

УДК 625.54, 625.57

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬЕФА НА ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ШАГА ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ОПОР ВДОЛЬ ЛИНИИ КАНАТНОГО МЕТРО

Лагерев А.В., Лагерев И.А.

Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского, Брянск, Россия

Сформулирована и решена задача условной нелинейной технико-экономической оптимизации шага установки промежуточных опорных конструкций при проектировании линий канатного метро в условиях сильно урбанизированной городской среды с учетом не горизонтальности поверхности рельефа. 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. При построении целевой функции были учтены 3 возможные формы провисания несущих канатов, которые могут быть реализованы для различных значений усилия их натяжения. Выполнен анализ влияния угла продольного уклона поверхности рельефа вдоль линии канатного метро на величину оптимального шага промежуточных опор в зависимости от конструктивных и стоимостных показателей промежуточных опор, а также на стоимость 1 км линии канатного метро. Количественные расчеты показали, что с увеличением продольного уклона поверхности стоимость строительства также увеличивается с нелинейно возрастающей скоростью.

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

**DOI:** 10.22281/2413-9920-2017-03-03-253-272

В настоящее время в связи с реализацией Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года [1], в том числе, на основе развития новых эффективных инновационных видов транспорта, повышается интерес к такому виду общественного пассажирского транспорта на базе подвесных канатных дорог как канатное метро [2, 3]. Его можно рассматривать в качестве перспективной альтернативы традиционным видам общественного городского транспорта – метрополитену, автобусу, троллейбусу, трамваю [4-6]. Канатное метро уже начали активно использовать как общественный транспорт для урбанизированной среды в Европе, Азии и Латинской Америке [7].

Как показано в [6, 8], строительство канатного метро в условиях сильно урбанизированной городской среды является достаточно затратным мероприятием. Значительную составляющую в общую стоимость реализации этой задачи, включая расходы на проектно-конструкторские, проектно-исследовательские, строительные-монтажные работы, приобретение необходимого механического оборудования, создания автоматизированной системы управления движением и др., вносят затраты на изготовление и установку промежуточных опор вдоль линии метро, а также

приобретение тяговых и несущих стальных канатов [9]. При этом, как было показано в [9-11], задача проектирования канатного метро, включая прокладку трассы с учетом значительного числа ограничений со стороны имеющейся городской застройки и инфраструктуры, выбор числа и мест установки промежуточных опорных металлоконструкций и др., является задачей технико-экономической оптимизации при наличии системы конструктивных, строительномонтажных, ландшафтных, планировочных ограничений.

Величина затрат на строительство линии канатного метро непосредственно зависит от числа промежуточных опор, расположенных по длине линии, т.е. зависит от шага их установки. 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. С увеличением шага единичная стоимость опоры и стоимость канатов будут возрастать, обуславливая рост суммарных затрат, несмотря на снижение количества опорных конструкций по длине линии канатного метро. Согласно [10] наблюдается такая оптимальная величина

шага установки промежуточных опор вдоль линии канатного метро, которой соответствует минимальные суммарные затраты на возведение опорных конструкций, приобретение тягового и несущих канатов, а также комплекта устанавливаемого на опору необходимого технологического оборудования.

В [10] была поставлена и решена оптимизационная задача определения оптимального шага установки промежуточных опор вдоль линии канатного метро для случая рельефа с горизонтальной поверхностью. Как показывают расчеты, шаг установки промежуточных опор действительно оказывает заметное влияние на стоимостные показатели линии канатного метро, в частности, на такой характерный показатель, как стоимость 1 км линии  $C_{1km}$ . Причем как при положительном, так и отрицательном отклонении шага установки от оптимального значения величина  $C_{1km}$  заметно возрастает. Стоимостные показатели промежуточных опор существенно влияют на оптимальную величину шага и стоимость строительства 1 км линии канатного метро, тогда как влияние стоимостных показателей несущих и тяговых канатов значительно меньше. В условиях сильно урбанизированной городской среды, практически не имеющей резервов землеотведения под установку промежуточных опор, приоритетным является обеспечение больших пролетов вдоль линии канатного метро, т.е. использование тяговых и несущих канатов повышенной агрегатной прочности. С увеличением агрегатной прочности канатов существенное увеличение оптимального шага влечет за собой незначительное увеличение высоты опор: в интервале изменения маркировочной группы  $G_k = 1770 (180)... 3930 (400)$  кН/мм<sup>2</sup> (кгс/мм<sup>2</sup>) шаг опор меняется в интервале 520...717 м (почти на 200 м), тогда как высота опор – в интервале 35,5...36,4 м (всего лишь на 0,9 м). Как результат, наблюдается существенное снижение стои-

мости 1 км линии канатного метро с 4,46 до 2,80 млн. руб., т.е. в 1,6 раза.

Одним из преимущественных условий строительства канатного метро является наличие ландшафтно неоднородной городской среды [4-6], поэтому научный и практический интерес имеет решение задачи нахождения величины оптимального шага установки промежуточных опор для случая рельефа с наклонной поверхностью при расположении соседних опор на различных высотных отметках.

Для этого случая расчетная схема участка линии канатного метро между двумя соседними промежуточными опорами приведена на рис. 1. Как и в случае горизонтальной установки соседних опор [10], 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  $Q_{cab}$  и горизонтального осевого усилия натяжения каната  $S_k$ . При дальнейших расчетах сосредоточенные нагрузки  $Q_{cab}$  удобно заменить распределенными интенсивностью

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

где  $n_{kn}$  - число несущих канатов;  $L_{cab}$  - расстояние между соседними пассажирскими кабинами.

При этом следует также учитывать вклад в величину нагруженности несущих канатов от динамических нагрузок, обусловленных раскачиванием пассажирских кабин и самих канатов при движении кабин [10, 12], и от ветрового давления на кабины и канаты [9]. Динамические нагрузки учитываются коэффициентом динамичности [13]. Тогда расчетная величина распределенной нагрузки на крайний в ряду несущий канат будет определяться зависимостью

$$q_{Rkn} = \sqrt{\left( q_{kn0} d_{kn}^2 + \mu_1 \frac{Q_{cab}}{n_{kn} L_{cab}} \right)^2 + w_0^2 \left( \eta_1 C_{wkn} k_{wkn} d_{kn} + \mu_{w1} C_{wcab} k_{wcab} \frac{A_{cab}}{n_{kn} L_{cab}} \right)^2}, \quad (1)$$

где  $\mu_1, \mu_{wm}$  - коэффициенты неравномерности распределения весовой и ветровой нагрузки на крайний несущий канат от пассажирской кабины;  $\eta_1$  - коэффициент ослаб-

ления давления ветра на поверхность крайнего несущего каната для ряда параллельно расположенных канатов [14];  $w_0$  - нормативное значение ветрового давления [14] в

зависимости от номера ветрового района [15];  $C_{wkn}$ ,  $C_{wcab}$  - аэродинамические коэффициенты несущего каната [14] и пассажирской кабины;  $k_{wkn}$ ,  $k_{wcab}$  - коэффициенты возрастания ветрового давления с высотой от поверхности [14], рассчитанные для высоты расположения оси каната и центра тяже-

сти кабины соответственно;  $A_{cab}$  - расчетная площадь пассажирской кабины (площадь проекции кабины на вертикальную плоскость);  $q_{kn}$  - погонный вес каната;  $d_{kn}$  - диаметр несущего каната;  $q_{kn0}$  - коэффициент в аппроксимации собственного веса 1 погонного метра длины несущего каната [10].

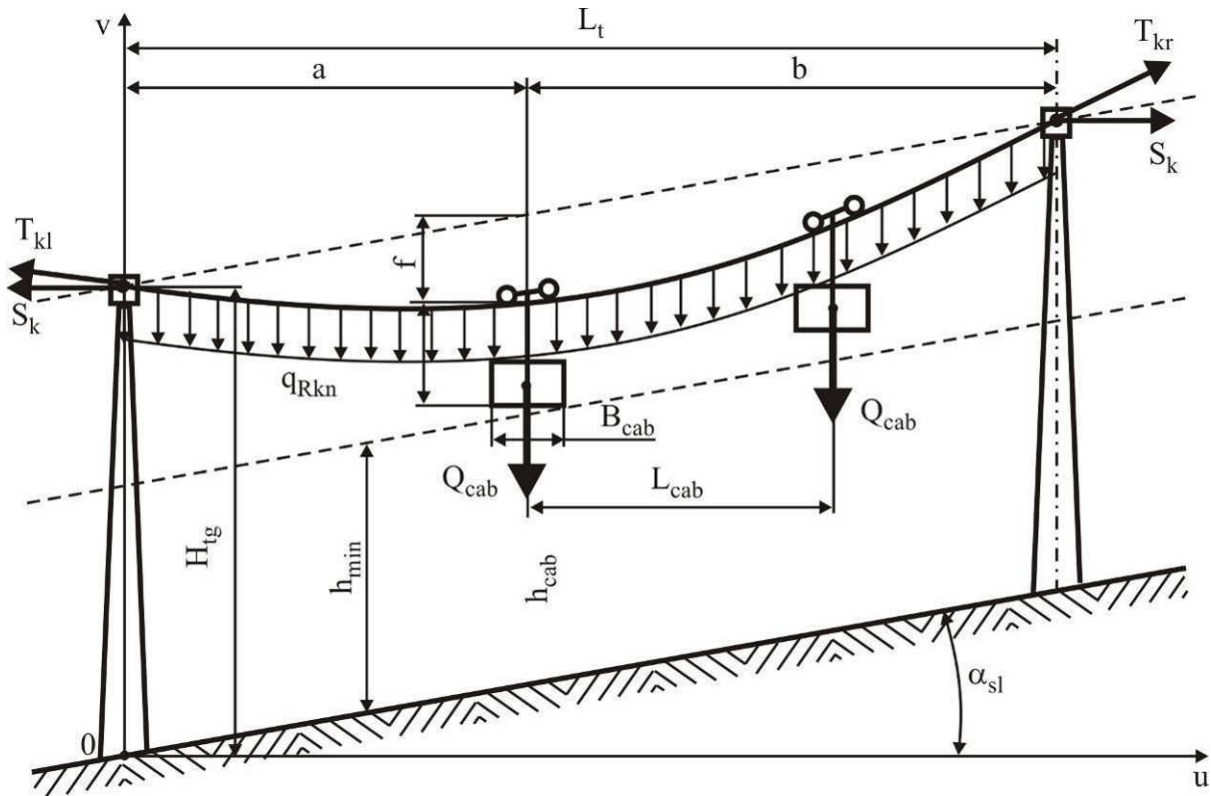


Рис. 1. Расчетная схема участка линии канатного метро между соседними промежуточными опорами для случая негоризонтальной поверхности рельефа

В зависимости от соотношения величины горизонтального усилия натяжения несущего каната  $S_k$ , шага установки промежуточных опор  $L_t$  и разности высотных отметок крепления каната на соседних опорах вследствие не горизонтальности поверхности рельефа с углом продольного уклона  $\alpha_{sl}$

$$\Delta v = L_t \operatorname{tg} \alpha_{sl}$$

возможны различные формы провисания несущих канатов:

- форма I, характеризующаяся расположением сечения наибольшего провисания каната внутри пролета между промежуточными опорами (рис. 1);

- форма II, характеризующаяся расположением сечения наибольшего провисания каната за пределами пролета (рис. 2);

- форма III, характеризующаяся совпадением расположения сечения наибольшего провисания каната с одной из опор пролета.

