

УДК 625.54, 625.57

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИНИИ КАНАТНОГО МЕТРО С УНИФИЦИРОВАННЫМИ ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ОПОРАМИ

Лагерев А.В., Лагерев И.А.

Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского (Брянск, Россия)

Сформулирована и решена задача условной нелинейной технико-экономической оптимизации шага установки промежуточных опор, унифицированных по высоте, при проектировании линий канатного метро в условиях сильно урбанизированной городской среды. Задача оптимизации включает однокритериальную целевую функцию, выражающую стоимость строительства линии канатного метро (суммарную стоимость промежуточных опор, их фундамента, тягового и несущих стальных канатов и технологического оборудования). Указанная целевая функция подлежала минимизации путем нахождения оптимального сочетания шага установки промежуточных опор и усилия натяжения несущих канатов с учетом системы конструктивных, режимных, прочностных и градостроительных ограничений в виде нелинейных неравенств. Оптимизационный алгоритм был построен на основе прямого метода оптимизации типа Хука-Дживса, который был модифицирован с учетом необходимости варьирования высотой промежуточных опор с постоянным шагом, равным шагу унификации. При построении целевой функции были учтены три возможные формы провисания несущих канатов, которые могут быть реализованы для различных значений усилия их натяжения. Выполнен анализ влияния шага унификации и минимального типоразмера промежуточных опор по высоте на величину их оптимального шага в зависимости от конструктивных и стоимостных показателей промежуточных опор, а также на стоимость 1 км линии канатного метро при различных значениях угла продольного уклона поверхности рельефа вдоль линии канатного метро.

Ключевые слова: канатное метро, канатная дорога, промежуточная опора, шаг установки, унификация, канат несущий, канат тяговый, агрегатная прочность, технико-экономическая оптимизация, стоимость

DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-04-400-414

В настоящее время канатный транспорт все шире рассматривается как перспективная альтернатива развития транспортной инфраструктуры применительно к условиям крупных городов и мегаполисов, а также территориальных кластеров (например, туристических или рекреационных) [1]. Это связано с рядом существенных социальных, технических и экономических преимуществ данного наземного вида общественного транспорта перед его традиционными видами - наземным (троллейбус, автобус, трамвай) и подземным (метрополитен) [1, 2]. Однако максимальная реализация потенциальных преимуществ канатного общественного транспорта возможна лишь при создании его новых инновационных исполнений, в частности, на основе мехатронных модулей движения и развитой системы автоматического управления движением всего подвижного состава в пределах транспортной сети из нескольких линий-маршрутов. Принципиальные схемные решения и отдельные проектно-конструкторские разработки, имеющиеся в этом направлении, представлены, например, в работах [3-6]. В [1, 2, 7, 8] разработаны концептуальные предложения по строительству канатного метро применительно к

конкретным городам и территориям – Ростову-на-Дону, Брянску, Екатеринбург, Одессе, горно-спортивному кластеру Сочи и др.

Особое значение для научной проработки проблемы внедрения канатного метро в транспортную инфраструктуру крупных городов и территорий и ее реализации применительно к ландшафтно неоднородным условиям имеет задача рационального проектирования транспортных линий. Она носит технико-экономический характер, так как их строительство в реальных городских условиях с учетом значительного числа ограничений, связанных с особенностями уже имеющейся городской застройки как в плане, так и по высоте, является финансово затратным мероприятием. При этом стоимость строительства весьма чувствительна к выбору основных проектных параметров линий – расстояний между соседними промежуточными опорами, высоты промежуточных опор, диаметров несущих канатов и характеристик их натяжения [9-11]. Постановка задачи проектирования линий канатного метро в целом как задачи технико-экономической оптимизации, предложенная в [12, 13], является наиболее перспективным подходом к решению практически важной проблемы макси-

мального удешевления строительства канатного метро без ущерба надежности и энергоэффективности технической системы.

Постановка задач исследования.

Представленные в работах [9-13] результаты технико-экономической оптимизации проектирования линий канатного метро показывают, что на стоимостные характеристики оптимальных вариантов конструктивного исполнения линий значительное влияние имеют высоты промежуточных опор. Как следствие, оптимальное проектирование линии, проходящей вдоль ландшафтно неоднородной поверхности, путем математически формализованного поиска минимума стоимостной целевой функции с помощью известных методов оптимизации приводит к тому, что оптимальный вариант требует установки промежуточных опор индивидуальной высоты. С практической точки зрения это является крайне неудобным обстоятельством, так как требует индивидуального подхода к проектированию и производству промежуточных опор, что, естественно, усложняет и удорожает процессы их конструирования, технологической подготовки к производству, изготовления и монтажа. Учитывая, что строительство линии канатного метро предусматривает возведение достаточно большого числа промежуточных опор (как правило, от 3 до 6 штук в пределах 1 км линии), актуальной является задача унификации промежуточных опор по высоте. Указанная унификация должна предусматривать использование промежуточных опор нескольких типоразмеров, начиная от минимального (высотой $H_{t\min}^{un}$) и кончая максимальным (высотой $H_{t\max}^{un}$). Промежуточные типоразмеры унифицированных опор в диапазоне $H_{t\min}^{un} \dots H_{t\max}^{un}$ отличаются между собой по высоте на постоянный шаг унификации ΔH .

Необходимость использования унифицированных промежуточных опор обуславливает необходимость коррекции тех математических моделей задачи оптимального проектирования линий канатного метро, которые были разработаны ранее в [9-13].

Для решения технико-экономической задачи оптимального проектирования линии канатного метро с унифицированными по

высоте промежуточными опорами целесообразно использовать две оптимизационные математические модели:

- модель оптимизации шага установки промежуточных унифицированных опор;
- модель оптимизации линии канатного метро в целом.

Первая из названных математических моделей позволяет оценить оптимальные характеристики линии канатного метро, проложенной преимущественно вдоль практически горизонтальной или наклонной поверхности рельефа с практически постоянным углом наклона α_{sl} . В связи с постоянством геометрической формы рельефа в рамках данной модели достаточно рассмотреть сравнительно небольшой участок линии – локальный участок между двумя соседними промежуточными опорами L_t равной высоты H_{tg} .

Вторая модель позволяет оценить оптимальные характеристики линии канатного метро, проложенной вдоль ландшафтно неоднородной трассы, по длине которой имеют место значимые изменения геометрической формы рельефа и ее количественных параметров. Указанная модель максимально приближена к оптимизации реальных линий канатного метро и поэтому в ее рамках необходимо рассматривать линию канатного метро на всем протяжении L_{tr} , причем унифицированные промежуточные опоры, как правило, будут иметь неодинаковую высоту $H_{tg,i}$ с разностью, кратной принятому шагу унификации ΔH_{tg} .

Математическая модель оптимизации шага установки промежуточных унифицированных опор.

