

4. Тракторы. Конструкция/ В.М. Шарипов, Д.В. Апельинский., **Л.Х. Арустамов** и др.; Под общ. ред. В.М. Шарипова. – М.: Машиностроение, 2012. – 790 с.
5. Тракторы и автомобили/ В.М. Шарипов, М.К. Бирюков, Ю.В. Дементьев и др.; Под общ. ред. В.М. Шарипова. – М.: Издательский дом «Спектр», 2010. – 351 с.
6. Жилейкин М.М., Котиев Г.О., Сарач Е.Б. Разработка адаптивных законов управления двухуровневым демпфированием в подвеске быстроходных многоосных колесных машин // Журнал автомобильных инженеров. – 2012. – №1 (72). – С. 28-33.
7. Метод выбора рациональных параметров системы поддрессоривания быстроходных гусеничных машин / **В.А. Савочкин**, В.М. Шарипов, И.А. Смирнов и др. // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – №3. – С. 12-18.
8. Золотаревская Д.И. Математическое моделирование колебаний колесного трактора с амортизаторами на передней подвеске // Тракторы и сельхозмашины. 2014. №1. – С. 8-11.
9. Золотаревская Д.И. Оценка влияния скорости колесного трактора и других факторов на его колебания // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – №2. – С. 21-25.
10. К вопросу об оптимизации системы поддрессоривания быстроходной гусеничной машины / **В.А. Савочкин**, В.М. Шарипов, И.А. Смирнов, С.М. Шишанов // Известия МГТУ «МАМИ». – 2014. – №3(21). – Т.1. – С. 79-90.
11. Подрубалов В.К., Подрубалов М.В., Никитенко А.Н. Применимость различных схем динамической системы колесного трактора при расчетной оценке его вибронагруженности // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – №1. – С. 20-25.
12. Подрубалов В.К., Подрубалов М.В. Результаты экспериментальных исследований кинематических возбуждений машин от с.-х. профилей пути // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – №9. – С. 34-38.
13. Щетинин Ю.С., Есеновский-Лашков М.Ю., Сергеев А.И. Теоретические исследования колебаний колесного трактора при работе в тяговом режиме // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – №3. – С. 17-20.
14. Лысов А.М. Выбор подвески гусеничного с.-х. трактора треугольной компоновочной схемы тягового класса 5-6 // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – №3. – С. 26-29.
15. Стрелков А.Г. Конструкция быстроходных гусеничных машин. – М.: МГТУ «МАМИ», 2005. – 616 с.

Оптимальное проектирование линий канатного метро в условиях сильно урбанизированной городской среды

д.т.н. проф. Лагерев А.В., к.т.н. Лагерев И.А.
Брянский государственный университет им. акад. И.Г.Петровского
8 (4832) 64-81-17, bsu-avl@yandex.ru

Аннотация. Сформулирована и решена задача условной нелинейной технико-экономической оптимизации размещения и высоты промежуточных опорных конструкций при проектировании линий канатного метро в условиях сильно урбанизированной городской среды.

Ключевые слова: метро канатное, оптимизация, конструкция промежуточная опорная, станция посадочная, канат, стоимость

Канатное метро, представляющее собой дальнейшее развитие подвесных канатных дорог, является эффективной альтернативой традиционным видам наземного общественного транспорта [1]. Это скоростной городской транспорт, так как проектная скорость движения составляет 40 – 60 км/ч, что в 1,5 – 2 раза выше средней скорости движения традиционного транспорта. Канатное метро уже начали активно использовать как общественный транспорт для урбанизированной среды в Европе, Азии и Латинской Америке [2].

Значительную составляющую в общую стоимость строительства канатного метро, включая расходы на проектно-конструкторские, изыскательские, строительно-монтажные

работы, приобретение необходимого механического оборудования, создания системы управления движением и др., вносят затраты на изготовление и установку промежуточных опорных конструкций вдоль линии метро, а также приобретение тяговых и несущих стальных канатов. Величина этих затрат зависит от числа промежуточных опор, расположенных по длине линии, т.е. шага их установки. Учитывая необходимость обеспечения предельно допустимой минимальной высоты приближения пассажирских кабин к поверхности земли, понятно, что с уменьшением шага установки опор их суммарная стоимость будет возрастать вследствие увеличения количества опорных конструкций, хотя единичная стоимость опоры будет снижаться вследствие уменьшения ее высоты.

Очевидно, задача расположения промежуточных опор канатного метро является задачей технико-экономической оптимизации. Ее цель – обеспечение минимальных затрат на возведение опорных конструкций, приобретение тягового и несущих канатов, а также комплекта устанавливаемого на опору необходимого технологического оборудования.

