

УДК 625.54, 625.57

УСКОРЕННАЯ ОПТИМИЗАЦИОННАЯ ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССАЖИРСКОЙ ПОДВЕСНОЙ КАНАТНОЙ ДОРОГИ

ACCELERATED OPTIMIZATION EVALUATION OF THE MAIN TECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE PASSENGER AERIAL ROPEWAY

Лагереv А.В., Лагереv И.А.
Lagerev A.V., Lagerev I.A.

Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)
Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

Аннотация. В статье разработана математическая модель и методика ускоренной оптимизационной оценки основных технических характеристик пассажирской подвесной канатной дороги (шага и высоты промежуточных опор, усилия натяжения несущих канатов). Для вычисления оптимальных значений этих технических характеристик ранее была разработана задача технико-экономической оптимизации. В основу задачи оптимизации была положена минимизация целевой функции – стоимости затрат на строительство канатной дороги при учете ряда конструктивных ограничений. Ускоренная оптимизационная оценка основана на том, что положение точки минимума целевой функции следует искать вдоль линии одного из упомянутых ограничений – ограничения на минимальное усилие натяжения несущих канатов. Это позволило предложить два пути ускоренной оптимизационной оценки: 1) снижение размерности задачи оптимизации; 2) замена поиска минимума целевой функции на решение нелинейного алгебраического уравнения. Предложенный алгоритм ускоренной оптимизационной оценки основных технических характеристик подвесной канатной дороги позволяет получить в точности те же их значения, что и в результате решения разработанной ранее задачи технико-экономической оптимизации, но с применением более простых математических методов.

Ключевые слова: пассажирская подвесная канатная дорога, промежуточная опора, шаг опор, усилие натяжения каната, несущий канат, высота опоры, оптимизация, целевая функция, ограничения, стоимость.

Дата принятия к публикации: 01.07.2018
Дата публикации: 25.09.2018

Сведения об авторах:

Лагереv Александр Валерьевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе НИИ фундаментальных и прикладных исследований ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», bsu-avl@yandex.ru.
ORCID: 0000-0003-0380-5456.

Abstract. In the article the mathematical model and the technique of the accelerated optimization estimation of the main technical characteristics of the passenger aerial ropeway (step and height of intermediate supports, tension force of the bearing ropes) are developed. To calculate the optimal values of these technical characteristics, the task of technical and economic optimization was previously developed. The optimization task was based on the minimization of the objective function - the cost of the aerial ropeway construction, taking into account a number of structural constraints. The accelerated optimization estimate is based on the fact that the position of the minimum point of the objective function should be searched along the line of one of the mentioned constraints – constraint on the minimum of tension force of the bearing ropes. This allowed us to propose two ways of accelerated optimization evaluation: 1) reduction of the dimension of the optimization problem; 2) replacement of the search for the minimum of the objective function by the solution of a nonlinear algebraic equation. The proposed algorithm of accelerated optimization evaluation of the main technical characteristics of the passenger aerial ropeway allows to obtain exactly the same values as the result of solving the previously developed problem of technical and economic optimization, but with the use of more simple mathematical methods.

Keywords: passenger aerial ropeway, intermediate support, step supports, tension force of rope, supporting rope, height of support, optimization, objective function, constraints, cost.

Date of acceptance for publication: 01.07.2018
Date of publication: 25.09.2018

Authors' information:

Alexander V. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice director of Research Institute of Fundamental and Applied Research at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, bsu-avl@yandex.ru. ORCID: 0000-0003-0380-5456.

Лагереv Игорь Александрович – доктор технических наук, доцент, проректор по инновационной работе ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», lagerev-bgu@yandex.ru.
ORCID: 0000-0002-0921-6831.

Igor A. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Vice rector for Innovations at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, lagerev-bgu@yandex.ru.
ORCID: 0000-0002-0921-6831.

I. Введение.

Подвесные канатные дороги нашли широкое применение во многих странах мира в качестве непрерывного транспорта для организации пассажирских и грузовых перевозок [1, 2]. Пассажирские канатные дороги преимущественно используются для быстрого и удобного перемещения людей к труднодоступным спортивным, туристическим, экологическим и оздоровительным объектам в пределах природных территорий со сложным рельефом местности [3, 4]. Грузовые канатные дороги используются для транспортировки различных грузов во многих отраслях экономики – в горнорудной, угольной, химической, металлургической, энергетической, лесной и сельскохозяйственной промышленности [5-8]. Согласно данным технико-экономического анализа [2, 9-11], канатный транспорт является более экономически и экологически выгодным, чем наземный транспорт (автомобильный, конвейерный и железнодорожный). Особенно тех случаях, когда рельеф местности, высокая плотность жилой или промышленной застройки и различные градостроительные ограничения препятствуют развитию наземного трафика.

Теория подвесных пассажирских и грузовых канатных дорог начала активно разрабатываться в середине XX века. Одновременно такие исследования начались в Англии, Австрии, Германии, Италии, России и других странах [1, 5, 12].

Как показано в [2, 6, 9, 11, 13], подвесные канатные дороги являются эффективной альтернативой традиционным видам наземного общественного транспорта в мегаполисах и крупных городах. Их можно отнести к скоростному городскому транспорту. Средняя скорость движения пассажирских кабин может составлять 18...40 км/ч [9, 10, 13]. Это выше средней скорости движения традиционного наземного транспорта в стесненных городских условиях. Кроме того, проблема

транспортной доступности приобретает все большее значение при оценке проектов при модернизации транспортной инфраструктуры крупных городов [14]. По этому показателю подвесные канатные дороги также имеют несомненные достоинства.

