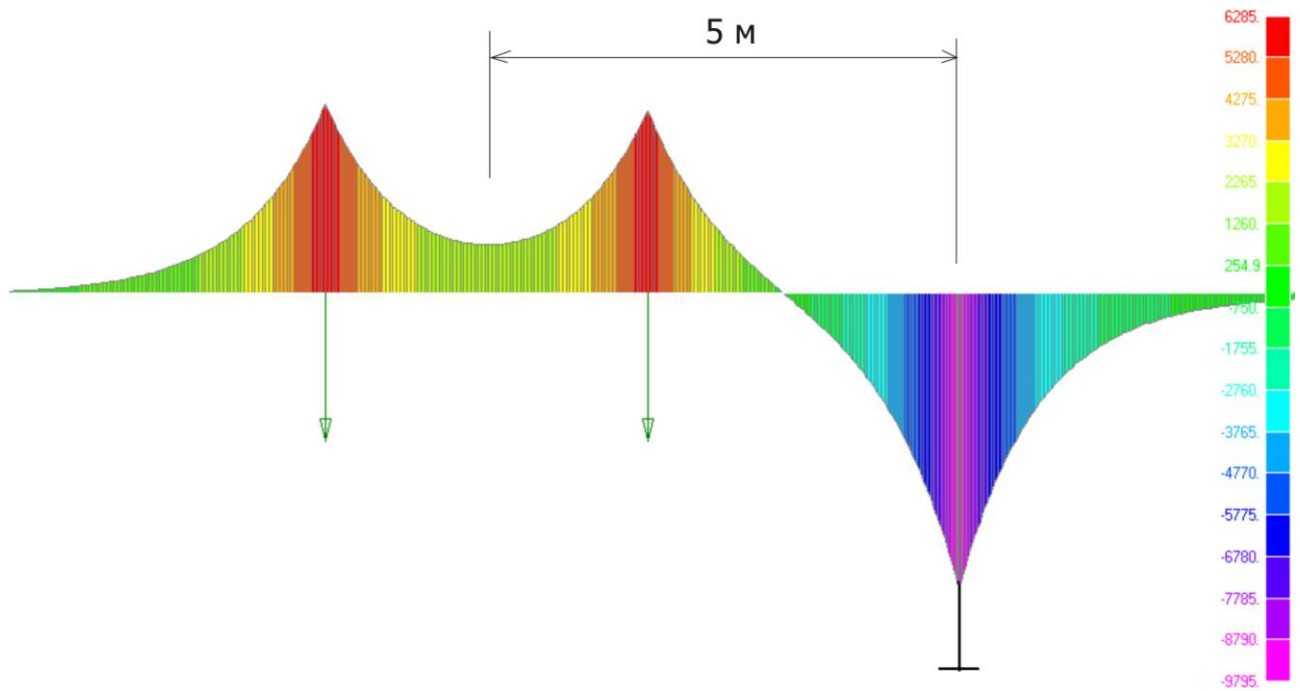


Рис. 3.35. Эпюра изгибающих моментов ($H \times m$) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и одного транспортного средства, размещенного на расстоянии 5 м от промежуточной опоры, при шарнирном закреплении корпуса рельса на опоре и при $-40,8^\circ C$

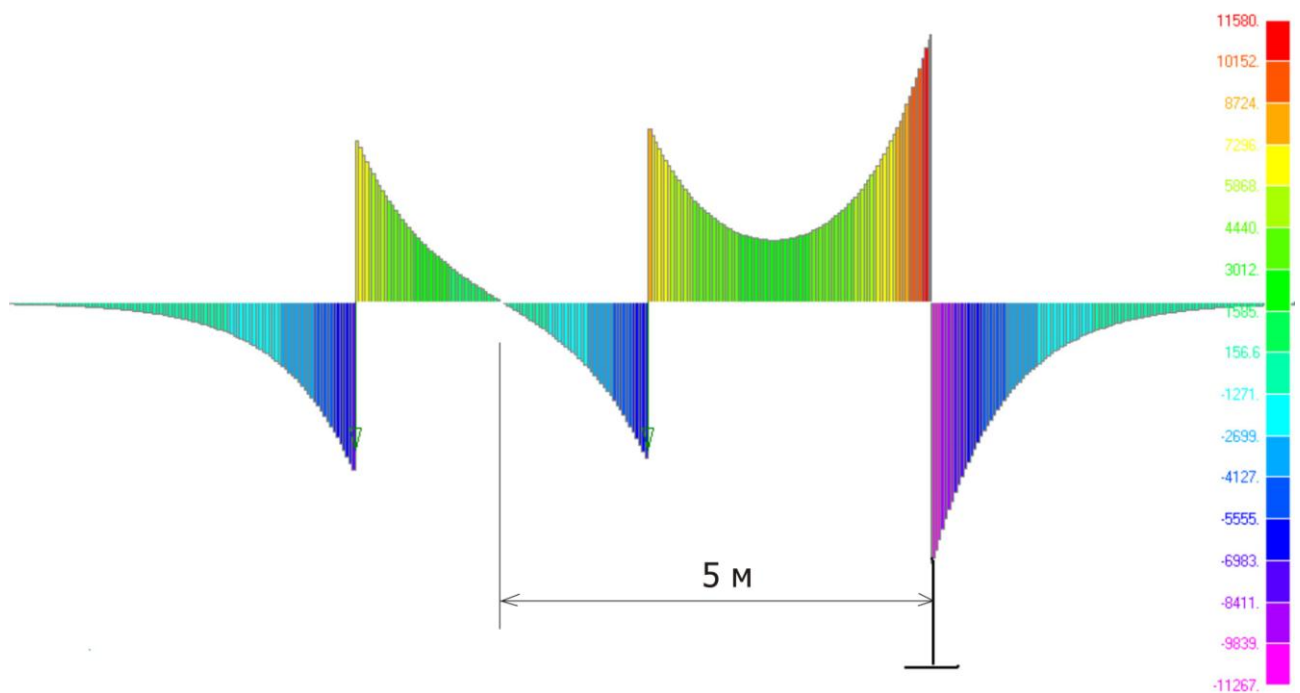


Рис. 3.36. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельсе от собственного веса рельса-струны и одного транспортного средства, размещенного на расстоянии 5 м от промежуточной опоры, при шарнирном закреплении рельса на опоре и при $-40,8^\circ C$