В стоимостном выражении величина затрат C на строительство участка линии между соседними посадочными станциями A и B складывается из ряда слагаемых: стоимости зданий станций C_A и C_B ; стоимости технологического оборудования C_{eA} и C_{eB} ; стоимости промежуточных опорных металлоконструкций C_{ii} и фундамента под ними C_{fi} ; стоимости установленного на опорах технологического оборудования C_{ei} ; стоимости тягового и несущих стальных канатов. Зависимость для расчета затрат C имеет вид:

$$C = C_A + C_B + C_{eA} + C_{eB} + \sum_{i=1}^{I_t} (C_{ii} + C_{fi} + C_{ei}) + (C_{kt} + n_{kn} C_{kn}) \sum_{m=1}^{I_t+1} l_{km}, \quad (1)$$

где: C_{kt}, C_{kn} – стоимость 1 погонного метра тягового и несущего каната; I_t – число промежуточных опор; n_{kn} – число несущих канатов; l_{km} – длина каната с учетом его провисания в m -м пролете между соседними промежуточными опорами.

Стоимость строительства зданий посадочных станций может варьироваться в широких пределах. На начальном этапе проектирования затраты на строительство зданий посадочных станций C_A и C_B можно определять по зависимости вида:

$$C_{A(B)} = (C_{sA(B)} S_{fA(B)} / h_{fA(B)}) H_{A(B)},$$

где: $C_{sA(B)}$ – стоимость 1 м² здания станции A (B); $S_{fA(B)}, h_{fA(B)}$ – площадь и высота этажа здания станции A (B); $H_{A(B)}$ – высота расположения посадочной площадки станции A (B).

Стоимость промежуточной опорной конструкции C_t зависит как от ее возможного конструктивного исполнения, так и высоты H_t . Она может быть аппроксимирована степенной регрессионной зависимостью вида:

$$C_t = C_{t0} H_t^{a_t}. \quad (2)$$

Для оценки эмпирических коэффициентов C_{t0} и a_t [3] используются данные о стоимости опорных конструкций линий электропередач, т.к. конструктивно они достаточно близки к промежуточным опорным конструкциям канатного метро.

Вследствие необходимости натяжения тягового и несущих канатов требуется усиление конструкции опор, что повышает их массу и, соответственно, стоимость изготовления. Это обстоятельство удобно учесть путем увеличения расчетной высоты опор по сравнению с их геометрической высотой H_{tg} пропорционально принятому натяжению S_k несущих канатов. Поэтому в выражении (2) для оценки единичной стоимости опоры необходимо использовать расчетную высоту, составляющую:

$$H_t = H_{tg} (1 + \psi [n]_k S_k / R_{kn}),$$

где: ψ – коэффициент усиления конструкции опоры при действии максимально допустимого

по условию прочности каната усилия натяжения $T_{k \max} = R_{kn} / [n]_k$; R_{kn} – агрегатная прочность несущего каната; $[n]_k$ – минимальный коэффициент запаса прочности каната [4].

Согласно требованиям Ростехнадзора [4] в качестве тяговых и несущих стальных канатов в конструкции канатного метро необходимо использовать либо специальные канаты повышенной агрегатной прочности, либо традиционные для канатных дорог и лифтов грузопассажирские канаты по ГОСТ 2688-80, ГОСТ 3066-80, ГОСТ 3077-80, ГОСТ 3079-80, ГОСТ 3081-80, ГОСТ 7665-80 и ГОСТ 7667-80. Используемые в расчетах основные параметры указанных канатов следует представить в зависимости от их диаметра d_k [3]:

- для расчета собственного веса 1 погонного метра длины каната:

$$q_k = q_{k0} d_k^2;$$

- для расчета агрегатной прочности (разрывного усилия) каната:

$$R_k = r_{k0} + r_{k1} d_k + r_{k2} d_k^2;$$

- для расчета стоимости 1 погонного метра длины каната:

$$C_k = c_{k0} + c_{k1} d_k + c_{k2} d_k^2.$$

Значения эмпирических коэффициентов, полученные с помощью метода наименьших квадратов по данным ГОСТ и ценовым данным фирм-изготовителей, приведены в [3].

Расчетная схема участка линии канатного метро между соседними промежуточными опорами приведена на рисунке 1. Линия провисания несущего каната формируется под действием нескольких сил:

- вертикальной равномерно распределенной нагрузки от собственного веса каната интенсивностью q_{kn} ;
- вертикальной сосредоточенной нагрузки от веса пассажирских кабин Q_{cab} ;
- горизонтального продольного усилия натяжения каната S_k ;
- горизонтальной поперечной статической составляющей ветрового давления на пассажирскую кабину p_{cab} ;
- горизонтальной поперечной статической составляющей ветрового давления на несущие канаты p_{kn} .