Подробный обзор использования подвесные канатные транспортные дороги в различных городах содержится в [2, 9, 13]. В урбанизированной среде они стали наиболее активно использоваться в последние 10...15 лет [15]. Поэтому в настоящее время многие специфические вопросы проектирования, расчета и моделирования рабочих процессов в подвесных канатных дорогах, которые необходимо рассматривать именно для урбанизированной среды, теоретически исследованы недостаточно и на эту тему имеется мало научных публикаций. Одной из первых публикаций на эту тему явилось исследование [16]. В нем были рассмотрены вопросы производительности, стоимости и возможности применения кабельных самоходных систем в городских условиях. Ряд работ посвящен вопросам воздействия климатических факторов (ветра и перепада температур воздуха) на динамику пассажирских кабин и канатной системы подвесных канатных дорог [17, 18], расчету прочности и натяжения несущих канатов [19-21], безопасности транспортирования пассажиров [2, 3].

II. Анализ научной проблемы.

Проблема исследования пассажирских подвесных канатных дорог имеет не только технический аспект. Например, в [4] рассматриваются вопросы социального и экономического влияния строительства канатных дорог на развитие прилегающих территорий, а в [22] – вопросы юридического оформления права собственности на воздушное пространство и землю для канатных дорог.

Однако экономические аспекты строительства канатных дорог пока не нашли своего достойного рассмотрения, хотя именно

они определяют перспективность модернизации городской транспортной инфраструктуры на основе пассажирских канатных дорог.

Строительство пассажирской канатной дороги в условиях сильно урбанизированной среды крупного города или мегаполиса является весьма затратной технической и экономической задачей [2, 23, 24]. Стоимость строительства включает расходы на проектно-конструкторские, проектно-изыскательские, строительные-монтажные работы, приобретение необходимого механического оборудования, создания автоматизированной системы управления движением и др. Значительную составляющую в общую стоимость строительства канатной дороги вносят затраты на строительство станций для посадки пассажиров, на изготовление и установку промежуточных опор вдоль линии канатной дороги, на приобретение тяговых и несущих стальных канатов.

Как было показано в [23-25], задача расположения промежуточных опор канатной дороги является задачей совместной техни-

кой и экономической оптимизации. Целью оптимизации является обеспечение минимальной величины затрат на возведение станций для посадки пассажиров, промежуточных опор, приобретение тягового и несущих канатов, а также комплекта устанавливаемого на опору необходимого технологического оборудования [23]. Постановка и решение данной оптимизационной задачи позволяет существенно удешевить строительство пассажирских подвесных канатных дорог в урбанизированной среде [2, 24, 25].

Впервые подход к анализу экономической составляющей проблемы модернизации системы городского общественного транспорта на основе пассажирских подвесных канатных дорог мехатронного типа и к разработке соответствующих оптимизационных математических моделей был сделан в [24]. Рассмотренная в [24] расчетная схема участка подвесной канатной дороги между двумя соседними промежуточными опорами приведена на рис. 1.

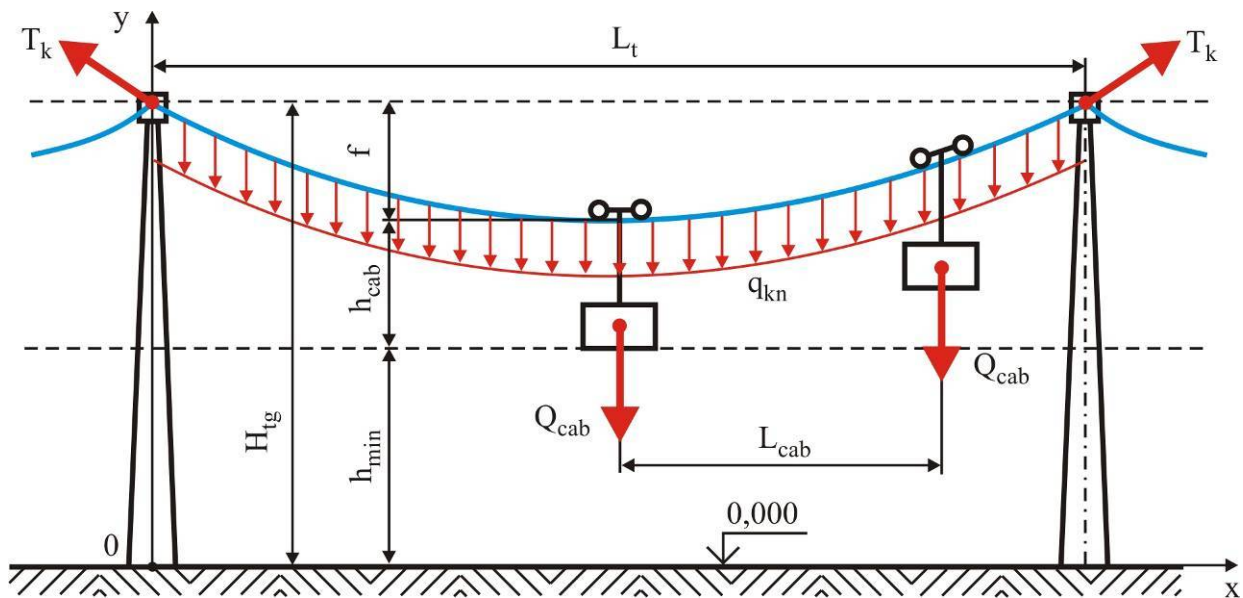


Рис. 1. Расчетная схема участка подвесной канатной дороги между соседними промежуточными опорами [24]

В качестве варьируемых параметров задачи оптимизации шага установки промежуточных опор канатного метро было предложено использовать две независимые величины: расстояние между опорами L_t и усилие