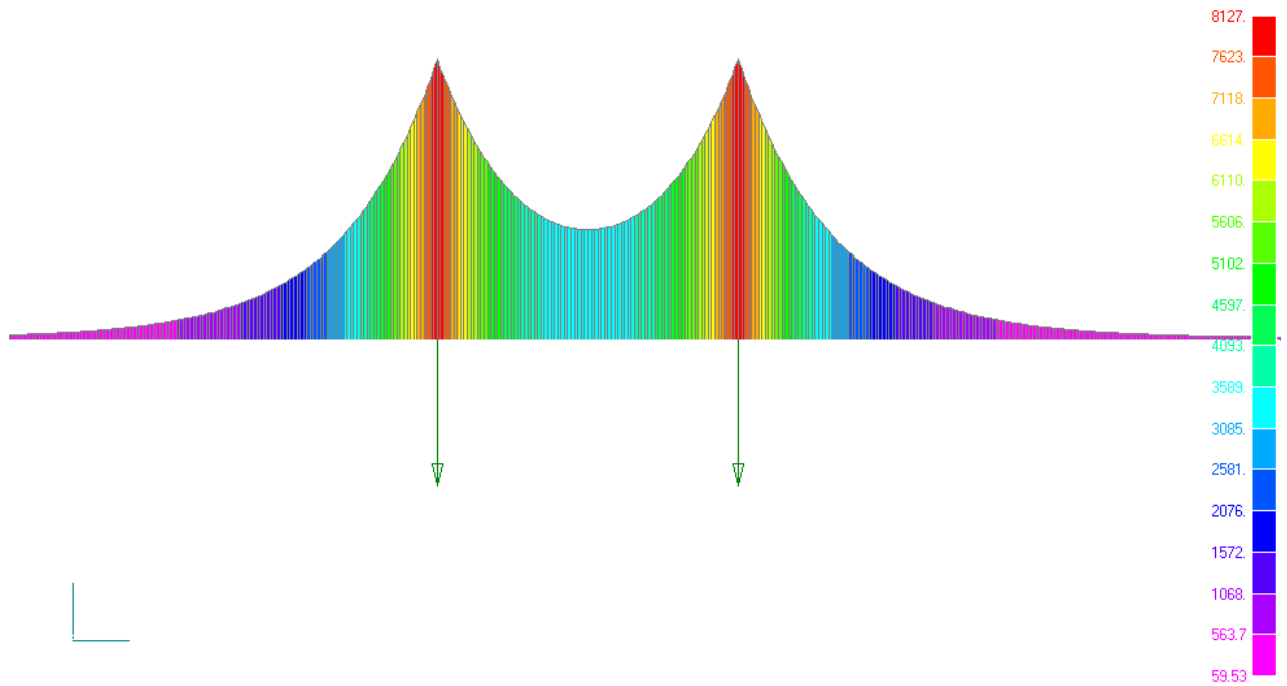


Рис. 3.37. Эпюра изгибающих моментов ($\text{H}\times\text{м}$) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и одного транспортного средства, размещенного в середине пролета, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при $+57,2\text{ }^\circ\text{C}$