В качестве целевой функции при формулировке задачи технико-экономической оптимизации линии канатного метро будем использовать целевую функцию, предложенную в [9]. Она имеет стоимостное выражение и складывается из стоимости самих промежуточных опор и фундамента под ними, а также стоимости тягового и несущих стальных канатов и установленного на опоре технологического оборудования:

$$C = n_t(C_f + C_t + C_e) + (n_t + 1)(C_{kt} + n_{kn}C_{kn})I_k, \quad (1)$$

где C_t, C_f, C_e - единичная стоимость опорной конструкции, фундамента и комплекта технологического оборудования; C_{kt}, C_{kn} - стоимость 1 погонного метра тягового и несущего каната соответственно; $n_t = L_{tr} / L_t - 1$ - число опорных конструкций.

Количественная оценка стоимости промежуточных опор в зависимости от их конструктивного исполнения, фундамента опор,

тягового и несущих канатов содержится в работах [9, 12, 13].

При построении модели целесообразно использовать методический подход, который ранее был разработан в [9-11], внося в него определенные коррективы. Расчетная схема математической модели оптимизации шага установки промежуточных унифицированных опор приведена на рис. 1.

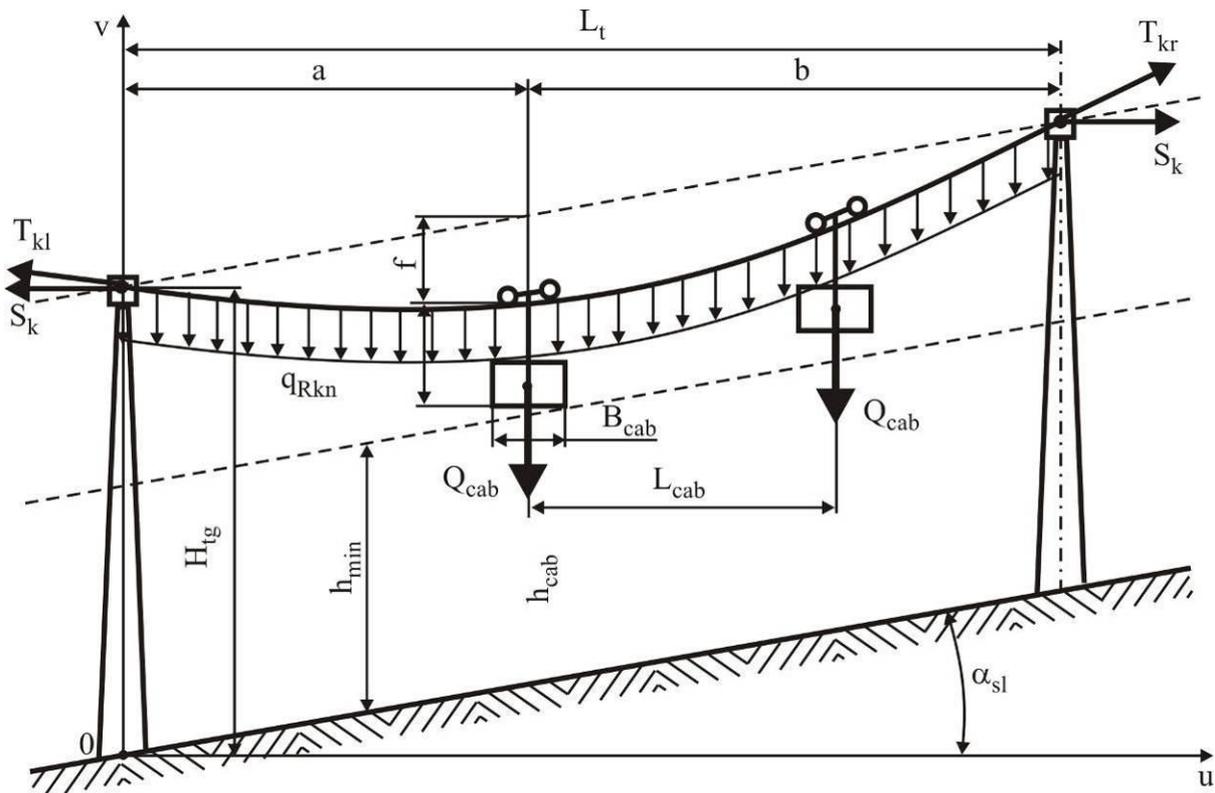


Рис. 1. Расчетная схема участка линии канатного метро между соседними промежуточными унифицированными опорами [10]

В данном случае вектор управляемых параметров целесообразно сформировать также из двух независимых величин задачи оптимизации, однако вместо шага установки промежуточных опор L_t (как это сделано в [9-11]) включить геометрическую высоту промежуточных опор H_{tg} и горизонтальное усилие натяжения несущего каната S_k . Поэтому вектор варьируемых (управляемых) параметров будет иметь следующий вид:

$$\{x\}^T = \{x_1 \ x_2\} = \{H_{tg} \ S_k\}.$$

Такая замена варьируемых параметров позволяет упростить процедуру поиска глобального минимума целевой функции (1), так как при ее реализации с помощью одного

из прямых методов оптимизации [14, 15] возможно непосредственное варьирование высотой промежуточной опоры H_{tg} с принятым шагом унификации ΔH_{tg} . Это гарантирует, что в процессе поиска минимума целевой функции будет получен такой оптимальный вектор варьируемых параметров $\{x\}^{opt}$, в котором переменная $x_1^{opt} = H_{tg}^{opt}$ будет иметь не произвольное, а требуемое по условию унификации высоты опор значение. Шаг установки промежуточных опор, соответствующий известным значениям H_{tg} и S_k , определяется следующими соотношениями:

- при I форме провисания несущего каната между соседними опорами (при значении кри-

терия формы провисания каната $K_f > 1$ [12])

$$L_t = \frac{S_k}{\psi_d q_{Rkn}} \left\{ \left[\frac{4\psi_d q_{Rkn}}{S_k} \left(H_{tg} - h_{\min} - h_{cab} - \frac{\psi_d q_{Rkn} B_{cab}^2}{4S_k} \right) + tg^2 \alpha_{sl} \right]^{0,5} + (\psi_d - 1) tg \alpha_{sl} \right\};$$

- при II и III формах провисания несущего каната между соседними опорами (при

значении критерия формы провисания каната $K_f \leq 1$ [12])

$$L_t = 2 \left\{ \frac{2S_k}{\psi_d q_{Rkn}} \left[H_{tg} - h_{\min} - h_{cab} - \frac{B_{cab}}{2} \left(\frac{\psi_d q_{Rkn} B_{cab}}{4S_k} + tg \alpha_{sl} \right) \right] \right\}^{0,5},$$

где q_{Rkn} - расчетная величина распределенной нагрузки на один несущий канат [10, 12]; ψ_d - коэффициент динамичности [9, 16]; h_{\min} - минимально допустимое приближение низа пассажирской кабины к поверхности рельефа; h_{cab} - высота пассажирской кабины с учетом устройства подвешивания; B_{cab} - длина пассажирской кабины.

Остальные величины, используемые в математической модели и характеризующие геометрические размеры линии канатного метро, эксплуатационные нагрузки на несущие канаты, параметры пассажирских кабин и др., являются фиксированными, так как либо задаются в качестве исходных данных, либо вычисляются в зависимости от указанных управляемых параметров.