Реализуемая форма провисания несущего каната для заданного продольного уклона поверхности определяется величиной критерия

$$K_f = \frac{q_{Rkn} L_t}{2 S_k \operatorname{tg} \alpha_{sl}}$$

при  $K_f \notin (-1; +1)$  реализуется I форма, при  $K_f \in (-1; +1)$  - II форма, при  $K_f = \pm 1$  - III форма.

При характерной для канатного метро относительной величине стрелы провисания каната  $f / L_t < 0,1$  с погрешностью менее 1,3% геометрическая линия провисания несущего каната по I форме в пролете между соседними

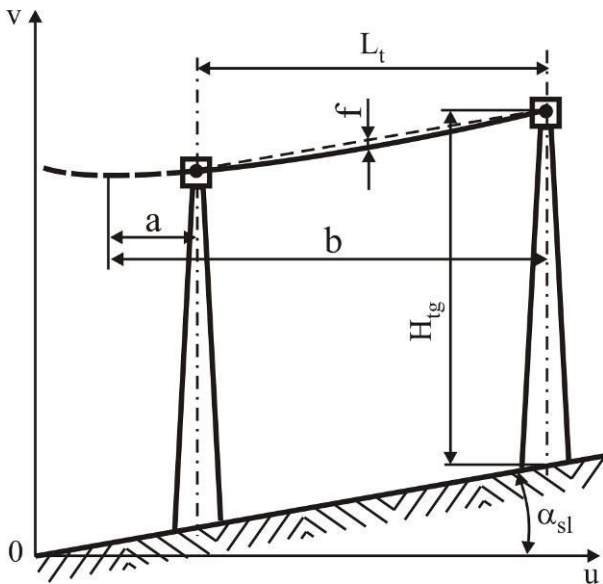


Рис. 2. Положение несущего каната для II формы провисания

промежуточными опорами в том случае, когда точки подвеса концов каната находятся на разной высоте (рис. 1), может быть представлена параболической зависимостью вида [9, 11]:

$$v_{kn}(u) = \begin{cases} H_{tg} - \psi_d \frac{q_{Rkn} u^2}{S_k}, & 0 \leq u \leq a \\ H_{tg} + \psi_d \frac{q_{Rkn} u(u - 2a)}{S_k}, & a \leq u \leq L_t \end{cases}$$

Максимальная стрела провисания составляет

$$f = a \left( \psi_d \frac{q_{Rkn} a}{S_k} + tg \alpha_{sl} \right)$$

и находится в сечении на расстоянии  $a$  и  $b$  от соседних промежуточных опор (рис. 1):

$$a = \frac{1}{2} \left( L_t - \frac{S_k}{q_{Rkn}} tg \alpha_{sl} \right),$$

$$b = \frac{1}{2} \left( L_t + \frac{S_k}{q_{Rkn}} tg \alpha_{sl} \right).$$

Длина несущего каната в пролете между опорами приблизительно будет составлять

$$l_k \approx \frac{L_t}{\cos \alpha_{sl}} \left[ 1 + \frac{8a^2 \cos^2 \alpha_{sl}}{3L_t^2} \left( \psi_d \frac{q_{Rkn} a}{S_k} + tg \alpha_{sl} \right)^2 \right],$$

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

$$d_{kn} = \frac{1}{2r_{k2}} \left[ \sqrt{r_{k1}^2 - 4r_{k2}(r_{k0} - [n]_k T_{kl})} - r_{k1} \right], \quad (2)$$

$$d_{kn} = \frac{1}{2r_{k2}} \left[ \sqrt{r_{k1}^2 - 4r_{k2}(r_{k0} - [n]_k T_{kr})} - r_{k1} \right], \quad (3)$$

где  $T_{kl}, T_{kr}$  - осевые усилия натяжения несущего каната на левой и правой опорах соответственно, определяемые зависимостями:

$$T_{kl} = S_k / \cos \left[ \arctg \left( \psi_d q_{Rkn} a / S_k \right) \right],$$

$$T_{kr} = S_k / \cos \left[ \arctg \left( \psi_d q_{Rkn} b / S_k \right) \right].$$

Окончательно минимальный диаметр несущего каната выбирается равным максимальному из рассчитанных по зависимостям (2) и (3).

Геометрическая линия провисания несущего каната по II и III формам в пролете между соседними промежуточными опорами в том случае, когда точки подвеса концов каната находятся на разной высоте (рис. 2) выражается параболической зависимостью:

$$v_{kn}(u) = H_{tg} + u \left[ tg \alpha_{sl} - \psi_d \frac{q_{Rkn}}{2S_k} (L_t - u) \right].$$

Максимальная стрела провисания составляет

$$f = \psi_d q_{Rkn} L_t^2 / 8S_k$$

и находится в сечении на расстоянии  $L_t / 2$  от соседних промежуточных опор. Длина несущего каната в пролете приблизительно будет составлять

$$l_k \approx \frac{L_t}{\cos \alpha_{sl}} \left( 1 + \psi_d^2 \frac{q_{Rkn}^2 L_t^2}{24S_k^2 \cos^2 \alpha_{sl}} \right).$$

Осевые усилия натяжения несущего каната на левой и правой опорах составляют

$$T_{kl} = S_k / \cos \left[ \arctg \left( tg \alpha_{sl} - \psi_d \frac{q_{Rkn} L_t}{2S_k} \right) \right],$$

$$T_{kr} = S_k / \cos \left[ \arctg \left( tg \alpha_{sl} + \psi_d \frac{q_{Rkn} L_t}{2S_k} \right) \right].$$

В качестве целевой функции при формулировке задачи технико-экономической оптимизации шага установки промежуточных опор линии канатного метро будем использовать целевую функцию, предложенную в [10]. Она имеет стоимостное выражение, так как складывается из ряда слагаемых – стоимости самих промежуточных опор и фундамента под ними, а также стоимости тягового и несущих стальных канатов и технологического оборудования:

$$C = n_t(C_f + C_t + C_e) + (n_t + 1)(C_{kt} + n_{kn} C_{kn}) l_k, \quad (4)$$

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;  $L_{tr}$  - длина линии канатного метро.

Количественная оценка стоимости промежуточных опор в зависимости от их конструктивного исполнения, фундамента опор, тягового и несущих канатов содержится в работах [9-11].

Вектор управляемых параметров формируется из двух независимых величин задачи оптимизации – шага установки промежуточных опор  $L_t$  и горизонтального усилия натяжения несущего каната  $S_k$ :

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

Остальные величины являются фиксированными, так как либо задаются в качестве исходных данных, либо вычисляются в зависимости от указанных управляемых параметров. К первой группе относятся:  $L_{tr}, L_{cab}, Q_{cab}, A_{cab}, h_{\min}, h_{cab}, \alpha_{sl}, \psi, \psi_d, [n]_k, w_0, C_{wkn},$

$C_{cab}, k_{wkn}, k_{wcab}, \mu_1, \mu_{w1}, \eta_1$  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 [9-11]  $C_{f0}, a_f, C_{t0}, a_t, q_{k0}, r_{k0}, r_{k1}, r_{k2}, c_{k0},$

$c_{k1}, c_{k2}$ . Ко второй группе относятся:  $q_{Rkn}, q_{cab}, f, a, b, d_{kt}, d_{kn}, H_{tg}, l_k, n_t, T_{kl}, T_{kr}$ . Из величин второй группы формируется вектор неуправляемых параметров, которые не подлежат варьированию в процессе решения оптимизационной задачи:

$$\{z\}^T = \{z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4 \ z_5 \ z_6 \ z_7 \ z_8 \ z_9 \ z_{10} \ z_{11} \ z_{12}\} = \{q_{Rkn} \ q_{cab} \ f \ d_{kt} \ d_{kn} \ H_{tg} \ l_k \ n_t \ a \ b \ T_{kl} \ T_{kr}\}.$$

Окончательно задача технико-экономической оптимизации шага установки промежуточных опорных конструкций канатного метро на наклонной поверхности сводится к минимизации целевой функции – суммарной стоимости изготовления и монтажа опор, приобретения тягового и несущих канатов, которая согласно (4) имеет вид:

- при I форме провисания несущего каната между соседними опорами

$$\begin{aligned} \Pi(\{x\}, \{z\}) = & \left( \frac{L_{tr}}{x_1} - 1 \right) \left\langle C_{f0} \left[ \left[ h_{\min} + h_{cab} + z_9 \left( \frac{\psi_d z_1 z_9}{x_2} + tg \alpha_{sl} \right) + \frac{\psi_d z_1 B_{cab}^2}{4x_2} \right] \left( 1 + \psi \frac{x_2 [n]_k}{R_{kn}} \right) \right]^{a_f} + \right. \\ & \left. + C_{t0} \left[ \left[ h_{\min} + h_{cab} + z_9 \left( \frac{\psi_d z_1 z_9}{x_2} + tg \alpha_{sl} \right) + \frac{\psi_d z_1 B_{cab}^2}{4x_2} \right] \left( 1 + \psi \frac{x_2 [n]_k}{R_{kn}} \right) \right]^{a_t} + C_e \right\rangle + \\ & + (C_{kt} + n_{kn} C_{kn}) \frac{L_{tr}}{\cos \alpha_{sl}} \left[ 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{z_9 \cos \alpha_{sl}}{x_1} \right)^2 \left( \psi_d \frac{q_{Rkn} z_9}{x_2} + tg \alpha_{sl} \right)^2 \right] \rightarrow \min ; \end{aligned} \quad (5)$$