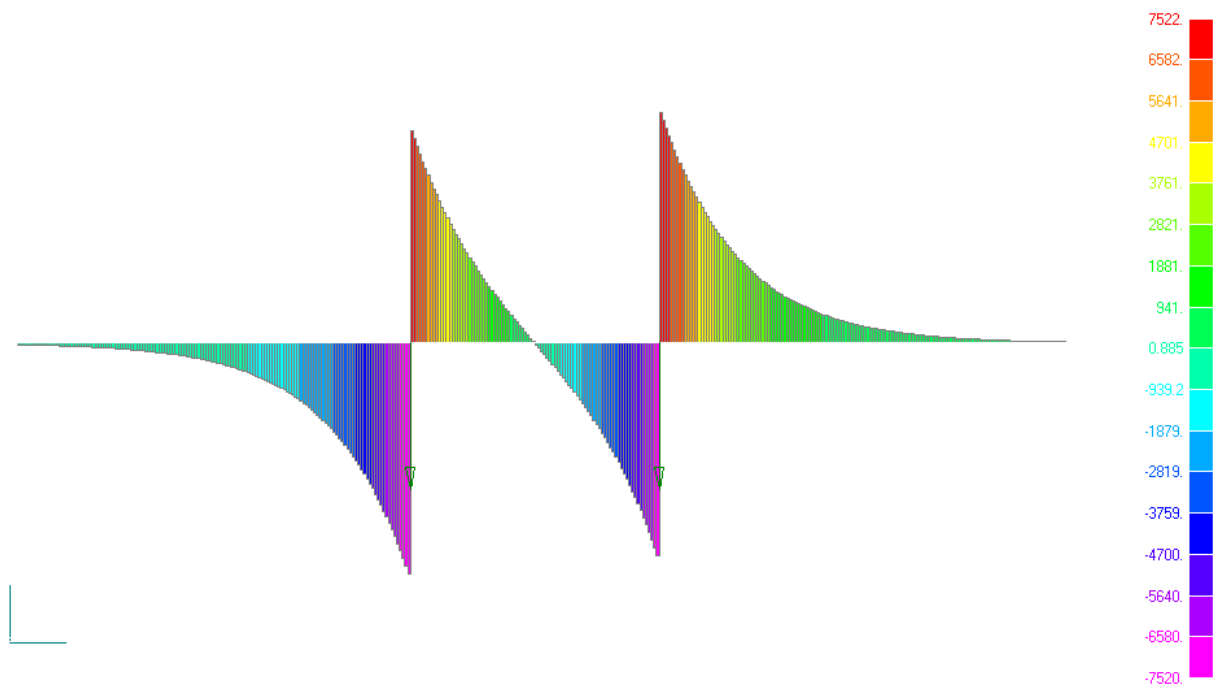


Рис. 3.38. Эпюра поперечных сил (Н) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного транспортного средства, размещенного в середине пролета, при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре и при $+57,2\text{ }^\circ\text{C}$

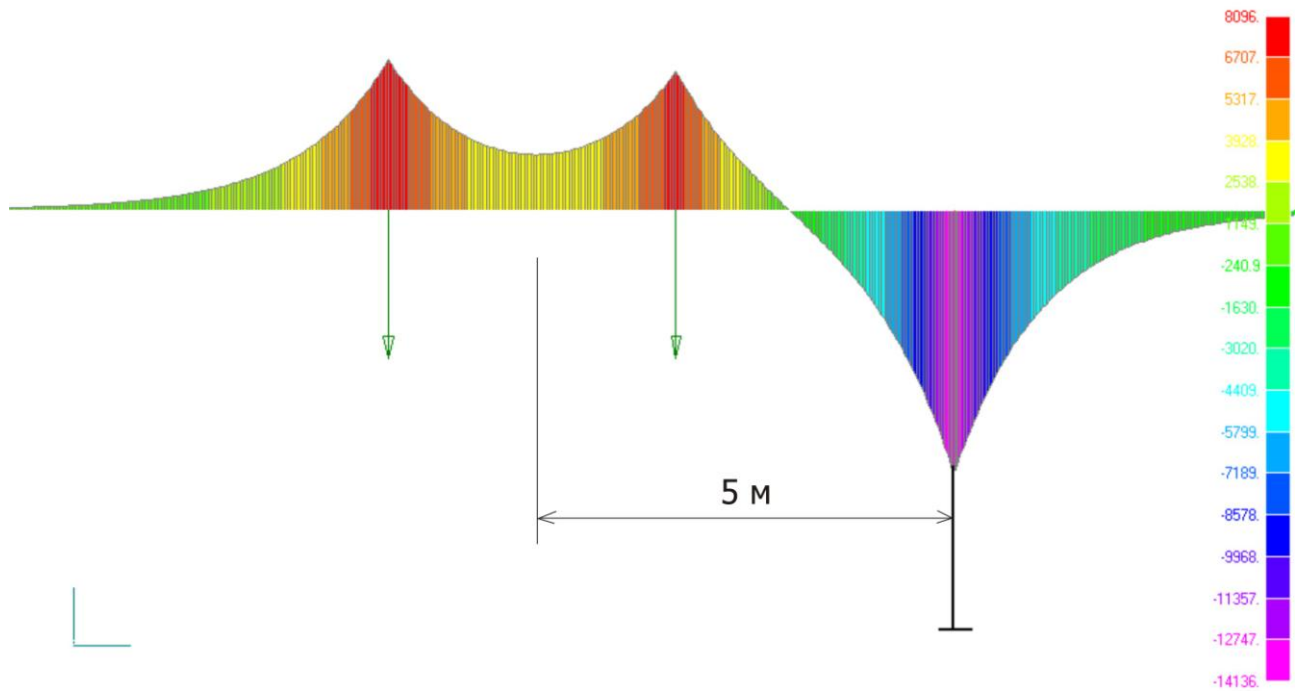


Рис. 3.39. Эпюра изгибающих моментов ($\text{H}\times\text{м}$) в рельсе-струне от собственного веса рельса-струны и одного транспортного средства, размещенного на расстоянии 5 м от промежуточной опоры, при шарнирном закреплении рельса на опоре и при $+57,2^\circ\text{C}$