К первой группе относятся: длина линии L_{lr} , расстояние между соседними кабинами L_{cab} , вес Q_{cab} и площадь проекции пассажирской кабины на вертикальную плоскость A_{cab} [12], минимально допустимое приближение низа пассажирской кабины к поверхности рельефа h_{\min} , высота пассажирской кабины с учетом устройства подвешивания h_{cab} , угол наклона поверхности рельефа α_{sl} , коэффициент усиления конструкции опоры при действии максимально допустимого по условию прочности каната усилия натяжения ψ [9], коэффициент динамичности ψ_d , минимальный коэффициент запаса прочности каната согласно требованиям Ростехнадзора [18] $[n]_k$, нормативное значение ветрового давления [19] в зависимости от

номера ветрового района [20] w_0 , аэродинамические коэффициенты несущего каната C_{wkn} [19] и пассажирской кабины C_{cab} , коэффициенты возрастания ветрового давления с высотой от поверхности [19], рассчитанные для высоты расположения оси каната k_{wkn} и центра тяжести кабины k_{wcab} , коэффициенты неравномерности распределения весовой μ_1 и ветровой μ_{w1} нагрузки на крайний несущий канат от пассажирской кабины, коэффициент ослабления давления ветра на поверхность крайнего несущего каната для ряда параллельно расположенных канатов η_1 [19], агрегатная прочность несущего каната максимального диаметра $d_{kn\max}$ выбранной конструкции $R_{kn}(d_{kn\max})$ [9, 12], число несущих канатов n_{kn} и эмпирические коэффициенты в регрессионных зависимостях связи стоимости промежуточных опор с их высотой и стоимости 1 погонного метра несущего и тягового канатов с их диаметром $C_{f0}, a_f, C_{t0}, a_t, q_{k0}, r_{k0}, r_{k1}, r_{k2}, c_{k0}, c_{k1}, c_{k2}$ [9, 12, 13].

Ко второй группе относятся: расчетная величина распределенной нагрузки на один несущий канат q_{Rkn} , распределенная нагрузка от веса пассажирской кабины q_{cab} [12], стрела провисания f и расстояния сечения максимального провисания несущего каната от промежуточных опор a и b [10], диаметры тягового d_{kt} и несущего d_{kn} канатов, шаг установки промежуточных опор L_t , длина

несущего каната в пролете с учетом его провисания l_k [10], число промежуточных опор вдоль линии канатного метро n_t , осевые усилия натяжения несущего каната на левой T_{kl} и правой T_{kr} опорах [10]. Из величин

$$\begin{aligned} \{z\}^T &= \{z_1 z_2 z_3 z_4 z_5 z_6 z_7 z_8 z_9 z_{10} z_{11} z_{12} z_{13} z_{14}\} = \\ &= \{q_{Rkn} q_{cab} f d_{kt} d_{kn} L_t l_k n_t a b T_{kl} T_{kr} R_{kn} (d_{kn \max}) / [n]_k K_f\}. \end{aligned}$$

Окончательно задача технико-экономической оптимизации шага установки промежуточных опор канатного метро, унифицированных по высоте, сводится к минимизации целевой функции – суммарной стоимо-

второй группы формируется вектор неуправляемых параметров, которые не подлежат варьированию в процессе решения оптимизационной задачи:

сти изготовления и монтажа опор, приобретения тягового и несущих канатов, которая согласно (1) имеет вид:

- при I форме провисания несущего каната между соседними опорами

$$\begin{aligned} \Pi(\{x\}, \{z\}) &= \left(\frac{L_{tr}}{z_6} - 1 \right) \left\{ C_{f0} \left[x_1 \left(1 + \psi \frac{x_2}{z_{14}} \right) \right]^{a_f} + C_{t0} \left[x_1 \left(1 + \psi \frac{x_2}{z_{14}} \right) \right]^{a_t} \right\} + \\ &+ (C_{kt} + n_{kn} C_{kn}) \frac{L_{tr}}{\cos \alpha_{sl}} \left[1 + \frac{8}{3} \left(\frac{z_9 \cos \alpha_{sl}}{z_6} \right)^2 \left(\psi_d \frac{z_1 z_9}{x_2} + tg \alpha_{sl} \right)^2 \right] \rightarrow \min ; \end{aligned} \quad (2)$$

- при II и III формах провисания несущего каната между соседними опорами

$$\begin{aligned} \Pi(\{x\}, \{z\}) &= \left(\frac{L_{tr}}{z_6} - 1 \right) \left\{ C_{f0} \left[x_1 \left(1 + \psi \frac{x_2}{z_{14}} \right) \right]^{a_f} + C_{t0} \left[x_1 \left(1 + \psi \frac{x_2}{z_{14}} \right) \right]^{a_t} \right\} + \\ &+ (C_{kt} + n_{kn} C_{kn}) \frac{L_{tr}}{\cos \alpha_{sl}} \left[1 + \frac{1}{6} \left(\frac{\psi_d z_1 z_6}{2x_2 \cos \alpha_{sl}} \right)^2 \right] \rightarrow \min . \end{aligned} \quad (3)$$

При этом должны выполняться ограничения в форме неравенств, которые определяют следующие требования:

- к высоте предельных типоразмеров унифицированных промежуточных опор

$H_{t \max}^{un} - x_1 \geq 0$; $x_1 - H_{t \min}^{un} \geq 0$;
- минимальной высоте промежуточной опоры при I форме провисания каната

$$x_1 - h_{\min} - h_{cab} - \frac{\psi_d z_1 B_{cab}^2}{4x_2} - z_9 \left(\psi_d \frac{z_1 z_9}{x_2} + tg \alpha_{sl} \right) \geq 0 ;$$

при II и III формах провисания каната

$$x_1 - h_{\min} - h_{cab} - \frac{B_{cab}}{2} \left(\psi_d \frac{z_1 B_{cab}}{4x_2} + tg \alpha_{sl} \right) - \psi_d \frac{z_1 z_6^2}{8x_2} \geq 0 ;$$

- к максимально допустимому горизонтальному усилию натяжения несущего каната

$$z_{14} - x_2 \geq 0 ;$$

- к допустимому диапазону изменения величины шага установки соседних опор

$$L_{t \max} - z_6 \geq 0 ; \quad L_{tr} / z_6 - 1 \geq 0 ;$$

- к допустимому диапазону изменения диаметров тягового каната

$$d_{kt \max} - z_4 \geq 0; \quad z_4 - d_{kt \min} \geq 0;$$

- к допустимому диапазону изменения диаметров несущих канатов

$$d_{kn \max} - z_5 \geq 0; \quad z_5 - d_{kn \min} \geq 0;$$

- к максимально допустимой величине провисания несущего каната между опорами при I форме провисания каната

$$\psi_f z_6 - z_9 \left(\psi_d \frac{z_1 z_9}{x_2} + tg \alpha_{sl} \right) \geq 0;$$

