

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

УДК [UDC] 699.852

DOI 10.17816/transsyst20228345-62

© А.Э. Юницкий, А.С. Хлебус, М.И. Цырлин

ЗАО «Струнные технологии»

(Минск, Республика Беларусь)

## ОЦЕНКА ЖЕСТКОСТИ ГИБКОГО РЕЛЬСА И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЛЬСО-СТРУННОЙ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРЫ В ЦЕНТРЕ uSky В ШАРДЖЕ (ОАЭ)

**Обоснование:** В работе дано описание устройства рельсо-струнной путевой структуры и струнного рельса; представлен тестовый участок путевой структуры с гибким рельсом в Центре uSky Transport в Шардже (ОАЭ).

**Цель:** Расчет жесткости гибкого рельса при действии подвижной нагрузки и ее зависимости от температурного воздействия; определение усилий в элементах гибкого рельса, размах напряжений и долговечность гибкого рельса от действия циклической транспортной нагрузки юникар-Т (тропический).

**Методы:** Расчет производился при помощи программного комплекса конечно-элементного анализа ANSYS.

**Результаты:** Анализ результатов расчета показал высокую эффективность и надежность предложенного транспортного решения, учитывая соотношение материалоемкости струнного рельса к несущей способности путевой структуры.

**Ключевые слова:** рельсо-струнная путевая структура, uST, uSky, юникар тропический, струнный рельс, жесткость гибкого рельса, напряженно-деформированное состояние рельсо-струнной путевой структуры.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© A.E. Unitsky, A.S. Khlebus, M.I. Tsyrlin

Unitsky String Technologies, Inc.

(Minsk, Republic of Belarus)

## EVALUATION OF FLEXIBLE RAIL RIGIDITY AND STRESS-STRAIN STATE OF ELEMENTS OF STRING RAIL TRACK STRUCTURE AT THE uSky CENTER IN SHARJAH (UAE)

**Annotation:** The study describes the arrangement of the string rail track structure and string rail; a test section of the track structure with flexible rail at the uSky Transport Center in Sharjah (UAE) is presented.

**Aim:** analysis of rigidity of flexible rail under action of transport load and its dependence on temperature impact, as well as calculation of forces in elements of flexible rail are performed; the stress range and durability of the flexible rail under cyclic transport load from Unicar-T (tropical) are determined.

**Methods:** The calculation was made using the ANSYS finite element analysis software package.

**Results:** Analysis of the calculation results showed high efficiency and reliability of the proposed transport solution, taking into account the ratio of the material intensity of the string rail to the bearing capacity of the track structure.

**Key words:** string rail track structure, uST, uSky, tropical Unicar, string rail, flexible rail rigidity, stress-strain state of string rail track structure.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных инновационных составляющих струнных транспортных систем Unitsky String Technologies (uST) является рельсо-струнная эстакада. Внешне она напоминает автомобильную или железнодорожную эстакаду, систему опор, на которых располагается дорожное полотно. Однако, в отличие от автомобильных или железнодорожных эстакад, у эстакады uST есть уникальные технологические отличия, которые обеспечивают ей преимущества при эксплуатации.

Главное из таких отличий – неразрезная конструкция струнных рельс. В отличие от, например, автомобильной эстакады, которая состоит из нескольких независимых пролетов между опорами, эстакада uST имеет единую, неразрезную, монолитную конструкцию, что очень важно. Если у автомобильной эстакады убрать даже одну опору, пролетное строение рухнет под собственным весом, и ехать по такой эстакаде станет невозможно. В случае с эстакадой для струнного транспорта, если даже несколько соседних опор будут уничтожены, например, в результате террористического акта, путевая структура останется целой, потому что нагрузка распределится на соседние опоры благодаря натянутым стальным канатам (струнам) внутри рельсов.

Другое важное отличие заключается в том, что опоры эстакады uST держат на себе только рельсо-струнную ферму или легкий струнный рельс, в отличие от автомобильной эстакады, содержащей тяжелое сплошное дорожное полотно, уложенное на мощные стальные или железобетонные балки. Именно поэтому внешне опоры эстакады струнного транспорта выглядят такими легкими, в отличие от массивных железобетонных опор, входящих в структуру автомобильных и железнодорожных эстакад [1].

Перечисленные технологические особенности дают струнным эстакадам целый ряд преимуществ:

– в эстакаде uST собственный вес эстакады составляет порядка 10 % от расчетной нагрузки, тогда как в обычной эстакаде – более 90 %. То есть при прочих равных условиях, эстакада uST может выдержать в разы больше полезной нагрузки: подвижного состава и пассажиров;

– сплошное дорожное полотно в обычной эстакаде требует дополнительных затрат. При возведении эстакады uST необходимо на порядок меньшее количество строительных материалов, что в разы снижает стоимость строительства;

– при одинаковой распределенной нагрузке неразрезная (без температурных швов и стыков) эстакада uST в 5 раз жестче и в 3 раза прочнее традиционного балочного моста. При одинаковой сосредоточенной силе эстакада струнного транспорта в 1,9 раза жестче и в 1,5 раза прочнее традиционного балочного моста.

Внешне близкие конструкции классических и рельсо-струнных эстакад имеют важные различия, которые в итоге делают струнные транспортные системы uST эффективнее всех современных наземных видов транспорта в эстакадном исполнении.

Основа технологии uST – струнный рельс. Струнный рельс представляет собой монолитную балку или ферму, внутри которой находятся растянутые арматурные канаты (струны). Остальное пространство внутри рельса заполнено специальным композитом или бетоном, которые обладают антикоррозийными свойствами [2].

Такая структура предварительно напряженного рельса дает множество преимуществ:

- высокая прочность и долговечность за счет непрерывности и монолитности пути;
- простота изготовления и монтажа;
- высокая относительная жесткость конструкции – как у мостов и путепроводов для высокоскоростных железных дорог;
- конструктивный минимализм, низкий расход материалов;
- ровность пути благодаря натянутым высокими усилиями стальным канатам внутри рельсов;
- отсутствие температурных швов и стыков;
- высокая плавность хода подвижного состава, низкий шум и вибрации;
- минимальные затраты энергии на движение за счет использования плоской головки рельса и цилиндрического стального колеса;
- широкий диапазон рабочих температур.

Все это также обеспечивает достижение самых высоких показателей эксплуатации транспорта – высоких скоростей движения, минимальных ударных нагрузок и низких затрат энергии.