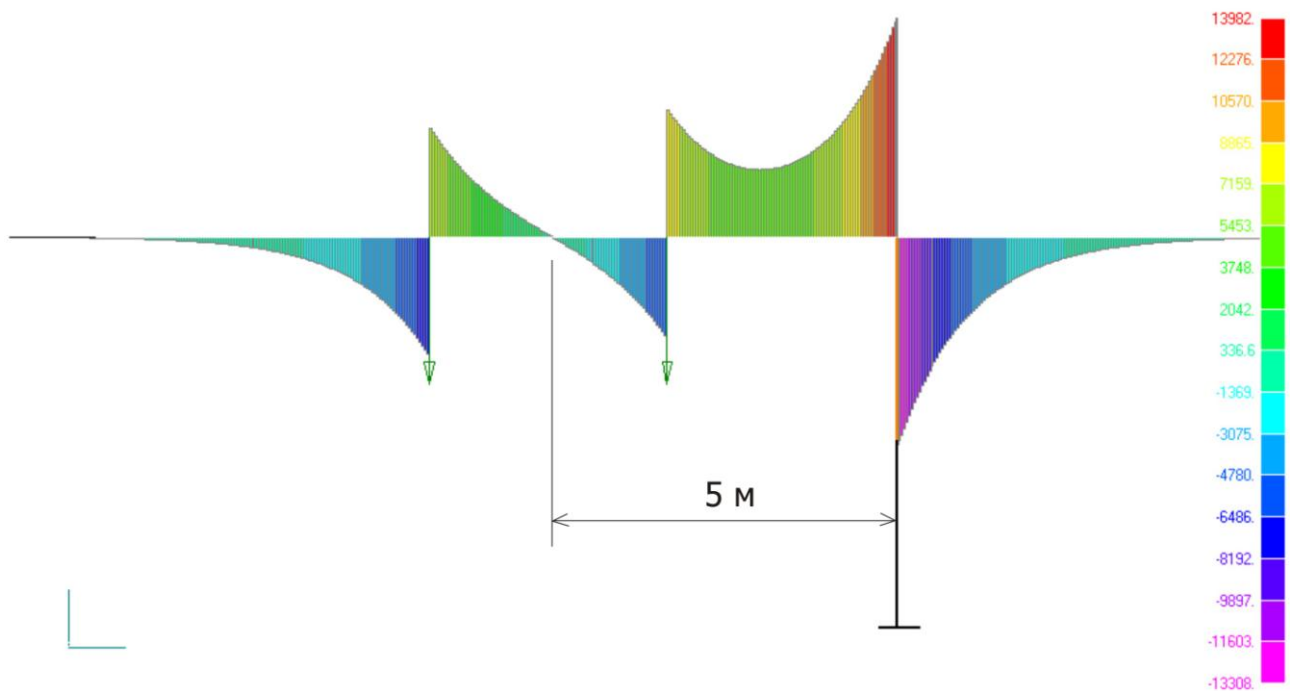


Рис. 3.40. Эпюра поперечных сил (H) в корпусе рельса от собственного веса рельса-струны и одного транспортного средства, размещенного на расстоянии 5 м от промежуточной опоры, при шарнирном закреплении рельса на опоре и при $+57,2^\circ\text{C}$

**Анализ наиболее опасных положений
транспортных средств на пролете из условия обеспечения
прочности рельса-струны на промежуточной опоре**

**4.1. Для жесткой заделки корпуса
рельса-струны на промежуточной опоре**

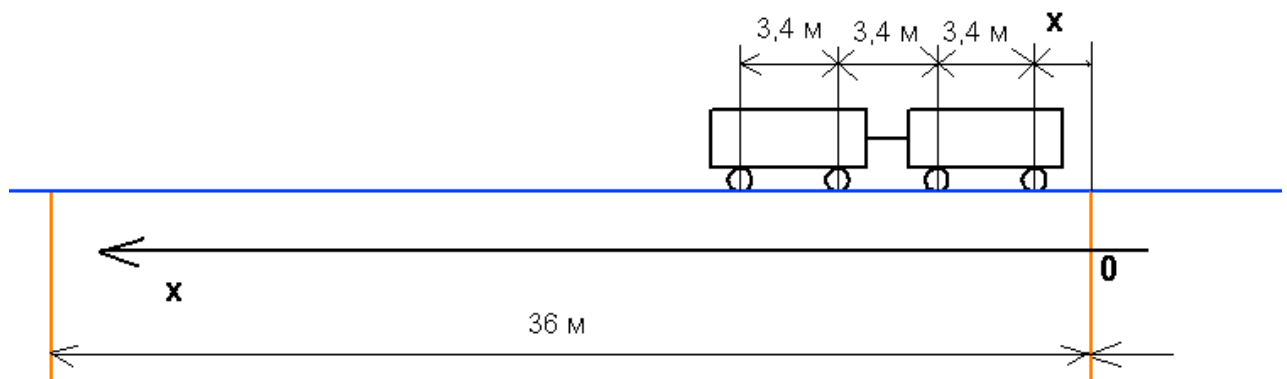


Рис. 4.1. Координаты расположения двух транспортных средств на пролете (для расчета на прочность рельса-струны при жесткой заделке рельса-струны на промежуточной опоре)

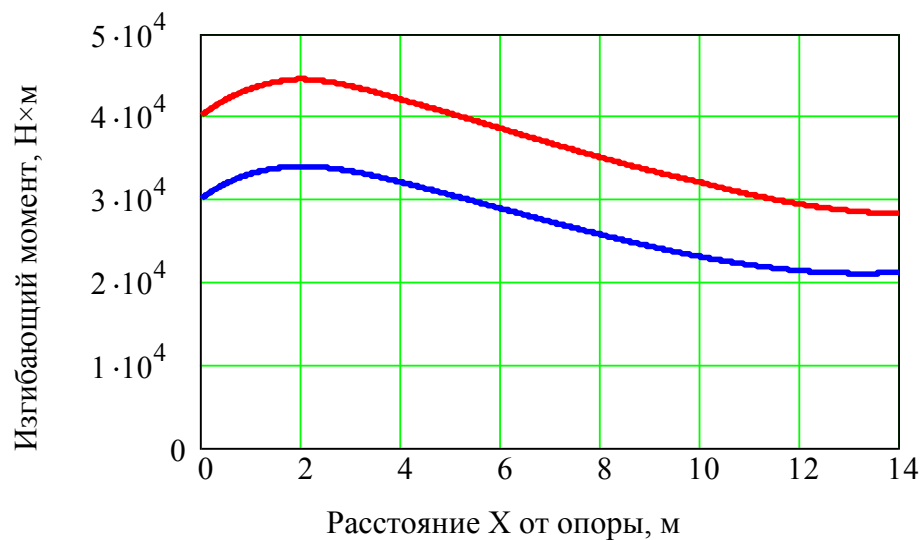


Рис. 4.2. Изменение величины изгибающего момента ($\text{Н}\cdot\text{м}$) в сечении рельса-струны на промежуточной опоре в зависимости от расстояния (метры) до опоры при движении по пролету двух транспортных средств (см. рис. 4.1) и жесткой заделке корпуса рельса на опоре:
 зимой: при $-40,8^\circ\text{C}$: -----
 летом: при $+57,2^\circ\text{C}$: -----