при II и III формах провисания каната

$$\psi_f z_6 - \psi_d \frac{z_1 z_6^2}{8x_2} \geq 0;$$

- к минимальному усилию натяжения каната согласно требованиям Ростехнадзора [18] при I форме провисания каната

$$x_2 - \frac{10n_{cab} \psi_d Q_{cab}}{n_{kn}} \cos \left[\arctg \left(\psi_d \frac{z_1 z_9}{x_2} \right) \right] \geq 0;$$

при II и III формах провисания каната

$$x_2 - \frac{10n_{cab} \psi_d Q_{cab}}{n_{kn}} \cos \left[\arctg \left(tg \alpha_{sl} - \psi_d \frac{z_1 z_6}{2x_2} \right) \right] \geq 0;$$

- к максимальному усилию натяжения каната, исходя из его наибольшей возможной агрегатной прочности при I форме провисания каната

$$z_{14} \cos \left[\arctg \left(\psi_d \frac{z_1 (z_6 - z_9)}{x_2} \right) \right] - x_2 \geq 0;$$

при II и III формах провисания каната

$$z_{14} \cos \left[\arctg \left(tg \alpha_{sl} + \psi_d \frac{z_1 z_6}{2x_2} \right) \right] - x_2 \geq 0,$$

где $L_{t \max}$ - предельное расстояние между промежуточными опорами; $d_{kt \max}$, $d_{kn \max}$ - максимальный диаметр тягового и несущего канатов; $d_{kt \min}$, $d_{kn \min}$ - минимальный диаметр тягового и несущего канатов; ψ_f - коэффициент допустимого провисания каната между опорами; n_{cab} - число пассажирских кабин, одновременно находящихся в пределах одного пролета.

Для нахождения минимума целевой функции (2) или (3) с учетом принятых ограничений необходимо использовать один из прямых методов условной оптимизации [14, 15], основанный на непосредственном вычислении величины целевой функции $C(\{x\}, \{z\})$. Известные прямые методы (например, методы типа Хука-Дживса) предусматривают поиск точки оптимума $\{x\}^{opt}$ путем постепенного пошагового приближения к ней от исходной начальной точ-

ки оптимизации $\{x\}^{beg}$, причем по мере приближения производится постепенное уменьшение шага поиска до тех пор, пока он не достигнет требуемой точности положения точки вычисления оптимума в пределах множества управляемых параметров $\{x\}$. В рассматриваемом случае такой вычислительный алгоритм является неприемлемым, так как по одному из управляемых параметров - высоте промежуточной опоры $x_1 = H_{ig}$ - шаг оптимизации должен оставаться постоянным в течение всего поиска положения точки оптимума и быть равным шагу унификации:

$$\Delta x_1 = \Delta H = const.$$

Это требует соответствующей коррекции выбранного традиционного метода оптимизации. Следует ожидать, что на величину минимальной стоимости строительства линии канатного метро, определяемую расчетом целевой функции (1), также будет оказывать влияние принятый минимальный типоразмер унифицированных промежуточных опор, характеризующийся минимальной высотой $H_{t \min}^{un}$. Это требует проведения ряда оптимизационных расчетов для нескольких начальных точек оптимизации $\{x\}^{beg}$, отличающихся значением высоты промежуточной опоры $x_1^{beg} = H_{t \min}^{un, i}$, причем для i -го

расчета величина $H_{t_{\min}}^{un,i}$ задается в интервале $H_{t_{\min}}^{un} \dots H_{t_{\min}}^{un} + \Delta H$.

• Решение задачи оптимизации шага установки унифицированных по высоте промежуточных опор линии канатного метро с учетом названных выше особенностей вычислительного алгоритма метода оптимиза-

ции было реализовано в компьютерной программе «Оптимизация линии канатного метро с унифицированными опорами» [21]. Ее структурная схема с указанием входящих процедур представлена на рис. 2, а укрупненная блок-схема - на рис. 3.

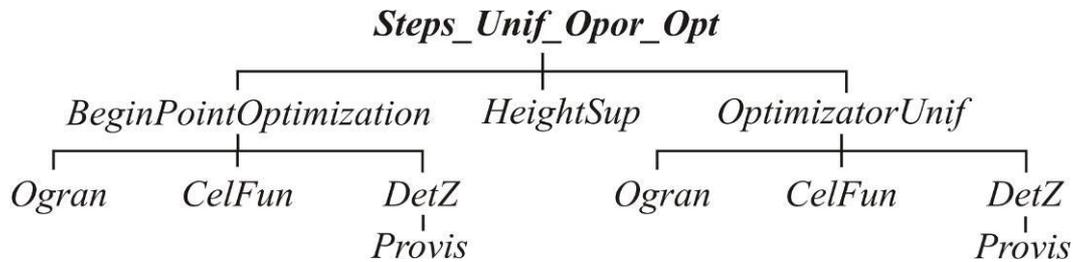


Рис. 2. Структурная схема компьютерной программы «Оптимизация линии канатного метро с унифицированными опорами»

Программа структурно включает в себя головную процедуру *Steps_Unif_Opor_Opt* и 6 подпрограмм типа Procedure:

- *BeginPointOptimization* – расчет целевой функции в начальной точке оптимизации;
- *CelFun* – вычисление значения целевой функции $\Pi(\{x\})$ в соответствии с соотношениями (2) или (3);
- *DetZ* - вычисление неуправляемых параметров - компонент вектора $\{z\}$;
- *Provis* – определение формы провисания каната и вычисление компонент вектора $\{z\}$, зависящих от формы провисания каната;
- *Ogran* – вычисление левых частей ограничений задачи оптимизации;
- *OptimizadorUnif* – реализация алгоритма оптимизации целевой функции (с учетом коррекции алгоритма на основе постоянства шага оптимизации по одному из управляемых параметров – высоте промежуточной опоры);

HeightSup – определение минимального типоразмера унифицированной промежуточной опоры.

Анализ результатов оптимизации шага установки промежуточных унифицированных опор.

Расчеты, проведенные с помощью вычислительной программы «Оптимизация линии канатного метро с унифицированными опорами» [21] для ряда возможных вариантов конструктивного исполнения канатной

транспортной системы, показали, что технико-экономические показатели оптимального варианта установки унифицированных по высоте промежуточных опор зависят от шага унификации ΔH , стоимости строительства самой опоры и комплекта технологического оборудования, монтируемого на опоре, а также угла наклона земной поверхности α_{sl} .

На рис. 4 приведены результаты оптимизации – графики изменения высоты и шага установки унифицированных промежуточных опор H_{ig}^{opt} для трех значений шага унификации $\Delta H = 2, 4$ и 8 м в зависимости от угла наклона поверхности рельефа α_{sl} . Конструктивно каждый из указанных шагов может быть реализован с помощью специальной секции-вставки соответствующей длины, крепящейся на оголовке промежуточной опоры, например, минимального типоразмера $H_{ig\min}^{un}$. Для рассмотренных вариантов ΔH был принят единый минимальный типоразмер $H_{ig\min}^{un} = 18$ м. На рис. 4 также нанесен график $H_{ig}^{opt}(\alpha_{sl})$, рассчитанный для неунифицированных опор на основе решения задачи технико-экономической оптимизации линии канатного метро [10]. Для унифицированных опор график $H_{ig}^{opt}(\alpha_{sl})$ имеет дискретно-ступенчатый характер (рис. 4, а), причем с увеличением шага унификации ΔH дискретность увеличивается: ширина

диапазона углов α_{sl} , в пределах которых высота опор H_{lg}^{opt} имеет неизменное значение, | возрастает.