натяжения несущих канатов T_k . Из них был сформирован вектор управляемых параметров вида [24]

$$\{x\}^T = \{x_1 \ x_2\} = \{L_t \ T_k\}.$$

Другие технические и экономические характеристики канатной дороги предложено считать фиксированными, так как оно либо задаются в качестве исходных данных, либо вычисляются в зависимости от указанных управляемых параметров. К первой группе были отнесены [2, 24]: общая длина канатной дороги L_{tr} , расстояние между пассажирскими кабинами L_{cab} , вес пассажирской кабины Q_{cab} , допустимое высотное приближение пассажирских кабин к зданиям и сооружениям h_{min} , вертикальный габаритный размер кабины h_{cab} , коэффициент усиления конструкции опоры при действии максимально допустимого по условию прочности каната усилия натяжения ψ , коэффициент динамичности ψ_d , минимальный коэффициент запаса прочности каната $[n]_k$, число несущих канатов n_{kn} , эмпирические коэффициенты для расчета стоимости фундамента промежуточной опоры C_{f0} и a_f , эмпирические коэффициенты для расчета стоимости промежуточной опоры C_{i0} и a_i , эмпирический коэффициент для расчета собственного веса 1 погонного метра длины каната q_{k0} , эмпирические коэффициенты для расчета агрегатной прочности (разрывного усилия) каната r_{k0} , r_{k1} и r_{k2} , эмпирические коэффициенты для расчета стоимости 1 погонного метра длины каната c_{k0} , c_{k1} и c_{k2} . Ко второй группе отнесены [2, 24]: интенсивность распределенной нагрузки от собственного веса каната q_{kn} , интенсивность распределенной нагрузки от веса пассажирских кабин q_{cab} , стрела провисания несущих канатов в пролете между соседними промежуточными опорами f , диаметр тягового каната d_{kt} , диаметр несущего каната d_{kn} , геометрическая высота промежуточной опоры H_{ig} , длина канатов в пролете между соседними промежуточными опорами l_k , число промежуточных опор n_t . Из величин второй группы было предложено сформировать вектор управляемых параметров, которые не под-

лежат варьированию в процессе решения оптимизационной задачи:

$$\{z\}^T = \{z_1 z_2 z_3 z_4 z_5 z_6 z_7 z_8\} = \{q_{kn} q_{cab} f d_{kt} d_{kn} H_{ig} l_k n_t\}.$$

Окончательно задача технико-экономической оптимизации шага установки промежуточных опор подвесной канатной дороги на горизонтальной плоскости сводится к минимизации целевой функции – суммарной стоимости изготовления и монтажа опор, приобретения тягового и несущих канатов. Согласно [24] целевая функция имеет вид:

$$\begin{aligned} \Pi(\{x\}, \{z\}) = & \frac{L_{tr}}{x_1} \left\langle C_{f0} \left[h_{min} + h_{cab} + \frac{\psi_d(z_1 + z_2)x_1^2}{8x_2} \right] \times \right. \\ & \times \left. \left(1 + \psi \frac{x_2[n]_k}{R_{kn}} \right) \right\rangle^{a_f} + \\ & + C_{i0} \left\langle \left[h_{min} + h_{cab} + \frac{\psi_d(z_1 + z_2)x_1^2}{8x_2} \right] \times \right. \\ & \times \left. \left(1 + \psi \frac{x_2[n]_k}{R_{kn}} \right) \right\rangle^{a_i} + C_e \left. + (C_{kt} + n_{kn}C_{kn})L_{tr} \left[1 + \frac{\psi_d^2(z_1 + z_2)^2 x_1^2}{24x_2^2} \right] \right\rangle \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (1)$$

При этом должны выполняться ограничения в форме неравенств [24], определяющие требования к:

- допустимому диапазону изменения величины шага установки соседних опор

$$x_1 \geq 0; \quad L_{tmax} - x_1 \geq 0; \quad L_{tr}/x_1 - 1 \geq 0;$$
- допустимым диапазонам изменения диаметров тягового и несущих канатов

$$d_{ktmax} - d_{kt} \geq 0; \quad d_{kt} - d_{ktmin} \geq 0;$$

$$d_{knmax} - d_{kn} \geq 0; \quad d_{kn} - d_{knmin} \geq 0;$$
- максимально допустимой величине провисания несущего каната между опорами

$$\psi_f x_1 - \frac{\psi_d(z_1 + z_2)x_1^2}{8x_2} \geq 0;$$

- минимальному усилию натяжения каната согласно требованиям ПБ 10-559-03 [26]

$$x_2 - 10n_{cab}\psi_d Q_{cab}/n_{kn} \geq 0; \quad (2)$$

- максимальному усилию натяжения каната, исходя из его наибольшей возможной агрегатной прочности

$$R_{kn}(d_{kn \max})/[n]_k - x_2 \geq 0;$$

- максимальной высоте промежуточной опоры

$$H_{t \max} - h_{\min} - h_{cab} - \frac{\psi_d(z_1 + z_2)x_1^2}{8x_2} \geq 0,$$

где $L_{t \max}$ - предельное расстояние между промежуточными опорами; $d_{kt \max}$, $d_{kn \max}$ - максимальный диаметр тягового и несущего канатов [2, 24]; $d_{kt \min}$, $d_{kn \min}$ - минимальный диаметр тягового и несущего канатов [2, 24]; ψ_f - коэффициент допустимого провисания каната между опорами; n_{cab} - число пассажирских кабин, одновременно находящихся в пределах одного пролета; $R_{kn}(d_{kn \max})$ - агрегатная прочность каната максимального диаметра выбранной конструкции [2, 24]; $H_{t \max}$ - предельно допустимая высота промежуточной опоры.

III. Математическая модель и методика ускоренной оптимизационной оценки основных технических параметров подвесной канатной дороги.