Выводы: при движении двух транспортных средств в сцепке по пролету с жесткой заделкой рельса-струны на промежуточной опоре, максимум изгибающего момента в рельсе-струне достигается при $X = 2$ м, т.е. при нахождении первого (или последнего по ходу движения) колеса в сцепке на расстоянии 2 м от опоры.

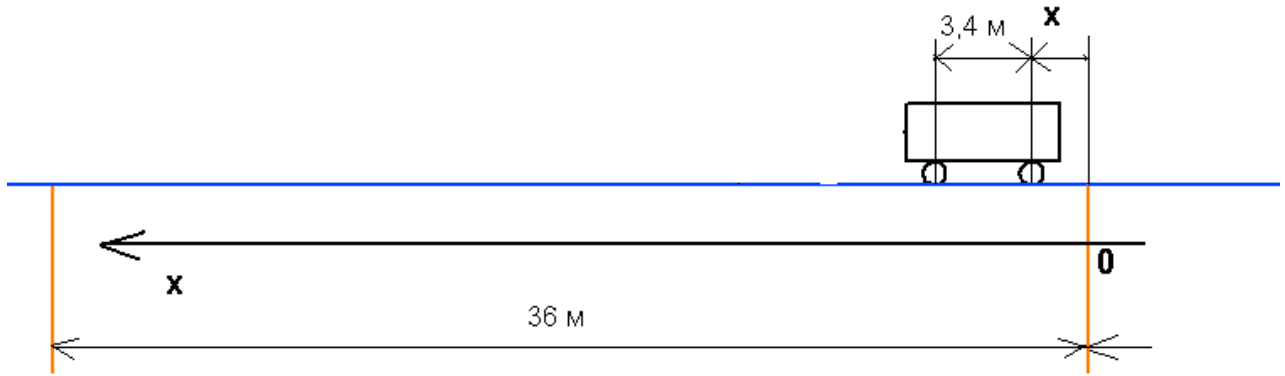


Рис. 4.3. Координаты расположения одного транспортного средства на пролете (для расчета на выносливость рельса-струны при жесткой заделке рельса-струны на промежуточной опоре)

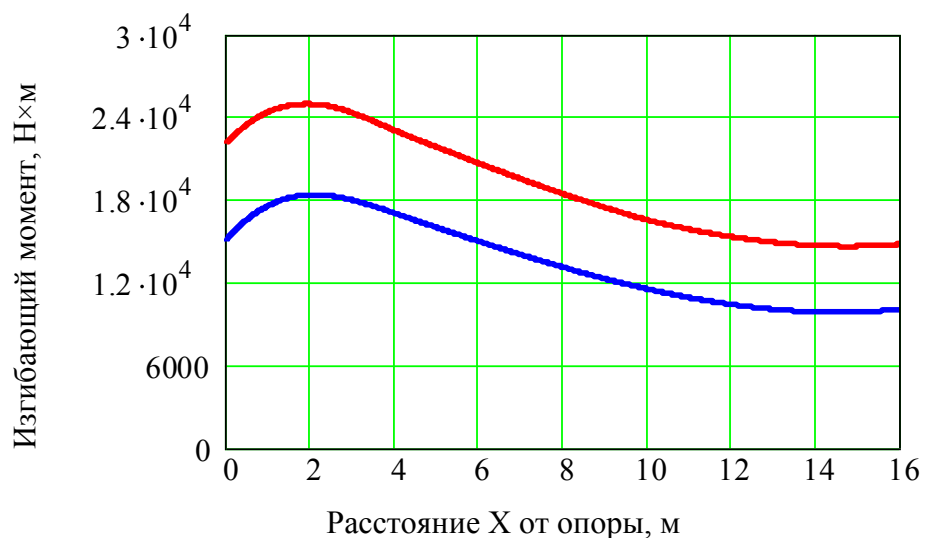


Рис. 4.4. Изменение величины изгибающего момента (Н×м) в сечении рельса-струны на промежуточной опоре в зависимости от расстояния (метры) до опоры при движении по пролету одного транспортного средства (см. рис. 4.3) и жесткой заделке корпуса рельса на опоре:

зимой: при $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$: -----
 летом: при $+57,2\text{ }^{\circ}\text{C}$: -----

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

**Анализ наиболее опасных положений
транспортных средств на пролете из условия обеспечения
прочности рельса-струны на промежуточной опоре**