Сегодня в ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь, разработаны пять типов струнных рельсов для разных условий эксплуатации:

- 1) **жесткий рельс** (или ферма); допустимая скорость: до 500 км/ч; длина пролета: до 100 м;
- 2) **полужесткий рельс**; допустимая скорость: до 350 км/ч; длина пролета: до 100 м;
- 3) **гибкий рельс**; допустимая скорость: до 150 км/ч; длина пролета: до 2000 м;
- 4) **полугибкий рельс** (с поддерживающим канатом); допустимая скорость: до 500 км/ч; длина пролета: до 2000 м;
- 5) **сверхлегкий рельс** (колтюбинговая труба); допустимая скорость: до 150 км/ч; длина пролета: до 1500 м.

Также струнный рельс сочетает в себе свойства гибкой нити на большом пролете между опорами и жесткой балки на малом пролете – под колесом рельсового электромобиля и над опорой. Поэтому в разных вариациях рельсо-струнную путевую структуру можно использовать как для прокладки трасс между небоскребами на большой высоте, так и для перевозки грузовых контейнеров по тяжелой ферменной структуре из порта, размещенного на шельфе моря.

Струнный рельс – уникальная технологическая инновация, сочетающая в себе преимущества железнодорожного рельса с эффективными характеристиками натянутой стальной нити.

## ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Тестовый участок рельсо-струнной путевой структуры с гибким рельсом в Центре uSky Transport в Шардже (ОАЭ) – многопролетная бирельсовая транспортная эстакада длиной 400 м, состоящая из предварительно напряженных рельсов, не имеющих температурных швов, замкнутых на концевые (анкерные) опоры и опирающихся на промежуточные опоры посредством опорных седел [3]. Функция седел состоит в обеспечении плавного изменения жесткости в месте крепления рельса к опоре, для комфортного передвижения транспортных средств с проектной скоростью. Путевая структура, инженерные коммуникации размещаются выше уровня земли с целью обхода занятой территории или транспортных потоков. Применение данного типа структур наиболее оптимально при пересечении местности со сложным рельефом и преодолении природных преград (реки, озера, каньоны, горные разломы).

С точки зрения строительной механики путевая структура представляет собой «жесткую нить». Данная конструкция отличается весьма низким погонным весом рельсового полотна (не более 24 кг/м.п.) и, как следствие, минимальными расходами на строительные материалы.

Подбор оптимальных сечений, применение качественных материалов с высокими прочностными характеристиками и специальных технологий позволяют соответствовать предъявленным нормативным требованиям по прочности, надежности и эксплуатационной безопасности как конструкции в целом, так и отдельных ее элементов.

Тестовый участок состоит из трех пролетов, длина центрального пролета составляет 200 м, двух крайних – по 100 м. Максимальный уклон пути при движении транспортного средства – рельсового электромотоцикла на стальных колесах, получившего название юнимобиль (uPod – на англ.), полной массой до 5000 кг – 8 % (либо 4,6 градуса) во всем эксплуатационном диапазоне температур от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$  (нагрев конструкции на солнце), который возможен в ОАЭ с вероятностью один раз в 100 лет. Минимальный радиус кривизны пути в продольно-вертикальной плоскости в зоне высотных промежуточных опор составляет около 75 м при длине опорного седла 15 м, что позволяет комфортно преодолевать данные участки пути.

На Рис. 1 представлен общий вид путевой структуры, на схеме указаны вертикальные отметки рельса в зоне анкерных и промежуточных опор, стрелками указано направление силового воздействия на опоры от предварительно напряженного гибкого рельса.

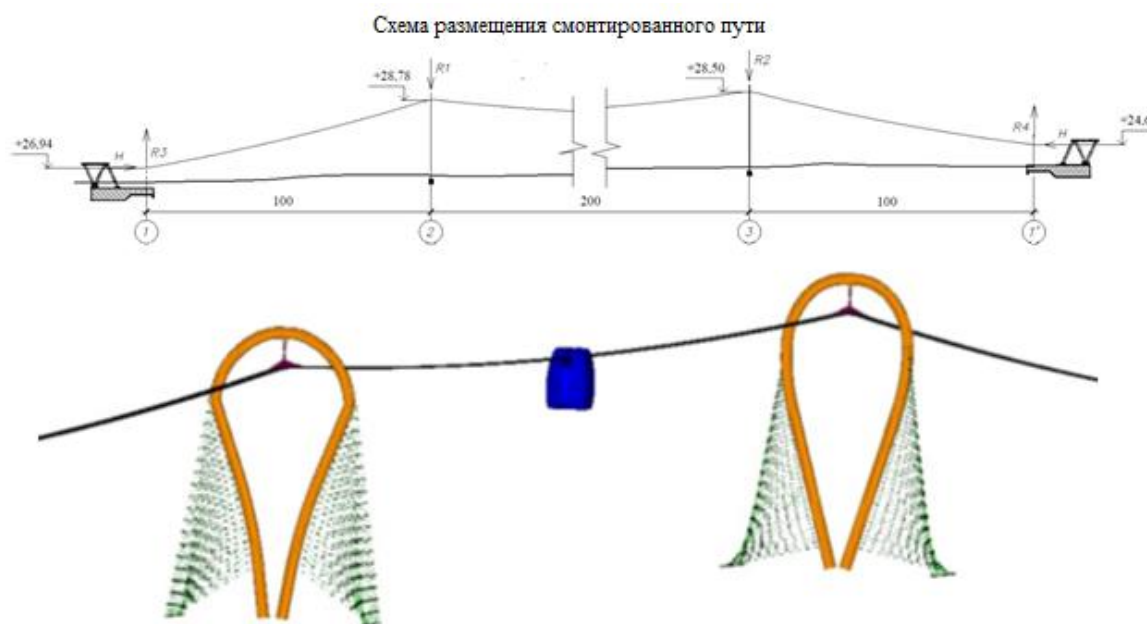


Рис. 1. Общий вид тестового участка

Рельсо-струнная путевая структура состоит из двух отдельных рельсов (левый и правый), связанных между собой стальными перемычками с шагом 2 м (Рис. 2). Каждый рельс включает предварительно напрягаемые элементы: внутренние – высокопрочные арматурные канаты диаметром 15,2 мм, и внешний корпус – U-образный

профиль из высокопрочной стали. Совместная работа корпуса и внутренних канатов обеспечена наполнителем, который также защищает канаты от неблагоприятных воздействий окружающей среды, обеспечивая тем самым их долговечность [4].