В [24] было выполнено решение указанной задачи оптимизации (1) с учетом приведенных выше ограничений на варьируемые переменные - расстояние между промежуточными опорами L_t и усилие натяжения несущих канатов T_k . Для этого использовался один из прямых методов нелинейной условной оптимизации типа метода Хука-Дживса [27].

Расчеты показали, что в пределах изменения исходных параметров задачи оптимизации L_{tr} , L_{cab} , Q_{cab} , h_{\min} , h_{cab} , ψ , ψ_d , $[n]_k$, C_{f0} , a_f , C_{t0} , a_t , q_{k0} , r_{k0} , r_{k1} , r_{k2} , c_{k0} , c_{k1} , c_{k2} , характерных для современных пассажирских подвесных канатных дорог, точка минимума целевой функции (1) лежит на ограничении (2), т.е. определяется минимальным усилием натяжения несущего каната согласно требованиям ПБ 10-559-03 [26]. При этом точка минимума лежит на достаточном удалении от возможных точек пересечения ограничения (2) с каким-либо другим ограничением задачи оптимизации.

Этот факт позволяет сделать вывод о том, что положение точки минимума целевой функции (1) в двухмерном пространстве $\{x\}^T = \{x_1 \ x_2\} = \{L_t \ T_k\}$ можно искать не во всем этом пространстве, а только вдоль линии ограничения (2). Учитывая, что принадлежность точки минимума линии ограничения (2) определяется равенством

$$x_2 - 10n_{cab}\psi_d Q_{cab} / n_{kn} = 0,$$

можно сразу же определить оптимальное значение одного из варьируемых параметров задачи оптимизации:

$$x_2^{opt} = T_k^{opt} = 10n_{cab}\psi_d Q_{cab} / n_{kn}. \quad (3)$$

При расчете $x_2^{opt} = T_k^{opt}$ с помощью уравнения (3) следует принимать число пассажирских кабин $n_{cab} = 1$.

Таким образом, теперь в процессе оптимизации целевой функции (1) необходимо определять оптимальное значение лишь одного варьируемого параметра - шага промежуточных опор $x_1^{opt} = L_t^{opt}$, т.е. исходная задача двумерной оптимизации сводится к более простой в математическом аспекте одномерной задаче нелинейной оптимизации.

Тот факт, что точка минимума целевой функции (1) не совпадает с какими-либо точками пересечения ограничения (2) с другими ограничениями, еще более упрощает задачу, так как она превращается в задачу безусловной нелинейной оптимизации. Ее решение возможно не только с помощью эффективных численных методов, но и аналитически. Естественно, полученное в результате решения оптимальное значение шага промежуточных опор $x_1^{opt} = L_t^{opt}$ должно быть проверено на его соответствие остальным ограничениям задачи оптимизации [31].

Таким образом, целевую функцию (1) можно записать в виде

$$U(x_1, \{z\}) = \frac{L_{tr}}{x_1} \left\{ C_{f0} \left[h_{\min} + h_{cab} + \frac{\psi_d(z_1 + z_2)x_1^2}{8T_k^{opt}} \right] \times \right. \\ \left. \times \left(1 + \psi \frac{T_k^{opt}[n]_k}{R_{kn}} \right) \right\}^{a_f} +$$

$$+ C_{t0} \left\{ \left[h_{\min} + h_{cab} + \frac{\psi_d(z_1 + z_2)x_1^2}{8T_k^{opt}} \right] \times \right. \quad (4)$$

$$\left. \times \left(1 + \psi \frac{T_k^{opt}[n]_k}{R_{kn}} \right) \right\}^{a_t} + C_e \left. \right\} +$$

$$+ (C_{kt} + n_{kn}C_{kn})L_{tr} \left[1 + \frac{\psi_d^2(z_1 + z_2)^2 x_1^2}{24(T_k^{opt})^2} \right] \rightarrow \min$$

или в более компактном виде

$$\Pi(x_1, \{z\}) = \frac{1}{x_1} \left[A_f(H + Bx_1^2)^{a_f} + A_t(H + Bx_1^2)^{a_t} + C_e \right] +$$

$$+ A_k(1 + Dx_1^2) \rightarrow \min,$$

где $A_f = L_{tr}C_{f0} \left(1 + \psi \frac{T_k^{opt}[n]_k}{R_{kn}} \right)^{a_f}$;

$$A_t = C_{t0} \left(1 + \psi \frac{T_k^{opt}[n]_k}{R_{kn}} \right)^{a_t} ; \quad A_k = C_{kt} + n_{kn}C_{kn} ;$$

$$B = \frac{\psi_d(z_1 + z_2)}{8T_k^{opt}} ; \quad D = \frac{\psi_d^2(z_1 + z_2)^2}{24(T_k^{opt})^2} .$$

Нахождение минимума целевой функции (4) одного переменного x_1 может выполняться одним из численных методов безусловной оптимизации [27-29].

Возможен другой подход к определению $x_1^{opt} = L_t^{opt}$. Учитывая, что в точке минимума $x_1^{opt} = L_t^{opt}$ целевой функции (4) выполняется условие [30]

$$\frac{d}{dx_1} \Pi(x_1, \{z\}) = 0 ,$$

то для определения искомого значения $x_1^{opt} = L_t^{opt}$ получим нелинейное алгебраическое уравнение следующего вида:

$$2A_k D (x_1^{opt})^3 + 2 \left\{ A_f a_f \left[H + B(x_1^{opt})^2 \right]^{a_f - 1} + \right.$$

$$+ A_t a_t \left[H + B(x_1^{opt})^2 \right]^{a_t - 1} \left. \right\} (x_1^{opt})^2 -$$

$$- \left\{ A_f \left[H + B(x_1^{opt})^2 \right]^{a_f} + A_t \left[H + B(x_1^{opt})^2 \right]^{a_t} + C_e \right\} = 0 . \quad (5)$$

Уравнение (5) может быть решено с помощью одного из численных методов решения алгебраических уравнений [31].