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

$$\begin{aligned} \Pi(\{x\}, \{z\}) = & \left( \frac{L_{tr}}{x_1} - 1 \right) \left\langle C_{f0} \left[ \left[ h_{\min} + h_{cab} + \frac{\psi_d z_1 x_1^2}{8x_2} + \frac{B_{cab}}{2} \left( tg \alpha_{sl} + \frac{\psi_d z_1 B_{cab}}{4x_2} \right) \right] \left( 1 + \psi \frac{x_2 [n]_k}{R_{kn}} \right) \right]^{a_f} + \right. \\ & \left. + C_{t0} \left[ \left[ h_{\min} + h_{cab} + \frac{\psi_d z_1 x_1^2}{8x_2} + \frac{B_{cab}}{2} \left( tg \alpha_{sl} + \frac{\psi_d z_1 B_{cab}}{4x_2} \right) \right] \left( 1 + \psi \frac{x_2 [n]_k}{R_{kn}} \right) \right]^{a_t} + C_e \right\rangle + \\ & + (C_{kt} + n_{kn} C_{kn}) \frac{L_{tr}}{\cos \alpha_{sl}} \left[ 1 + \frac{1}{6} \left( \frac{\psi_d x_1 z_1}{2x_2 \cos \alpha_{sl}} \right)^2 \right] \rightarrow \min . \end{aligned} \quad (6)$$

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

- к допустимому диапазону изменения величины шага установки соседних опор

$$x_1 \geq 0; L_{t \max} - x_1 \geq 0; L_{tr} / x_1 - 1 \geq 0;$$

- к допустимым диапазонам изменения диаметров тягового и несущих канатов

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

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

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

$$\psi_f x_1 - z_9 \left( \psi_d \frac{z_1 z_9}{x_2} + tg \alpha_{sl} \right) \geq 0;$$

при II и III формах провисания каната

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

- к минимальному усилию натяжения каната согласно требованиям ПБ 10-559-03 [16] при I форме провисания каната

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

при II и III формах провисания каната

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

где  $L_{t \max}$  - предельное расстояние между промежуточными опорами;  $d_{kt \max}$ ,  $d_{kn \max}$  - максимальный диаметр тягового и несущего канатов;  $d_{kt \min}$ ,  $d_{kn \min}$  - минимальный диаметр тягового и несущего канатов;  $\psi_f$  - 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;  $H_{t \max}$  - предельная высота промежуточной опоры;  $B_{cab}$  - длина пассажирской кабины.

Для нахождения минимума целевой функции (5) или (6) с учетом принятых ограничений необходимо использовать один из прямых методов условной оптимизации [17, 18], основанный на непосредственном вы-

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

при II и III формах провисания каната

$$x_2 - \frac{10n_{cab}\psi_d Q_{cab}}{n_{kn}} \cos \left[ \arctg \left( tg \alpha_{sl} - \psi_d \frac{x_1 z_1}{2x_2} \right) \right] \geq 0; \quad (7)$$

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

при I форме провисания каната

$$\frac{R_{kn}(d_{kn \max})}{[n]_k} \cos \left[ \arctg \left( \psi_d \frac{z_1(x_1 - z_9)}{x_2} \right) \right] - x_2 \geq 0; \quad (8)$$

при II и III формах провисания каната

$$\frac{R_{kn}(d_{kn \max})}{[n]_k} \cos \left[ \arctg \left( tg \alpha_{sl} + \psi_d \frac{z_1 x_1}{2x_2} \right) \right] - x_2 \geq 0; \quad (9)$$

- к максимальной высоте промежуточной опоры

при I форме провисания каната

числении величины целевой функции  $C(\{x\}, \{z\})$ . Решение задачи оптимизации шага установки промежуточных опор линии канатного метро было реализовано в компьютерной программе «Оптимизация шага установки опор канатного метро с учетом рельефа местности». Ее структурная схема с указанием входящих процедур представлена на рис. 3, а укрупненная блок-схема - на рис. 4. Программа структурно включает в себя головную процедуру *Steps\_Opor\_Opt\_Relief* и 6 процедур тип Procedure:

- *BeginPointOptimization* – расчет целевой функции в начальной точке оптимизации;

- *CelFun* – вычисление значения целевой функции  $C(\{x\})$  в соответствии с соотношением (3);

- *DetZ* - вычисление неуправляемых параметров - компонент вектора  $\{z\}$ ;

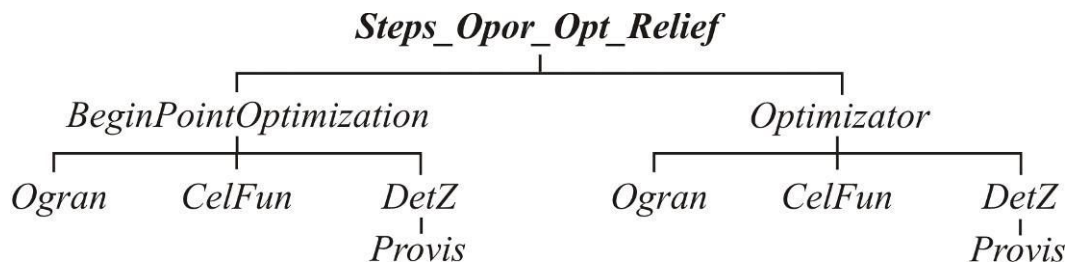


Рис. 3. Структурная схема программы «Оптимизация шага установки опор канатного метро с учетом рельефа местности»

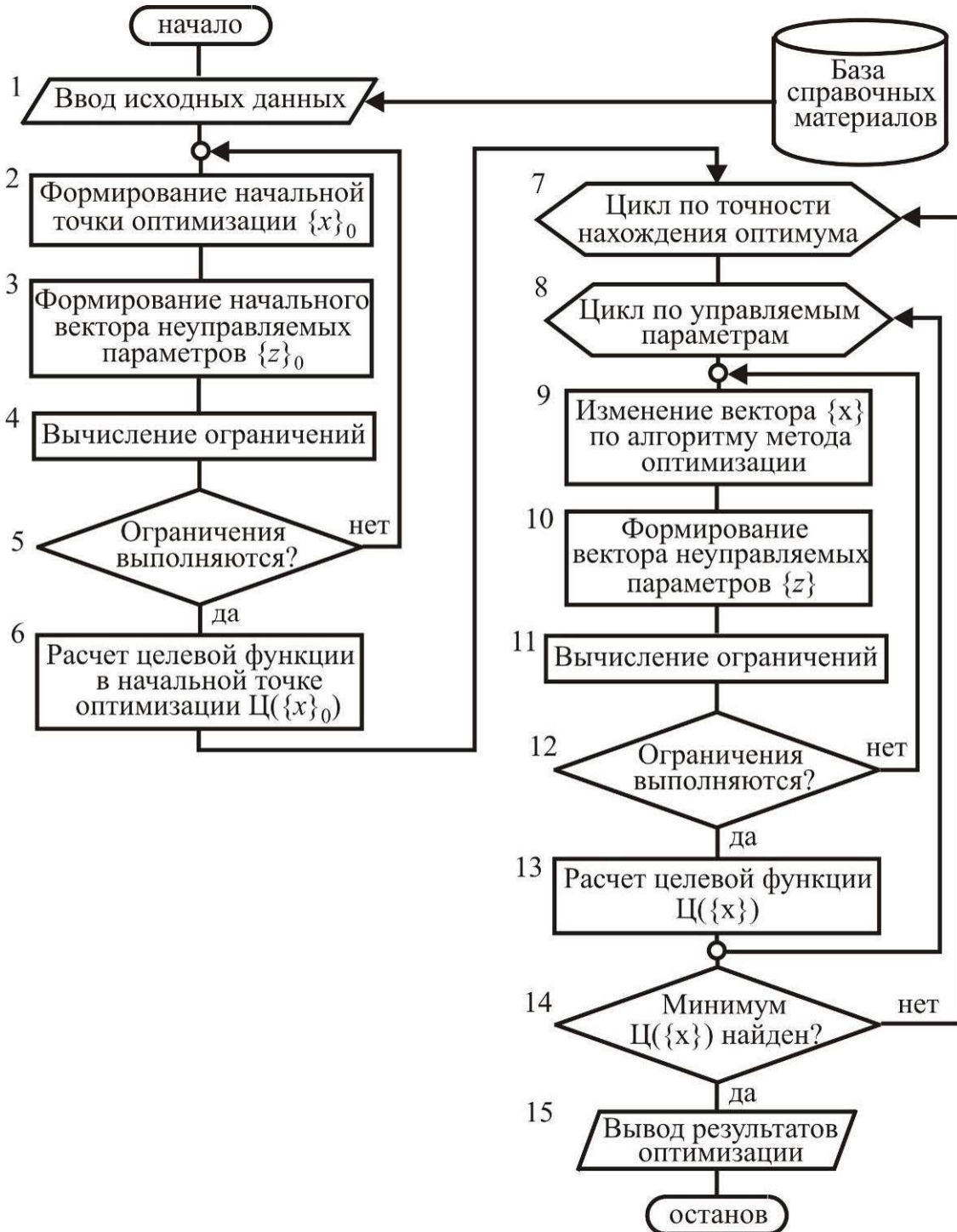


Рис. 4. Укрупненная блок-схема программы «Оптимизация шага установки опор линии канатного метро с учетом рельефа местности»

- *Provis* – определение формы провисания каната и вычисление компонент вектора  $\{z\}$ , зависящих от формы провисания каната;
- *Ogran* – вычисление левых частей ограничений задачи оптимизации;
- *Optimizer* – реализация алгоритма оптимизации целевой функции.

Расчеты, проведенные с помощью вычислительной программы «Оптимизация шага установки опор линии канатного метро с учетом рельефа местности» для ряда возможных вариантов конструктивного исполнения канатной транспортной системы, показали, что технико-экономические показатели оптимального варианта установки промежуточных опор в значительной мере зависят от угла наклона земной поверхности  $\alpha_{sl}$ , а также от стоимости комплекта технологического оборудования, монтируемого на опоре, и стоимости самой опоры.