**4.2. Для шарнирного закрепления корпуса
рельса на промежуточной опоре**

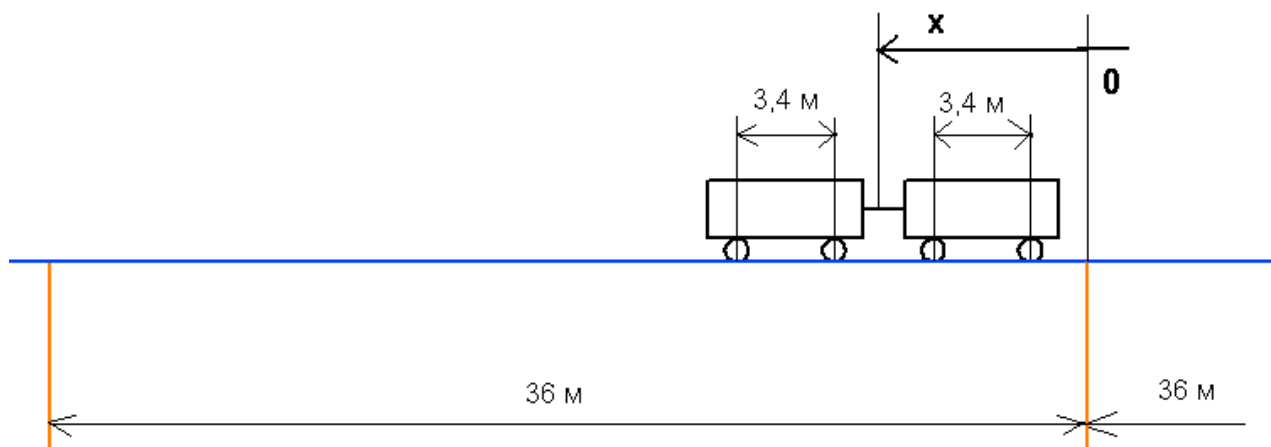


Рис. 4.5. Координаты расположения двух транспортных средств на пролете (для расчета на прочность рельса-струны при шарнирном закреплении корпуса рельса на промежуточной опоре)

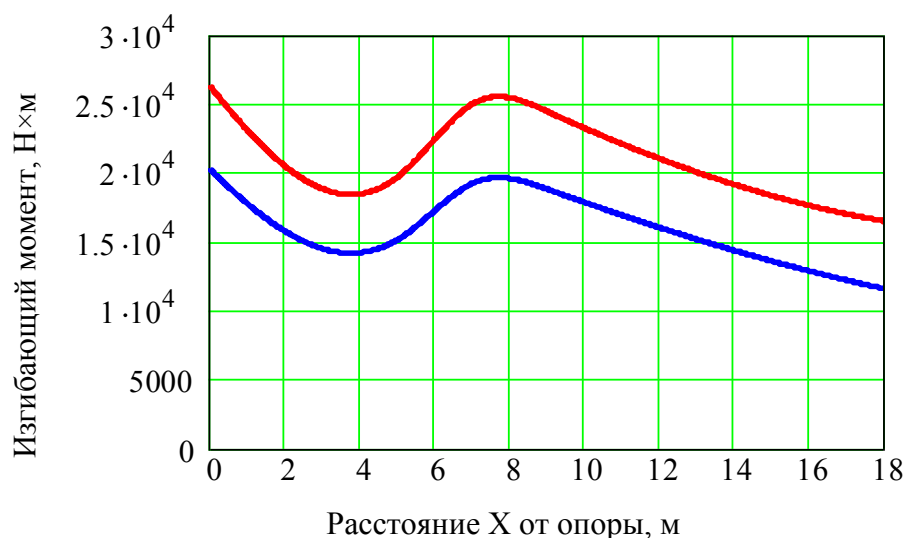


Рис. 4.6. Изменение величины изгибающего момента ($\text{Н}\times\text{м}$) в сечении рельса-струны над промежуточной опорой в зависимости от расстояния (метры) до опоры при движении по пролету двух транспортных средств (см. рис. 4.5) и шарнирном закреплении корпуса рельса на опоре:
 зимой: при $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$: -----
 летом: при $+57,2\text{ }^{\circ}\text{C}$: -----

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

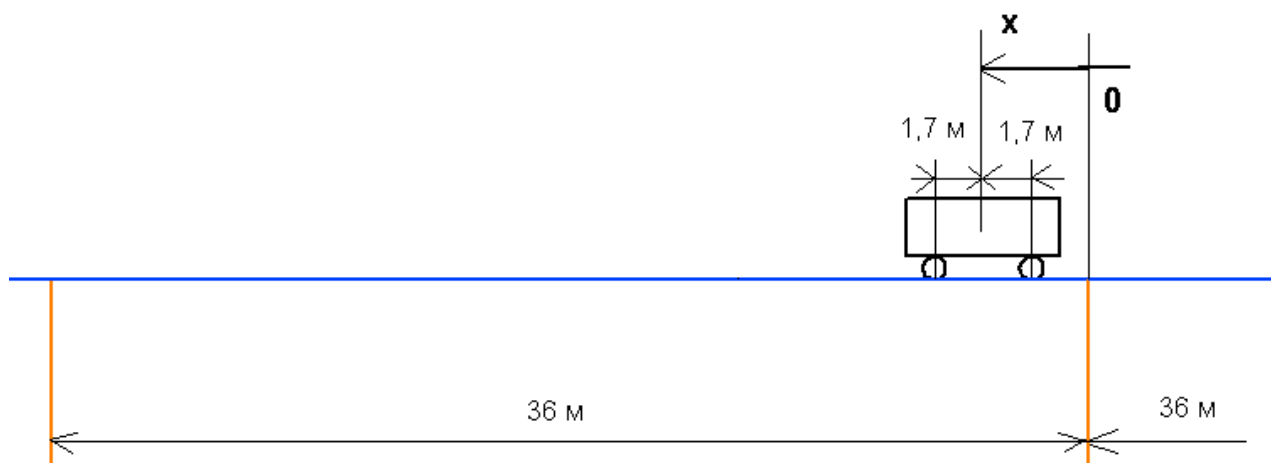


Рис. 4.7. Координаты расположения одного транспортного средства на пролете (для расчета на выносливость рельса-струны при шарнирном закреплении рельса-струны на промежуточной опоре)