Если найденное значение

$$x_1^{opt} = L_t^{opt} \in (L_{cab}; 2L_{cab}] ,$$

то, следовательно, в пределах одного пролета между соседними промежуточными опо-

рами будут находиться две пассажирские кабины. Поэтому необходимо провести новую итерацию определения оптимального значения шага $x_1^{opt} = L_t^{opt}$. Для этого необходимо вычислить новые значения $x_2^{opt} = T_k^{opt}$ с помощью уравнения (3) и неуправляемого параметра z_2 с помощью уравнения

$$z_2 = \frac{n_{cab} Q_{cab}}{n_{kn} L_{cab}} ,$$

подставив в указанные уравнения величину $n_{cab} = 2$.

Аналогично, если найденное значение

$$x_1^{opt} = L_t^{opt} \in (2L_{cab}; 3L_{cab}] ,$$

то, следовательно, в пределах одного пролета между соседними промежуточными опорами будут находиться три пассажирские кабины. При этом новые значения $x_1^{opt} = L_t^{opt}$ и z_2 необходимо найти при $n_{cab} = 3$. И так далее.

На основе найденных оптимальных значений шага промежуточных опор L_t^{opt} и усилия натяжения несущих канатов T_k^{opt} могут быть рассчитаны другие основные технические характеристики пассажирской подвесной канатной дороги по следующим зависимостям:

- высота промежуточных опор

$$H_{ig} = h_{\min} + h_{cab} + \frac{\psi_d(z_1 + z_2)(L_t^{opt})^2}{8T_k^{opt}} ;$$

- длина несущего каната в пределах одного пролета

$$l_k = L_t^{opt} \left[1 + \frac{\psi_d^2(z_1 + z_2)^2 (L_t^{opt})^2}{24(T_k^{opt})^2} \right] ;$$

- диаметр несущего каната

$$d_{kn} = \frac{\sqrt{r_{k1}^2 - 4r_{k2} \{ r_{k0} - [n]_k (T_k^{opt}) \}} - r_{k1}}{2r_{k2}} .$$

IV. Анализ результатов расчетов.

Зависимость (3) для оценки оптимального значения усилия натяжения несущих канатов можно представить в виде

$$x_2^{opt} = T_k^{opt} = 10\psi_d L_{cab} z_2 .$$

Из данного выражения видно, что при заданном значении расстояния между пассажир-

скими кабинами L_{cab} величина T_k^{opt} определяется интенсивность распределенной нагрузки на несущий канат от веса пассажирской кабины z_2 . Соотношение между весом пассажирской кабины и расстоянием между кабинами при равном значении параметра z_2 для двух характерных значений 20 и 40 Н/м показано на рис. 2.

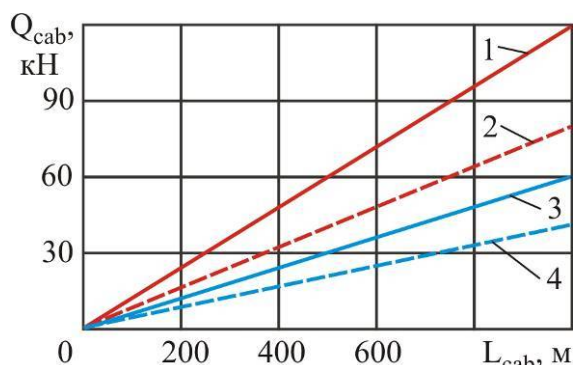


Рис. 2. Соотношение между весом пассажирской кабины и расстоянием между кабинами при равном значении параметра z_2 : 1 - $z_2 = 40$ Н/м, $n_{kn} = 3$; 2 - $z_2 = 40$ Н/м, $n_{kn} = 2$; 3 - $z_2 = 20$ Н/м, $n_{kn} = 3$; 4 - $z_2 = 20$ Н/м, $n_{kn} = 2$

С целью сравнения результатов расчетов, проведенных путем оптимизации целевой функции двух переменных (1), предложенной в [24], и целевой функции одного переменного (4), предложенной в данной работе, указанные расчеты были выполнены при одинаковых исходных данных, соответствующих принятым в [24]. Были рассмотрены два варианта канатной дороги на основе использования опор, аналогичных по стоимости опорам типа ПГМ 500 и типа МУ 330, при трех несущих и одном тяговом канатах по ГОСТ 3079-80 маркировочной группы $G_k = 2160$ (220) кН/мм² (кгс/мм²).

Расчеты по предложенному упрощенному алгоритму показали, что положения точек минимума целевых функций (4) и (1) в точности совпали. Это свидетельствует об адекватности предложенного подхода к ускоренной оптимизационной оценке основных технических характеристик подвесных канатных дорог.