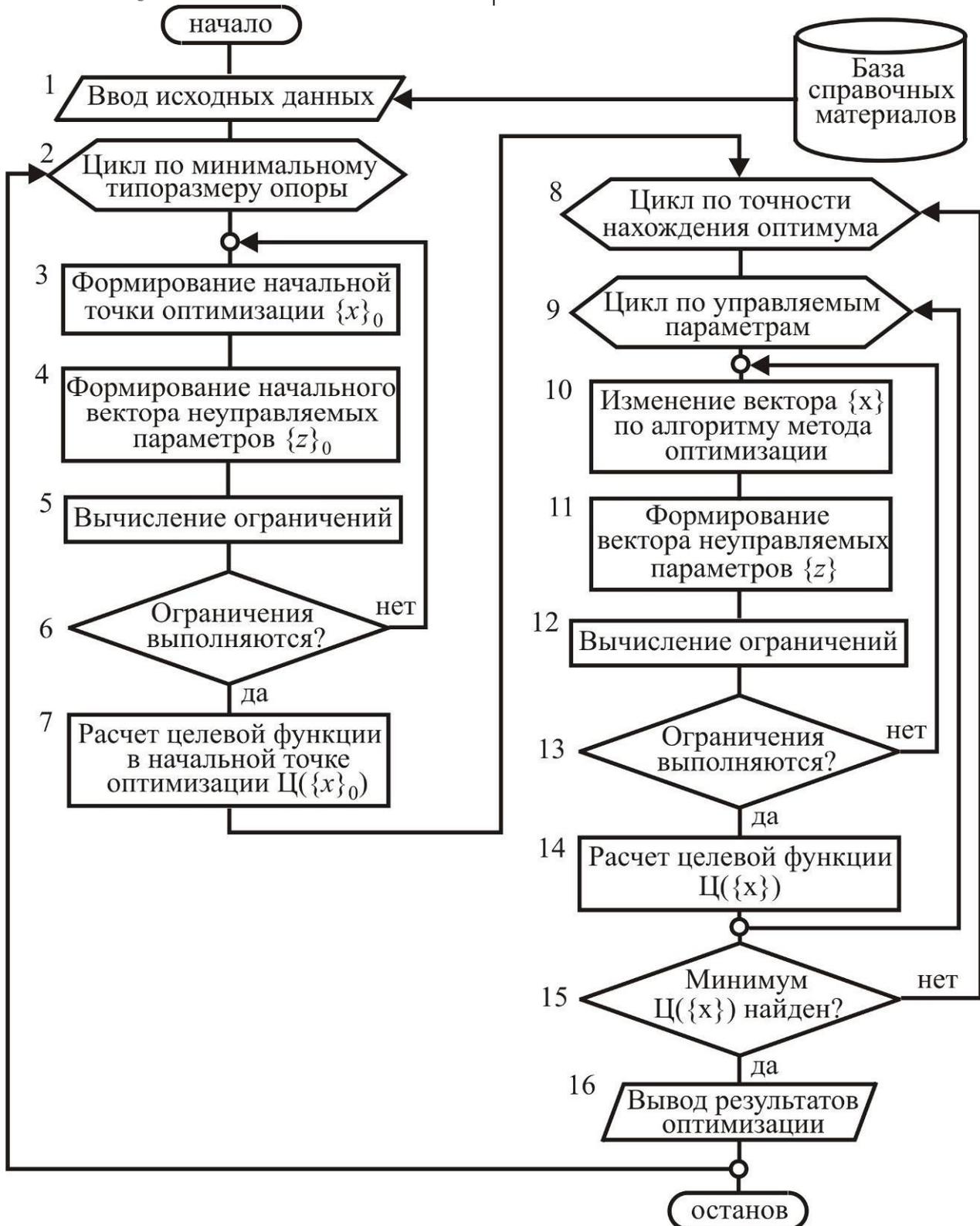


Рис. 3. Укрупненная блок-схема компьютерной программы «Оптимизация линии канатного метро с унифицированными опорами»

Изменение шага установки унифицированных промежуточных опор L_t^{opt} для опти- | мального варианта конструктивного исполнения линии канатного метро в зависимости

от угла наклона поверхности рельефа α_{sl} также носит дискретно-ступенчатый характер (рис. 4, б). Переход на больший типоразмер унифицированной промежуточной опоры обуславливает необходимость установки

опор с большим шагом L_i^{opt} . Его величина затем начинает монотонно уменьшаться с дальнейшим ростом угла наклона α_{sl} до тех пор, пока не потребуется переход на новый типоразмер опоры.

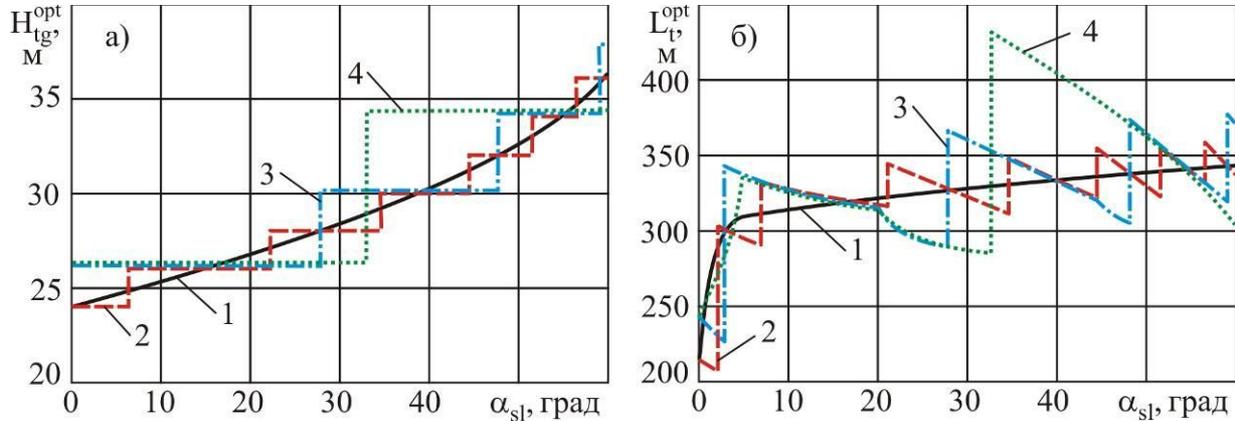


Рис. 4. Изменение оптимальных характеристик линии канатного метро с унифицированными промежуточными опорами в зависимости от угла наклона поверхности рельефа: а – высота опор; б – шаг установки опор (1 – неунифицированная опора; 2 – $\Delta H = 2$ м; 3 – $\Delta H = 4$ м; 4 – $\Delta H = 8$ м)