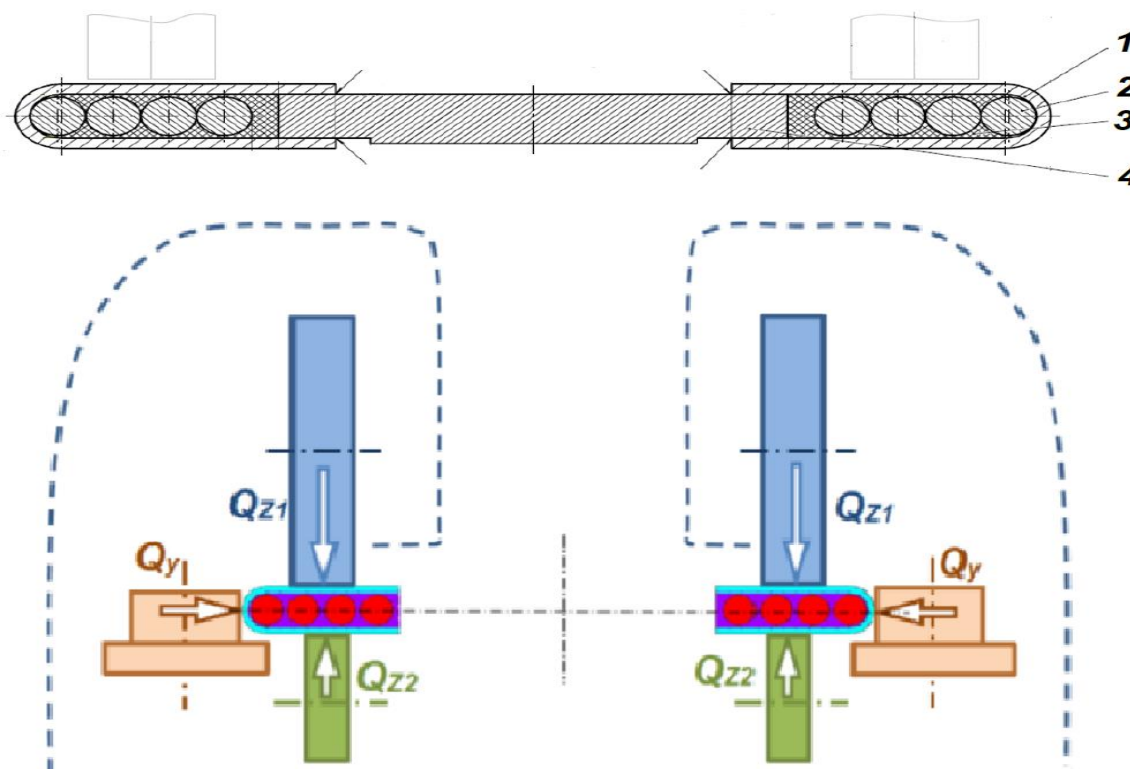


Рис. 2. Поперечное сечение гибкого струнного рельса и схема силового воздействия от колес подвешенного бирельсового транспортного средства

- 1 – U-образный профиль из высокопрочной стали (корпус рельса);  
 2 – высокопрочный стальной канат (струна рельса);  
 3 – наполнитель;  
 4 – переключка;  
 $Q_{z1}$  – вертикальное силовое воздействие от опорного колеса подвешенного рельсового электромобиля (юнимобиля);  
 $Q_{z2}$  – вертикальное силовое воздействие от поджимного колеса юнимобиля;  
 $Q_y$  – поперечное силовое воздействие от направляющего колеса

В Табл. 1 приведены массо-инерционные характеристики поперечного сечения гибкого рельса, в Табл. 2 – свойства применяемых в конструкции строительных материалов.

Таблица 1. Масс-инерционные характеристики гибкого рельса

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Площадь поперечного сечения корпуса (2 шт.)	$A_a$	см <sup>2</sup>	14,7
Площадь поперечного	$A_c$	см <sup>2</sup>	8,0

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Значение
сечения заполнителя (2 шт.)			
Площадь поперечного сечения канатов (8 шт.)	$A_s$	см <sup>2</sup>	13,2
Суммарная площадь поперечного сечения, приведенная к стали	$A$	см <sup>2</sup>	28,3
Момент инерции поперечного сечения, приведенный к стали (при расчетах на изгиб от действия вертикальных поперечных сил)	$I_{y-y}$	см <sup>4</sup>	18,0
Момент сопротивления поперечного сечения, приведенный к стали (при расчетах на изгиб от действия вертикальных поперечных сил)	$W_{y-y}$	см <sup>3</sup>	14,1
Погонная масса всех элементов гибкого рельса	$m$	кг/м.п.	23,6

Таблица 2. Расчетные характеристики строительных материалов гибкого рельса

Характеристики материалов	Корпус	Струна	Заполнитель	Перемычка
Обозначение на Рис. 2	1	2	3	4
Материал	U-образный профиль из стальной полосы	Высокопрочный арматурный канат	Двухкомпонентный композит	Сталь
Модуль упругости, МПа	210000	200000	10000	210000
Коэффициент Пуассона	0,3	0,3	0,35	0,3
Предел текучести, МПа	700	1636	-	-
Предел прочности, МПа	750	1860	30	350
Погонный вес, кг/м	5,78 x 2	1,298 x 8	0,828 x 2	-

## МЕТОД И ЦЕЛЬ РАСЧЕТА, РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Метод расчета – статический линейно-упругий расчет по теории второго порядка, который позволяет определять величины в сечениях (силы, моменты, напряжения, деформации) в любой точке конструкции на основе линейного деформирования строительных материалов и

геометрии деформированной несущей конструкции, т. е. с учетом нелинейности деформаций [5]. При таком методе расчета учитывается взаимное влияние усилий (например, продольно-поперечный изгиб).

Цель расчета – оценка жесткости гибкого рельса и напряженно-деформированного состояния элементов рельсо-струнной пути на основе конечно-элементного анализа. В частности, ставятся задачи:

- расчет жесткости гибкого рельса при действии транспортной нагрузки и ее зависимости от температурного воздействия;
- расчет усилий (линии влияния) в элементах гибкого рельса и их зависимости от температурного воздействия;
- оценка размаха напряжений и долговечности элементов гибкого рельса от действия циклической транспортной нагрузки юникар-Т (тропический) при штатных режимах эксплуатации.

Для решения поставленных задач была разработана конечно-элементная модель рельсо-струнной путевой структуры на основе балочных и оболочечных элементов (Рис. 3). Геометрия поперечных сечений элементов, вертикальные отметки опорных узлов, а также граничные условия в полной мере соответствуют конструкции путевой структуры.