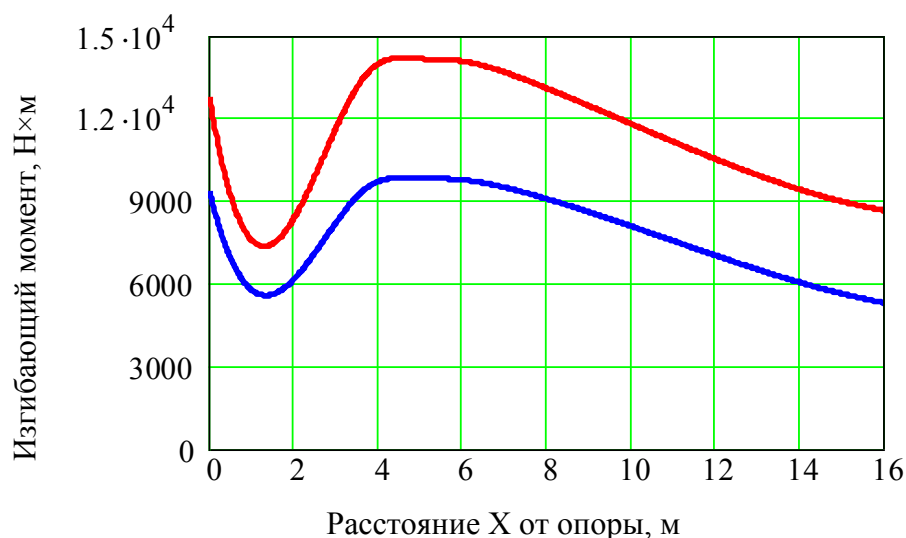


Рис. 4.8. Изменение величины изгибающего момента (Н×м) в сечении рельса-струны над промежуточной опорой в зависимости от расстояния (метры) до опоры при движении по пролету одного транспортного средства (см. рис. 4.7) и шарнирном закреплении корпуса рельса на опоре:

зимой: при $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$: - - - - -
 летом: при $+57,2\text{ }^{\circ}\text{C}$: - - - - -

Выводы: при движении одного транспортного средства по пролету с шарнирным закреплением рельса-струны на промежуточной опоре, максимум изгибающего момента в рельсе-струне достигается при $X = 5\text{ м}$, считая от его центра тяжести, или на расстоянии $3,3\text{ м}$ от опоры до ближнего колеса модуля.

**Результаты расчетов прочности и выносливости
головки рельса, корпуса рельса и струны**

Таблица 5.1

Расчет прочности струн от воздействия двух модулей весом 6 тс каждый
(сцепка модулей — в середине пролета)

№	Описание расчетного элемента	Напряжения в МПа												
		Предвари- тельное натяжение (при +20°C)	От собственного веса (относительно +20°C)		От изменения температуры (относительно +20°C)		От временной нагрузки				Суммарные			
			Зима -40,8°C	Лето +57,2°C	Зима -40,8°C	Лето +57,2°C	Зима -40,8°C		Лето +57,2°C		Зима -40,8°C		Лето +57,2°C	
							max	min	max	min	max	min	max	min
1	Струна	1132	0,6	0,5	129	-79	1,28	0	2,6	0	1262,22	1261,05	1055,75	1053,16

Таблица 5.2.1

Расчет прочности головки рельса и корпуса рельса от воздействия двух модулей весом 6 тс каждый
(крепление рельса к опоре — жесткая заделка)
Сцепка модулей — в середине пролета, напряжения — под колесом

№	Описание расчетной точки	Напряжения в МПа												
		Предварительное натяжение (при +20°C)	От собственного веса (относительно +20°C)		От изменения температуры (относительно +20°C)		От временной нагрузки				Суммарные			
			Зима -40,8°C	Лето +57,2°C	Зима -40,8°C	Лето +57,2°C	Зима -40,8°C		Лето +57,2°C		Зима -40,8°C		Лето +57,2°C	
							max	min	max	min	max	min	max	min
1	Верх головки рельса	70	0,6	-0,2	150	-92	0	-32	0	-40,5	220,6	188,6	-22,2	-62,7
2	Низ корпуса рельса	70	-0,1	0,4	150	-92	55,1	0	72,7	0	275	219,9	51,1	-21,6

Таблица 5.2.2

Расчет прочности головки рельса и корпуса рельса от воздействия двух модулей весом 6 тс каждый
(крепление рельса к опоре — жесткая заделка)
Сцепка модулей — на расстоянии 2 м от промежуточной опоры, напряжения — на опоре

№	Описание расчетной точки	Напряжения в МПа												
		Предварительное натяжение (при +20°C)	От собственного веса (относительно +20°C)		От изменения температуры (относительно +20°C)		От временной нагрузки				Суммарные			
			Зима -40,8°C	Лето +57,2°C	Зима -40,8°C	Лето +57,2°C	Зима -40,8°C		Лето +57,2°C		Зима -40,8°C		Лето +57,2°C	
							max	min	max	min	max	min	max	min
1	Верх головки рельса	70	-4,7	3,8	150	-92	171,4	0	215,1	0	386,7	215,3	196,9	-18,2
2	Низ корпуса рельса	70	9	-6,5	150	-92	0	-299,1	0	-374,1	229	-70,1	-28,5	-402,6