На рис. 5 приведены результаты оптимизации – минимальная стоимость 1 км линии канатного метро  $C_{1km}$  – в зависимости от величины  $\alpha_{sl}$  для двух вариантов линии на основе использования опор, аналогичных по стоимости опорам типа ПГМ 500 и опорам решетчатого типа (их стоимость в 2 раза превышает стоимость опор ПГМ 500), при двух несущих и одном тяговом канатах по ГОСТ 3079-80 маркировочной группы  $G_k = 2160$  (220) кН/мм<sup>2</sup> (кгс/мм<sup>2</sup>). Каждый из указанных конструктивных вариантов рассматривался для двух значений стоимости устанавливаемого на промежуточной опоре комплекта технологического оборудования:  $C_e = 1,0$  млн. руб. и  $C_e = 0$ . Обращает на себя внимание экстремальный характер зависимости  $C_{1km} \sim \alpha_{sl}$  с выраженным минимумом при малых углах наклона поверхности рельефа порядка  $3...6^\circ$ . Положение минимума является достаточно устойчивым и незначительно изменяется при достаточно существенном изменении стоимости промежуточных опор  $C_t$  и технологического оборудования  $C_e$ . Видно также, что наиболее эффективными условиями для строительства канатного метро является рельеф местности со значительными перепадами высотных отметок по длине трассы транспортирования.

Для вариантов исполнения канатного метро, представленных на рис. 5, лишь при углах наклона поверхности свыше  $50...60^\circ$  стоимость 1 км линии начинает превышать стоимость 1 км линии, проложенной вдоль строго горизонтальной поверхности (при  $\alpha_{sl} = 0$ ). Таким образом, канатное метро оказывается наиболее эффективным в условиях гористой или холмистой местности, когда другие традиционные виды наземного пассажирского транспорта использовать с точки зрения обеспечения безопасности движения либо невозможно, либо проблематично.

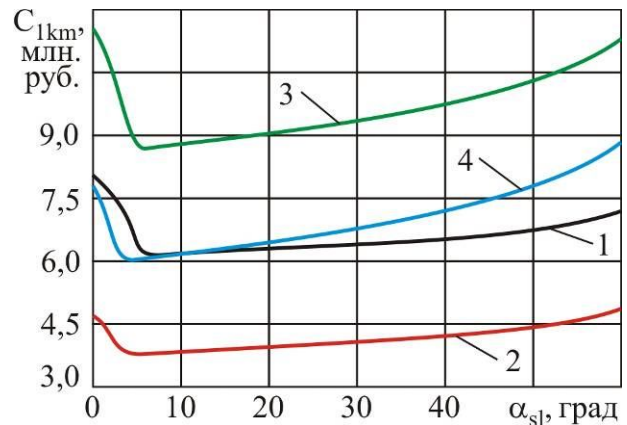


Рис. 5. Минимальная стоимость 1 км линии канатного метро при оптимальном шаге установки промежуточных опор в зависимости от угла наклона поверхности рельефа: 1, 2 – опоры типа ПГМ 500; 3, 4 – опоры решетчатого типа; 1, 3 -  $C_e = 1,0$  млн. руб.; 2, 4 -  $C_e = 0$

Рис. 6 дает представление об относительном вкладе в стоимость 1 км линии канатного метро  $C_{1km}$  трех составляющих уравнения (4) – стоимости промежуточных опор (включая фундамент под опорами)  $C_{1km}^{опора}$ , стоимости канатной системы (несущих и тягового канатов)  $C_{1km}^{канат}$  и стоимости смонтированного технологического оборудования  $C_{1km}^{оборуд}$ . Естественно, что основная доля приходится на стоимость промежуточных опор, причем графики зависимостей  $C_{1km}^{опора} \sim \alpha_{sl}$ ,  $C_{1km}^{канат} \sim \alpha_{sl}$  и  $C_{1km}^{оборуд} \sim \alpha_{sl}$  приблизительно параллельны графику суммарной зависимости  $C_{1km} \sim \alpha_{sl}$ . С увеличением угла наклона поверхности рельефа относительный вклад стоимости канатной системы несколько сни-



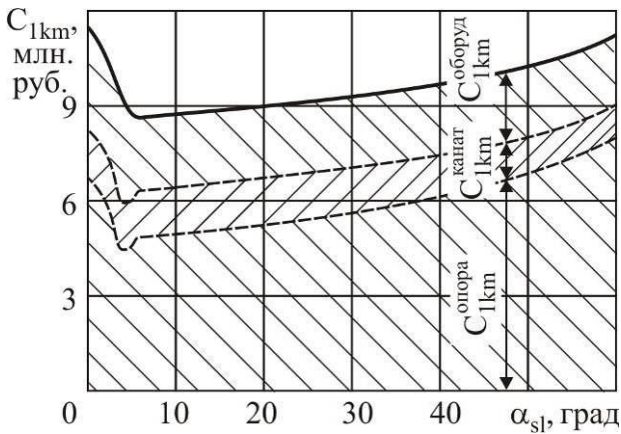


Рис. 6. Вклад отдельных слагаемых в стоимость 1 км линии (вариант 3 на рис. 5)

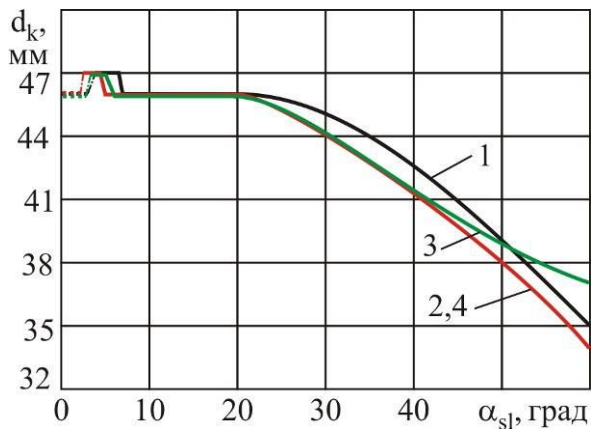


Рис. 7. Влияние угла наклона поверхности рельефа на диаметр несущих канатов (обозначение графиков соответствует рис. 5)

жается, что является следствием уменьшения абсолютного значения  $C_{1km}^{канат}$  из-за уменьшения диаметров используемых канатов (рис. 7). При этом диаметры несущих канатов мало зависят от стоимости промежуточных опор и технологического оборудова-

ния: разница для рассмотренных вариантов составляет 0...2 мм.

На рис. 8 показано влияние рельефа на величину управляемых параметров задачи оптимизации – шаг установки промежуточных опор  $L_t^{opt}$  и горизонтальное усилие натяжения несущего каната  $S_k^{opt}$  для оптимального по стоимости варианта исполнения канатного метро. При малых углах наклона поверхности  $\alpha_{sl} < 6...8^{\circ}$  для минимизации стоимости строительства линии канатного метро требуется более частая установка промежуточных опор (рис. 8, а), которая несмотря на возможность строительства более низких и, следовательно, более дешевых опор (рис. 9), тем не менее, обуславливает в целом повышенные значения  $C_{1km}$  оптимального варианта конструктивного исполнения линии (рис. 5). При больших углах наклона поверхности необходима более редкая установка (рис. 8, а) более высоких промежуточных опор (рис. 9), причем изменение величины оптимального шага  $L_t^{opt}$  с ростом  $\alpha_{sl}$  может иметь различный характер: может возрастать (графики 2,4 на рис. 8, а), может уменьшаться (график 1 на рис. 8, а), может быть практически постоянным (график 3 на рис. 8, а). Однако в пределах угла наклона  $10...60^{\circ}$  диапазон изменения оптимального шага  $L_t^{opt}$  достаточно мал, составляя не более  $\pm 10\%$  от значения  $L_t^{opt}$  при  $\alpha_{sl} = 10^{\circ}$ .

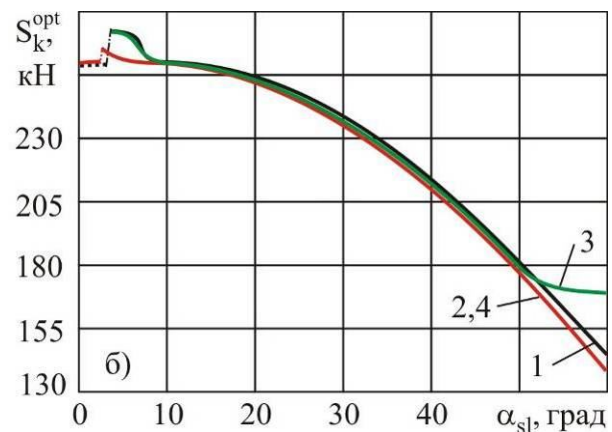
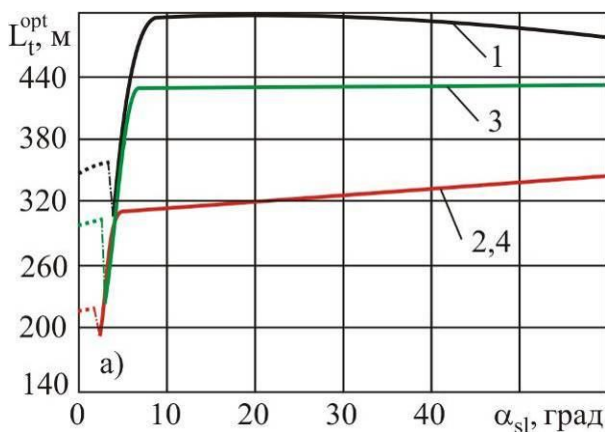


Рис. 8. Влияние угла наклона поверхности рельефа на: а - шаг установки промежуточных опор  $L_t^{opt}$ ; б - горизонтальное усилие натяжения несущего каната  $S_k^{opt}$  (обозначение графиков соответствует рис. 5)

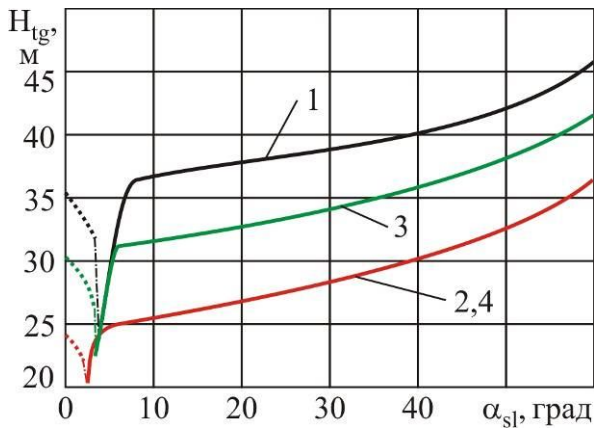


Рис. 9. Влияние угла наклона поверхности рельефа на высоту промежуточных опор (обозначение графиков соответствует рис. 5)

