

УДК (UDC) 625.1/.5:629.369

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОДДЕРЖИВАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ  
КАНАТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМOPTIMIZATION OF SUPPORTING STRUCTURES TO ENSURE TECHNOLOGICAL  
PROCESSES DURING THE OPERATION OF SPECIAL ROPE TRANSPORT SYSTEMSЛагереv А.В.<sup>1</sup>, Лагереv И.А.<sup>2</sup>, Косачев В.С.<sup>2</sup>  
Lagerev A.V.<sup>1</sup>, Lagerev I.A.<sup>2</sup>, Kosachev V.S.<sup>2</sup><sup>1</sup> – Российский университет транспорта (Москва, Россия)<sup>2</sup> – Кубанский государственный технологический университет (Краснодар, Россия)<sup>1</sup> – Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation)<sup>2</sup> – Kuban State Technological University (Krasnodar, Russian Federation)

**Аннотация.** Подвесные канатные системы в настоящее время достаточно широко применяются для проведения разнообразных транспортно-логистических операций в широком числе отраслей современной экономики. Наряду с традиционным использованием канатных дорог в стационарном исполнении, в последние годы активно развивается направление по использованию мобильных канатных транспортных систем. Это позволяет эффективно решать важные транспортно-логистические задачи в течение ограниченного лимита времени и в сложных природно-климатических и/или эксплуатационных условиях, в частности, такие задачи, как проведение транспортных операций в труднодоступной и удаленной местности, проведение погрузочно-разгрузочных работ на необорудованном побережье, проведение специальных спасательных и транспортных операции, проведение транспортных работ на поверхности иных космических тел и т.п. В данной статье рассмотрена задача разработки промежуточных опор мобильных канатных дорог, характеризующихся минимальной массой при соблюдении необходимых прочностных требований. Представлены разработанная математическая оптимизационная модель и реализующая ее компьютерная программа. Рассмотрены пять конструктивных вариантов исполнения поперечного сечения промежуточной опоры ферменной конструкции с несущими вертикальными тонкостенными стойками. При минимизации массы металлоконструкции опоры учтены влияние и масса анкерных канатов, обеспечивающих заданное пространственное положение промежуточной опоры. Также представлены некоторые результаты проведения оптимизационных расчетов для базового варианта канатной системы.

**Ключевые слова:** мобильная канатная дорога, опора промежуточная, оптимизация.

**Abstract.** Aerial rope systems are currently widely used for carrying out a variety of transport and logistics operations in a wide range of sectors of the modern economy. Along with the traditional use of ropeways in stationary design, the direction of using mobile rope transport systems has been actively developing in recent years. This makes it possible to effectively solve important transport and logistics tasks within a limited time limit and in difficult natural, climatic and/or operational conditions, in particular, such tasks as carrying out transport operations in remote and inaccessible areas, carrying out loading and unloading operations on an unequipped coast, carrying out special rescue and transport operations, carrying out transport works on the surface of other cosmic bodies, etc. This article discusses the task of developing intermediate towers for mobile ropeways, characterized by a minimum mass while meeting the necessary strength requirements. The developed mathematical optimization model and the computer program implementing it are presented. Five design variants of the cross-section of the intermediate tower of the truss structure with supporting vertical thin-walled struts are considered. When minimizing the mass of the metal structure of the tower, the influence and mass of the anchor ropes providing a given spatial position of the intermediate tower are taken into account. Some results of optimization calculations for the basic version of the rope system are also presented.

**Keywords:** mobile ropeway, intermediate tower, optimization

Дата получения статьи: 10.06.2026  
Дата принятия к публикации: 29.08.2026  
Дата публикации: 25.09.2026

Date of manuscript reception: 10.06.2026  
Date of acceptance for publication: 29.08.2026  
Date of publication: 25.09.2026

**Сведения об авторах:**

**Лагереv Александр Валерьевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Робототехнические и технологические комплексы на транспорте», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», e-mail: [bsu-avl@yandex.ru](mailto:bsu-avl@yandex.ru).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0380-5456>

**Лагереv Игорь Александрович** – доктор технических наук, доцент, профессор ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», e-mail: [lagerev-bgu@yandex.ru](mailto:lagerev-bgu@yandex.ru).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0921-6831>

**Косачев Вячеслав Степанович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологическое оборудование и системы жизнеобеспечения» ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», e-mail: [vs.kosachev@gmail.com](mailto:vs.kosachev@gmail.com).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2582-8547>

**Authors' information:**

**Alexander V. Lagerev** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department «Robotic and Technological Complexes in Transport» at Russian University of Transport, e-mail: [bsu-avl@yandex.ru](mailto:bsu-avl@yandex.ru).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0380-5456>

**Igor A. Lagerev** – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Professor at Kuban State Technological University, e-mail: [lagerev-bgu@yandex.ru](mailto:lagerev-bgu@yandex.ru).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0921-6831>

**Vyacheslav S. Kosachev** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department «Technological Equipment and Life Support Systems» at Kuban State Technological University, e-mail: [vs.kosachev@gmail.com](mailto:vs.kosachev@gmail.com).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2582-8547>

**1. Введение**

В настоящее время канатные системы достаточно широко используются для проведения разнообразных транспортно-логистических операций по доставке пассажиров и грузов в различных отраслях экономики, в частности, в транспортной инфраструктуре городов и рекреационных территорий [1 - 3], в промышленности и строительстве [4], при разработке месторождений полезных ископаемых [5, 6], в сельском хозяйстве [7, 8] и лесной промышленности [9, 10], при освоении труднодоступных горных и арктических территорий [11, 12], в условиях проведения спасательно-восстановительных работ на территориях природных или техногенных аварий и катастроф [13], на театре военных действий [14] и др. Они также рассматриваются как перспективный вид транспорта при создании эффективной транспортной инфраструктуры при освоении иных космических объектов – Луны и Марса [15, 16].

Зачастую канатные транспортные системы реализуются в виде стационарно устанавливаемых многопролетных подвесных канатных дорог кольцевого или маятникового типа движения тяговых или несущих тяговых канатов [17 - 19]. Однако в последние годы активно начинает развиваться направление по использованию канатных транспортных систем в их мобильном исполнении, что позволяет эффективно решать важные транспортно-логистические задачи в

течение ограниченного лимита времени и в сложных природно-климатических и/или эксплуатационных условиях. С этой целью к настоящему времени были предложены перспективные конструкции и методы их проектирования и моделирования для автономно перемещающихся установок для оперативного развертывания канатных дорог – мобильных канатных транспортно-технологических комплексов на базе специальных самоходных колесных или гусеничных шасси [20, 21] и аэромобильных установок модульного исполнения [22 - 24]. Эти установки могут быть использованы для создания как однопролетных, так и много пролетных канатных дорог. Однако в последнем случае необходимо использование промежуточных поддерживающих конструкций – промежуточных опор – для размещения на их оголовках необходимо технологического оборудования для высотной фиксации ветвей канатной системы. Учитывая основную функциональную направленность использования мобильных канатных дорог, связанную с выполнением транспортно-логистических операций в специальных условиях эксплуатации (труднодоступная местность, погрузка/разгрузка на необорудованном побережье, специальные спасательные и транспортные операции, поверхность иных космических тел и т.п.) [13], ключевое значение имеет разработка поддерживающих конструкций, обладающих минимальной массой при соблюдении необходимых прочностных требований.

Исходя из сказанного, в данной статье рассмотрена задача разработки промежуточных опор мобильных канатных дорог минимальной массы, в процессе которой была разработана математическая оптимизационная модель и реализующая ее компьютерная программа применительно к опорам с различным конструктивным исполнением поперечных сечений и с учетом влияния анкерных канатов.

## 2. Материалы и методы

Конструктивное исполнение промежуточных опор для мобильных канатных дорог, ориентированных на применение в условиях невозможности использования или технико-экономической нецелесообразности использования транспортных средств доставки или монтажных грузоподъемных средств требуемой грузоподъемности, должно быть ориентировано на достижение минимального веса и конструктивного минимализма при соблюдении необходимых условий прочности и жесткости. В связи с этим общим соображением можно сформулировать ряд требований и условий при выборе конфигурации поперечного сечения промежуточных опор и их закрепления в проектном положении:

- промежуточная опора должна представлять собой плоскую или прямоугольную в плане решетчатую конструкцию с двумя или четырьмя вертикальными несущими стойками кольцевого, квадратного или уголкового тонкостенного поперечного сечения, связанными для жесткости поперечными горизонтальными и (или) наклонными тонкостенными стержнями или планками;

- высота промежуточной опоры  $H_i$  должна быть значительно больше двух других размеров поперечного сечения;

- промежуточная опора рассматривается как стержень, имеющий шарнирное опирание и находящийся под действием сжимающей продольной нагрузки от веса установленного комплекта технологического оборудования, веса одной полностью загруженной грузовой платформы и усилий натяжения набегающей и сбегавшей ветвей несущего (или нескольких несущих или одного несущего)

ще-тягового) каната с учетом количества расположенных на опоре ветвей канатной дороги (одна или две), а также усилий натяжения анкерных канатов с учетом возможного изменения их длины в пределах расчетного интервала температуры эксплуатации;

- основной причиной потери промежуточной опорой работоспособности, которая учитывается при прочностном анализе и ориентировочной оценке площади поперечного сечения, является потеря устойчивости под действием максимальной сжимающей продольной нагрузки;

- площадь поперечного сечения промежуточной опоры также должна быть проверена по условию прочности на сжатие;

- для закрепления промежуточной опоры в вертикальном или наклонном проектном положении используются две пары анкерных канатов, по паре с каждой стороны опоры;

- анкерные канаты в общем случае крепятся с разных сторон опоры на разной высоте и на разном расстоянии от опоры.