На рис. 3 показаны графики изменения величины целевых функций (4) вдоль ограничения (2) в зависимости от шага промежуточных опор L_t . У всех графиков (для всех конструктивных типов промежуточных опор) наблюдается качественно сходная экстремальная форма. Однако количественно они зависят от типа использованных промежуточных опор. Экстремум оказывается более выраженным в том случае, когда величина оптимального шага промежуточных опор L_t^{opt} оказывается меньше. Этот факт можно объяснить тем, что стоимость промежуточных опор выражается степенной функцией от их высоты H_{ig} , причем скорость роста стоимости опоры с увеличением высоты различна для опор разного конструктивного исполнения [2, 24]. На рис. 4 приведены сравнительные данные изменения единичной стоимости C_t промежуточных опор типа МПГ 500 и типа МУ 330 в зависимости от шага их установки, а также график изменения необходимой высоты опор. Видно, что опорам (типа МУ 330), характеризующимся большей скоростью роста их стоимости с ростом высоты, соответствует более выраженная экстремальная форма зависимости $C(L_t)$ и меньшие значения оптимального шага промежуточных опор L_t^{opt} . Объяснение этого факта заключается в следующем: при использовании таких промежуточных опор экономически выгодным является установка более низких опор, несмотря на то, что шаг их расположения должен быть меньше, а общее число в пределах канатной дороги – больше. В этом случае такая тенденция, как увеличение затрат на использование более высоких опор, превалирует над другой тенденцией - увеличением затрат на установку большего числа опор. С другой стороны, опорам (типа МПГ 500), характеризующимся сравнительно малой скоростью роста их стоимости с ростом высоты, соответствует менее выраженная экстремальная форма зависимости $C(L_t)$ и большие значения оптимального шага промежуточных опор L_t^{opt} . В этом случае, наоборот, такая тенденция, как

увеличение затрат на установку большего числа опор, превалирует над другой тенденцией - увеличением затрат на использование более высоких опор.

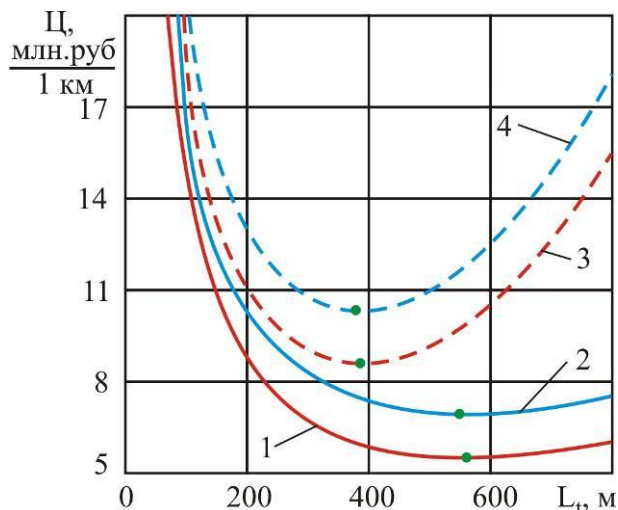


Рис. 3. Изменение величины целевых функций (4) вдоль ограничения (2) в зависимости от шага промежуточных опор:
 1 – опоры типа МПГ 500, $z_2 = 20$ Н/м;
 2 – опоры типа МПГ 500, $z_2 = 40$ Н/м;
 3 – опоры типа МУ 330, $z_2 = 20$ Н/м;
 4 – опоры типа МУ 330, $z_2 = 40$ Н/м

Список литературы

1. Scheingert, Z. Aerial Ropeways and Funicular Railways / Z. Scheingert. - London, 1966. - 555 p.
2. Короткий, А.А. Развитие транспортной инфраструктуры крупных городов и территорий на основе технологии канатного метро / А.А. Короткий, А.В. Лагереv, Б.Ч. Месхи, И.А. Лагереv, А.В. Панфилов. - Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. - 344 с. ISBN 978-5-7890-1378-6
 DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1311913>
3. Логвинов, А.С. Пассажирские одноканатные дороги. Устройство и эксплуатация / А.С. Логвинов, А.А. Короткий. - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2016. - 210 с.
4. Nikšić, M. Geographic and Traffic Aspects of Possibilities for Implementing Ropeway Systems in Passenger Transport / M. Nikšić, S. Gašparović // Promet-Traffic &

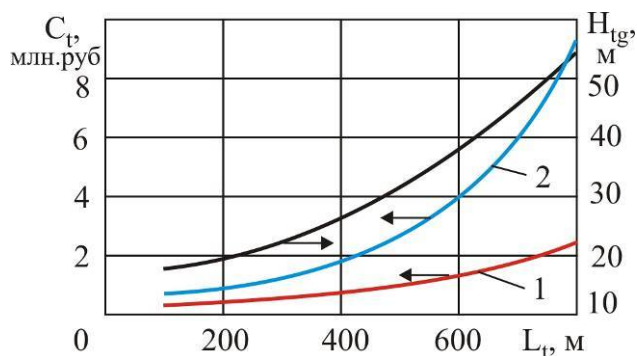


Рис. 4. Зависимости высоты и единичные стоимости промежуточных опор от шага их установки: 1 – опоры типа МПГ 500; 2 – опоры типа МУ 330

V. Заключение.

Предложенный алгоритм ускоренной оптимизационной оценки основных технических характеристик подвесной канатной дороги (шага установки и высоты промежуточных опор, усилия натяжения несущих канатов) позволяет получить в точности те же их значения, что и в результате решения сформулированной в [24] задачи технико-экономической оптимизации, но с применением более простых математических методов.

References

1. Scheingert, Z. Aerial Ropeways and Funicular Railways. London, 1966. 555 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. ISBN 978-5-7890-1378-6
 DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1311913> (In Russian)
3. Logvinov A.S., Korotkiy A.A. *Passazhirskie odnokanatnye dorogi. Ustroystvo i ekspluatatsiya* [Passenger ropeways with single rope. Device and operation]. Rostov-na-Donu, DGTU, 2016. 210 p. (In Russian)
4. Nikšić M., Gašparović S. Geographic and Traffic Aspects of Possibilities for Imple-