Горизонтальное усилие натяжения несущего каната  $S_k^{opt}$  для оптимального по стоимости варианта исполнения канатного метро с ростом угла наклона поверхности рельефа  $\alpha_{sl}$  монотонно снижается (рис. 8, б). Наибольшие значения  $S_k^{opt}$  для поверхностей с малыми значениями угла  $\alpha_{sl}$ , т.е. незначительно отклоняющихся от строго горизонтальной поверхности, связаны с необходимостью обеспечения приемлемой величины стрелы провисания  $f$  несущих канатов под действием собственного веса и веса пассажирских кабин (рис. 10). При больших значениях угла  $\alpha_{sl}$  для поддержания таких же

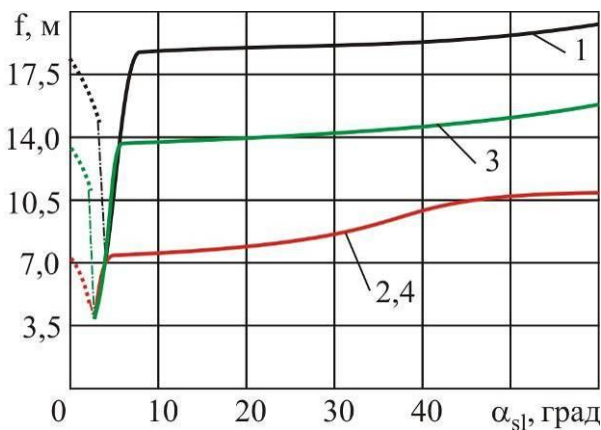


Рис. 10. Влияние угла наклона поверхности рельефа на стрелу провисания несущих канатов при действии усилия натяжения  $S_k^{opt}$  (обозначение графиков соответствует рис. 5) величин  $f$  требуется создание меньших горизонтальных усилий  $S_k$ . Усилие натяжения

$S_k^{opt}$  практически не зависит от стоимости промежуточных опор, канатной системы и технологического оборудования.

Анализ графиков на рис. 6-10 позволяет отметить скачкообразные изменения исследованных параметров линии канатного метро в диапазоне малых углов наклона поверхности рельефа  $\alpha_{sl} \sim 3 \dots 6^\circ$ . Это связано с тем, что в указанном диапазоне углов происходит смена форм провисания несущих канатов, что подтверждается графиками изменения критерия  $K_f$  (рис. 11). На рис. 12 более детально представлен механизм влияния смены

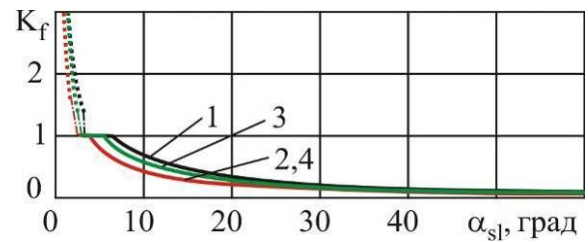


Рис. 11. Изменение критерия формы провисания несущих канатов от угла наклона поверхности рельефа (обозначение графиков соответствует рис. 5)

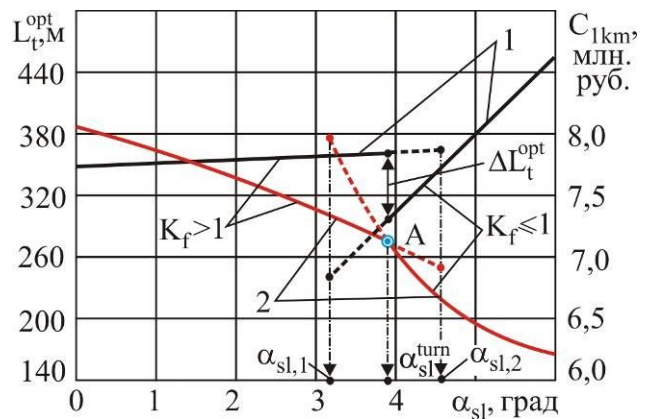


Рис. 12. Механизм влияния смены формы провисания несущих канатов на формирование характеристик оптимального варианта линии канатного метро (на примере варианта 1 рис. 5): 1 -  $C_{1km}$ ; 2 -  $L_t^{opt}$

формы провисания несущих канатов на характеристики оптимального варианта конструктивного исполнения линии канатного метро на примере варианта 1 (на рис. 5). С отклонением поверхности рельефа от строго горизонтального положения в диапазоне углов наклона  $0 \leq \alpha_{sl} < \alpha_{sl,2}$  провисание несущих канатов происходит по форме I, т.е. с

положением точки наибольшего провисания между соседними промежуточными опорами. При этом величина критерия формы провисания снижается, находясь в диапазоне  $\infty > K_f > 1$ . Сменяющая форму I форма провисания III, при которой положение точки наибольшего провисания находится на опоре, расположенной на меньшей высотной отметке, начинает реализовываться при  $\alpha_{sl} \geq \alpha_{sl,1}$ . Таким образом, в диапазоне углов  $\alpha_{sl,1} \leq \alpha_{sl} \leq \alpha_{sl,2}$  оптимальное решение линии канатного метро может быть построено как на основе реализации формы I провисания несущих канатов, так и на основе формы III. Этот вывод подтверждается анализом конфигурации поверхности целевой функции  $C_{1km}(L_t, S_k)$  в области определения вектора управляемых параметров  $\{x\}$  задачи оптимизации (5) или (6). Как пример, на рис. 13, а показаны изолинии равных значений стоимости  $C_{1km}(L_t, S_k) = const$  для значения угла наклона поверхности рельефа, принадлежащего диапазону  $\alpha_{sl,1} \leq \alpha_{sl} \leq \alpha_{sl,2}$ . По-

верхность целевой функции имеет два локальных минимума:  $minimum(I)$  соответствует форме провисания I, а  $minimum(III)$  – форме провисания III. При  $\alpha_{sl,1} \leq \alpha_{sl} < \alpha_{sl}^{turn}$  (рис. 12) глобальным минимумом является точка  $minimum(I)$ , т.е. оптимальный вариант линии канатного метро целесообразно принимать на основе формы I. При  $\alpha_{sl} > \alpha_{sl}^{turn}$  глобальным минимумом является точка  $minimum(III)$ , т.е. оптимальный вариант линии канатного метро целесообразно принимать на основе формы III. При значении угла  $\alpha_{sl} = \alpha_{sl}^{turn}$  зависимость  $C_{1km}(\alpha_{sl})$  имеет точку перелома A, а другие характеристики оптимального варианта – положительный или отрицательный скачок. Например, представленная на рис. 13, а характеристика – оптимальный шаг промежуточных опор  $L_t^{opt}$  – испытывает отрицательный скачок на величину  $\Delta L_t^{opt} = -60$  м (с  $L_t^{opt} = 360$  м до  $L_t^{opt} = 300$  м).

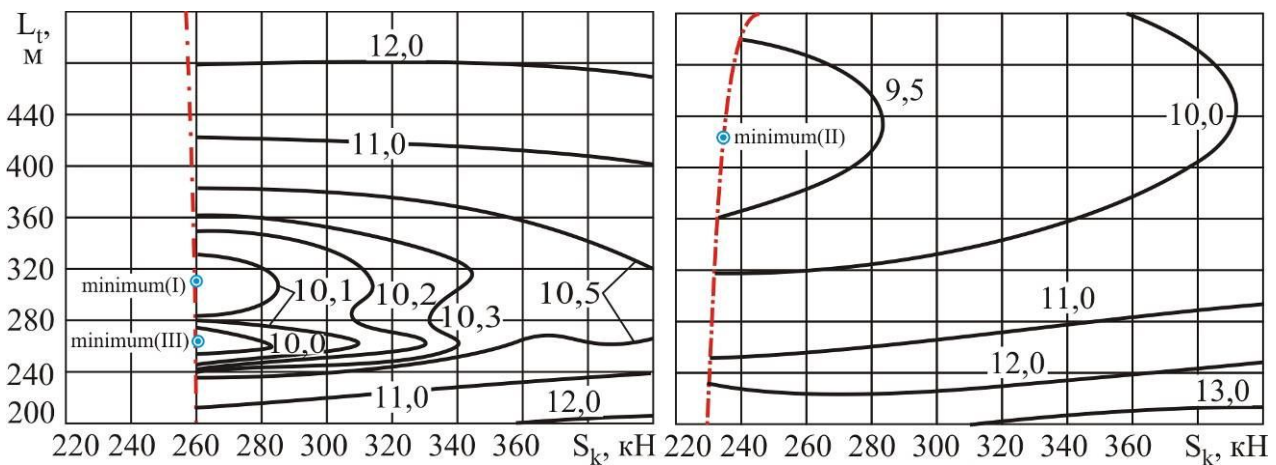


Рис. 13. Изолинии равных значений целевой функции  $C_{1km}(L_t, S_k) = const$  (вариант 3 рис. 5):

а -  $\alpha_{sl} = 3,5^0$ ; б -  $\alpha_{sl} = 30^0$  (цифры у изолиний -  $C_{1km}$ , млн. руб.)

Форма III является оптимальной для узкого диапазона углов  $\alpha_{sl}$ , составляющего  $\sim 2...3^0$ , а затем плавно, без скачкообразного изменения характеристик оптимального варианта конструктивного исполнения канатного метро, сменяется формой II. Поверхность целевой функции  $C_{1km}(L_t, S_k)$  в области определения вектора управляемых параметров  $\{x\}$  имеет только один, глобальный минимум (точка  $minimum(II)$  на рис. 13, б).

Однако при больших значениях угла наклона  $\alpha_{sl} > 40...50^0$  возможно появление второго локального минимума, значение которого заметно отличается от глобального минимума в большую сторону, так как соответствующий ему шаг установки промежуточных опор оказывается существенно меньше  $L_t^{opt}$ .

При малых углах наклона поверхности рельефа, когда оптимальный вариант конструктивного исполнения линии канатного

метро реализуется на основе форм I или III провисания несущих канатов, точка глобального минимума целевой функции лежит на ограничении (8) или (9) соответственно. В случаях оптимального варианта на основе формы II она лежит на ограничении (7). Указанные ограничения связаны с величиной агрегатной прочности  $R_{kn}(d_{kn\max})$  используемых несущих канатов максимального диаметра  $d_{kn\max}$  и их числом  $n_{kn}$ . С увеличением агрегатной прочности канатов и увеличением их числа можно ожидать улучшения технико-экономических характеристик оптимального варианта конструктивного исполнения линии канатного метро. Это подтверждается результатами расчета оптимальной

стоимости  $C_{1km}$  для двух значений числа несущих канатов:  $n_{kn} = 3$  и  $n_{kn} = 6$ . Однако экономический выигрыш оказывается весьма незначительным, составляя лишь ~4%. При этом не изменяются такие оптимальные характеристики линии, как шаг установки  $L_t^{opt}$  и высота  $H_{tg}$  промежуточных опор, форма и стрела провисания несущих канатов  $f$ . Однако существенно снижается требуемый диаметр несущих канатов (например, для варианта 2 на рис. 5 - с 47 до 33 мм) и горизонтальное усилие их натяжения  $S_k^{opt}$  (приблизительно в 2 раза), что положительно сказывается на характеристиках натяжного устройства.