Исходя из указанных соображений, в данном исследовании было рассмотрено пять вариантов поперечных сечений промежуточных опор. Эти варианты с указанием характерных расчетных размеров приведены на рис. 1.

Масса несущей металлоконструкции промежуточной опоры  $M_{ii}$ , площадь поперечного сечения несущих стоек  $F_{ii}$  и момент инерции поперечного сечения опоры  $J_{ii}$  для  $i$ -го рассматриваемого конструктивного варианта определяются следующими зависимостями:

- вариант № 1

$$M_{i1} = H_i \rho_i s_i \left[ 2\pi(d_i - s_i) + \frac{k_b(B_i - d_i)s_i}{h_b} \right];$$
$$F_{i1} = 2\pi s_i(d_i - s_i);$$

$$J_{i1} = \frac{\pi s_i}{4} (d_i^3 - 3d_i^2 s_i + 4d_i s_i^2 - 2s_i^3);$$

-вариант № 2

$$M_{i2} = H_i \rho_i s_i \left[ 8(b_i - s_i) + \frac{k_b(B_i - b_i)s_i}{h_b} \right];$$
$$F_{i2} = 8s_i(b_i - s_i);$$

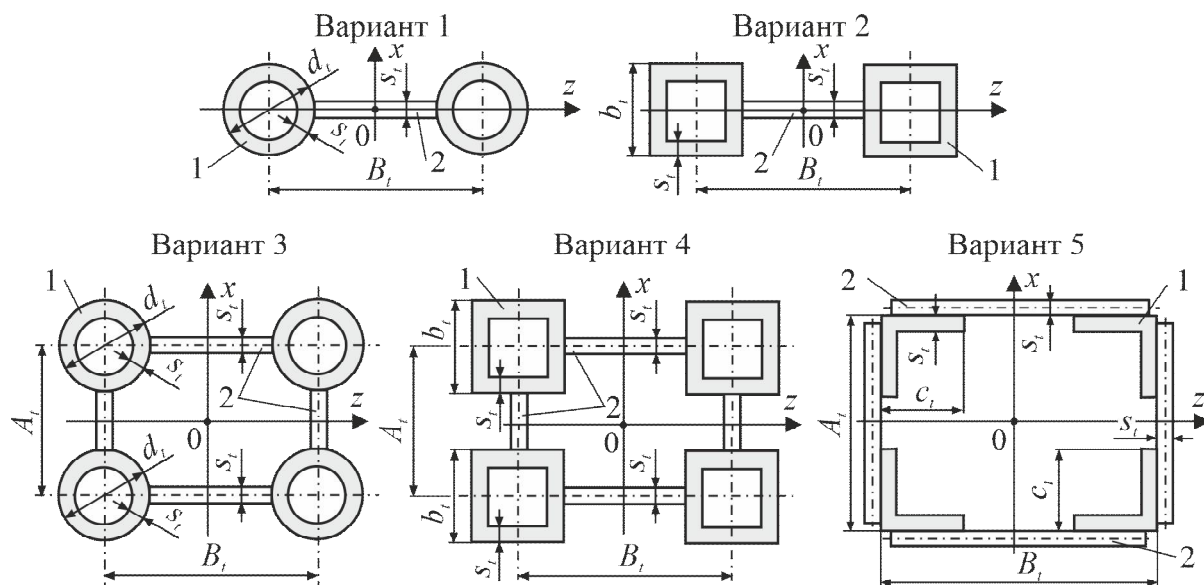


Рис. 1. Варианты поперечных сечений промежуточных опор:  
 1 – несущая стойка; 2 – поперечная планка

$$J_{t2} = \frac{2s_t}{3}(b_t^3 - 3b_t^2s_t + 4b_ts_t^2 - 2s_t^3)$$

-вариант № 3

$$M_{t3} = 2H_t\rho_t s_t \left[ 2\pi(d_t - s_t) + \frac{k_b(A_t + B_t - 2d_t)s_t}{h_b} \right];$$

$$F_{t3} = 2F_{t1} = 4\pi s_t(d_t - s_t);$$

$$J_{t3} = 2J_{t1} + F_{t1}A_t^2/2 =$$

$$= \pi s_t [d_t^3 - 3d_t^2s_t + 4d_ts_t^2 - 2s_t^3 + 2(d_t - s_t)A_t^2];$$

- вариант № 4

$$M_{t4} = 2H_t\rho_t s_t \left[ 8(b_t - s_t) + \frac{k_b(A_t + B_t - 2b_t)s_t}{h_b} \right];$$

$$F_{t4} = 2F_{t2} = 16s_t(b_t - s_t);$$

$$J_{t4} = 2J_{t2} + F_{t2}A_t^2/2 =$$

$$= 8s_t \left[ \frac{(b_t^3 - 3b_t^2s_t + 4b_ts_t^2 - 2s_t^3)}{3} + 2(b_t - s_t)A_t^2 \right];$$

- вариант № 5

$$M_{t5} = 2H_t\rho_t s_t \left[ 2(2c_t - s_t) + \frac{k_b(A_t + B_t - 2c_t)s_t}{h_b} \right];$$

$$F_{t5} = 4(2c_t - s_t)s_t;$$

$$J_{t5} = s_t \left[ \frac{c_t s_t^2}{3} + (A_t - s_t)^2(c_t - s_t) + (A_t - c_t)^2 c_t \right],$$

где  $A_t$ ,  $B_t$ ,  $d_t$ ,  $b_t$ ,  $c_t$ ,  $s_t$  – характерные размеры поперечных сечений промежуточных опор (рис. 1);  $\rho_t$  – плотность материала промежуточной опоры;  $k_b$  – коэффициент, выражаю-

щий отношение ширины планки к ее толщине;  $h_b$  – шаг расположения поперечных планок по высоте промежуточной опоры.

На рис. 2 показана расчетная схема нагружения промежуточной опоры в процессе эксплуатации канатной дороги. На этой схеме показаны следующие силы, действующие на несущую металлоконструкцию промежуточной опоры:  $S_r$  – горизонтальное усилие натяжения несущего каната,  $T_{rb,l}$  и  $T_{rb,r}$  – осевые усилия натяжения левой и правой ветвей несущего каната,  $S_{ar}$  – горизонтальное усилие натяжения анкерного каната,  $T_{ar,l}$  и  $T_{ar,r}$  –

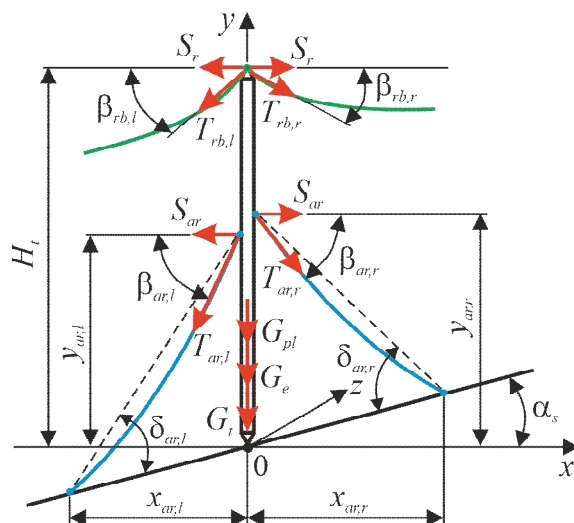


Рис. 2. Расчетная схема нагружения промежуточной опоры

осевые усилия натяжения левой и правой пар анкерных канатов,  $G_t$  – вес несущей металлоконструкции промежуточной опоры,  $G_e$  – вес установленного на оголовке промежуточной опоры вспомогательного технологического оборудования (роlikоопор, направляющих, отклоняющих и др. устройств),  $G_{pl}$  – вес загруженной транспортной платформы, включая устройство ее подвески к несущему канату.