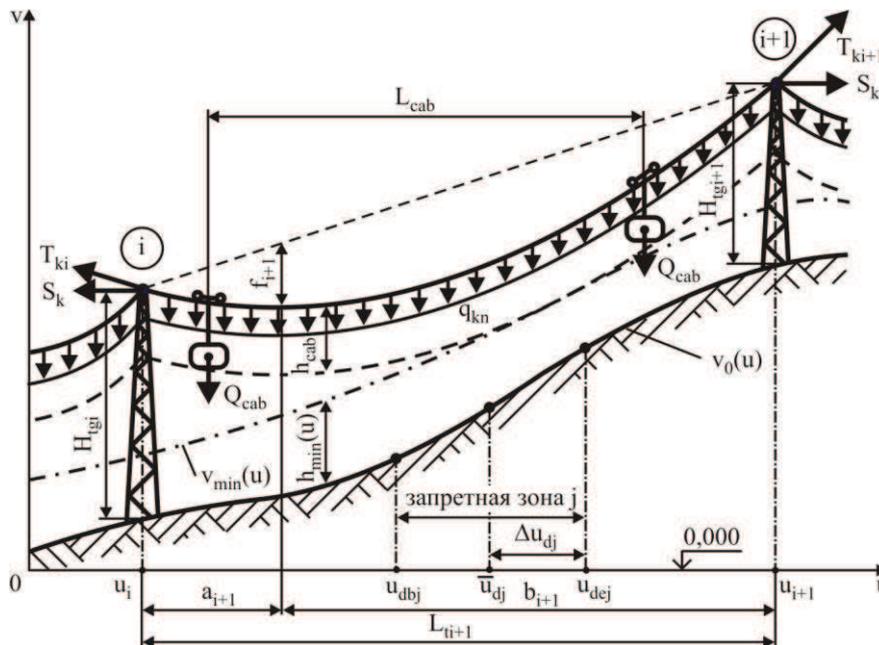


Рисунок 1. Расчетная схема линии канатного метро между соседними опорами

Сосредоточенные нагрузки Q_{cab} удобно заменить распределенными интенсивностью:

$$q_{cab} = Q_{cab} / n_{kn} L_{cab},$$

где: L_{cab} – расстояние между соседними пассажирскими кабинами.

Равнодействующая поперечной распределенной нагрузки на m -й несущий канат:

$$q_{Rknm} = \sqrt{(q_{cabm} + q_{kn})^2 + (p_{cab} + p_{knm})^2} = \\ = \sqrt{\left(q_{kn0} d_{kn}^2 + \mu_m \frac{Q_{cab}}{n_{kn} L_{cab}} \right)^2 + w_0^2 \left(\eta_m C_{wkn} k_{wkn} d_{kn} + \mu_{wm} C_{wcab} k_{wcab} \frac{A_{cab}}{n_{kn} L_{cab}} \right)^2},$$

где: μ_m, μ_{wm} – коэффициенты неравномерности распределения весовой и ветровой нагрузки на m -й несущий канат от пассажирской кабины; η_m – коэффициент ослабления давления ветра на m -й несущий канат для ряда параллельных канатов [5]; w_0 – нормативное ветровое давление [5]; C_{wkn}, C_{wcab} – аэродинамические коэффициенты несущего каната [5] и кабины; k_{wkn}, k_{wcab} – коэффициенты возрастания ветрового давления с высотой [5] для каната и кабины; A_{cab} – площадь проекции кабины на вертикальную плоскость.

На несущие канаты действуют также динамические нагрузки от раскачивания пассажирских кабин при их движении и раскачивания самих канатов под действием ветрового давления. Поэтому по аналогии с расчетами подъемно-транспортной техники [6] при расчете канатной системы используется коэффициент динамичности $\psi_d > 1$.

В зависимости от соотношения величины горизонтального усилия натяжения несущего каната S_k , длины $(i+1)$ -го пролета между соседними i -й и $(i+1)$ -й опорами L_{i+1} и разностью высотных отметок крепления каната на этих опорах:

$$\Delta v_{i+1} = (v_{0i+1} + H_{tgi+1}) - (v_{0i} + H_{tgi}),$$

возможны различные формы провисания несущих канатов:

- форма I, характеризующаяся расположением сечения наибольшего провисания каната внутри пролета между промежуточными опорами (рисунок 1);
- форма II, характеризующаяся расположением сечения наибольшего провисания каната за пределами пролета;
- форма III, характеризующаяся совпадением расположения сечения наибольшего провисания каната с одной из опор пролета.