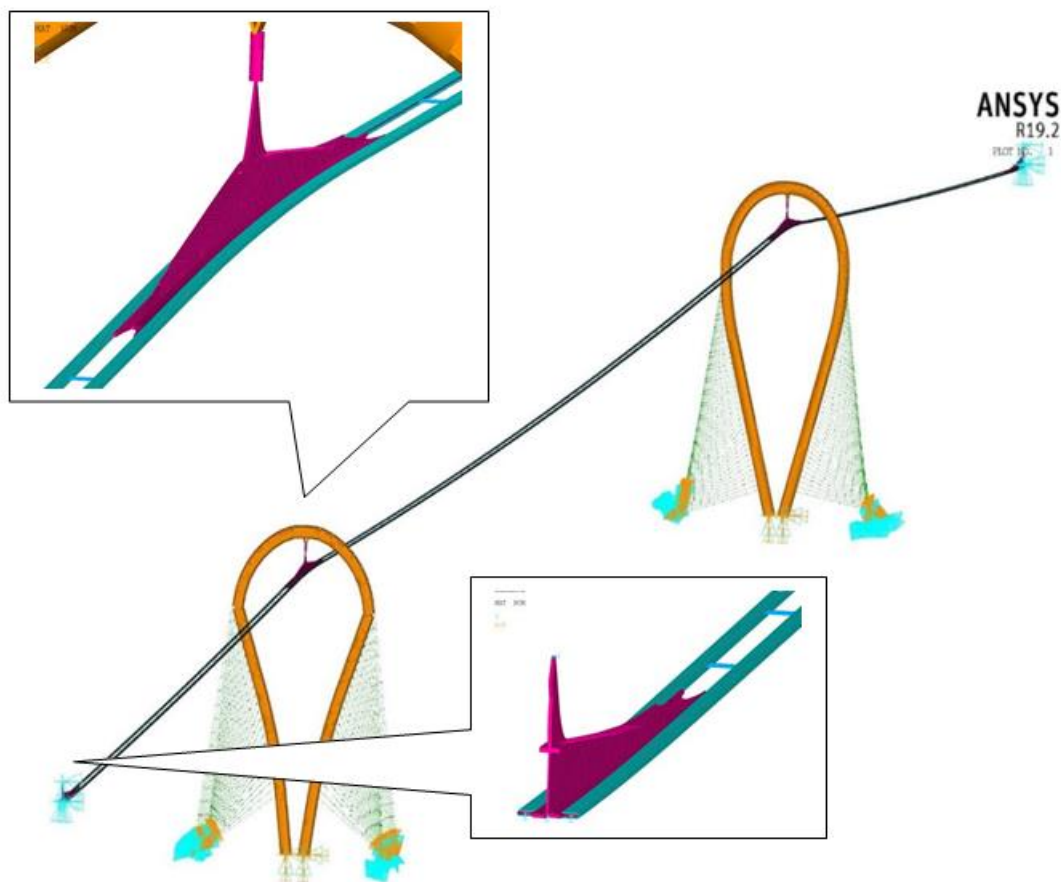


Рис. 3. Общий вид конечно-элементной модели рельсо-струнной путевой структуры с гибким рельсом



## ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ РЕЛЬСО-СТРУННОГО ПУТИ ПРИ НАГРУЖЕНИИ

Собственный вес рельсового полотна составляет  $q=23,6$  кг/м.п. Суммарное расчетное натяжение всех элементов рельса, соответствующее температуре замыкания  $t_0=+35$  °С, составляет  $N_0=1970$  кН. При изменении температуры окружающей среды, воздействии на элементы гибкого рельса солнечной радиации, ветровых потоков происходит и изменение их температуры, а соответственно, и натяжения ввиду замкнутости системы и изменения внутренних напряжений. Например, при минимальной расчетной температуре  $t_{\min}=-10$  °С суммарное натяжение увеличится до 2312 кН, а при максимальной расчетной температуре  $t_{\max}=+80$  °С – уменьшится до 1648 кН.

Изменение натяжения сопровождается изменением деформированного состояния гибкого рельса и величины его максимального провиса. На Рис. 4 представлены линии гибкого рельса от действия постоянных сил (гравитации) при минимальной ( $-10$  °С), максимальной ( $+80$  °С) и номинальной ( $+35$  °С) температурах.

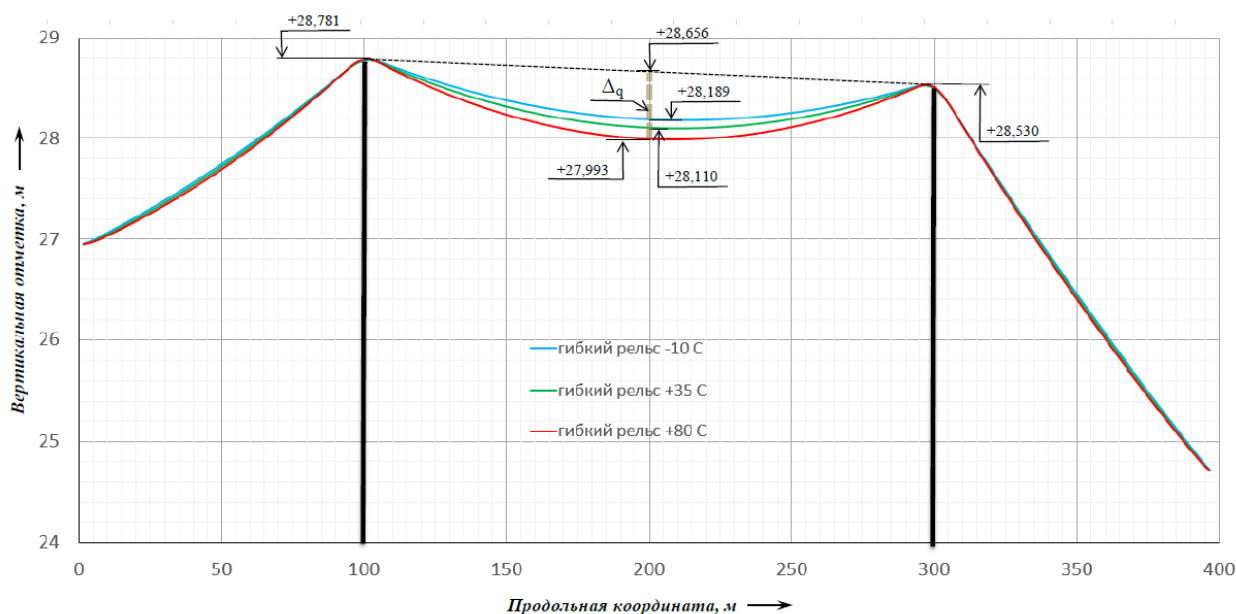


Рис. 4. Линия провеса гибкого рельса при различной температуре путевой структуры (при действии постоянных воздействий – собственный вес и предварительное натяжение)

Основные параметры деформированного рельса (максимальный провис, соответствующее натяжение) при различных температурах указаны в Табл. 3.