Величина сжимающей продольной нагрузки, действующей на промежуточную опору в ее нижнем, наиболее нагруженном сечении, есть сумма действующей на оголовки опоры осевых усилий натяжения обоих ветвей несущих канатов, осевых усилий натяжения двух пар анкерных канатов, веса несущей металлоконструкции промежуточной опоры, собственного веса несущей металлоконструкции опоры, веса установленного на оголовке опоры вспомогательного технологического оборудования и веса загруженной транспортной платформы:

$$Q_t = \varepsilon_{rb} n_{rb} (T_{rb,l} \sin \beta_{rb,l} + T_{rb,r} \sin \beta_{rb,r} + q_{rb} L_t) + 2(T_{ar,l} \sin \beta_{ar,l} + T_{ar,r} \sin \beta_{ar,r}) + G_t + G_e + G_{pl}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{rb}$  – число ветвей канатной дороги, поддерживаемых промежуточной опорой;  $n_{rb}$  – число несущих канатов в конструкции канатной дороги;  $q_{rb}$  – погонный вес 1 м длины несущего каната;  $L_t$  – расстояние между соседними промежуточными опорами в горизонтальной плоскости;  $\beta_{rb,l}$ ,  $\beta_{rb,r}$  – углы между продольными осями несущего каната и промежуточной опоры слева и справа от опоры;  $\beta_{ar,l}$ ,  $\beta_{ar,r}$  – углы между продольными осями анкерных канатов и промежуточной опоры слева и справа от опоры.

Несущие канаты канатных дорог и анкерные канаты, несмотря на их натяжение силами  $S_r$  и  $S_{ar}$ , испытывают естественное провисание. В зависимости от угла наклона опорной поверхности  $\alpha_s$  провисание несущих канатов может происходить по одной из трех форм [2, 25]. В [19] был предложен безразмерный критерий, сформированный из полной погонной нагрузки на несущий канат от собственного веса и распределенной нагрузки от транспортируемого груза, величины

пролета между промежуточными опорами, горизонтального усилия натяжения несущего каната и перепада высот в пролете, позволяющий оценить, какая форма провисания каната будет реализовываться. В [13] предложена зависимость для определения порогового угла наклона опорной поверхности  $(\alpha_{sl})_t$ , при достижении которого форма I провисания каната меняется на форму II. Как показывают расчеты, обеими подходами можно пользоваться для определения формы естественного провисания несущих канатов канатных дорог, так как они дают одинаковый результат.

Учитывая предложенные в [26] формулы для расчета усилий натяжения и углов провисания несущих канатных дорог в зависимости от формы их провисания, то входящие в уравнение (1) параметры нагружения опоры несущим канатом определяются с помощью следующих уравнений:

при форме I провисания несущего каната (когда  $\alpha_s < (\alpha_{sl})_t$ )

$$\beta_{rb,l} = \arctg[0.5\psi_d S_r^{-1} (L_t q_R + \psi_d S_r \tg \alpha_s)],$$

$$\beta_{rb,r} = \arctg[0.5\psi_d S_r^{-1} (L_t q_R - \psi_d S_r \tg \alpha_s)],$$

$$T_{rb,l} = S_r \cos^{-1} \{ \arctg[0.5\psi_d S_r^{-1} (L_t q_R + \psi_d S_r \tg \alpha_s)] \},$$

$$T_{rb,r} = S_r \cos^{-1} \{ \arctg[0.5\psi_d S_r^{-1} (L_t q_R - \psi_d S_r \tg \alpha_s)] \},$$

при форме II провисания несущего каната (когда  $\alpha_s \geq (\alpha_{sl})_t$ )

$$\beta_{rb,l} = \arctg(\tg \alpha_s + 0.5\psi_d q_R L_t S_r^{-1}),$$

$$\beta_{rb,r} = \arctg(\tg \alpha_s - 0.5\psi_d q_R L_t S_r^{-1}),$$

$$T_{rb,l} = S_r \cos^{-1} [\arctg(\tg \alpha_s + 0.5\psi_d q_R L_t S_r^{-1})],$$

$$T_{rb,r} = S_r \cos^{-1} [\arctg(\tg \alpha_s - 0.5\psi_d q_R L_t S_r^{-1})],$$

где  $\psi_d$  – коэффициент динамичности для усилий в несущем канате при работе канатной дороги [10];  $L_t$  – величина пролета между промежуточными опорами в горизонтальной плоскости;  $q_R$  – расчетная распределенная суммарная погонная нагрузка на несущий канат от его собственного веса, веса транспортируемого груза вместе с грузовой платформой и узлом подвески, которая может быть выражена зависимостью:

$$q_R = q_{rb} + \xi_n \frac{G_{pl}}{n_{rb} L_{pl} \cos \alpha_s},$$

где  $L_{pl}$  – расстояние вдоль несущего каната между подвесками двух соседних грузовых платформ;  $\xi_n$  – коэффициент, учитывающий возможную неравномерность распределения нагрузки между соседними несущими канатами (при  $n_{rb} = 1$  коэффициент  $\xi_n = 1$ , при  $n_{rb} > 1$  коэффициент  $\xi_n > 1$ ).

Естественное провисание анкерных канатов всегда будет реализовываться по форме II вследствие значительного перепада высот, на которых расположены концы анкерных канатов. Учитывая различный наклон к горизонту геометрических линий, которые проходят через точки крепления концов анкерных канатов, расположенных слева и справа от промежуточной опоры, вследствие наклона опорной поверхности, то входящие в уравнение (1) параметры нагружения опоры анкерными канатами определяются с помощью следующих уравнений:

$$\beta_{ar,l} = \arctg(tg\alpha_{ar,l} + 0.5q_{ar}x_{ar,l}S_{ar}^{-1}),$$

$$\beta_{ar,r} = \arctg(tg\alpha_{ar,r} - 0.5q_{ar}x_{ar,r}S_{ar}^{-1}),$$

$$T_{ar,l} = S_{ar} \cos^{-1}[\arctg(tg\alpha_{ar,l} + 0.5q_{ar}x_{ar,l}S_{ar}^{-1})],$$

$$T_{ar,r} = S_{ar} \cos^{-1}[\arctg(tg\alpha_{ar,r} - 0.5q_{ar}x_{ar,r}S_{ar}^{-1})],$$

где  $\alpha_{ar,l}$ ,  $\alpha_{ar,r}$  – углы наклона к горизонту геометрических линий, проходящих через точки крепления концов расположенных слева и справа от промежуточной опоры анкерных канатов, которые определяются следующими зависимостями:

$$\alpha_{ar,l} = \arctg[(y_{ar,l} + x_{ar,l} \sin \alpha_s)x_{ar,l}^{-1}],$$

$$\alpha_{ar,r} = \arctg[(y_{ar,r} - x_{ar,r} \sin \alpha_s)x_{ar,r}^{-1}].$$

$$\beta_{ar,l,T \max} = \arctg(tg\alpha_{ar,l} + 0.5q_{ar}x_{ar,l}S_{ar,T \max}^{-1}),$$

$$\beta_{ar,r,T \max} = \arctg(tg\alpha_{ar,r} - 0.5q_{ar}x_{ar,r}S_{ar,T \max}^{-1}),$$

$$T_{ar,l,T \max} = S_{ar,T \max} \cos^{-1}[\arctg(tg\alpha_{ar,l} + 0.5q_{ar}x_{ar,l}S_{ar,T \max}^{-1})],$$

$$T_{ar,r,T \max} = S_{ar,T \max} \cos^{-1}[\arctg(tg\alpha_{ar,r} - 0.5q_{ar}x_{ar,r}S_{ar,T \max}^{-1})],$$

а начальные (максимальные) длины анкерных канатов с учетом их естественного провисания – с помощью следующих уравнений:

$$l_{ar,l,T \max} = \left(1 + \frac{q_{ar}^2 x_{ar,l}^2}{24S_{ar,T \max}^2}\right) \frac{x_{ar,l}}{\cos \alpha_{ar,l}},$$

Прямые линии, характеризующие идеальное положение анкерных канатов относительно опорной поверхности, выражаются углами:

$$\delta_{ar,l} = \arctg[(y_{ar,l} + x_{ar,l} \sin \alpha_s)x_{ar,l}^{-1}] - \alpha_s,$$

$$\delta_{ar,r} = \arctg[(y_{ar,r} - x_{ar,r} \sin \alpha_s)x_{ar,r}^{-1}] + \alpha_s.$$

При эксплуатации специальных канатных транспортных систем следует быть готовым к тому, что температура окружающей среды может иметь значительные колебания в пределах суток, сезонов или каких-либо других интервалов времени, характерных для условий эксплуатации мобильной канатной дороги. Характерный пример – канатная дорога на поверхности Луны. Вблизи лунного полюса в течении одних лунных суток (примерно 28 земных суток) температура изменяется от максимума (приблизительно 117 °C) до минимума (приблизительно -173 °C), т.е. на 290 °C [15]. В земных условиях такой перепад температур невозможен, тем не менее, в тяжелых климатических условиях перепады температур окружающего воздуха в несколько десятков градусов Цельсия вполне возможны.