- Transportation. – 2010. - Vol. 22. - No. 5. - P. 389-398.
5. Pestal, E. Seilbahnen und Seilkrane in Holz und Materialtransport. Wien, 1961. - 410 s.
6. Escobar-García, D. Political Determinants and Impact Analysis of Using a Cable System as a Complement to an Urban Transport System / D. Escobar-García, F. García-Orozco, C. Cadena-Gaitán // *UNU-MERIT Working Paper Series*. - 2013. - No. 2013-017. - 24 p.
7. Беркман, М.Б. Подвесные канатные дороги / М.Ю. Беркман, Г.Н. Бовский, Г.Г. Куйбида. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
8. Бовский, Г.Н. Фрагменты истории развития канатных дорог в нашей стране / Г.Н. Бовский // *Безопасность труда в промышленности*. – 2013. - № 4. – С. 86-88.
9. El-Jouzou H. A Comparative Study of Aerial Ropeway Transit (ART) Systems. Advantages and Possibilities. A thesis of Master of Sciences / H. El-Jouzou H. - Frankfurt, 2016. - 219 p.
10. Лагереv, А.В. Концепция инновационной системы городского транспорта «Канатное метро города Брянска» / А.В. Лагереv, И.А. Лагереv А.А., Короткий, А.В. Панфилов // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2012. - №3. – С. 12-15.
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302025>
11. Лагереv, А.В. Перспективы внедрения инновационной технологии надземных пассажирских перевозок на основе подвесных пассажирских канатных дорог для модернизации системы общественного транспорта города Брянска / А.В. Лагереv, И.А. Лагереv // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. – 2017. - №2. – С. 163-177. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-02-163-177
12. Дукельский, А.И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны / А.И. Дукельский. – М-Л: Машиностроение, 1966. – 484 с.
13. Alshalalfah, B. Experiences with Aerial Ropeway Transportation Systems in the Urban Environment / B. Alshalalfah, A. Shalaby, S. Dale, F. Othman // *Journal of Urban Planning and Development*, 2014, Vol.140, No.1, 04013001.
- menting Ropeway Systems in Passenger Transport. *Promet-Traffic & Transportation*, 2010, Vol. 22, No. 5, pp. 389-398.
5. Pestal E. Seilbahnen und Seilkrane in Holz und Materialtransport. Wien, 1961. 410 s.
6. Escobar-García D., García-Orozco F., Cadena-Gaitán C. Political Determinants and Impact Analysis of Using a Cable System as a Complement to an Urban Transport System. *UNU-MERIT Working Paper Series*, 2013, No. 2013-017. 24 p.
7. Berkman M.B., Bovskiy G.N., Kuybida G.G. *Podvesnye kanatnye dorogi* [Aerial ropeways]. Moscow, Mashinostroenie, 1984. 264 p.
8. Bovskiy G.N. *Fragments of the history of cable cars in our country* [Fragments of the history of cable cars in our country]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2013, No. 4, pp. 86-88 (In Russian)
9. El-Jouzou H. A Comparative Study of Aerial Ropeway Transit (ART) Systems. Advantages and Possibilities. A thesis of Master of Sciences. Frankfurt, 2016. 219 p.
10. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Korotkiy A.A., Panfilov A.V. Innovation transport system “Bryansk rope metro”. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, No. 3, pp. 12-15. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302025> (In Russian)
11. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Prospects of introduction of innovative technology overhead passenger traffic on the basis of the passenger ropeways for the modernization of the public transport system of the Bryansk city. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No.2, pp. 163-177.
DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2017-03-02-163-177>. (In Russian)
12. Dukelskiy A.I. *Podvesnye kanatnye dorogi i kabelnye kраны* [Overhead cableways and cable cranes]. Moscow-Leningrad, Mashinostroenie, 1966. 484 p. (In Russian)
13. Alshalalfah B., Shalaby A., Dale S. Experiences with Aerial Ropeway Transportation Systems in the Urban Environment. *Journal of Urban Planning and Development*, 2014, Vol.140, No.1, 04013001.