Таблица 5.3.1

Расчет прочности головки рельса и корпуса рельса от воздействия двух модулей весом 6 тс каждый
(крепление рельса к опоре — шарнирное закрепление)
Сцепка модулей — в середине пролета, напряжения — под колесом

№	Описание расчетной точки	Напряжения в МПа												
		Предварительное натяжение (при +20°C)	От собственного веса (относительно +20°C)		От изменения температуры (относительно +20°C)		От временной нагрузки				Суммарные			
			Зима -40,8°C	Лето +57,2°C	Зима -40,8°C	Лето +57,2°C	Зима -40,8°C		Лето +57,2°C		Зима -40,8°C		Лето +57,2°C	
							max	min	max	min	max	min	max	min
1	Верх головки рельса	70	0,6	-0,2	150	-92	0	-31	0	-39,1	220,6	189,6	-22,2	-61,3
2	Низ корпуса рельса	70	-0,1	0,5	150	-92	56,1	0	73,8	0	276	219,9	52,3	-21,5

Таблица 5.3.2

Расчет прочности головки рельса и корпуса рельса от воздействия двух модулей весом 6 тс каждый
(крепление рельса к опоре — шарнирное закрепление)
Сцепка модулей — симметрично над промежуточной опорой, напряжения — над опорой

№	Описание расчетной точки	Напряжения в МПа												
		Предварительное натяжение (при +20°C)	От собственного веса (относительно +20°C)		От изменения температуры (относительно +20°C)		От временной нагрузки				Суммарные			
			Зима -40,8°C	Лето +57,2°C	Зима -40,8°C	Лето +57,2°C	Зима -40,8°C		Лето +57,2°C		Зима -40,8°C		Лето +57,2°C	
							max	min	max	min	max	min	max	min
1	Верх головки рельса	70	-4,7	3,8	150	-92	104,7	0	126,2	0	320	215,3	108	-18,2
2	Низ корпуса рельса	70	9	-6,5	150	-92	0	-181,7	0	-218,5	229	47,3	-28,5	-247

Таблица 5.4.1

Расчет выносливости головки рельса и корпуса рельса от циклического воздействия модуля весом 6 тс
(крепление рельса к опоре — жесткая заделка)
Модуль — в середине пролета, напряжения — под колесом

№	Описание расчетной точки	Напряжения в МПа												
		Предварительное натяжение (при +20°C)	От собственного веса (относительно +20°C)		От изменения температуры (относительно +20°C)		От временной нагрузки				Суммарные			
			Зима -40,8°C	Лето +57,2°C	Зима -40,8°C	Лето +57,2°C	Зима -40,8°C		Лето +57,2°C		Зима -40,8°C		Лето +57,2°C	
							max	min	max	min	max	min	max	min
1	Верх головки рельса	70	0,6	-0,2	150	-92	0	-31,6	0	-39,8	220,6	189	-22,2	-62
2	Низ корпуса рельса	70	-0,1	0,4	150	-92	54	0	69,2	0	273,9	219,9	47,6	-21,6

Таблица 5.4.2

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

№	Описание расчетной точки	Напряжения в МПа												
		Предварительное натяжение (при +20°C)	От собственного веса (относительно +20°C)		От изменения температуры (относительно +20°C)		От временной нагрузки				Суммарные			
			Зима -40,8°C	Лето +57,2°C	Зима -40,8°C	Лето +57,2°C	Зима -40,8°C		Лето +57,2°C		Зима -40,8°C		Лето +57,2°C	
							max	min	max	min	max	min	max	min
1	Верх головки рельса	70	-4,7	3,8	150	-92	94,5	0	117,9	0	309,8	215,3	99,7	-18,2
2	Низ корпуса рельса	70	9	-6,5	150	-92	0	-165,2	0	-205,9	229	63,8	-28,5	-234,4

Таблица 5.5.1

Расчет выносливости головки рельса и корпуса рельса от циклического воздействия модуля весом 6 тс
(крепление рельса к опоре — шарнирное закрепление)
Модуль — в середине пролета, напряжения — под колесом

№	Описание расчетной точки	Напряжения в МПа												
		Предварительное натяжение (при +20°C)	От собственного веса (относительно +20°C)		От изменения температуры (относительно +20°C)		От временной нагрузки				Суммарные			
			Зима -40,8°C	Лето +57,2°C	Зима -40,8°C	Лето +57,2°C	Зима -40,8°C		Лето +57,2°C		Зима -40,8°C		Лето +57,2°C	
							max	min	max	min	max	min	max	min
1	Верх головки рельса	70	0,6	-0,2	150	-92	0	-31,1	0	-39,2	220,6	189,5	-22,2	-61,4
2	Низ корпуса рельса	70	-0,1	0,4	150	-92	54,5	0	69,8	0	274,4	219,9	48,2	-21,6

Таблица 5.5.2

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

№	Описание расчетной точки	Напряжения в МПа												
		Предварительное натяжение (при +20°C)	От собственного веса (относительно +20°C)		От изменения температуры (относительно +20°C)		От временной нагрузки				Суммарные			
			Зима -40,8°C	Лето +57,2°C	Зима -40,8°C	Лето +57,2°C	Зима -40,8°C		Лето +57,2°C		Зима -40,8°C		Лето +57,2°C	
							max	min	max	min	max	min	max	min
1	Верх головки рельса	70	-4,7	3,8	150	-92	53,4	0	66,2	0	268,7	215,3	48	-18,2
2	Низ корпуса рельса	70	9	-6,5	150	-92	0	-92,4	0	-114,2	229	136,6	-28,5	-142,7