Очевидно, для того, чтобы обеспечить нормальную работу анкерной системы промежуточных опор, необходимо выполнить натяжение анкерных канатов в период действия максимальной температуры с минимальным горизонтальным усилием натяжения  $S_{ar} = S_{ar,T \max}$ . В этих температурных условиях параметры нагружения опоры анкерными канатами определяются с помощью следующих уравнений:

$$l_{ar,r,T \max} = \left(1 + \frac{q_{ar}^2 x_{ar,r}^2}{24S_{ar,T \max}^2}\right) \frac{x_{ar,r}}{\cos \alpha_{ar,r}}.$$

С понижением температуры окружающей среды происходит уменьшение длины анкерного каната в зависимости от его началь-

ной длины, коэффициента температурного удлинения каната и величины снижения температуры окружающей среды. При этом происходит возрастание осевого усилия натяжения каната с минимальной величины  $T_{ar,l,T \max}$  или  $T_{ar,r,T \max}$  до максимальной:

$$T_{ar,l,T \min} = T_{ar,l,T \max} + \alpha_{temp} E_{ar} F_{ar} (T_{\max} - T_{\min}),$$

$$T_{ar,r,T \min} = T_{ar,r,T \max} + \alpha_{temp} E_{ar} F_{ar} (T_{\max} - T_{\min}),$$

где  $\alpha_{temp}$  – коэффициент температурного удлинения анкерного каната;  $E_{ar}$ ,  $F_{ar}$  – модуль упругости и площадь поперечного сечения анкерного каната;  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$  – максимальная и минимальная температура окружающей среды.

Указанные усилия  $T_{ar,l,T \min}$  и  $T_{ar,r,T \min}$  следует использовать в уравнении (1) в качестве расчетных усилий  $T_{ar,l}$  и  $T_{ar,r}$ .

Для определения углов между продольными осями анкерных канатов и промежуточной опоры слева и справа от опоры сначала необходимо определить их горизонтальные усилия натяжения путем решения нелинейных алгебраических уравнений вида:

$$\frac{S_{ar,l,T \min}}{\cos \left[ \arctg \left( tg \alpha_{ar,l} + \frac{q_{ar} x_{ar,l}}{2 S_{ar,l,T \min}} \right) \right]} - T_{ar,l,T \min} = 0,$$

$$\frac{S_{ar,r,T \min}}{\cos \left[ \arctg \left( tg \alpha_{ar,r} + \frac{q_{ar} x_{ar,r}}{2 S_{ar,r,T \min}} \right) \right]} - T_{ar,r,T \min} = 0,$$

$$\{z\}_1 = \{z_1 z_2 z_3 z_4 z_5 z_6\} = \{d_t s_t x_{ar,l} y_{ar,l} x_{ar,r} y_{ar,r}\}_1,$$

$$\{z\}_2 = \{z_1 z_2 z_3 z_4 z_5 z_6\} = \{b_t s_t x_{ar,l} y_{ar,l} x_{ar,r} y_{ar,r}\}_2,$$

$$\{z\}_3 = \{z_1 z_2 z_3 z_4 z_5 z_6 z_7\} = \{d_t s_t x_{ar,l} y_{ar,l} x_{ar,r} y_{ar,r} A_t\}_3,$$

$$\{z\}_4 = \{z_1 z_2 z_3 z_4 z_5 z_6 z_7\} = \{b_t s_t x_{ar,l} y_{ar,l} x_{ar,r} y_{ar,r} A_t\}_4,$$

$$\{z\}_5 = \{z_1 z_2 z_3 z_4 z_5 z_6 z_7\} = \{d_t s_t x_{ar,l} y_{ar,l} x_{ar,r} y_{ar,r} A_t\}_5.$$

Окончательно задача оптимизации массы промежуточных опор формулируется следующим образом: для нахождения вектора оптимальных значений управляемых параметров  $\{z\}_{opt,i}$  применительно к  $i$ -му конструктивному варианту необходимо минимизировать целевую функцию

а затем найти искомые углы по следующим зависимостям:

$$\beta_{ar,l,T \min} = \arctg(tg \alpha_{ar,l} + 0.5 q_{ar} x_{ar,l} S_{ar,l,T \min}^{-1}),$$

$$\beta_{ar,r,T \min} = \arctg(tg \alpha_{ar,r} - 0.5 q_{ar} x_{ar,r} S_{ar,r,T \min}^{-1}).$$

Указанные углы  $\beta_{ar,l,T \min}$  и  $\beta_{ar,r,T \min}$  следует использовать в уравнении (1) в качестве расчетных углов  $\beta_{ar,l}$  и  $\beta_{ar,r}$ .

При использовании в качестве критерия оптимальности конструкции промежуточной опоры достижение минимума общей массы, его математическое выражение для  $i$ -го варианта поперечного сечения опоры будет иметь следующий вид:

$$K_{opt,i} = M_{ti} + 2m_{ar,0} d_{ar}^2 (l_{ar,l,T \max} + l_{ar,r,T \max}), \quad (2)$$

где  $m_{ar,0}$  – коэффициент уравнения регрессии  $m_{ar} = m_{ar,0} d_{ar}^2$ , аппроксимирующего зависимость массы анкерного каната длиной 1 м  $m_{ar}$  от его диаметра  $d_{ar}$  [2].

Варьируемыми в ходе оптимизации параметрами являются характерные размеры поперечного сечения несущих стоек, а также геометрические размеры, характеризующие присоединение анкерных канатов к промежуточной опоре. Таким образом, векторы управляемых параметров оптимизации для исследуемых конструктивных вариантов будут иметь вид:

$$O_i(\{z\}_i) = M_{ti} + 2m_{ar,0} d_{ar}^2 (l_{ar,l,T \max} + l_{ar,r,T \max}) \rightarrow \min \quad (3)$$

при ограничениях неравенствами:

- ограничения на размеры поперечного сечения

$$0.5z_1 - z_2 \geq 0;$$

$$z_2 - \gamma_s z_1 \geq 0;$$

для вариантов 1 и 2

$$z_j \geq 0, \quad j = 1 \dots 6;$$

для вариантов 3, 4 и 5

$$z_j \geq 0, \quad j = 1 \dots 7;$$

$$A_{t \max} - z_7 \geq 0;$$

$$z_7 - 2z_1 \geq 0;$$

- ограничения на расположение крепления анкерных канатов к металлоконструкции промежуточной опоры

$$H_t - z_4 \geq 0;$$

$$H_t - z_6 \geq 0;$$

$$z_4 - \gamma_h H_t \geq 0;$$

$$z_6 - \gamma_h H_t \geq 0;$$

- ограничение на прочность стойки на сжатие под действием эксплуатационной нагрузки

для варианта 1

для варианта 1

$$(z_1^3 - 3z_1^2 z_2 + 4z_1 z_2^2 - 2z_2^3) z_2 - \frac{32 F_t H_t^2}{\pi^3 E_t [n_{dur}]} \geq 0;$$

для варианта 2

$$(z_1^3 - 3z_1^2 z_2 + 4z_1 z_2^2 - 2z_2^3) z_2 - \frac{6 F_t H_t^2}{\pi^2 E_t [n_{dur}]} \geq 0,$$

для варианта 3

$$z_2 \left[ z_1^3 - 3z_1^2 z_2 + 4z_1 z_2^2 - 2z_2^3 + 2(z_1 - z_2) z_7^2 \right] - \frac{4 F_t H_t^2}{\pi^3 E_t [n_{dur}]} \geq 0,$$

для варианта 4

$$z_2 \left[ \frac{z_1^3 - 3z_1^2 z_2 + 4z_1 z_2^2 - 2z_2^3}{2} + (z_1 - z_2) z_7^2 \right] - \frac{16 F_t H_t^2}{\pi^2 E_t [n_{dur}]} \geq 0,$$

для варианта 5

$$z_2 \left[ \frac{z_1 z_2^2}{3} + (z_7 - z_2)^2 (z_1 - z_2) + (z_7 - z_1)^2 z_1 \right] - \frac{4 F_t H_t^2}{\pi^2 E_t [n_{dur}]} \geq 0,$$

- ограничение диаметра анкерного каната  $d_{ar}$  его максимальным  $d_{ar, \max}$  и минимальным  $d_{ar, \min}$  значениями:

$$d_{ar, \max} - \frac{\sqrt{r_{ar,1}^2 - 4r_{ar,2}(r_{ar,0} - [n]_{ar} T_{ar,l,T \min})} - r_{ar,1}}{2r_{ar,2}} \geq 0,$$

$$d_{ar, \max} - \frac{\sqrt{r_{ar,1}^2 - 4r_{ar,2}(r_{ar,0} - [n]_{ar} T_{ar,r,T \min})} - r_{ar,1}}{2r_{ar,2}} \geq 0,$$

$$\frac{\sqrt{r_{ar,1}^2 - 4r_{ar,2}(r_{ar,0} - [n]_{ar} T_{ar,l,T \min})} - r_{ar,1}}{2r_{ar,2}} - d_{ar,\min} \geq 0,$$

$$\frac{\sqrt{r_{ar,1}^2 - 4r_{ar,2}(r_{ar,0} - [n]_{ar} T_{ar,r,T \min})} - r_{ar,1}}{2r_{ar,2}} - d_{ar,\min} \geq 0,$$