В качестве критерия K_f , определяющего реализацию одной из указанных форм провисания несущего каната, выступает соотношение:

$$K_f = \frac{q_{Rkn} L_{i+1}^2}{2S_k \Delta v_{i+1}} = \frac{q_{Rkn} L_{i+1}^2}{2S_k [(v_{0i+1} + H_{tgi+1}) - (v_{0i} + H_{tgi})]}.$$

При $K_f \notin (-1; +1)$ реализуется I форма провисания каната, при $K_f \in (-1; +1)$ – II форма, при $K_f = \pm 1$ – III форма. Критерий K_f удобен для определения величины перепада высот расположения узлов крепления несущего каната на соседних промежуточных опорах, при которых реализуются возможные формы провисания каната. Если

$$\Delta v_{i+1} < q_{Rkn} L_{i+1}^2 / 2S_k,$$

то будет реализовываться I форма провисания несущего каната, в противном случае – II форма, а при условии равенства – III форма.

При характерной для канатного метро относительной величине стрелы провисания каната $f_i / L_i < 0,1$ с погрешностью менее 1,3% [7] геометрическая линия провисания несущего каната по I форме в $(i+1)$ -м пролете между соседними i -й и $(i+1)$ -й опорами в том случае, когда точки подвеса концов каната находятся на разной высоте, в системе координат xOy (рисунок 1) может быть представлена параболической зависимостью вида:

$$v_{kn}(u_i \leq u \leq u_{i+1}) = \begin{cases} v_{0i} + H_{tgi} - \psi_d \frac{q_{Rkn}(u - u_i)^2}{2S_k}, & u_i \leq u \leq u_i + a_{i+1} \\ v_{0i+1} + H_{tgi+1} - \psi_d \frac{q_{Rkn}(L_{ti} - u)^2}{2S_k}, & u_i + a_{i+1} \leq u \leq u_i + L_{ti} \end{cases} \quad (3)$$

Максимальная стрела провисания f_{i+1} составляет:

$$f_{i+1} = a_{i+1} \left[\psi_d \frac{q_{Rkn} a_{i+1}}{2S_k} + \frac{(v_{0i+1} + H_{tgi+1}) - (v_{0i} + H_{tgi})}{u_{i+1} - u_i} \right], \quad (4)$$

и находится в сечении на расстоянии a_{i+1} и b_{i+1} от смежных опор i и $i+1$ (рисунок 1):

$$a_{i+1} = \frac{1}{2} \left\{ L_{ti+1} - \frac{2S_k}{q_{Rkn} L_{ti+1}} [(v_{0i+1} + H_{tgi+1}) - (v_{0i} + H_{tgi})] \right\}, \quad (5)$$

$$b_{i+1} = \frac{1}{2} \left\{ L_{ti+1} + \frac{2S_k}{q_{Rkn} L_{ti+1}} [(v_{0i+1} + H_{tgi+1}) - (v_{0i} + H_{tgi})] \right\}. \quad (6)$$

Длина несущего каната в пролете между опорами i и $i+1$ приближенно будет составлять:

$$l_{ki+1} \approx a_{i+1} \left(1 + \psi_d^2 \frac{q_{Rkn}^2 a_{i+1}^2}{24S_k^2} \right) + b_{i+1} \left(1 + \psi_d^2 \frac{q_{Rkn}^2 b_{i+1}^2}{24S_k^2} \right),$$

а его минимальный диаметр, определяемый из условия агрегатной прочности, находится как наибольшее значение из двух величин:

$$d_{kn} = 0,5 \sqrt{r_{k1}^2 - 4r_{k2}(r_{k0} - [n]_k T_{ki}) - r_{k1}} / r_{k2}, \quad (7)$$

$$d_{kn} = 0,5 \sqrt{r_{k1}^2 - 4r_{k2}(r_{k0} - [n]_k T_{ki+1}) - r_{k1}} / r_{k2}, \quad (8)$$

где: T_{ki}, T_{ki+1} – осевые усилия натяжения несущего каната на опорах i и $i+1$, соответственно.

С учетом требуемых значений минимального диаметра несущего каната для всех $L_i + 1$ пролетов линии канатного метро окончательно его минимальный диаметр выбирается равным максимальному из рассчитанных по зависимостям (7) и (8).