Таблица 3. Параметры деформированного состояния гибкого рельса от действия собственного веса

Температура рельса, °С	-10 °С	+35 °С	+80 °С
Расчетное натяжение рельса $N$ , кН	2312	1970	1648
Вертикальная отметка рельса на продольной координате 200 метров, м	+28,189	+28,110	+27,993
Максимальный провис рельса от собственного веса $\Delta q$ (середина пролета 200 метров), м	0,467	0,546	0,663

Полная расчетная масса нагрузки от юнимобиля юникар-Т – 4550 кг [6, 7], распределенная на две опорные оси (четыре колеса) с колесной базой 2,5 м.

На Рис. 5 представлен общий деформированный вид путевой структуры при нагружении транспортной нагрузкой в середине двухсотметрового пролета с указанием величины максимального прогиба гибкого рельса (в метрах).

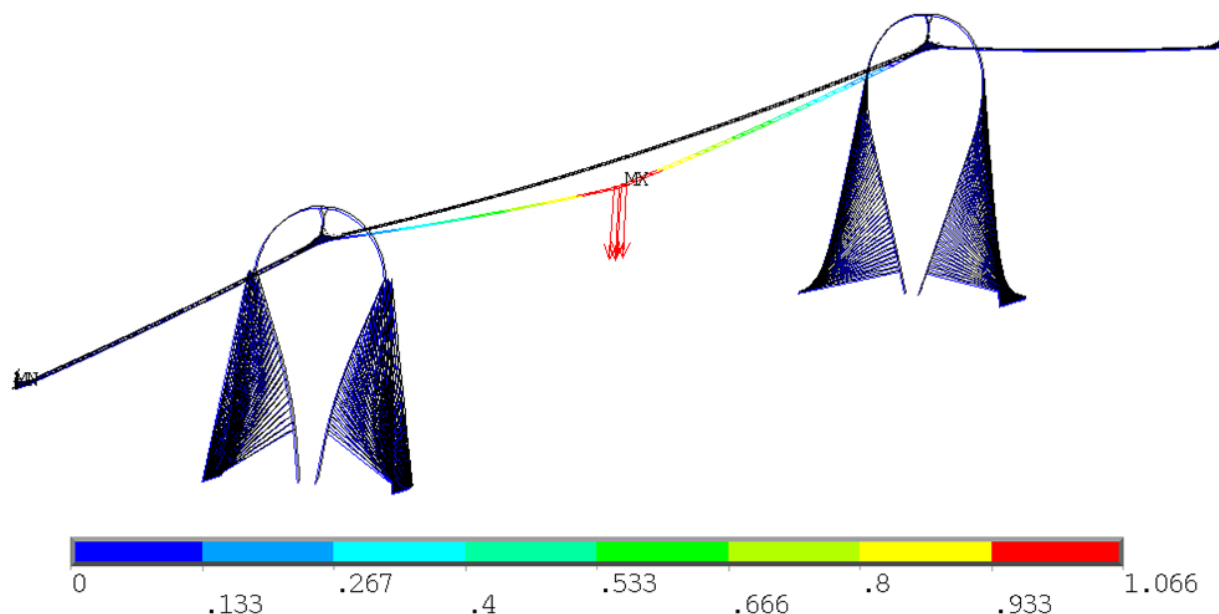


Рис. 5. Общий вид деформированного состояния гибкого рельса при нагружении весом юникара-Т полной массой 4550 кг при температуре +35 °С

В Табл. 4 указаны основные параметры деформированного рельса (максимальный провис, соответствующее натяжение) при различных температурах.

Таблица 4. Параметры деформированного состояния гибкого рельса от действия подвижной нагрузки

Температура рельса, °С	-10 °С	+35 °С	+80 °С
Начальное натяжение рельса $N_0$ , кН	2312	1970	1648
Максимальное натяжение рельса при воздействии транспортной нагрузки от юникара-Т полной массой 4550 кг $N$ , кН	2339	2009	1703
Увеличение натяжения элементов гибкого рельса от подвижной нагрузки $\Delta N$ , кН	27	39	55
Максимальный провис рельса от веса юникара-Т $\Delta P$ (середина пролета 200 м), м	0,922	1,066	1,250

На Рис. 6 представлены сплошные линии – линии гибкого рельса при отсутствии транспортной нагрузки, штриховые – траектории движения условного центра неподрессоренной массы (середина отрезка, соединяющего точки контакта переднего и заднего колес юникара-Т с путевой структурой).

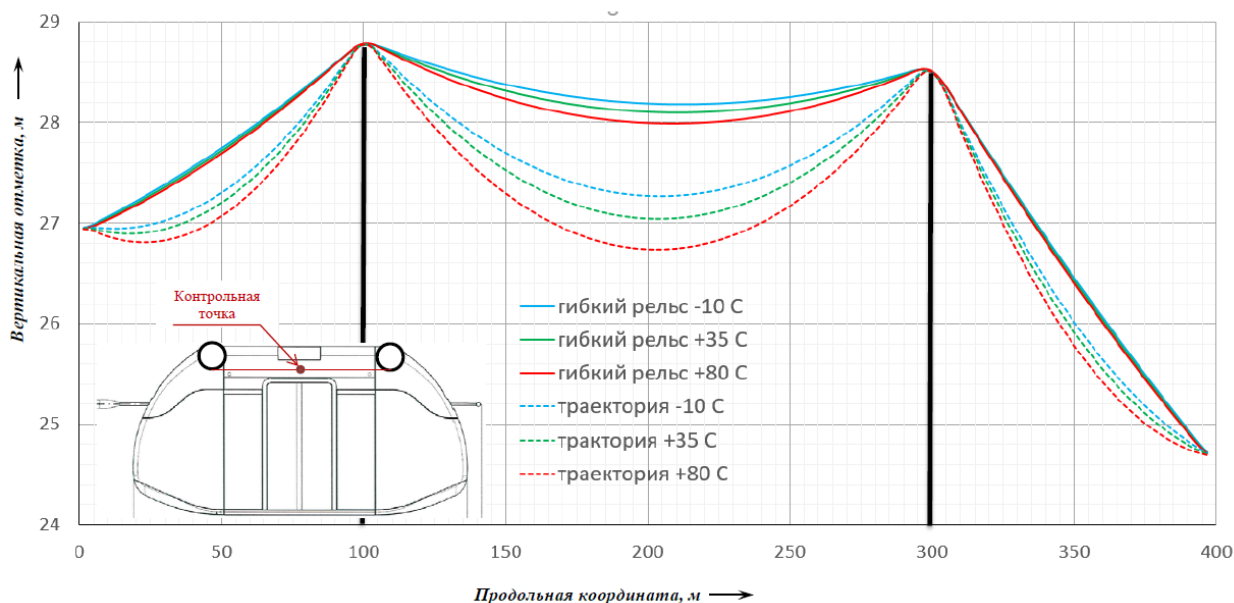


Рис. 6. Линия гибкого рельса и траектории движения юникара-Т (полная масса 4550 кг) при различной температуре путевой структуры; траектория привязана к контрольной точке – середина отрезка, соединяющего точки контакта переднего и заднего колес юникара-Т с рельсовым полотном

На Рис. 7, 8 указаны зависимости прогибов гибкого рельса и уклонов рельсо-струнного пути при движении юникара-Т во всем эксплуатационном диапазоне температур (от -10 °С до +80 °С). Максимальные величины прогибов характерны для середин пролетов, максимальные уклоны пути – в зонах приближения к опорным седлам.