- ограничение осевого усилия натяжения анкерного каната, исходя из его наибольшего возможного разрывного усилия  $R_{ar}(d_{ar,\max})$ , т.е. разрывного усилия каната максимального диаметра  $d_{ar,\max}$ :

$$R_{ar}(d_{ar,\max}) - [n]_{ar} T_{ar,l,T \min} \geq 0,$$

$$R_{ar}(d_{ar,\max}) - [n]_{ar} T_{ar,r,T \min} \geq 0,$$

- ограничение угла наклона прямой линии, характеризующей положение анкерного каната относительно опорной поверхности, минимальным  $[\delta_{ar}]_{\min}$  и максимальным  $[\delta_{ar}]_{\max}$  допустимыми значениями:

$$\arctg[(z_4 + z_3 \sin \alpha_s) z_3^{-1}] - \alpha_s - [\delta_{ar}]_{\min} \geq 0,$$

$$\arctg[(z_6 - z_5 \sin \alpha_s) z_5^{-1}] + \alpha_s - [\delta_{ar}]_{\min} \geq 0,$$

$$[\delta_{ar}]_{\max} - \arctg[(z_4 + z_3 \sin \alpha_s) z_3^{-1}] + \alpha_s \geq 0,$$

$$[\delta_{ar}]_{\max} - \arctg[(z_6 - z_5 \sin \alpha_s) z_5^{-1}] - \alpha_s \geq 0,$$

- ограничение угла наклона прямой линии, характеризующей положение левого анкерного каната относительно продольной оси промежуточной опоры, минимальным  $[\varphi_{ar}]_{\min}$  допустимым значением:

$$\arctg[z_3(z_4 + z_3 \sin \alpha_s)^{-1}] - [\varphi_{ar}]_{\min},$$

где  $\gamma_s$  - минимальный коэффициент относительной толщины стенки (рекомендуется значение  $\gamma_s$  в интервале от 0,05 до 0,15);  $\gamma_h$  - относительный коэффициент, определяющий минимальную допустимую высоту крепления анкерного каната к промежуточной опоре;  $A_{t\max}$  - максимально допустимое значение размера  $A_i$ ;  $[n_{comp}]$ ,  $[n_{dur}]$  - коэффициенты запаса работоспособности стойки при сжатии и потери устойчивости (рекомендуются значения этих коэффициентов в интервале от 1,2 до 2);  $\sigma_y$ ,  $E_t$  - предел текучести и модуль упругости Юнга материала стойки;  $[n]_{ar}$  - коэффициент запаса прочно-

сти анкерного каната;  $r_{ar,0}$ ,  $r_{ar,1}$ ,  $r_{ar,2}$  - коэффициенты уравнения регрессии

$$R_{ar} = r_{ar,0} + r_{ar,1} d_{ar} + r_{ar,2} d_{ar}^2,$$

аппроксимирующего зависимость разрывного усилия анкерного каната  $R_{ar}$  от его диаметра  $d_{ar}$  [2].

Представленные выше ограничения целевой функции  $O(\{z\}_i)$  формируют шестимерную (для вариантов 1 и 2) или семимерную (для вариантов 3 – 5) область допустимых значений управляемых параметров, в пределах которой требуется найти такое оптимальное сочетание параметров в векторе  $\{z\}_{opt,i}$ , которое бы минимизировало значение целевой функции (3). Для этого необходимо использовать один из прямых методов условной оптимизации [27], основанный на непосредственном вычислении величины целевой функции  $O(\{z\}_i)$ .

Для проведения оптимизации в соответствии с критерием оптимальности (2) необходим предварительный расчет величины сжимающей продольной нагрузки, действующей на промежуточную опору в ее нижнем, наиболее нагруженном сечении  $Q_i$  (1). Однако при этом необходимо знать осевые усилия и углы наклона анкерных канатов, которые определяются только по завершении процедуры минимизации целевой функции (3). Таким образом, процедура решения задачи оптимизации массы промежуточной опоры должна носить итерационный характер и включать выполнение ряда этапов:

1. Задание начального приближения диаметра анкерного каната  $d_{ar}^{(0)}$ , причем  $d_{ar,\min} < d_{ar}^{(0)} < d_{ar,\max}$ .

2. Выполнение расчетов необходимых параметров, входящих в выражение для критерия оптимальности, и решение задачи оптимизации целевой функции  $O(\{z\}_i)$  с уче-

том накладываемых на нее ограничений (первая итерация оптимизации).

3. Определение диаметра анкерного каната для первой итерации  $d_{ar}^{(1)}$ , как наибольшего значения из двух величин:

$$d_{ar}^{(1)} = \sqrt{\frac{T_{ar,l,T \min} - T_{ar,l,T \max}}{\alpha_{temp} E_{ar} (T_{\max} - T_{\min}) f_{ar,0}}},$$

$$d_{ar}^{(1)} = \sqrt{\frac{T_{ar,r,T \min} - T_{ar,r,T \max}}{\alpha_{temp} E_{ar} (T_{\max} - T_{\min}) f_{ar,0}}},$$

где  $f_{ar,0}$  – коэффициент уравнения регрессии  $F_{ar} = f_{ar,0} d_{ar}^2$ , аппроксимирующего зависимость площади поперечного сечения анкерного каната  $F_{ar}$  от его диаметра  $d_{ar}$  [2].

При вычислении усилий  $T_{ar,l,T \min}$ ,  $T_{ar,l,T \max}$ ,  $T_{ar,r,T \min}$  и  $T_{ar,r,T \max}$  необходимо использовать полученные оптимальные размеры  $Z_{3,opt}$ ,  $Z_{4,opt}$ ,  $Z_{5,opt}$  и  $Z_{6,opt}$ .

4. Если разница в величине диаметров  $|d_{ar}^{(0)} - d_{ar}^{(1)}| > \varepsilon_d$  (где  $\varepsilon_d$  – требуемая абсолютная погрешность определения диаметра анкерного каната), необходимо проведение

следующей, второй итерации. При этом используется значение диаметра анкерного каната  $d_{ar}^{(1)}$ .

5. Итерационная процедура повторяется до тех пор, пока после  $k$ -й итерации не будет соблюдаться условие  $|d_{ar}^{(k)} - d_{ar}^{(k-1)}| \leq \varepsilon_d$ .

### 3. Результаты и обсуждение

Оптимизационная математическая модель минимизации массы промежуточных опор мобильных канатных дорог, включая их анкеровку, была реализована в компьютерной программе «Mass\_Tower\_Optimization\_RW».

Чтобы выполнить анализ направленности и степени влияния основных режимных и конструктивных характеристик мобильной канатной дороги и промежуточных опор на их оптимальную массу и оптимальные значения их ключевых технических параметров был рассмотрен базовый модельный вариант. Основные исходные данные для базового варианта приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные исходные данные для базового варианта мобильной канатной дороги

| Технические характеристики                                                                     | Обозначение        | Величина             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------|
| Максимальная температура окружающей среды, °C                                                  | $T_{\max}$         | 50                   |
| Минимальная температура окружающей среды, °C                                                   | $T_{\min}$         | -25                  |
| Угол наклона опорной поверхности, град                                                         | $\alpha_s$         | 30                   |
| Шаг установки промежуточных опор, м                                                            | $L_t$              | 50                   |
| Высота промежуточной опоры, м                                                                  | $H_t$              | 5                    |
| Шаг расположения транспортных платформ, м                                                      | $L_{pl}$           | 20                   |
| Число несущих канатов                                                                          | $n_{rb}$           | 1                    |
| Число ветвей канатной системы, расположенных на опоре                                          | $\varepsilon_{rb}$ | 2                    |
| Горизонтальное усилие натяжения несущего каната, кН                                            | $S_r$              | 10                   |
| Горизонтальное усилие натяжения анкерного каната при максимальной температуре эксплуатации, кН | $S_{ar,T \max}$    | 1                    |
| Диаметр несущего каната, мм                                                                    | $d_{rb}$           | 20                   |
| Материал промежуточной опоры                                                                   | -                  | Сталь 09Г2С          |
| Тип анкерного каната                                                                           | -                  | ГОСТ 3079-80         |
| Коэффициент температурного расширения анкерного каната, 1/°C                                   | $\alpha_{temp}$    | $15,9 \cdot 10^{-6}$ |

В табл. 2 приведены оптимальные значения основных технических параметров для базового варианта мобильной канатной дороги, расположенной на земной поверхности, при всех вариантах конструктивного ис-

полнения поперечного сечения промежуточной опоры.