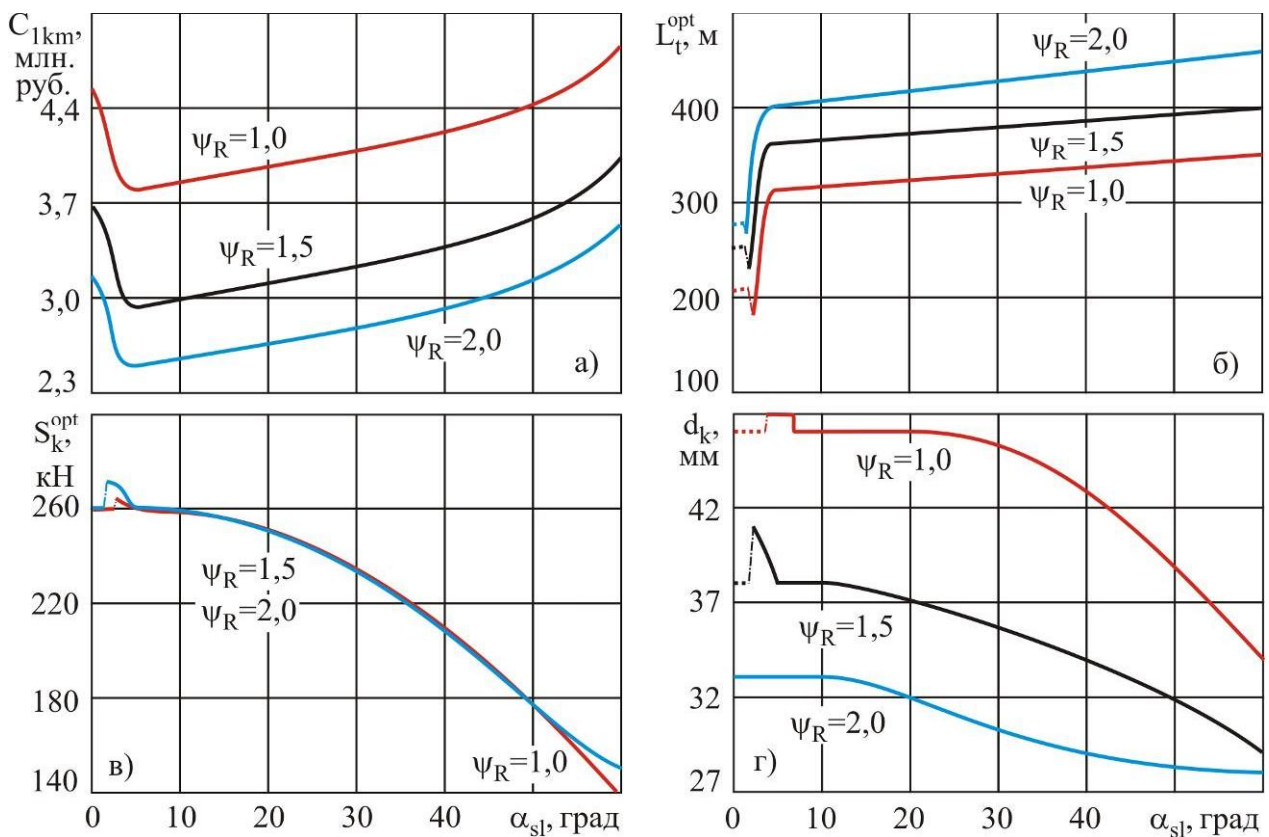


Рис. 14. Влияние агрегатной прочности несущих канатов на характеристики оптимального варианта конструктивного исполнения линии канатного метро: а – стоимость 1 км линии; б – шаг установки промежуточных опор; в – горизонтальное усилие натяжения несущих канатов; г – диаметр несущих канатов

В то же время, эффект от увеличения агрегатной прочности канатов оказывается весьма заметным. Влияние агрегатной прочности несущих канатов  $R_{kn}$  на характеристики оптимального варианта конструктивного исполнения линии канатного метро для

различных значений угла наклона поверхности рельефа (на примере варианта 2 на рис. 5) показано на рис. 14. На рис. 14 величина  $R_{kn}$  несущих канатов характеризуется коэффициентом

$$\psi_R = R_{kn} / R_{kn}^{вариант2},$$

где  $R_{kn}^{вариант2}$  - агрегатная прочность несущего каната, соответствующая варианту 2 конструктивного исполнения линии канатного метро (рис. 5).

В диапазоне углов наклона поверхности рельефа  $\alpha_{sl} > 10^0$  рост агрегатной прочности канатов обеспечивает прямо пропорциональный рост оптимального шага установки промежуточных опор (рис. 14, б) в соответствии с линейной зависимостью вида

$$\frac{L_t^{opt}(\psi_R)}{L_t^{opt}(\psi_r = 1)} \sim 0,65\psi_R.$$

Учитывая, что рост агрегатной прочности канатов весьма незначительно влияет на изменение высоты промежуточных опор  $H_{tg}$  оптимального варианта конструктивного исполнения линии канатного метро, увеличение  $L_t^{opt}$  приводит к заметному снижению стоимости 1 км линии. Так, для проведенных расчетов указанное снижение составляет примерно 40 % при увеличении агрегатной прочности несущих канатов в 2 раза (рис. 14, а). На величину горизонтального усилия натяжения несущих канатов  $S_k^{opt}$  их агрегатная прочность влияния практически не оказывает (рис. 14, в), однако приводит к существенному снижению требуемого диаметра несущих канатов (рис. 14, г), что также положительно сказывается на снижении стоимостных характеристик строительства линии канатного метро.

Практический интерес представляет собой выявление и анализ взаимосвязи между оптимальным шагом установки промежуточных опор линии канатного метро и такой важной технико-экономической характеристикой любой транспортной системы, как ее пропускная способность. Для канатного метро теоретическая пропускная способность (максимальное количество пассажиров, перевозимое за 1 ч в одном направлении) может быть рассчитана по следующей зависимости:

$$C_p^t = \frac{N_{p,cab} v_m}{L_{cab}} = \frac{\psi_v N_{p,cab} v_{max}}{L_{cab}}, \quad (10)$$

где  $N_{p,cab}$  - проектная вместимость одной пассажирской кабины;  $v_m$  - средняя скорость движения пассажирской кабины (с учетом

остановок на пассажирских станциях);  $v_{max}$  - максимально допустимая скорость движения пассажирской кабины на перегоне между соседними пассажирскими станциями;  $\psi_v = v_m / v_{max}$  - коэффициент пропорциональности между средней и максимально допустимой скоростью движения пассажирской кабины.

Согласно соотношению (10), теоретическая пропускная способность линии канатного метро прямо пропорциональна скорости движения (средней  $v_m$  или максимальной  $v_{max}$ ) пассажирской кабины и ее проектной вместимости  $N_{p,cab}$ , а также обратно пропорциональна расстоянию между двумя пассажирскими кабинами  $L_{cab}$ .

В рамках рассматриваемой математической модели оптимизации шага установки промежуточных опор максимальная скорость движения пассажирской кабины может быть учтена в величине коэффициента динамичности  $\psi_d > 1$ , причем коэффициент динамичности и скорость кабины связаны между собой прямо пропорциональной зависимостью. Для установления расчетного соотношения между  $\psi_d$  и  $v_{max}$  (или  $v_m$ ) необходимо моделирование динамики движения пассажирской кабины, поддерживаемой системой гибких стальных канатов, на основе построения соответствующих динамических моделей, примеры которого применительно к подъемным сооружениям можно найти в работах [12, 13, 19-21]. Влияние коэффициента динамичности  $\psi_d$  на характеристики оптимального варианта конструктивного исполнения линии канатного метро для различных значений угла наклона поверхности рельефа (на примере варианта 2 на рис. 5) показано на рис. 15. Рассмотренный гипотетический случай  $\psi_d = 1$  позволяет определить наиболее динамически благоприятные условия работы канатного метро. Анализ графиков на рис. 15 показывает, что основные характеристики линии канатного метро весьма чувствительны к изменению коэффициента динамичности. С ростом  $\psi_d$  стоимость 1 км линии и горизонтальное усилие натяжения несущих канатов возрастают приблизительно прямо пропорционально. Диа-