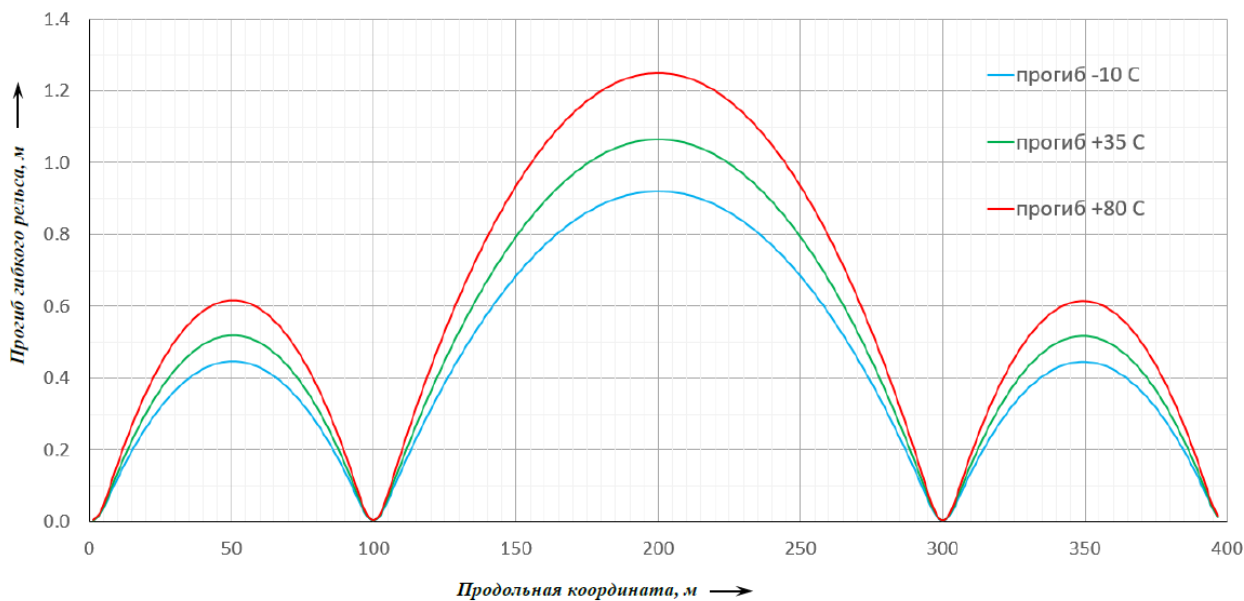


Рис. 7. Деформативность гибкого рельса при движении юникара-Т (полная масса 4550 кг) и различной температуре путевой структуры

Наибольший прогиб рельса при движении юникара-Т при температуре +80 °C составляет 1,25 м.

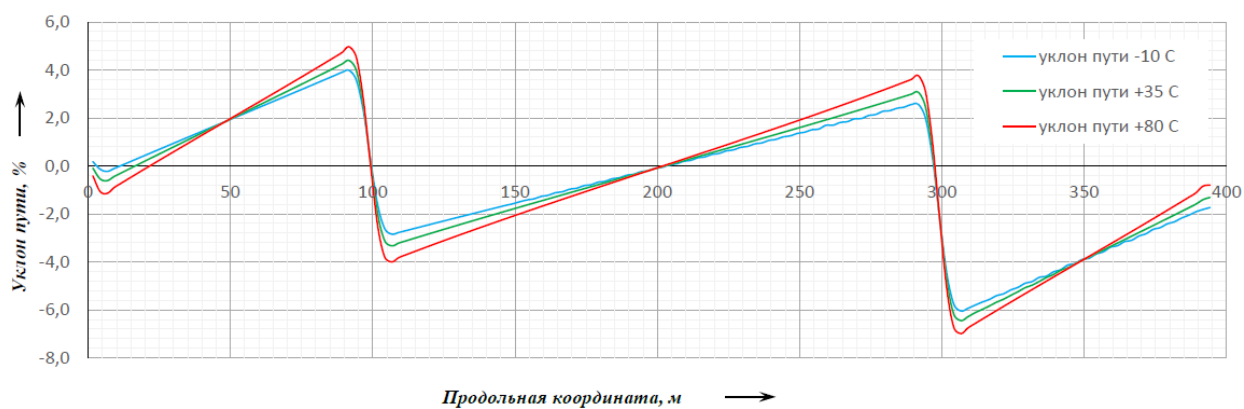


Рис. 8. Уклон рельсо-струнного пути при движении юникара-Т (полная масса 4550 кг) и различной температуре путевой структуры

Ввиду выбора оптимального сечения струнного рельса, определяющего его низкий погонный вес и достаточное натяжение, изменение температурного воздействия в диапазоне от -10 °C до +80 °C незначительно влияет на величину максимального провиса на пролете 200 метров (-8/+12 см от собственного веса и -14/+18 см от юникара-Т)

## ОЦЕНКА РАЗМАХА НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ГИБКОГО РЕЛЬСА ОТ ЦИКЛИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПРИ ШТАТНЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Величина размаха напряжений в элементах рельса при воздействии от подвижного состава непосредственно определяет усталостную выносливость несущих элементов рельса и является определяющим критерием выбора конструктивных параметров. В гибких системах максимальный размах напряжений можно оценить по формуле

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_N + \Delta\sigma_M = \frac{\Delta N_{\max}}{A} + \frac{M_{\max}}{W}, \quad (1)$$

где

$\Delta\sigma_N$  – минимальное напряжение, МПа;

$\Delta\sigma_M$  – максимальное напряжение, МПа;

$\Delta N_{\max}$  – натяжение, кН;

$A$  – площадь поперечного сечения, см<sup>2</sup>;

$M_{\max}$  – максимальный момент, Н×м;

$W$  – момент сопротивления сечения, см<sup>3</sup>.