Таблица 2

Оптимальные значения основных технических параметров для базового варианта  
(условия Земли)

| Технический параметр                                 | Вариант конструктивного исполнения |       |       |       |      |
|------------------------------------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|------|
|                                                      | 1                                  | 2     | 3     | 4     | 5    |
| Наружный размер несущей стойки $d_t (b_t, c_t)$ , мм | 56,3                               | 49,6  | 9,9   | 7,5   | 11,6 |
| Толщина стенки несущей стойки $s_t$ , мм             | 15,6                               | 18,8  | 1,5   | 2,2   | 5,6  |
| Х-координата крепления левого анкерного каната, м    | 1,24                               |       |       |       |      |
| У-координата крепления левого анкерного каната, м    | 4,0                                |       |       |       |      |
| Х-координата крепления правого анкерного каната, м   | 1,79                               |       |       |       |      |
| У-координата крепления правого анкерного каната, м   | 4,0                                |       |       |       |      |
| Расстояние $A_t$ между несущими стойками, мм         | -                                  | -     | 159,3 | 143,9 | 25,6 |
| Сжимающая продольная нагрузка на опору $Q_t$ , кН    | 29,6                               | 29,6  | 31,1  | 29,9  | 30,1 |
| Полная масса промежуточной опоры, кг                 | 165,6                              | 153,9 | 7,8   | 9,6   | 19,4 |
| Масса металлоконструкции опоры $M_t$ , кг            | 164,1                              | 152,4 | 6,3   | 8,1   | 17,9 |
| Масса анкерных канатов, кг                           | 1,5                                |       |       |       |      |
| Диаметр анкерного каната $d_{ar}$ , мм               | 5,0                                |       |       |       |      |
| Длина левого анкерного каната $l_{ar,l,Tmax}$ , м    | 4,78                               |       |       |       |      |
| Длина правого анкерного каната $l_{ar,r,Tmax}$ , м   | 3,59                               |       |       |       |      |

Варианты 3, 4 и 5 конструктивного исполнения поперечного сечения промежуточной опоры выгодно отличаются от вариантов 1 и 2. Это объясняется меньшей гибкостью таких опор как решетчатых стержневых конструкций за счет создания поперечной протяженности их несущей металлоконструкции, так как, как показывает анализ ограничений задачи оптимизации, прочность опор лимитируется условием потери устойчивости. Наблюдается весьма заметное отличие вариантов 3, 4 и 5 от вариантов 1 и 2 по наружному размеру и стенок несущих стоек. В частности, между вариантами 1 и 3 или вариантами 2 и 4, несущие стойки которых имеют геометрически одинаковые поперечные сечения, разница составляет 26 и 19 раз соответственно.

Для всех вариантов оказываются одинаковыми по величине такие параметры промежуточной опоры оптимальной конструкции, как горизонтальные координаты крепления к опорной поверхности левого и правого анкерных канатов  $x_{ar,l}$  и  $x_{ar,r}$ , вертикальные координаты крепления к металлоконструкции промежуточной опоры левого и правого анкерных канатов  $y_{ar,l}$  и  $y_{ar,r}$ , диаметр  $d_{ar}$  и масса анкерных канатов, длины левого и правого анкерных канатов  $l_{ar,l}$  и  $l_{ar,r}$ .

Оптимальные значения вертикальных координат крепления к металлоконструкции промежуточной опоры левого и правого анкерных канатов  $y_{ar,l}$  и  $y_{ar,r}$  соответствуют минимально допустимой высоте их установки  $y_h H_t$ , что объясняется необходимостью минимизации длины канатов, чтобы обеспечить минимум их массы. Поэтому включение в векторы управляемых параметров  $\{z\}_i$  переменных  $y_{ar,l}$  и  $y_{ar,r}$  можно в дальнейшем рассматривать как чрезмерное. Продольная сжимающая нагрузка  $Q_t$ , действующая на оптимальную по массе промежуточную опору, различна для разных конструктивных вариантов, однако разница незначительна (в пределах  $\pm 2,5\%$ ). Это объясняется тем, что основной вклад в ее формирование вносят, в первую очередь, усилия натяжения несущих канатов, во вторую – усилия натяжения анкерных канатов, которые одинаковы для всех конструктивных вариантов промежуточной опоры. Разница в величине нагрузки  $Q_t$  связана лишь с разницей веса металлоконструкции промежуточной опоры.

Следует отметить, что для варианта 5 оптимальная длина горизонтальной планки  $A_t$  в точности равна удвоенному размеру стороны уголкового профиля несущей стойки. Таким образом, эту планку можно исключить из

конструкции опоры, заменив пары боковых уголков соседних несущих стоек объединенными стойками, имеющими поперечный профиль в виде швеллера. Это позволит немного уменьшить оптимальную массу промежуточной опоры, указанную в табл. 2.

На оптимальную величину массы промежуточной опоры заметное влияние наряду с некоторыми другими параметрами оказывает угол наклона опорной поверхности. Количественно такое влияние применительно к рассмотренным конструктивным вариантам можно видеть на рис. 3. Как и следует ожидать, максимально массивные промежуточные опоры требуются для весьма малых уг-

лов  $\alpha_s$  в пределах нескольких градусов наклона поверхности. При отклонении опорной поверхности от строго горизонтального положения оптимальные значения массы резко снижаются и достигают некоторого минимума. Для результатов, представленных на рис. 3, минимум лежит в интервале от 2 до 8°. Затем наблюдается рост оптимальных значений массы промежуточной опоры, причем его интенсивность несравнима с интенсивностью снижения при  $\alpha_s \rightarrow 0$ . Такое поведение связано с изменением формы естественного провисания несущих канатов [25] в области минимальных значений оптимальной массы промежуточной опоры.

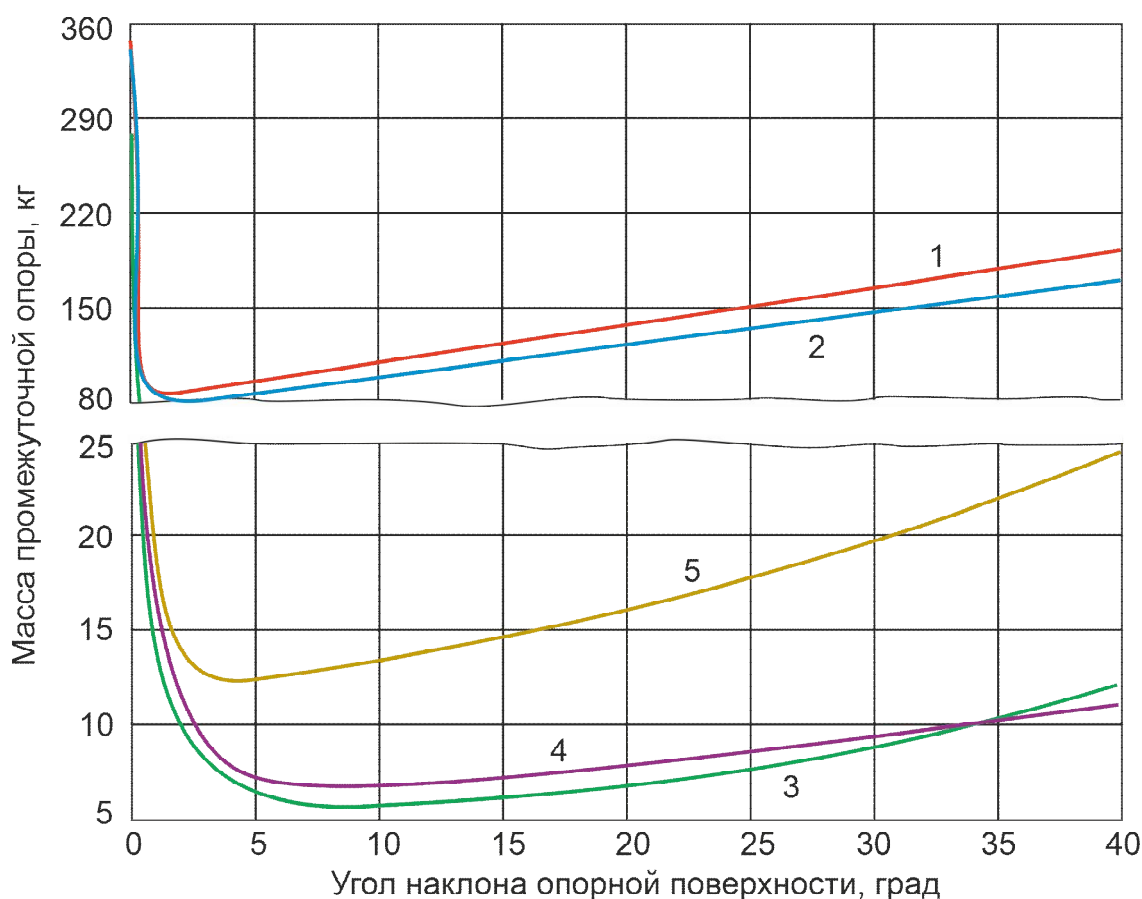


Рис. 3. Влияние угла наклона опорной поверхности на изменение оптимальной массы промежуточной опоры (номера кривых соответствуют вариантам конструктивного исполнения поперечного сечения опоры)

Для сравнения в табл. 3 приведены те же параметры, которые представлены в табл. 2, но применительно к мобильной канатной дорожке на лунной поверхности.