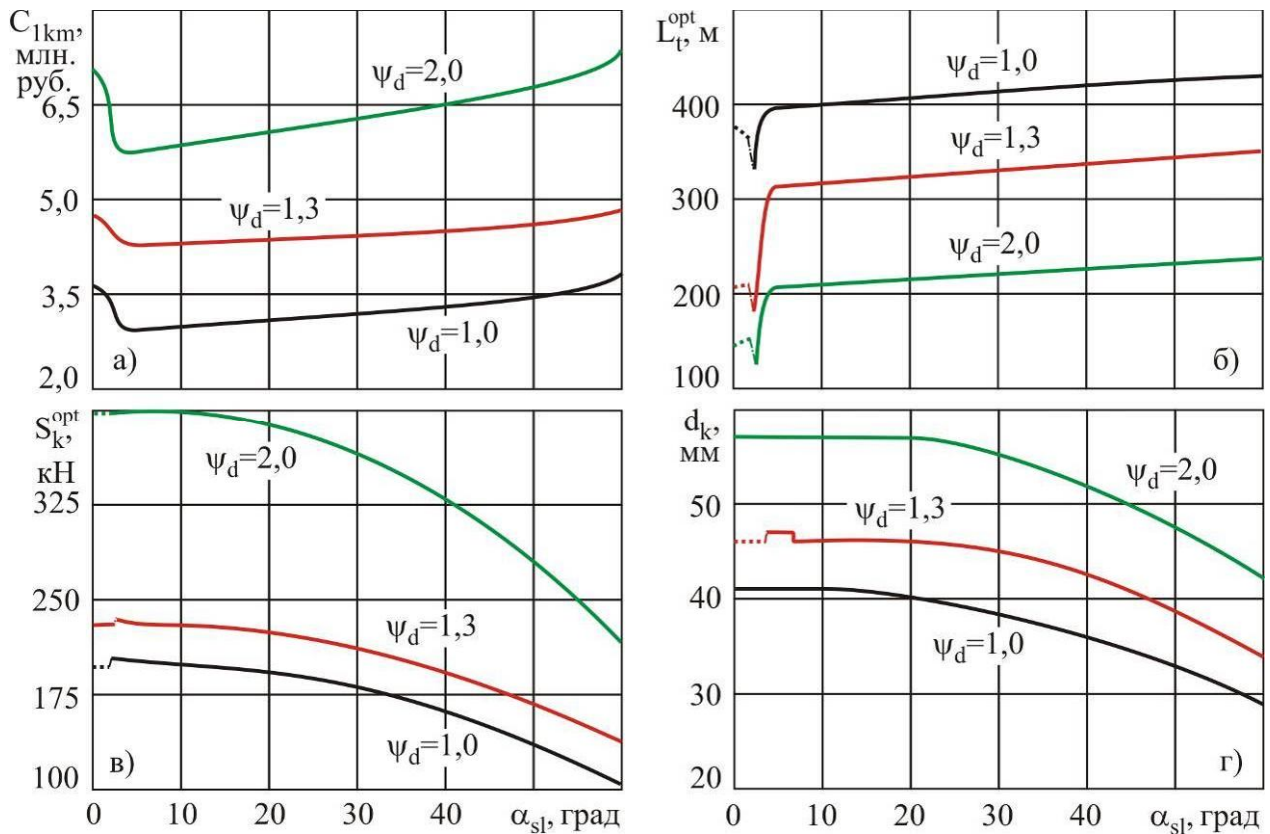


Рис. 15. Влияние коэффициента динамичности на характеристики оптимального варианта конструктивного исполнения линии канатного метро: а – стоимость 1 км линии; б – шаг установки промежуточных опор; в – горизонтальное усилие натяжения несущих канатов; г – диаметр несущих канатов

метр несущих канатов тоже возрастает, однако меньшими темпами. Шаг установки промежуточных опор с ростом  $\psi_d$  уменьшается также по приблизительно прямо пропорциональной зависимости. При этом высота самих опор практически не изменяется: разница составляет  $\sim 1\%$ . Таким образом, рост стоимости 1 км линии канатного метро обусловлен необходимостью построения большего числа промежуточных опор и усиления их конструкции для обеспечения большего требуемого усилия натяжения несущих канатов, а также стоимости самих канатов. Эти данные свидетельствуют о том, что при технико-экономической оптимизации в процессе проектирования линии канатного метро обязательно необходим учет средней или максимальной скоростью движения пассажирских кабин, а при дальнейшей эксплуатации линии – контроль скорости с обязательным ее ограничением согласно принятого при проектировании значения. Дополнительным источником повышения коэффициента динамичности в условиях

эксплуатации выступают ветровые нагрузки на канатную систему и пассажирские кабины, что должно учитываться при ограничении скорости движения или при задании проектного значения коэффициента динамичности. При разработке конструкций пассажирских кабин и канатной системы канатного метро необходимо в максимальной степени внедрять конструктивные мероприятия, направленные на снижение уровня протекающих динамических процессов.

В рамках рассматриваемой математической модели оптимизации шага установки промежуточных опор учет проектной вместимости  $N_{p,cab}$  и расстояния между двумя пассажирскими кабинами  $L_{cab}$  может быть выполнен комплексно путем изменения расчетной величины распределенной нагрузки  $q_{Rkn}$ , определяемой согласно зависимости (1). Тогда распределенная нагрузка  $q_{Rkn}$  с проектной вместимостью пассажирской кабины  $N_{p,cab}$  расстоянием между кабинами может быть связана соотношением

$$q_{Rkn} = \sqrt{\left( q_{kn0} d_{kn}^2 + \mu_1 \frac{q_{cab} N_{p,cab}^{b_q}}{n_{kn} L_{cab}} \right)^2 + w_0^2 \left( \eta_1 C_{wkn} k_{wkn} d_{kn} + \mu_{w1} C_{wcab} k_{wcab} \frac{a_{cab} N_{p,cab}^{a_q}}{n_{kn} L_{cab}} \right)^2}, \quad (11)$$

где  $q_{cab}$ ,  $b_q$  - коэффициенты регрессионного уравнения степенного вида  $Q_{cab} = q_{cab} N_{p,cab}^{b_q}$ , аппроксимирующего функцию  $Q_{cab} = f(N_{p,cab})$ ;  $a_{cab}$ ,  $a_q$  - коэффициенты регрессионного уравнения степенного вида  $A_{cab} = a_{cab} N_{p,cab}^{a_q}$ , аппроксимирующего функцию  $A_{cab} = f(N_{p,cab})$ .

Согласно (11) теоретическая пропускная способность линии канатного метро и расчетная распределенная нагрузка  $q_{Rkn}$  на несущий канат связаны прямо пропорциональной нелинейной зависимостью. Влияние величины распределенной нагрузки  $q_{Rkn}$  на характеристики оптимального варианта конструктивного исполнения линии канатного метро для различных значений угла наклона поверхности рельефа (на примере варианта 2 на рис. 5) показано на рис. 16. На рис. 16 ве-

личина распределенной нагрузки  $q_{Rkn}$  характеризуется коэффициентом

$$\psi_q = q_{Rkn} / q_{Rkn}^{вариант2},$$

где  $q_{Rkn}^{вариант2}$  - распределенная нагрузка на несущий канат, соответствующая варианту 2 конструктивного исполнения линии канатного метро (рис. 5).

Анализ рис. 16 показывает, что заметное влияние изменение нагрузки  $q_{Rkn}$  оказывает на стоимость 1 км линии канатного метро  $C_{1km}$  и шаг установки промежуточных опор  $L_t^{opt}$ , хотя изменение этих характеристик происходит медленнее, чем изменение  $q_{Rkn}$ : при росте  $q_{Rkn}$  в 2,25 раза (с  $\psi_q = 2/3$  до  $\psi_q = 1,5$ ) стоимость  $C_{1km}$  увеличивается в 1,3...1,4 раза (рис. 16, а), а шаг  $L_t^{opt}$  снижается в 1,4...1,5 раза (рис. 16, б) при разных значе-

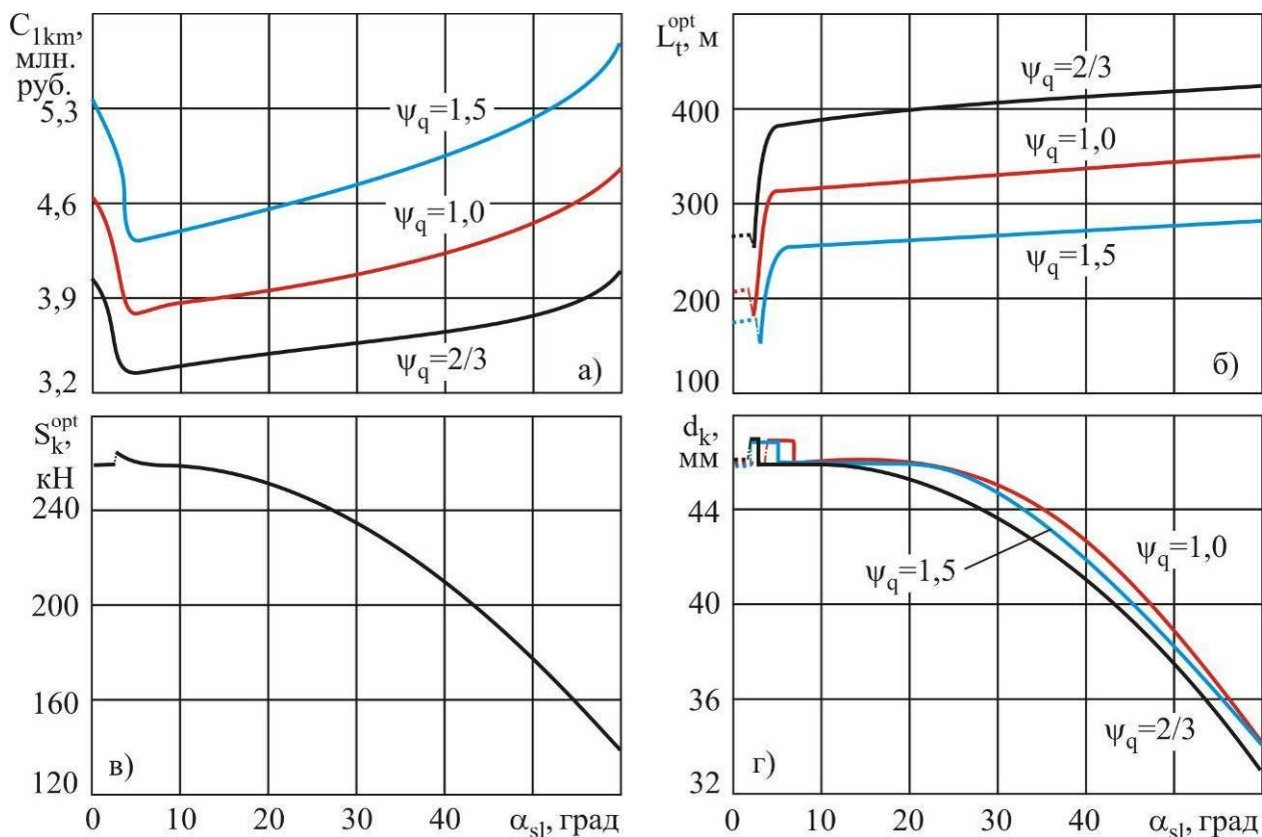


Рис. 16. Влияние величины распределенной нагрузки на несущий канат на характеристики оптимального варианта конструктивного исполнения линии канатного метро:  
 а – стоимость 1 км линии; б – шаг установки промежуточных опор;  
 в – горизонтальное усилие натяжения несущих канатов; г – диаметр несущих канатов

ниях угла наклона поверхности рельефа  $\alpha_{sl}$ . На величину горизонтального усилия натяжения несущих канатов  $S_k^{opt}$  влияние изменения нагрузки  $q_{Rkn}$  практически не наблюдается (рис. 15, в), а на диаметр несущих канатов  $d_{kn}$  оно оказывается минимальным: только при повышенных уклонах поверхности рельефа диаметры могут отличаться на 1...2 мм (рис. 15, г).