На Рис. 9 представлен общий вид эпюры изгибающего момента, действующего на гибкий рельс в зоне контакта с колесом юнимобиля.

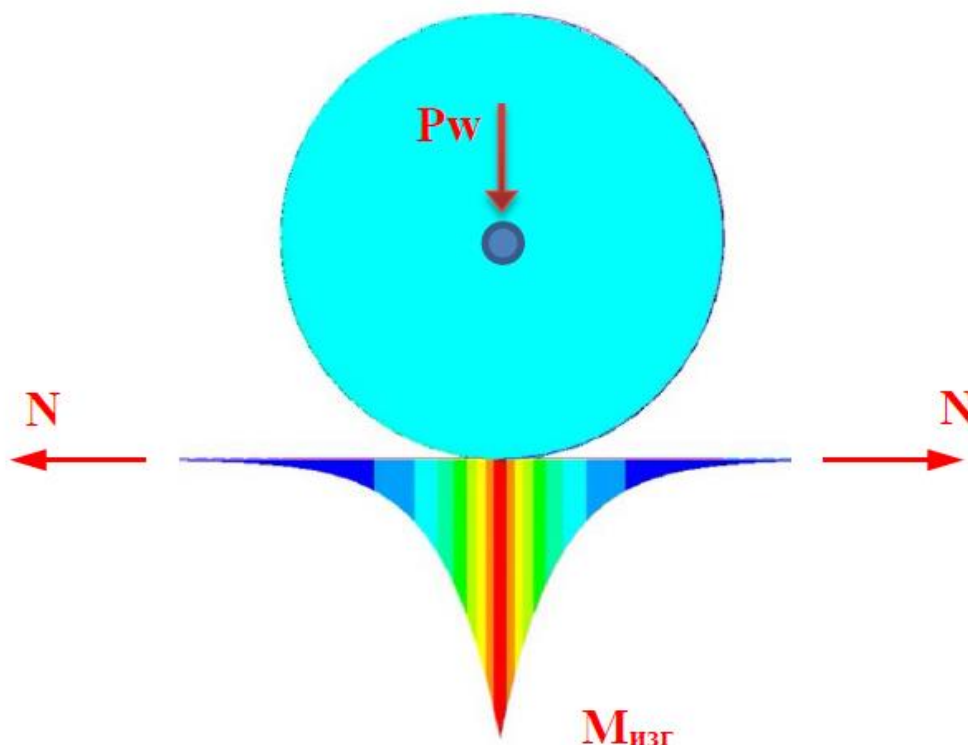


Рис. 9. Общий вид эпюры изгибающего момента, действующего на гибкий рельс в зоне контакта с колесом юнимобиля

В Табл. 5–8 приведена оценка максимального размаха напряжений в несущих элементах гибкого рельса – корпусе и канатах. Наиболее нагруженная зона – нижние грани элементов в середине двухсотметрового пролета тестовой трассы. Подвижная нагрузка – юникар-Т полной масса 4550 кг, равномерно распределенной на четыре опорных колеса.

Таблица 5. Оценка размаха напряжений в корпусе рельса при движении четырехколесного юникара-Т полной массой 4550 кг с нагрузкой на колесо 11,16 кН (середина пролета 200 метров)

Расчетный параметр (с расчетом на один U-образный профиль)	Температура элементов		
	-10 °C	+35 °C	+80 °C
Площадь поперечного сечения $A$ , см <sup>2</sup>	7,37	7,37	7,37
Начальное натяжение $N_0$ , кН	271,1	183,9	97,7
Максимальное натяжение $N$ , кН	278,2	194,3	112,1
Изменение натяжения $\Delta N_{\max}$ , кН	7,1	10,4	14,4
Размах напряжений от донатяжения при проезде юнимобиля $\Delta \sigma_N$ , МПа	10	14	20
Момент сопротивления сечения $W$ , см <sup>3</sup>	7,1	7,1	7,1
Локальный изгибающий момент $M_{\text{изг}}$ , Н·м	590	639	700
Размах напряжений от изгибающего момента под колесом	83	90	99

Таблица 6. Величина размаха напряжений в корпусе рельса (наиболее нагруженная зона – нижняя грань корпуса в середине 200-метрового пролета)

Параметр	Обозначение	Температура элементов рельса			Категория элемента* $\Delta \sigma_c$ , МПа
		-10 °C	+35 °C	+80 °C	
Минимальное	$\sigma_{\min}$ , МПа	368	250	133	160
Максимальное	$\sigma_{\max}$ , МПа	461	354	252	
Размах напряжений	$\Delta \sigma_R$ , МПа	93	104	119	

\* Категория элемента – это численное значение, присвоенное конкретному элементу при заданном направлении колебаний напряжения для определения кривой сопротивления усталости, что соответствует справочному значению предела выносливости  $\Delta \sigma_c$  при базовом числе циклов  $N_c=2$  млн.

Таблица 7. Оценка размаха напряжений в несущем канате при движении четырехколесного юникара-Т полной массой 4550 кг с нагрузкой на колесо 11,16 кН (середина пролета 200 метров)

Расчетный параметр (с расчетом на один арматурный канат)	Температура элементов рельса		
	-10 °С	+35 °С	+80 °С
Площадь поперечного сечения $A$ , см <sup>2</sup>	1,65	1,65	1,65
Начальное натяжение $N_0$ , кН	219,9	200,3	180,8
Максимальное натяжение $N$ , кН	221,5	202,6	184,1
Изменение натяжения $\Delta N_{\max}$ , кН	1,6	2,3	3,3
Размах напряжений от донатяжения при проезде	10	14	20
Момент сопротивления сечения $W$ (в составе сечения), см <sup>3</sup>	11,8	11,8	11,8
Локальный изгибающий момент $M_{\text{изг}}$ , Н·м	590	639	700
Размах напряжений от изгибающего момента под колесом, МПа	50	54	59

Таблица 8. Величина размаха напряжений в арматурном канате (наиболее нагруженная зона – нижняя грань корпуса в середине двухсотметрового пролета)

Параметр	Обозначение	Температура элементов			Категория элемента $\Delta \sigma_c$ , МПа
		-10 °С	+35 °С	+80 °С	
Минимальное	$\sigma_{\min}$ , МПа	1333	1214	1096	160
Максимальное	$\sigma_{\max}$ , МПа	1393	1282	1175	
Размах напряжений	$\Delta \sigma_R$ , МПа	60	68	79	

Представленные результаты позволяют оценить долговечность и надежность конструкции по методологии, изложенной в литературе [8]. Согласно результатам расчета, в данной конструкции обеспечена долговечность корпуса рельса не менее 10 млн. циклов, несущих канатов – не менее 78 млн. циклов, что гарантирует безопасную эксплуатацию путевой структуры не менее 100 лет при круглогодичной эксплуатации с интервалом движения юнимобиля около 2 минут.