Для природных условий Российской Федерации характерны значительные перепады температур воздуха как в течение года, так и на протяжении ряда лет. Эксплуатация канатного метро при температурах t , отличных от принятой проектной величины t_0 , приводит к изменению длины несущих канатов между промежуточными опорами пропорционально коэффициенту температурного удлинения несущего каната α_{Tnk} :

$$l_{ki+1}(t) = l_{ki+1}(t_0) + \alpha_{Tnk}(t - t_0)L_{ti}.$$

Температурное изменение длины несущих канатов при постоянном значении усилия натяжения $S_k(t_0) = S_k(t) = const$ может быть представлено как изменение усилия $S_k(t) \neq S_k(t_0)$ при постоянной температуре, равной проектной $t = t_0 = const$. Из условия эквивалентности изменения длины канатов в обоих случаях усилие натяжения $S_k(t)$ для I формы провисания несущего каната определяется решением нелинейного уравнения:

$$a_{i+1}(t) \left(1 + \psi_d^2 \frac{q_{Rkn}^2 a_{i+1}^2(t)}{24S_k^2(t)} \right) + b_{i+1}(t) \left(1 + \psi_d^2 \frac{q_{Rkn}^2 b_{i+1}^2(t)}{24S_k^2(t)} \right) - \left[a_{i+1} \left(1 + \psi_d^2 \frac{q_{Rkn}^2 a_{i+1}^2}{24S_k^2} \right) + b_{i+1} \left(1 + \psi_d^2 \frac{q_{Rkn}^2 b_{i+1}^2}{24S_k^2} \right) \right] - \alpha_{Tkn}(t - t_0)L_{ti} = 0, \quad (9)$$

в котором расстояния $a_{i+1}(t)$ и $b_{i+1}(t)$ являются функциями искомой величины $S_k(t)$ согласно зависимостям (5) и (6).

Геометрическая линия провисания несущего каната в $(i + 1)$ -м пролете и стрела провисания f_{i+1} при произвольной температуре t будут определяться зависимостями (3) и (4) или (9) при подстановке в них скорректированных значений $S_k(t)$ и $a_{i+1}(t)$.

В качестве варьируемых параметров задачи оптимизации линии канатного метро необходимо использовать следующие влияющие на величину целевой функции параметры:

- число промежуточных опорных конструкций I_t ;
- координаты точек расположения промежуточных опорных конструкций вдоль линии канатного метро u_i ($i \in [1; I_t]$);
- высоты промежуточных опорных конструкций H_{tgi} ($i \in [1; I_t]$) и посадочных станций $H_A = H_{tgi=0}$ и $H_B = H_{tgi=I_t+1}$;
- усилие натяжения несущих канатов S_k .

Из них формируется вектор управляемых параметров:

$$\{x\}^T = \{x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n \ \dots \ x_N\} = \{H_A \ H_B \ S_k \ u_1 \ u_2 \ \dots \ u_{I_t} \ H_{tgi1} \ H_{tgi2} \ \dots \ H_{tgiI_t}\},$$

число элементов которого составляет $N = 2I_t + 3$. При характерных для линий канатного метро расстояниях между соседними посадочными станциями $L_{AB} = 3 - 5$ км число искомым переменных в задаче оптимизации будет достигать $N = 20 - 100$.

Окончательно задача технико-экономической оптимизации при проектировании участка линии канатного метро между соседними посадочными станциями с учетом рельефа поверхности и характеристик городской высотной застройки сводится к минимизации целевой функции – суммарной стоимости строительства – при фиксированном значении числа промежуточных опорных конструкций $I_t = const$, которая согласно (1) имеет вид:

$$\begin{aligned} C(\{x\})|_{I_t=const} = & \left(\frac{C_{sA} S_{fA}}{h_{fA}} \right) x_1 + \left(\frac{C_{sB} S_{fB}}{h_{fB}} \right) x_2 + C_{eA} + C_{eB} + \sum_{i=1}^{i=I_t} (C_{f0i} x_{i+I_t+3}^{afi} + C_{f0i} x_{i+I_t+3}^{afi} + C_{ei}) + \\ & + (C_{kt} + n_{kn} C_{kn}) \sum_{m=1}^{m=I_t+1} \left[a_m(x_{m+I_t+2}; x_{m+I_t+3}; x_{m+2I_t+2}; x_{m+2I_t+3}) \left(1 + \psi_d^2 \frac{q_{Rkn}^2 a_m^2}{6x_3^2} \right) + \right. \\ & \left. + b_m(x_{m+I_t+2}; x_{m+I_t+3}; x_{m+2I_t+2}; x_{m+2I_t+3}) \left(1 + \psi_d^2 \frac{q_{Rkn}^2 b_m^2}{6x_3^2} \right) \right] \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (10)$$

Алгоритм оптимального проектирования линии канатного метро предусматривает многократную поочередную минимизацию целевой функции (10) при различном значении параметра I_t . Глобальный минимум и будет определять характеристики оптимального варианта проектируемой линии.