- ban Planning and Development. - 2014. - Vol. 140. - No. 1.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000158](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000158).
14. Gutiérrez, J. Using Accessibility Indicators and GIS to Assess Spatial Spillovers of Transport Infrastructure Investment / J. Gutiérrez, A. Condeco-Melhorado, J. Martín // *Journal of Transport Geography*. – 2010. – No. 18. – P. 141-152.
15. Alshalalfah, B. Improvements and Innovations in Aerial Ropeway Transportation Technologies: Observations from Recent Implementations / B. Alshalalfah, A. Shalaby, S. Dale, F. Othman // *Journal of Transportation Engineering*. - 2013. - Vol. 139. - No. 8. - P. 814-821.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000548](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000548).
16. Neumann, E. Cable Propelled People Movers in Urban Environments / E. Neumann // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. - 1992. - No. 1349. – P. 125-132.
17. Guštinčič, J. Analysis of Oscillations in a Cableway: Wind Load Effects / J. Guštinčič, L.M.G. Raffi // *Modelling in Science Education and Learning*. – 2013. - Vol. 6 (1). - No. 11. - P. 145-155.
18. Hoffman, K. Simulation of Vortex Excited Vibrations of a Bicable Ropeway / K. Hoffman, R. Petrova // *Engineering Review*. – 2009. – Vol. 29. – No. 1. – P. 11-23.
19. Патарая, Д.И. Расчет и проектирование канатных систем на примере подвесных дорог / Д.И. Патарая. – Тбилиси: Метснереба, 1991. – 102 с.
20. Gavrilov, S. Non-stationary problems in dynamics of a string on an elastic foundation subjected to a moving load / S. Gavrilov // *Journal of Sound and Vibration*. – 1999. – Vol. 222. – No. 1. - P. 345-361.
21. Jian Qin. Analysis of the Working Cable System of Single-span Circulating Ropeway / Jian Qin, Liang Qiao, Jun Chen, Jiancheng Wan, Ming Jiang, Chunhua Hu // *MATEC Web of Conferences*. – 2017. - Vol. 136. DOI: [10.1051/matecconf/201713602003](https://doi.org/10.1051/matecconf/201713602003)
22. Nordin, A.S. Air rights - A study of urban ropeways from a real estate law perspective. Master of Sciences Thesis. Stockholm, Sweden, 2016, No. TRITA-FOB-FaV-MASTER-2016:33. 66 p.
23. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Optimal design of the cable car line. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No. 2, pp. 406-415.
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302241>
14. Gutiérrez J., Condeco-Melhorado A., Martín J. Using Accessibility Indicators and GIS to Assess Spatial Spillovers of Transport Infrastructure Investment. *Journal of Transport Geography*, 2010, No.18, pp. 141-152.
15. Alshalalfah B., Shalaby A., Dale S., Othman F. Improvements and Innovations in Aerial Ropeway Transportation Technologies: Observations from Recent Implementations. *Journal of Transportation Engineering*, 2013, Vol.139, No.8, pp. 814-821.
16. Neumann, E. Cable Propelled People Movers in Urban Environments. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1992, No.1349, pp.125-132.
17. Guštinčič J., Raffi L.M.G. Analysis of Oscillations in a Cableway: Wind Load Effects. *Modelling in Science Education and Learning*, 2013, Vol. 6(1), No.11, pp. 145-155.
18. Hoffman K., Petrova R. Simulation of Vortex Excited Vibrations of a Bicable Ropeway. *Engineering Review*, 2009, Vol.29, No.1, pp. 11-23.
19. Pataraya D.I. *Raschet i proektirovanie kanatnykh system na primere podvesnykh dorog* [Calculation and design of cable systems on the example of suspension roads]. Tbilisi, Metsnereba, 1991. 102 p. (In Russian)
20. Gavrilov S. Non-stationary problems in dynamics of a string on an elastic foundation subjected to a moving load. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, Vol. 222, No.1, pp. 345-361.
21. Jian Qin, Liang Qiao, Jun Chen, Jiancheng Wan, Ming Jiang, Chunhua Hu. Analysis of the Working Cable System of Single-span Circulating Ropeway. *MATEC Web of Conferences*, 2017, Vol. 136, 02003. DOI: [10.1051/matecconf/201713602003](https://doi.org/10.1051/matecconf/201713602003)
22. Nordin A.S. Air rights - A study of urban ropeways from a real estate law perspective. Master of Sciences Thesis. Stockholm, Sweden, 2016, No. TRITA-FOB-FaV-MASTER-2016:33. 66 p.
23. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Optimal design of the cable car line. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No. 2, pp. 406-415.
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302241>

- tive. Master of Sciences Thesis / A.S. Nordin. – Stockholm, 2016. - No. TRITA-FOB-FaV-MASTER-2016:33. - 66 p.
23. Лагерев, А.В. Оптимальное проектирование линии канатного метро / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев // Вестник Брянского государственного университета. - 2015. – № 2. – С. 406-415.
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302241>
24. Лагерев, А.В. Оптимизация шага установки промежуточных опорных конструкций вдоль линии канатного метро / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев // Вестник Брянского государственного университета. – 2014. - № 4.- С. 22-30.
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302237>
25. Лагерев, А.В. Оптимальное проектирование линий канатного метро в условиях сильно урбанизированной городской среды / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев // Известия МГТУ «МАМИ». - 2015. – Т.1. - № 1 (23). – С. 57-65.
26. ПБ 10-559-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации пассажирских подвесных и буксировочных канатных дорог. – Введ. 2003-05-01. – М.: Госстандарт: Изд-во стандартов, 2003. – 47 с.
27. Reklaitis, G.V. Engineering optimization. Methods and applications / G.V. Reklaitis, A. Ravindran, K.M. Ragsdell. – N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1983.
28. Лагерев, И.А. Оптимальное проектирование подъемно-транспортных машин / И.А. Лагерев, А.В. Лагерев. – Брянск: БГТУ, 2013. 228 с. - ISBN 978-5-89838-680-1.
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1202230>
29. Gill, Ph.E. Practical optimization / Ph.E. Gill, W. Murray, M.H. Wright. – London: Academic Press Inc. Ltd, 1981.
30. Борнштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Борнштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1980. – 976 с.
31. Shoup T.E. A practical guide to computer methods for engineers / T.E. Shoup. - Prentice-Hall, 1979.
- (In Russian)
24. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Cable transport system “Kanatnoe metro” towers distance optimization. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, No.4, pp. 22-30.
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302237>
(In Russian)
25. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Optimal design of cable subway lines in a highly urbanized city environment. *Izvestiya MGTU “MAMI”*, 2015, Vol.1, No.2, pp. 57-65. (In Russian)
26. ПБ 10-559-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации пассажирских подвесных и буксировочных канатных дорог. Moscow, Gosstandart, 2003. 47 p. (In Russian)
27. Reklaitis G.V., Ravindran A., Ragsdell K.M. Engineering optimization. Methods and applications. N.Y., John Wiley & Sons, Inc., 1983.
28. Lagerev I.A., Lagerev A.V. *Optimalnoe proektirovanie pod'yemno-transportnykh mashin* [Optimal design of lifting-transport machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskiiy Universitet, 2013. 228 p. ISBN 978-5-89838-680-1.
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1202230>
(In Russian)
29. Gill Ph.E., Murray W., Wright M.H. Practical optimization. London, Academic Press Inc. Ltd, 1981.
30. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchshchikhsya vtuzov* [Handbook of mathematics for engineers and students of technical schools]. Moscow, Nauka, 1980. 976 p. (In Russian)
31. Shoup T.E. A practical guide to computer methods for engineers. Prentice-Hall, 1979.