Такая синхронность изменения оптимальных значений высоты и шага установки промежуточных опор приводит к тому, что оптимальные стоимостные характеристики линии канатного метро выражаются не дискретно-ступенчатой, а гладкой функцией. Как пример, на рис. 5 показан график стоимости 1 км линии канатного метро $C_{1km}(\alpha_{sl})$

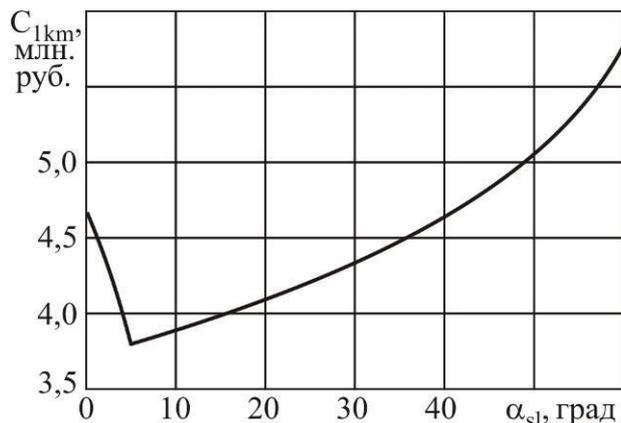


Рис. 5. Изменение стоимости 1 км линии канатного метро в зависимости от угла наклона поверхности рельефа для унифицированной опоры типа ПГМ 500 с шагом унификации 8 м

для унифицированных опор с шагом унификации $\Delta H = 8$ м. В качестве стоимостных характеристик промежуточных опор и несущих канатов были рассмотрены стоимостные характеристики стальных многогранных опор типа ПГМ 500 и грузоподъемных канатов по ГОСТ 3079-80, приведенные в [10].

Немонотонный характер графика $C_{1km}(\alpha_{sl})$ обусловлен тем, что, как показано в [10], при малых углах наклона поверхности рельефа $\alpha_{sl} \leq \sim 5^\circ$ кривая провисания несущих канатов для оптимального конструктивного исполнения линии канатного метро характеризуется формой I, затем при углах наклона до $\alpha_{sl} \sim 6 \dots 8^\circ$ – формой III, а далее – формой II. Анализируя форму графиков $H_{tg}^{opt}(\alpha_{sl})$ на рис. 4, а, можно ожидать, что для тех значений угла α_{sl} , при которых наблюдается наибольшая разница высот унифицированных и неунифицированных опор, должна также наблюдаться и наибольшая разница в стоимости 1 км линии канатного метро. Расчеты показали, что даже при достаточно большом шаге унификации $\Delta H = 8$ м наибольшая разница в стоимости оказывается практически незначимой: она лежит в пределах до 2...3%, возрастая с ростом α_{sl} и стоимости отдельных опор.

Унификация промежуточных опор по высоте и ее шаг практически не оказывают

влияния на оптимальное значение горизонтального усилия натяжения несущих канатов S_k^{opt} , которое определяется, главным образом, углом наклона поверхности рельефа α_{sl} (рис. 6). Расчеты показали, что отклонение величины S_k^{opt} для неунифицированных и унифицированных опор в пределах диапазона углов наклона поверхности рельефа $\alpha_{sl}=0...60^0$ составляет не более 0,5...0,8 %.

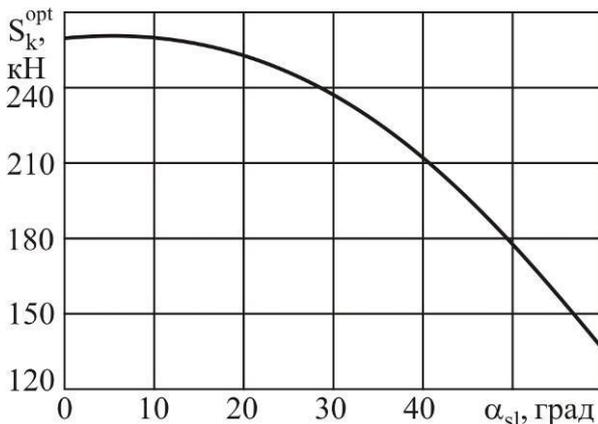


Рис. 6. Изменение горизонтального усилия натяжения несущих канатов S_k^{opt} в зависимости от угла наклона поверхности рельефа для унифицированной опоры типа ПГМ 500 с шагом унификации 8 м

Численное исследование влияния минимального типоразмера унифицированных промежуточных опор $H_{i\min}^{un}$ на оптимальные характеристики конструктивного исполнения линии канатного метро показали, что даже при достаточно большом шаге унификации $\Delta H = 8$ м выбор минимального типоразмера в интервале высоты опоры 0...8 м приводит к отклонению стоимости C_{1km} в малых пределах $\pm 1,3\%$, хотя отклонение L_i^{opt} может достигать $\pm(15...20)\%$.

Математическая модель оптимизации линии канатного метро с унифицированными по высоте промежуточными опорами.

В основу данной математической модели целесообразно положить ранее разработанную в [12, 13] и реализованную в виде компьютерной программы [22] математическую модель технико-экономической оптимизации проектирования линии канатного метро. В указанной модели рассматривается случай промежуточных опор, неунифицированных

по высоте, причем в вектор управляемых параметров задачи оптимизации непосредственно включены высоты промежуточных опор [12, 13]:

$$\{x\}^T = \{x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n \ \dots \ x_N\} = \{H_A \ H_B \ S_k \ u_1 \ u_2 \ \dots \ u_{I_t} \ H_{ig1} \ H_{ig2} \ \dots \ H_{igI_t}\},$$

где $H_A = H_{ig=0}$, $H_B = H_{ig=I_t+1}$ - высота посадочных станций; H_{igi} ($i \in [1; I_t]$) - высоты промежуточных опор; u_i ($i \in [1; I_t]$) - координаты точек расположения промежуточных опорных конструкций вдоль линии канатного метро (при этом координаты расположения посадочных станций составляют: для станции A - $u_A = u_{i=0} = 0$, для станции B - $u_B = u_{i=I_t+1} = L_{AB}$); I_t - число промежуточных опор в пределах проектируемой линии.

Таким образом, математическая модель [12, 13] справедлива и для оптимального проектирования линии канатного метро с унифицированными по высоте промежуточными опорами при условии, что алгоритм используемого прямого метода оптимизации будет предусматривать постоянный шаг варьирования высоты всех промежуточных опор $H_{igi} = \Delta H = const$ в течение всего процесса поиска положения точки минимума целевой функции.

Заключение.

1. Для технико-экономического оптимального проектирования линии канатного метро применительно к случаю промежуточных опор, унифицированных по высоте, традиционные алгоритмы оптимизации (методы типа Хука-Дживса) не могут быть использованы. Требуется их коррекция, которая предусматривает постоянство шага поиска точки минимума целевой функции в течение всего процесса оптимизации для части управляемых параметров – высот промежуточных опор. При этом шаг поиска для других управляемых параметров должен уменьшаться по мере приближения к точке минимума целевой функции.