При нахождении минимума целевой функции (10) должны выполняться следующие ограничения в форме неравенств, определяющие требования:

- 1) к взаимному расположению соседних промежуточных опор:

$$u_1 \geq 0; \ u_{i+1} - u_i, \ i \in [1; I_t - 1]; \ L_{AB} - u_{I_t} \geq 0,$$

- 2) расположению промежуточных опор за пределами запретных зон (исключению попадания места их установки в пределы запретных зон – рек, оврагов, водоемов, стадионов, автотрасс и др.):

$$|u_i - \bar{u}_{dj}| - \Delta u_{dj} \geq 0, \ i \in [1; I_t], \ j \in [1; J_d];$$

- 3) к допустимому диапазону изменения величины шага установки соседних опор:

$$L_{tmax} - u_1 \geq 0; \ L_{tmax} - (u_{i+1} - u_i) \geq 0, \ i \in [1; I_t - 1]; \ L_{tmax} - (L_{AB} - u_{I_t}) \geq 0;$$

$$u_1 - L_{tmin} \geq 0; \ (u_{i+1} - u_i) - L_{tmin} \geq 0, \ i \in [1; I_t - 1]; \ (L_{AB} - u_{I_t}) - L_{tmin} \geq 0;$$

- 4) максимальной высоте промежуточной опоры:

$$H_{t \max} - H_{tgi} \geq 0, i \in [1; I_t];$$

5) допустимому углу наклона несущих канатов к горизонту при движении кабины между соседними промежуточными опорами при максимальной температуре воздуха:

• при I форме провисания каната:

$$[\beta] - \left| \arctg(\psi_d q_{Rkn} a_{i+1} / S_k(t_{\max})) \right| \geq 0,$$

$$[\beta] - \left| \arctg(\psi_d q_{Rkn} b_{i+1} / S_k(t_{\max})) \right| \geq 0, i \in [1; I_t + 1];$$

• при II и III формах провисания каната:

$$[\beta] - \left| \arctg \left(\frac{(v_{0i+1} + H_{tgi+1}) - (v_{0i} + H_{tgi})}{L_{ti}} - \psi_d \frac{q_{Rkn}}{2S_k(t_{\max})} L_{ti} \right) \right| \geq 0,$$

$$[\beta] - \left| \arctg \left(\frac{(v_{0i+1} + H_{tgi+1}) - (v_{0i} + H_{tgi})}{L_{ti}} + \psi_d \frac{q_{Rkn}}{2S_k(t_{\max})} L_{ti} \right) \right| \geq 0, i \in [1; I_t + 1];$$

6) допустимому взаимному высотному расположению узлов крепления несущего каната на соседних промежуточных опорах:

$$[i_t] - \left| \frac{(v_{0i+1} + H_{tgi+1}) - (v_{0i} + H_{tgi})}{L_{ti}} \right| \geq 0, i \in [1; I_t + 1];$$

7) допустимому высотному расположению пассажирских кабин при их движении вдоль трассы канатного метро при максимальной температуре воздуха:

$$v_{kn}(u_i \leq u \leq u_{i+1}) \Big|_{npu t_{\max}} - h_{cab} - h_{\min}(u_i \leq u \leq u_{i+1}) - v_0(u_i \leq u \leq u_{i+1}) \geq 0, i \in [1; I_t + 1];$$

8) допустимым диапазонам изменения диаметров тягового и несущих канатов:

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

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

9) допустимой стреле провисания несущего каната между промежуточными опорами при максимальной температуре воздуха:

• при I форме провисания каната:

$$\psi_f(u_{i+1} - u_i) - a_{i+1}(t_{\max}) \left[\frac{\psi_d q_{Rkn} a_{i+1}(t_{\max})}{2S_k(t_{\max})} + \frac{(v_{i+1} - v_i) + (H_{tgi+1} - H_{tgi})}{u_{i+1} - u_i} \right] \geq 0, i \in [1; I_t + 1],$$

• при II и III формах провисания каната:

$$\psi_f(u_{i+1} - u_i) - \psi_d q_{Rkn} L_{ti} / 8S_k(t_{\max}) \geq 0, i \in [1; I_t + 1];$$

10) минимальному усилию натяжения каната согласно требованиям ПБ 10-559-03 [4]:

$$S_k - 10n_{cab} \psi_d Q_{cab} / n_{kn} \geq 0;$$

11) максимальному осевому усилию натяжения несущего каната исходя из его наибольшей возможной агрегатной прочности:

• при I форме провисания каната:

$$R_{kn}(d_{kn \max}) / [n]_k - S_k / \cos[\arctg(\psi_d q_{Rkn} a_{i+1} / S_k)] \geq 0,$$

$$R_{kn}(d_{kn \max}) / [n]_k - S_k / \cos[\arctg(\psi_d q_{Rkn} b_{i+1} / S_k)] \geq 0, i \in [1; I_t];$$

• при II и III формах провисания каната:

$$\frac{R_{kn}(d_{kn \max})}{[n]_k} - S_k / \cos \left[\arctg \left(\frac{(v_{0i+1} + H_{tgi+1}) - (v_{0i} + H_{tgi})}{L_{ti}} - \psi_d \frac{q_{Rkn}}{2S_k} L_{ti} \right) \right] \geq 0,$$

$$\frac{R_{kn}(d_{kn \max})}{[n]_k} - S_k / \cos \left[\arctg \left(\frac{(v_{0i+1} + H_{tgi+1}) - (v_{0i} + H_{tgi})}{L_{ti}} + \psi_d \frac{q_{Rkn}}{2S_k} L_{ti} \right) \right] \geq 0, i \in [1; I_t],$$

где: L_{AB} – расстояние между станциями; $L_{t \max}$, $L_{t \min}$ – максимальное и минимальное предельные расстояния между промежуточными опорами; \bar{u}_{dj} , Δu_{dj} – координата цен-

тра и полуширина j -й запретной зоны; J_d – число запретных зон; $[i_t]$ – допустимый продольный уклон расположения узлов крепления несущего каната к соседним промежуточным опорам; t_{\max} – максимальная температура воздуха; $[\beta]$ – предельный угол наклона к горизонту несущих канатов; v_{\min} – минимально допустимое высотное приближение кабины к поверхности земли; $d_{kt \max}$, $d_{kn \max}$ – 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; h_{cab} – вертикальный габарит пассажирской кабины вместе с системой подвески; $R_{kn}(d_{kn \max})$ – агрегатная прочность каната максимального диаметра выбранной конструкции; $H_{t \max}$ – предельная высота промежуточной опоры; n_{cab} – число пассажирских кабин, одновременно находящихся в пределах одного пролета.

Для нахождения минимума целевой функции (10) с учетом принятых ограничений необходимо использовать один из прямых методов условной оптимизации [8], основанный на непосредственном вычислении величины целевой функции $C(\{x\})$.

Для оценки влияния параметров рельефа земной поверхности на результаты оптимизации стоимости канатного метро были выполнены расчеты модельной линии при синусоидальной форме поверхности с различным числом полувольт по длине трассы (рисунок 2):

$$v(u) = V_{\max} \sin(2\pi nu / L_{AB}).$$

Как видно из данных, приведенных на рисунке 2, стоимость строительства линии канатного метро очень чувствительна к количеству промежуточных опор и геометрической неоднородности рельефа. При малом числе промежуточных опор ($I_t \leq 7$) с уменьшением I_t стоимость линии резко возрастает (до двух раз – с ~140 млн руб. до ~280 млн руб.), что обусловлено быстрым возрастанием высоты опор H_t из-за необходимости нейтрализовать увеличение стрелы провисания несущих канатов по мере увеличения расстояния между соседними опорами. При $I_t \approx 8 - 14$ стоимость линии минимальна, примерно одинакова и составляет ~140 млн руб., а затем начинает возрастать, так как высота опор достигает своего минимума по условию высотного приближения пассажирских кабин к поверхности. Дальнейшее увеличение числа опор и, как следствие, уменьшение расстояния между ними, ведет к росту затрат на установку конструктивно лишних опор.