Отмеченные выше замечания относительно результатов оптимизации промежу-

точных опор для мобильных канатных дорог, эксплуатирующихся в земных условиях, принципиально сходны и для случая лунных мобильных канатных дорог. Более высокие значения оптимальных масс промежуточной опоры для всех конструктивных вариантов

Таблица 3

Оптимальные значения основных технических параметров для базового варианта  
(условия Луны)

| Технический параметр                                 | Вариант конструктивного исполнения |       |       |       |      |
|------------------------------------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|------|
|                                                      | 1                                  | 2     | 3     | 4     | 5    |
| Наружный размер несущей стойки $d_l (b_l, c_l)$ , мм | 60,2                               | 52,9  | 10,6  | 8,0   | 13,2 |
| Толщина стенки несущей стойки $s_l$ , мм             | 16,6                               | 13,7  | 3,1   | 2,3   | 6,0  |
| Х-координата крепления левого анкерного каната, м    | 1,24                               |       |       |       |      |
| У-координата крепления левого анкерного каната, м    | 4,0                                |       |       |       |      |
| Х-координата крепления правого анкерного каната, м   | 1,79                               |       |       |       |      |
| У-координата крепления правого анкерного каната, м   | 4,0                                |       |       |       |      |
| Расстояние $A_l$ между несущими стойками, мм         | -                                  | -     | 132,7 | 153,5 | 25,6 |
| Сжимающая продольная нагрузка на опору $Q_l$ , кН    | 38,5                               | 38,4  | 40,2  | 38,8  | 39,1 |
| Полная масса промежуточной опоры, кг                 | 189,5                              | 176,2 | 14,9  | 11,7  | 24,4 |
| Масса металлоконструкции опоры $M_l$ , кг            | 187,0                              | 173,7 | 12,4  | 9,2   | 20,7 |
| Масса анкерных канатов, кг                           | 2,5                                |       |       |       |      |
| Диаметр анкерного каната $d_{ar}$ , мм               | 6,5                                |       |       |       |      |
| Длина левого анкерного каната $l_{ar,l,Tmax}$ , м    | 4,78                               |       |       |       |      |
| Длина правого анкерного каната $l_{ar,l,Tmax}$ , м   | 3,59                               |       |       |       |      |

объясняются тем, что для лунных условий эксплуатации характерен весьма значительный перепад температур окружающей среды в течение одних лунных суток – до 320 °. Это вызывает большее изменение длины анкерных канатов для условий работы при максимальной и минимальной температурах и, как следствие, большие значения осевых усилий натяжения в левых и правых анкерных канатах.

#### 4. Заключение

В данной статье рассмотрена одна из сторон важной технической проблемы совершенствования методов проектирования основных структурных компонентов канатных дорог. Применительно к задаче проектирования их поддерживающих конструкций была разработана оптимизационная математическая модель стержневой решетчатой промежуточной опоры с пятью различными вариантами конструктивного исполнения поперечного сечения с учетом канатной анкерной опоры. Оптимизация металлоконструкции промежуточной опоры по критерию достижения минимума массы системы «металлоконструкция опоры – анкерные канаты» позволяет как выявить наиболее благоприятные для практического использова-

ния формы поперечных сечений несущей металлоконструкции, так и определить оптимальные значения их характерных размеров.

В условиях действия значительных продольных сжимающих нагрузок, обусловленных усилиями натяжения несущих и анкерных канатов, использование конструктивных вариантов, для которых характерно снижение гибкости металлоконструкции промежуточной опоры весьма положительно сказывается на ее оптимальной массе. Разница может достигать нескольких десятков раз.

Как показали расчеты, проведенные для базового варианта мобильной канатной дороги, оптимальная масса промежуточной опоры с учетом ее анкерной заделки зависит от угла наклона опорной поверхности. Поэтому при оптимальном проектировании металлоконструкций промежуточных опор мобильных канатных дорог необходимо ориентироваться на максимально необходимый угол наклона опорной поверхности, который и следует принимать за расчетный. Однако при этом надо учитывать, что такие поддерживающие конструкции могут в дальнейшем применяться при том рельефе местности, при котором будут реализовываться условия естественного провисания несущих или не-

сущест-тяговых канатов по форме II [25]. При близким к горизонтальным условиям рельефа, т.е. при условиях естественного провисания указанных канатов по форме I, необхо-

димо использовать поддерживающие конструкции с другими значениями оптимальной массы и оптимальными значениями характерных размеров поперечного сечения.

### Список литературы

1. Vuchic V.R. Urban Transit Systems and Technology. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 602 p.
2. Короткий А.А., Лагереv А.В., Месхи Б.Ч., Лагереv И.А., Панфилов А.В. Развитие транспортной инфраструктуры крупных городов и территорий на основе технологии канатного метро. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. 344 с. DOI: 10.5281/zenodo.1311913
3. 15. Короткий А.А. Канатный транспорт (канатные дороги и лифты). Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. 114 с.
4. Беркман М.Б., Бовский Г.Н., Куйбида Г.Г. Подвесные канатные дороги. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
5. Walker S.C. Mine Winding and Transport. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1988. 546 p.
6. Gromov E.V., Bilin A.L., Belogorodtsev O.V., Nagovitsyn G.O. Substantiation of Mining-and-Transportation System Type and Parameters for Mining of Ore Deposits in the Conditions of the on the Kola Peninsula // Journal of Mining Science. 2018. T. 54. № 4. C. 591–598. DOI: 10.1134/S1062739118044051
7. Diwakar K.C., Maraseni T., Jamir C., Magar R.T., Tuladhar F. Effectiveness of gravity goods ropeways in market participation of smallholder farmers in uplands // Transportation. 2020. № 47. P. 1393–1414. DOI: 10.1007/s11116-018-9970-8
8. Jenefar S., Suresh A., Nandhini T., Abinayaa B., Rasika M., Sanjay M. Design and Fabrication of Portable Cableway System for Efficient Transportation of Agricultural Commodities // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology. 2025. Vol. 13. No. 4. P. 2100-2005DOI: 10.22214/ijraset.2025.68676
9. Lates D., Moica S., Veres C., Pozdirca A., Harpa E. Design of Smart Forestry Cableway // Procedia Manufacturing. 2019. No. 32. P. 79–86. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.186

### References

1. Vuchic V.R. Urban Transit Systems and Technology. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2007. 602 p.
2. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meskhi B.Ch., Lagerev I.A., Panfilov A.V. *Razvitie transportnoy infrastruktury krupnykh gorodov i territoriy na osnove tekhnologii kanatnogo metro* [The development of transport infrastructure of large cities and territories on the basis of technology of passenger ropeways]. Rostov-na-Donu, DGTU, 2017. 344 p. DOI: 10.5281/zenodo.1311913 (In Russian)
3. Korotkiy A.A. *Kanatnyy transport (kanatnye dorogi i lifty)* [Cable transport (cable cars and elevators)]. Rostov-na-Donu, DGTU, 2018. 114 p. (In Russian)
4. Berkman M.B., Bovskiy G.N., Kuybida G.G. *Podvesnye kanatnye dorogi* [Aerial ropeways]. Moscow, Mashinostroenie, 1984. 264 p.
5. Walker S.C. Mine Winding and Transport. Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V., 1988. 546 p.
6. Gromov E.V., Bilin A.L., Belogorodtsev O.V., Nagovitsyn G.O. Substantiation of Mining-and-Transportation System Type and Parameters for Mining of Ore Deposits in the Conditions of the on the Kola Peninsula. *Journal of Mining Science*, 2018, Vol. 54, No. 4, pp. 591–598. DOI: 10.1134/S1062739118044051
7. Diwakar K.C., Maraseni T., Jamir C., Magar R.T., Tuladhar F. Effectiveness of gravity goods ropeways in market participation of smallholder farmers in uplands. *Transportation*, 2020, No. 47, pp. 1393–1414. DOI: 10.1007/s11116-018-9970-8
8. Jenefar S., Suresh A., Nandhini T., Abinayaa B., Rasika M., Sanjay M. Design and Fabrication of Portable Cableway System for Efficient Transportation of Agricultural Commodities. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 2025, Vol. 13, No. 4, pp. 2100-2005DOI: 10.22214/ijraset.2025.68676