2. Для унифицированных опор график зависимости их высоты от угла наклона поверхности рельефа имеет дискретно-ступенчатый характер. С увеличением шага унификации дискретность увеличивается: ширина диапазона углов наклона поверхно-

сти рельефа, в пределах которых высота опор остается постоянной, возрастает.

3. Для унифицированных опор график зависимости шага их установки вдоль линии канатного метро от угла наклона поверхности рельефа также имеет дискретно-ступенчатый характер. Переход на больший типоразмер унифицированной промежуточной опоры обуславливает необходимость установки опор с большим шагом. Его величина затем начинает монотонно уменьшаться с дальнейшим ростом угла наклона поверхности рельефа до тех пор, пока не потребуется переход на новый типоразмер опоры.

4. Синхронное изменение оптимальных значений высоты и шага установки промежуточных опор в зависимости от угла наклона поверхности рельефа приводит к тому, что оптимальные стоимостные характеристики линии канатного метро выражаются не дискретно-ступенчатой, а гладкой функцией. Она имеет экстремальный характер с минимумом при углах наклона поверхности рельефа $\sim 5^0$, что связано с изменением формы провисания несущих канатов.

5. Унификация промежуточных опор оказывает незначительное влияние на оптимальные стоимостные характеристики линии канатного метро. Даже при достаточно большом шаге унификации наибольшая разница в оптимальной стоимости оказывается практически незначимой: она лежит в пределах до 2...3%, возрастая с ростом угла наклона поверхности рельефа и единичной стоимости промежуточной опоры.

6. Унификация промежуточных опор по высоте и ее шаг практически не оказывают влияния на оптимальное значение горизонтального усилия натяжения несущих канатов. Оно определяется, главным образом, углом наклона поверхности рельефа. Отклонение величины горизонтального усилия натяжения несущих канатов для неунифицированных и унифицированных опор в пределах диапазона углов наклона поверхности рельефа $0 \dots 60^0$ составляет не более 0,5...0,8 %.

Список литературы.

1. Короткий, А.А. Перспективы применения канатного транспорта в урбанизированной среде / А.А. Короткий, М.В. Кирсанов,

А.В. Панфилов // Градостроительство. – 2013. - № 4. - С. 66-70.

2. 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.

3. Пат. 2506182 Российская Федерация, МПК В61В 7/00. Транспортная система («Канатное метро») / А.А. Короткий, А.В. Лагереv, Б.Ч. Месхи, В.М. Приходько, Г.В. Кустарев, В.Б. Маслов, Д.А. Короткий, М.В. Кирсанов, А.В. Панфилов, И.А. Лагереv. - № 2012121358/11; заявл. 23.05.12; опубли. 10.02.14.

4. Пат. 120617 Российская Федерация, МПК В61В 7/00. Транспортная система («Канатное метро») / А.А. Короткий, А.В. Лагереv, Б.Ч. Месхи, В.М. Приходько, Г.В. Кустарев, В.Б. Маслов, Д.А. Короткий, М.В. Кирсанов, А.В. Панфилов, И.А. Лагереv. - № 2012121284/11; заявл. 23.05.12; опубли. 27.09.2012. - Бюл. № 27.2. Пат. 2506182 Российская Федерация, МПК В61В 7/00. Транспортная система («Канатное метро») / А.А. Короткий, А.В. Лагереv, Б.Ч. Месхи, В.М. Приходько и др. - № 2012121358/11; заявл. 23.05.12; опубли. 10.02.14.

5. Канатное метро // ИКЦ «Мысль» НГТУ: [сайт]. - Режим доступа: <http://www.ikcmysl.ru/kanatnoe-metro>.

6. Самсонов, А.В. Моделирование динамики мехатронного модуля гибкого тягового органа канатной дороги / А.В. Самсонов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2016. - № 2. – С. 81-85.

7. 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.

8. Месхи, Б.Ч. Концепция развития сети канатного метро в Ростове-на-Дону // Б.Ч. Месхи, А.А. Короткий, В.Б. Маслов // Вестник Донского государственного технического

го университета. – 2011. – Т. 11. - № 8. – С. 1348-1355.

9. 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.

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

11. Лагерев, И.А. Оптимизация шага расположения и высоты промежуточных опорных металлоконструкций канатного метро / И.А. Лагерев // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы: Материалы XIX Московской междунар. межвуз. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Москва, 9 апреля 2015 г. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – С. 88-90.

12. Лагерев, А.В. Оптимальное проектирование линии канатного метро / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев // Вестник Брянского государственного университета. – 2015. - № 2. - С. 406-415.

13. 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.

14. Лагерев, И.А. Оптимальное проектирование подъемно-транспортных машин / И.А. Лагерев, А.В. Лагерев. – Брянск: БГТУ, 2013. – 228 с.

15. Гилл, Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. – М.: Мир, 1985. – 509 с.

16. Лагерев, А.В. Динамико-прочностной анализ гидравлических крано-манипуляторных установок мобильных машин / А.В. Лагерев, А.А. Мильто, И.А. Лагерев. – Брянск: РИО БГУ, 2015. – 186 с.

17. Лагерев, И.А. Моделирование рабочих процессов манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов / И.А. Лагерев. – Брянск: РИО БГУ, 2016. – 371 с.

18. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности пассажирских канатных дорог и фуникулеров». – Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 6 февраля 2014 г. № 42.

19. Лагерев, А.В. Нагруженность подъемно-транспортной техники / А.В. Лагерев. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2010. – 180 с.

20. СНиП 23-01-99. Строительная климатология. – Введ. 2000-01-01. – М.: Госстандарт: Изд-во стандартов, 2000. – 68 с.

21. Оптимизация линии канатного метро с унифицированными опорами: свид-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / Лагерев А.В., Лагерев И.А. - № 2017662165; заявл. 21.07.2017; опубли. 01.11.2017.

22. Оптимизация линии канатного метро: свид-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / авторы, заявители и правообладатели Лагерев А.В., Лагерев И.А., Вольпер Л.В., Вольпер В.Л. - № 2015614518; заявл. 10.03.2015; опубли. 20.04.2015.

Сведения об авторах

Лагерев 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.

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

OPTIMAL DESIGN OF THE CABLE METRO WITH UNIFIED INTERMEDIATE SUPPORTS

Lagerev A.V., Lagerev I.A.

Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, Bryansk, Russian Federation

In article was formulated and solved the problem of conditional nonlinear technical and economic optimization of the distance between intermediate supports, uniform in height, during the design of the cable metro lines in highly urbanized city environment. The optimization problem involves a single-criterion objective function that expresses the cost of construction of the cable metro line (total cost of intermediate supports and their foundations, traction and carrying steel cables and technical equipment). The specified objective function subject to minimization by finding the optimal combination of the distance between intermediate supports and tension carrying ropes with accounting constructive, modal, structural and planning constraints in the form of nonlinear inequalities. The optimization algorithm was based on the direct method of optimization type, Hooke-Jeeves, which was modified taking into account the need of varying the height of intermediate supports with a constant step equal to the step of unification. When constructing the objective function were considered three possible forms sagging of carrying ropes, which can be implemented for various values of the efforts of their tension. Analysis was done of the influence of the step unification and minimum size of intermediate supports on their optimum step, the cost of intermediate supports, the cost of 1 km cable metro line for different values of the angle of the longitudinal slope of the surface relief along the cable metro line. The graph of height of unified supports from the angle of the longitudinal slope of the surface relief has discrete-step type. With the increase of the step unify the discreteness increases: the width of the range of angles of the longitudinal slope of the surface relief within which the height of the supports remains constant, increases. The graph of step installation of unified supports along the cable metro line from the angle of the longitudinal slope of the surface relief also has discrete-step type. The transition to a larger height unified intermediate supports determines the need for installation of supports with a large pitch. Its value then begins to decrease monotonically with further increase of the angle of the longitudinal slope of the surface relief until it needs to transition to the new size of supports. Synchronous change in the optimal values of the height and step of the installation of intermediate supports, depending on the angle of the longitudinal slope of the surface relief leads to the fact that the optimal cost characteristics of the cable metro lines are smooth functions. It has an extreme character with a minimum at angles of inclination of the surface elevation ~5 degrees, which is associated with the form of sagging of the load-bearing ropes. Unification of intermediate supports has little effect on the optimal cost characteristics of the cable metro lines. Even for a sufficiently large step of the unification the largest difference in optimal value is almost insignificant: it lies in the range of 2...3%, increasing with increasing the angle of the longitudinal slope of the surface relief and unit cost of the intermediate support. Unification of intermediate supports according to the height and their step practically does not affect the optimal value for horizontal tension on the load-bearing ropes. It determined mainly by the angle of the longitudinal slope of the surface relief. Deviation of horizontal tension on the load-bearing ropes for the nonstandard supports and the unified supports within the range of angles of inclination of the terrain surface 0...60 degrees is not more than 0.5 to 0.8 %.

Keywords: cable metro, ropeway, intermediate support, installation step, unification, traction cable, carrying cable, strength of the cable, optimization, cost.

DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-04-400-414

References

1. Korotkiy A.A., Kirsanov M.V., Panfilov A.V. Perspektivy primeneniya kanatnogo transporta v urbanizirovannoy srede. *Gradostroitel'stvo*, 2013, No. 4, pp. 66-70. (In Russian)
2. 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-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No.2, pp. 163-177. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-02-163-177. (In Russian)
3. Patent RU 2506182. *Transportnaya sistema «Kanatnoe metro»* [Transport system «Rope metro»]. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meskhi B.I., Prikhodko V.M., Kustarev G.V., Maslov V.B., Korotkiy D.A., Kirsanov M.V., Panfilov A.V., Lagerev I.A. Declared 23.05.2012. Published 10.02.2014. (In Russian)
4. Patent RU 120617. *Transportnaya sistema «Kanatnoe metro»* [Transport system «Rope metro»]. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meskhi B.I., Prikhodko V.M., Kustarev G.V., Maslov V.B., Korotkiy D.A., Kirsanov M.V., Panfilov A.V., Lagerev I.A. Declared 23.05.2012. Published 27.09.2012. (In Russian)
5. *Kanatnoe metro. IKTs «Myhsl» NGTU*. Available at: <http://www.ikcmysl.ru/kanatnoe-metro>. (In Russian)

6. Samsonov A.V. Cable railway mechatronic drive dynamics simulation. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, No.2, pp. 81-85. (In Russian)
7. 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. (In Russian)
8. Meskhi B.Ch., Korotkiy A.A., Maslov V.B. Vision of cable metro network in Rostov-on-Don. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, Vol.11, No.8, pp. 1348-1355. (In Russian)
9. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Cable transport system "Kanatnoe metro" towers distance optimisation. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, No.4, pp. 22-30. (In Russian)
10. Lagerev A.V., Lagerev I.A. The effect of topography on the choice of optimal step intermediate supports along the line of the cable metro. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No.3, pp. 253-272. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-01-253-272 (In Russian)
11. Lagerev I.A. Optimization of the step location and height of intermediate support metal structures of the cable metro. *Materialy XIX Moskovskoy mezhdunarodnoy mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Podemno-transportnye, stroitelnye, dorozhnye, putevye mashiny i robototekhnicheskie komplekсы"* [Proceedings of the 19 Moscow International Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists "Lifting-transport, building, road, track machines and robotic systems"]. Moscow, MGTU imeni N.E. Bauman, 2015, pp. 88-90. (In Russian)
12. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Optimal design of the cable car line. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No. 2, pp. 406-415. (In Russian)
13. 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)
14. Lagerev I.A., Lagerev A.V. *Optimalnoe proektirovanie podyemno-transportnykh mashin* [Optimal design of lifting-transport machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskii Universitet, 2013. 228 p. (In Russian)
15. Gill Ph.E., Murray W., Wright M.H. Practical optimization. Academic Press Inc. (London) Ltd, 1981.
16. Lagerev A.V., Milto A.A., Lagerev I.A. *Dinamiko-prochnostnoy analiz gidravlicheskiykh krano-manipulyatornykh ustanovok mobilnykh mashin* [Dynamic and mechanical analysis of hydraulic crane-manipulating installations of mobile machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Universitet, 2015. 186 p. (In Russian)
17. Lagerev I.A. *Modelirovanie rabochikh protsessov manipulyatsionnykh sistem mobilnykh mnogoselevykh transportno-tekhnologicheskikh mashin i kompleksov* [Modeling of work processes in manipulation systems for mobile multi-purpose transport and technological machines and complexes]. Bryansk, RIO BGU, 2016. 371 p. (In Russian)
18. *Federalnye normy i pravila v oblasti promyshlennoy bezopasnosti "Pravila bezopasnosti passazhirskikh kanatnykh dorog i funikule-rov"* [Federal norms and rules in the field of industrial safety "Safety rules for passenger ropeways and funiculars"]. Moscow, Federalnaya sluzhba po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru, 2014. (In Russian)
19. Lagerev A.V. *Nagruzhenost podemno-transportnoy tekhniki* [Load lifting and transport equipment]. Bryansk, BGTU, 2010. 180 p. (In Russian)
20. *SNiP 23-01-99. Stroitel'naya klimatologiya* [Building climatology]. Moscow, Gosstandart, 2003. 68 p. (In Russian)
21. Lagerev A.V., Lagerev I.A. *Optimizatsiya linii kanatnogo metro s unifikatsionnyimi oporami. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM* [Optimization of the cable metro lines with unified supports. The Certificate on official registration of the computer program]. No. 2017662165, 2017. (In Russian)
22. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Volper L.V., Volper V.L. *Optimizatsiya linii kanatnogo metro. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM* [Optimization of the cable metro line. The Certificate on official registration of the computer program]. No. 2015614518, 2015. (In Russian)

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.

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

Дата принятия к публикации
(Date of acceptance for publication)
19.07.2017

Дата публикации
(Date of publication):
25.12.2017