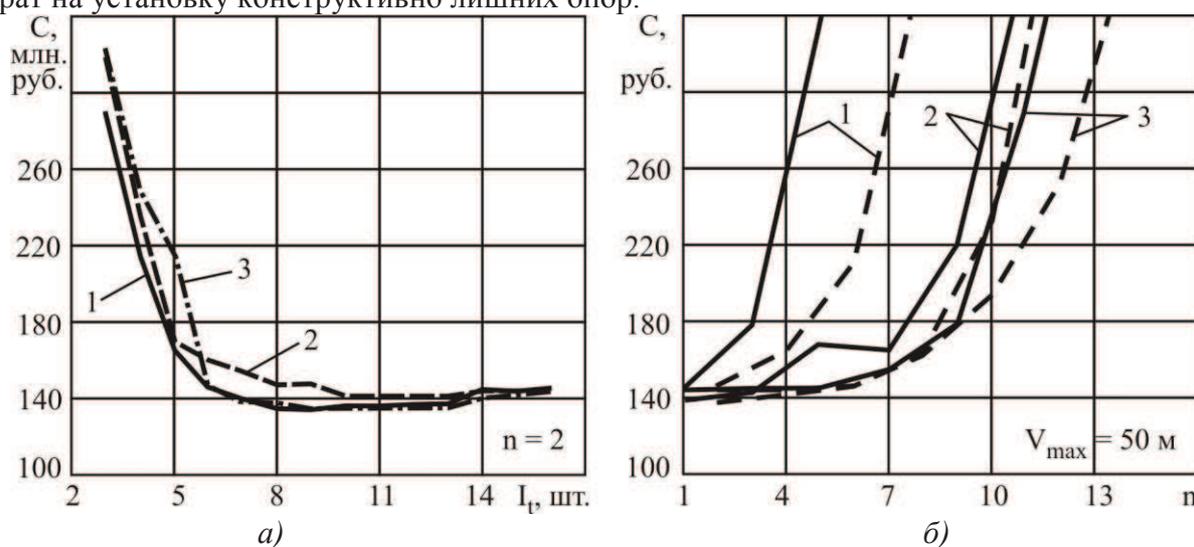


Рисунок 2. Влияние рельефа на стоимость линии канатного метро при синусоидальной форме поверхности: а – высоты (1 – $V_{\max} = 50$ м; 2 – 25 м; 3 – 0 м); б – продольной неравномерности (----- – нечетное число полувольт синусоиды; - - - - - четное число полувольт синусоиды; 1 – $I_t = 9$ шт.; 2 – 12 шт.; 3 – 15 шт.)

Рисунок 2б дает представление о влиянии неравномерности рельефа на стоимость линии канатного метро (неравномерность рельефа возрастает с увеличением числа полуволн n). В случае слабо неравномерного рельефа ($n < 3 - 4$) стоимость линии минимальна и приблизительно одинакова для разного числа опор. Однако при существенно неравномерном рельефе ($n > 4 - 5$) повышенное число опор благоприятно сказывается на стоимости вследствие того, что в этом случае опоры возможно установить в зонах возвышенности, что обуславливает снижение высоты опор и, несмотря на большее количество, – снижение их суммарной стоимости.

При проектировании линий канатного метро с помощью данной оптимизационной математической модели проектировщик может выполнить количественный технико-экономический анализ влияния значительного числа исходных стоимостных, конструктивных и геометрических факторов на оптимальное размещение, высоту и количество промежуточных опорных конструкций и, таким образом, определить наиболее экономичный вариант строительства.

Литература

1. Концепция инновационной системы городского транспорта «Канатное метро города Брянска» / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев, А.А. Короткий, А.В. Панфилов // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. – 2012. – №3. – С. 12-15.
2. Канатное метро // ИКЦ «Мысль» НГТУ: [сайт]. – Режим доступа: <http://www.ikcmysl.ru/kanatnoe-metro>.
3. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Оптимизация шага установки промежуточных опорных конструкций вдоль линии канатного метро // Вестник Брян. гос. ун-та. Точные и естественные науки. - 2014. – № 4. – С. 22-30.
4. 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.
5. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия. – Введ. 1987-01-01. – М.: Госстандарт: Изд-во стандартов, 2000. – 53 с.
6. Лагерев А.В. Нагруженность подъемно-транспортной техники. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2010. – 180 с.
7. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Шнейдерович Р.М. Расчет на прочность деталей машин. – М.: Машиностроение, 1966. – 616 с.
8. Лагерев И.А. Оптимальное проектирование подъемно-транспортных машин. – Брянск: БГТУ, 2013. – 228 с.

Стесненное кручение в клиноременных передачах

д.т.н. проф. Мартынов В.К.
 Университет машиностроения
 (919) 726- 26- 91, amart61@inbox.ru

Аннотация. В статье рассматривается возможное появление в клиноремённой передаче условий стеснённого кручения ремней, особенно широких вариаторных, имеющих гофры. Для них и подобных им клиновых ремней нагружение в передаче как гибких стержней открытого профиля накладывает свою специфику в появлении и учёте новых крутящих моментов к определяемым в существующей теории на основе гипотезы плоских сечений. Полученные в статье результаты повышают возможности описания происходящих процессов в работе передачи, давая им надлежащую оценку.

Ключевые слова: клиноремённая передача, стеснённое кручение ремня, крутящие моменты, напряжение сжатия, деформация сечений.

Совершенствование конструкций клиновых ремней, в частности, выполнение их с гоф-