Расчет жесткости гибкого рельса и напряженно-деформированного состояния элементов рельсо-струнной путевой структуры производился при помощи программного комплекса конечно-элементного анализа ANSYS [9].

Выполненные расчеты были использованы при проектировании и строительстве тестового участка рельсо-струнной путевой структуры в исследовательском Центре uSky Transport в Шардже (ОАЭ) (Рис. 10) [1].



Рис. 10. Гибкая рельсо-струнная путевая структура  
в Центре uSky Transport в Шардже

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе произведен расчет жесткости гибкого рельса при действии подвижной нагрузки и ее зависимости от температурного воздействия; установлены усилия в элементах гибкого рельса; определен размах напряжений и долговечность гибкого рельса от действия циклической нагрузки – юникара-Т. Анализ результатов расчета доказывает высокую эффективность и надежность предложенного транспортного решения, учитывая соотношение материалоемкости струнного рельса (24 кг/м) к несущей способности путевой структуры (эксплуатационная нагрузка – подвижной состав полной массой 4,55 т).

## Библиографический список / References

1. Юницкий А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе. – Силакросг: ПНБ принт, 2019. – 576 с. [Yunitskii AE. *Strunnnye transportnye sistemy: na Zemle i v Kosmose*. Silakrogs: PNB print; 2019. 576 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 26.09.2022. Ссылка активна на: 26.09.2022. Доступно по: <https://www.rulit.me/books/strunnnye-transportnye-sistemy-na-zemle-i-v-kosmose-read-488548-1.html>



2. Юницкий А.Э. Инновационные транспортно-инфраструктурные технологии uST / Альбом. – Минск: ЗАО «Струнные технологии, 2021. – 94 с. [Yunitskii AE. *Innovatsionnye transportno-infrastrukturnye tekhnologii uST / Album*. Minsk: Unitsky String Technologies, Inc.; 2021. 94 p. (In Russ.)]. doi: 10.20291/2311-164X-2022-2-3-7
3. Патент ЕА № 037758. Транспортная система Юницкого (варианты) / Юницкий А.Э. – МПК В62D 35/00, заявл. 12.07.2019; опубл. 19.05.2021. [Patent EA № 037758. *Transportnaya sistema Yunitskogo (varianty)*. Yunitskii AE. IPC B62D 35/00, filed 12.07.2019; publ. 19.05.2021 (In Russ.)].
4. Патент ЕА № 031807. Рельс транспортной системы / Юницкий А.Э. – МПК В62D 35/00, заявл. 09.06.2017; опубл. 28.02.2019. [Patent EA № 031807. *Rel's transportnoi sistemy*. Yunitskii AE. IPC B62D 35/00, filed 09.06.2017; publ. 28.02.2019. (In Russ.)].
5. ТКП EN 1990-2011 (02250) Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций / МАиС РБ. – Минск, 2015. – 86 с. [ТССР EN 1990-2011 (02250) Eurocode. *Osnovy proektirovaniya stroitel'nykh konstruksii* / МАиС РБ. Minsk; 2015. 86 p. (In Russ.)].
6. Средство транспортное Юникар U4-430. Руководство по эксплуатации. – Минск, 2018. – 114 с. [*Sredstvo transportnoe Yunikar U4-430. Rukovodstvo po ekspluatatsii*. Minsk; 2018. 114 p. (In Russ.)].
7. Юницкий А.Э., Гарах В.А., Зайцев А.Д., Цырлин М.И. Конструктивные особенности юникара тропического для городских перевозок пассажиров // Инновационный транспорт. – 2021. – № 1. – С. 8–15. [Yunitskii AE, Garakh VA, Zaitsev AD, Tsyrlin MI. *Design features of the tropical unicar for urban passenger transport*. *Innotrans*. 2021;(1):8-15. (In Russ.)]. doi: 10.20291/2311-164X-2021-1-8-15.
8. ТКП EN 1993-1-9-2009 (02250) Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1–9. Усталостная прочность / МАиС РБ. Минск, 2010. – 43 с. [ТССР EN 1993-1-9-2009 (02250) Eurocode 3. *Proektirovanie stal'nykh konstruksii. Chast' 1-9. Ustalostnaya prochnost'* / МАиС РБ. Minsk; 2010. 43 p. (In Russ.)].
9. Жидков А.В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования. – Нижний Новгород: НГУ, 2006. – 115 с. [Zhidkov AV. *Primenenie sistemy ANSYS k resheniyu zadach geometricheskogo i konechno-elementnogo modelirovaniya*. Nizhnii Novgorod: NGU; 2006. 115 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 26.09.2022. Доступно по: [www.unn.ru/pages/e-library/aids/2006/1.pdf?ysclid=l8irg6k8cj922416463](http://www.unn.ru/pages/e-library/aids/2006/1.pdf?ysclid=l8irg6k8cj922416463)

#### Сведения об авторах:

**Цырлин Михаил Иосифович**, кандидат технических наук, ведущий специалист;  
eLibrary SPIN: 9548-6321; ORCID: 0000-0002-2983-3255  
E-mail: m.tsirlin@unitsky.com

**Юницкий Анатолий Эдуардович**, председатель совета директоров, генеральный конструктор;  
E-mail: a@unitsky.com

**Хлебус Александр Степанович**, начальник группы прочностного анализа;  
E-mail: a.khlebus@unitsky.com

**Information about the authors:**

**Michael I. Tsyrlin**, Candidate of Technical Sciences, Leading Specialist;

eLibrary SPIN: 9548-6321; ORCID: 0000-0002-2983-3255

E-mail: m.tsirlin@unitsky.com

**Anatoli E. Unitsky**, Chairman of the Board of Directors and General Designer;

E-mail: a@unitsky.com

**Aliaksandr S. Khlebus**, Strength Analysis Team Lead;

E-mail: a.khlebus@unitsky.com

**Цитировать:**

Юницкий А.Э., Хлебус А.С., Цырлин М.И. Оценка жесткости гибкого рельса и напряженно-деформированного состояния элементов рельсо-струнной путевой структуры в центре uSky в Шардже (ОАЭ) // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 45–62. doi: 10.17816/transsyst20228345-62

**To cite this article:**

Unitsky AE, Khlebus AS, Tsyrlin MI. Evaluation of flexible rail rigidity and stress-strain state of elements of string rail track structure at the uSky center in Sharjah (UAE). *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(3):45-62. doi: 10.17816/transsyst20228345-62