10. Короткий А.А., Лагереv А.В., Месхи Б.Ч., Лагереv И.А., Панфилов А.В., Таричко В.И. Транспортно-логистические технологии и машины для цифровой урбанизированной среды. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. 268 с. DOI: 10.5281/zenodo.3551132
11. Olszyna G., Rokita T., Tytko A., Wójcik M. Role of cable transport in the management and development of the mountain areas // *Geomatics, Landmanagement and Landscape*. 2013. No. 4. P. 63–74. DOI: 10.15576/GLL/2013.4.63
12. Varch T., Erber G., Visser R., Spinelli R., Harrill H., Stampfer K. Advances in Cable Yarding: A Review of Recent Developments in Skyline Carriage Technology // *Current Forestry Reports*. 2021. No. 7. P.181–194. DOI: 10.1007/s40725-021-00150-x
13. Лагереv А.В., Лагереv И.А., Таричко В.И. Надежность и безопасность эксплуатации мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Брянск: РИСО БГУ, 2022. 207 с.
14. Rolenec O., Palasiewicz T., Zalesky Ja., Kyjovsky Ja. Possible Ways of Evaluation of Industrially Manufactured Means for Low-Bearing Terrain Strengthening Usable in Military Operations // *International Journal Advanced Science Engineering. Information Technology*. 2021. Vol.11. No.5. P. 1772-1779.
15. NASA'S Management of the Artemis Missions (Report IG-22-003 (A 20 008 01)). (2021). NASA, Office of Inspector General. <https://oig.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/02/IG-22-003.pdf>
16. Sauti G., Gardner J.M. Kim J.-W., Jensen B.D., Siochi E.J. LuZip: Lunar Zip-line, Gondola and Cable-based Transportation for Artemis Moon Missions Mobility and Dust Avoidance (Report NASA/TM–20240005839; NASA STI Program Report Series). Langley Research Center. 2024.
17. Pestal E. Seilbahnen und Seilkrane in Holz und Materialtransport. Wien: Fromme, 1961.
18. Дукельский А.И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны. М.-Л.: Машиностроение, 1966. 484 с.
19. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Design of 10.22214/ijraset.2025.68676
9. Lates D., Moica S., Veres C., Pozdirca A., Harpa E. Design of Smart Forestry Cableway. *Procedia Manufacturing*, 2019, No. 32, pp. 79–86. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.186
10. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meskhi B.Ch., Lagerev I.A., Panfilov A.V., Tarichko V.I. *Transportno-logisticheskie tekhnologii i mashiny dlya tsifrovoy urbanizirovannoy sredy* [Transport and logistics technologies and machines for the digital urban environment]. Ros-tov-on-Don, Don State Technical University, 2019. 268 p. DOI: 10.5281/zenodo.3551132 (In Russian)
11. Olszyna G., Rokita T., Tytko A., Wójcik M. Role of cable transport in the management and development of the mountain areas. *Geomatics, Landmanagement and Landscape*, 2013, No. 4, pp. 63–74. DOI: 10.15576/GLL/2013.4.63
12. Varch T., Erber G., Visser R., Spinelli R., Harrill H., Stampfer K. Advances in Cable Yarding: A Review of Recent Developments in Skyline Carriage Technology. *Current Forestry Reports*, 2021, No. 7, pp.181–194. DOI: 10.1007/s40725-021-00150-x
13. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Nadezhnost i bezopasnost ekspluatatsii mobilnykh transportno-peregruzochnykh kanatnykh kompleksov* [Reliability and safety of operation of mobile transport and overloading rope complexes]. Bryansk, RISO BGU, 2022. 207 p. (In Russian)
14. Rolenec O., Palasiewicz T., Zalesky Ja., Kyjovsky Ja. Possible Ways of Evaluation of Industrially Manufactured Means for Low-Bearing Terrain Strengthening Usable in Military Operations. *International Journal Advanced Science Engineering. Information Technology*, 2021, Vol.11, No.5, pp. 1772-1779.
15. NASA'S Management of the Artemis Missions (Report IG-22-003 (A 20 008 01)). (2021). NASA, Office of Inspector General. <https://oig.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/02/IG-22-003.pdf>
16. Sauti G., Gardner J.M. Kim J.-W., Jensen B.D., Siochi E.J. LuZip: Lunar Zip-line, Gondola and Cable-based Transportation for Artemis Moon Missions Mobility and Dust

Passenger Aerial Ropeway for Urban Environment // *Urban Rail Transit*. 2019. Vol.5. No.1. P. 17-28. DOI: 10.1007/s40864-018-0099-z.

20. Лагереv А.В., Лагереv И.А., Таричко В.И. Конструкции и основы проектирования мобильных транспортно-прегрузочных канатных комплексов. Брянск: РИСО БГУ, 2020. 207 с. DOI: 10.5281/zenodo.10581288

21. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Mobile aerial ropeways based on autonomous self-propelled chassis: designs and operation. /Sharma S.K., Upadhyay R.K., Kumar V., Valera H. (eds). *Transportation Energy and Dynamics. Energy, Environment, and Sustainability*. Springer, Singapore, 2023, pp. 355-380. DOI: 10.1007/978-981-99-2150-8\_15

22. Лагереv А.В., Лагереv И.А. Мобильные канатные дороги на базе аэромобильных канатных установок. Брянск: РИСО БГУ, 2023. 201 с.

23. Пат. 2818434 Рос. Федерация: МПК B61B 7/00. Модульная мобильная канатная дорога / Лагереv А.В.; заявитель и патенто-обладатель Лагереv А.В. – №2023131421; заявл. 28.11.2023; опубл. 02.05.2024, Бюл. № 13.

24. Королько А.С., Королько Н.С., Свойкин Ф.В., Игнатова Е.И., Россихин К.В., Денисова Е.В., Божбов В.Е. Исторические аспекты и современное состояние канатных установок для разных отраслей промышленности // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2026. Вып. 259. С. 215-236.

25. Лагереv А.В., Лагереv И.А. Влияние параметров рельефа на выбор оптимального шага промежуточных опор вдоль линии канатного метро // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2017. №3. С. 253-272. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-03-253-272

26. Лагереv А.В., Лагереv И.А., Таричко В.И. Определение усилий натяжения канатов при эксплуатации мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2022. № 3. С. 194-210. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-03-194-210

Avoidance (Report NASA/TM–20240005839; NASA STI Program Report Series). Langley Research Center. 2024.

17. Pestal E. *Seilbahnen und Seilkrane in Holz und Materialtransport*. Wien: Fromme, 1961.

18. Dukelskiy A.I. *Podvesnye kanatnye dorogi i kabelnye krany* [Overhead cableways and cable cranes]. Moscow-Leningrad, Mashinostroenie, 1966. 484 p. (In Russian)

19. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Design of Passenger Aerial Ropeway for Urban Environment. *Urban Rail Transit*, 2019, Vol.5, No.1, pp. 17-28. DOI: 10.1007/s40864-018-0099-z

20. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Konstruktsii i osnovy proektirovaniya mobilnykh transportno-peregruzochnykh kanatnykh kompleksov* [Structures and design fundamentals of mobile transporting and overloading rope facilities]. Bryansk, RISO BGU, 2020. 207 p. DOI: 10.5281/zenodo.10581288 (In Russian)

21. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Mobile aerial ropeways based on autonomous self-propelled chassis: designs and operation. In: Sharma S.K., Upadhyay R.K., Kumar V., Valera H. (eds). *Transportation Energy and Dynamics. Energy, Environment, and Sustainability*. Springer, Singapore, 2023, pp. 355-380. DOI: 10.1007/978-981-99-2150-8\_15

22. Lagerev A.V., Lagerev I.A. *Mobilnye kanatnye dorogi na base aeromobilnykh kanatnykh ustanovok* [Mobile ropeways based on airmobile rope units]. Bryansk, RISO BGU, 2023. 201 p. (In Russian)

23. Patent RU 2818434, B61B 7/00. *Modulnaya mobilnaya kanatnaya doroga* [Modular mobile ropeway]. Lagerev A.V. Declared 28.11.2023. Published 02.05.2024. (In Russian)

24. Korolko A.S., Korolko N.S., Svoikin F.V., Ignatova E.I., Rossikhin K.V., Denisova E.V., Bozhbov V.E. *Istoricheskie aspekty i sovremennoe sostoyanie kanatnykh ustanovok dlya raznykh otrasley promyshlennosti*. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii*, 2026, No. 259, pp. 215-236. (In Russian)

25. Lagerev A.V., Lagerev I.A. The effect

27. Лагереv А.В., Лагереv И.А. Оптимальное проектирование подъемно-транспортных машин. М.: Издательство Юрайт, 2021. 293 с.
- † of topography on the choice of optimal step  
† intermediate supports along the line of the cable metro. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No.3, pp. 253-272. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-03-253-272 (In Russian)
- † 26. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Determination of tension forces of ropes during the operation of mobile transport and reloading rope complexes. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.3, pp. 194-210. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-03-194-210 (In Russian)
- † 27. Lagerev A.V., Lagerev I.A. *Optimalnoe proektirovanie podemno-transportnykh mashin* [Optimal design of lifting and transport machines]. Moscow, Urayt, 2021. 293 p. (In Russian)