#### **Заключение.**

1. Зависимость стоимости 1 км линии канатного метро от параметров рельефа носит экстремальный характер с выраженным минимумом при малых углах наклона поверхности рельефа порядка 3...6°. Положение минимума является достаточно устойчивым и незначительно изменяется при достаточно существенном изменении стоимости промежуточных опор и установленного на них технологического оборудования.

2. Наиболее эффективными условиями для строительства канатного метро является рельеф местности со значительными перепадами высотных отметок по длине трассы транспортирования: лишь при углах наклона поверхности свыше 50...60° стоимость 1 км линии начинает превышать стоимость 1 км линии, проложенной вдоль строго горизонтальной поверхности.

3. При малых углах наклона поверхности (менее 6...8°) для минимизации стоимости строительства линии канатного метро требуется более частая установка промежуточных опор. Однако несмотря на возможность строительства более низких и более дешевых опор, наблюдаются повышенные значения стоимости 1 км оптимального варианта линии. При больших углах наклона поверхности необходима более редкая установка более высоких промежуточных опор. В пределах угла наклона 10...60° диапазон изменения оптимального шага достаточно мал, составляя не более ±10 % от значения шага при угле наклона поверхности 10°.

4. В диапазоне малых углов наклона поверхности рельефа (3...6°) наблюдаются скачкообразные изменения основных технико-экономических характеристик линии канатного метро. Это связано со сменой форм провисания несущих канатов.

5. Увеличение числа несущих канатов имеет весьма незначительный экономический эффект (в пределах 4 %). При этом не изменяются такие оптимальные характеристики линии, как шаг установки и высота промежуточных опор, форма и стрела провисания несущих канатов. Однако существенно снижается диаметр несущих канатов и горизонтальное усилие их натяжения.

6. Повышение агрегатной прочности несущих канатов обеспечивает прямо пропорциональное повышение оптимального шага установки промежуточных опор и приводит к заметному снижению стоимости строительства линии канатного метро. На высоту промежуточных опор и горизонтальное усилие натяжения несущих канатов их агрегатная прочность влияния практически не оказывает, однако приводит к существенному снижению требуемого диаметра несущих канатов, что также положительно сказывается на снижении стоимостных характеристик строительства линии канатного метро.

7. Пропускная способность линии канатного метро оказывает заметное влияние на оптимальные значения ряда ее основных технико-экономических характеристик, в частности, на стоимость 1 км линии, шаг установки промежуточных опор, усилие натяжения и диаметр несущих канатов. Ее повышение возможно путем увеличения разрешенной скорости движения пассажирских кабин и (или) их вместимости и количества. Во всех этих случаях повышение пропускной способности обуславливает рост стоимости 1 км линии и снижение шага установки промежуточных опор. Степень влияния перечисленных направлений повышения пропускной способности является неодинаковой, что позволяет предполагать наличие для заданного значения теоретической пропускной способности оптимального сочетания скорости движения, вместимости и количества пассажирских кабин, при котором будет достигаться наибольший технико-экономический эффект при строительстве линии метро.

#### **Список литературы.**

1. Распоряжение Правительства РФ от 22 ноября 2008 г. № 1734-р «Транспортная стратегия Российской Федерации на период



до 2030 года» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/94460/#ixzz4h8vkrSuA>.

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

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

4. Лагерев, А.В. Концепция инновационной системы городского транспорта «Канатное метро города Брянска» / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев, А.А. Короткий, А.В. Панфилов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2012. - №3. – С. 12-15.

5. 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.

6. Лагерев, А.В. Перспективы внедрения инновационной технологии надземных пассажирских перевозок на основе подвесных пассажирских канатных дорог для модернизации системы общественного транспорта города Брянска / А.В.Лагерев, И.А. Лагерев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2017. - №2. – С. 163-177. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-02-163-177.

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

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 техническо-

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

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

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

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

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

16. 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.

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

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

19. Лагерев, И.А. Динамический анализ трехзвенного гидравлического крано-манипулятора / И.А. Лагерев, А.В. Лагерев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2011. - № 3. – С. 9-16.

20. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Milto A.A. Preliminary Dynamics and Stress Analysis of Articulating Non-Telescoping Boom Cranes using Finite Element Method // International Review on Modelling and Simulations. 2015. Vol. 8, N. 2. P. 223–226.

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

#### 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*.

Лагереv Игорь Александрович – кандидат технических наук, проректор по инновационной работе ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», *lagerev-bgu@yandex.ru*.

## THE EFFECT OF TOPOGRAPHY ON THE CHOICE OF OPTIMAL STEP INTERMEDIATE SUPPORTS ALONG THE LINE OF THE CABLE METRO

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 optimization of the distance between intermediate supports during the design of the cable metro lines in highly urbanized environment, taking into account not the horizontal surface of the terrain. 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. 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 angle of the longitudinal slope of the surface relief along the line of the cable metro on the value of the optimal distance between intermediate supports depending on the design and cost of intermediate supports and at the cost of 1 km line of the cable metro. Quantitative calculations showed that with the increase of the longitudinal slope of the surface construction cost also increases with nonlinear increasing rate. The dependence of the cost of 1 km of line underground cable metro from the parameters of the relief is of extreme character with a pronounced minimum at small angles of inclination of the terrain surface about 3...60 degrees. The position of the minimum is quite stable and only slightly changes when enough significant change in the cost of intermediate supports and installed on them technological equipment. The most effective conditions for the construction of the cable metro is the terrain with considerable differences in altitude along the length of the route of transport: only if the surface inclination of more than 50...60 degrees cost of 1 km line starts to exceed the cost of 1 km line laid along a strictly horizontal surface. At small angles of inclination of the surface (less than 6...8 degrees) to minimize the cost of construction of the cable metro line requires more frequent installation of intermediate supports. However, despite the possibility of building a lower and cheaper supports, the observed increased values of the cost of 1 km of optimum option of the line. At large angles of inclination of the surface a need for a more rare setup higher intermediate supports. Within the tilt angle 10...60 degrees the range of variation of the optimal step is small enough, amounting to no more than  $\pm 10\%$  from the value of the step at an angle of inclination of the surface 10 degree. In the range of

small angles of inclination of the terrain surface (3...6 degrees) observed abrupt changes in the basic technical and economic characteristics of the cable metro lines. This is due to the change of the forms sagging of load-bearing ropes. The increase in the number of supporting ropes has a very small economic effect (within 4 %). It does not change the optimal characteristics of such line, as a step of the installation and the height of intermediate supports, shape and sagging boom carrying ropes. However, the significantly reduced diameter of the supporting rope and the horizontal force tension. The increase in aggregate strength of carrying ropes provides a directly proportional increase in the optimal step installation of intermediate supports and leads to a marked decrease in the cost of construction of the cable metro lines. At the height of intermediate supports and the horizontal force of the tension carrying ropes of their aggregate strength influence practically does not, however, leads to a significant reduction in the required diameter of the supporting ropes. It also has a positive effect on reducing the cost characteristics of the construction cable metro line. The capacity of the line cable metro has a significant impact on the optimal values of some of its basic technical and economic characteristics, in particular, the cost of 1 km line, the step to install intermediate supports, tension and diameter of the supporting ropes. Its increase is possible by increasing the allowed speed passenger cabins and (or) their capacity and quantity. In all these cases, increasing capacity causes the increase in the cost of 1 km of line and the reduction step of the installation of intermediate supports. The degree of influence these areas of increasing capacity is not the same, which suggests the presence for the given value of the theoretical capacity of an optimal combination of speed, capacity and number of passenger cabins, which will be achieved the greatest technical and economic effect during the construction of the cable metro line.

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

**DOI:** 10.22281/2413-9920-2017-03-03-253-272

### References

1. *Rasporyazhenie Pravitelstva RF ot 22 noyabrya 2008 g. № 1734-r «Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda»*. Available: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/94460/#ixzz4h8vvpSuA> (In Russian)
2. 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)
3. 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)
4. 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)
5. Korotkiy A.A., Kirsanov M.V., Panfilov A.V. Perspektivy primeneniya kanatnogo transporta v urbanizirovannoy srede. *Gradostroitelstvo*, 2013, No. 4, pp. 66-70. (In Russian)
6. 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-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No.2, pp. 163-177. (In Russian) DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-03-163-177.
7. Kanatnoe metro. IKTs «Myhsl» NGTU. Available at: <http://www.ikcmysl.ru/kanatnoe-metro>. (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. Optimal design of the cable car line. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No. 2, pp. 406-415. (In Russian)
10. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Cable transport system “Kanatnoe metro” towers distance optimisation. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, No.1, pp. 22-30. (In Russian)
11. 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)
12. Samsonov A.V. Cable railway mechatronic drive dynamics simulation. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, No.2, pp. 81-85. (In Russian)
13. Lagerev A.V., Milto A.A., Lagerev I.A. *Dinamiko-prochnostnoy analiz gidravlicheskiikh 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)

14. Lagerev A.V. *Nagruzhennost podemno-transportnoy tekhniki* [Load lifting and transport equipment]. Bryansk, BGTU, 2010. 180 p. (In Russian)

15. *SNiP 23-01-99. Stroitel'naya klimatologiya* [Building climatology]. Moscow, Gosstandart, 2003. 68 p. (In Russian)

16. *PB 10-559-03. Pravila ustroystva i bezopasnoy ekspluatatsii passazhirskikh podvesnykh i buksirovochnykh kanatnykh dorog.* Moscow, Gosstandart, 2003. 47 p. (In Russian)

17. Lagerev I.A., Lagerev A.V. *Optimalnoe proektirovanie podyemno-transportnykh mashin* [Optimal design of lifting-transport machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskiy Universitet, 2013. 228 p. (In Russian)

18. Gill Ph.E., Murray W., Wright M.H. *Practical optimization*. Academic Press Inc. (London) Ltd, 1981.

19. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Dynamic analysis of a hydraulic three-tier crane-manipulator. *Vestnik Bryanskogo gosudarstven-*

*nogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, No.3, pp. 9-16. (In Russian)

20. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Milto A.A. Preliminary Dynamics and Stress Analysis of Articulating Non-Telescoping Boom Cranes using Finite Element Method. *International Review on Modelling and Simulations*, 2015, Vol. 8, No. 2. pp. 223–226.

21. Lagerev I.A. *Modelirovanie rabochikh protsessov manipulyatsionnykh sistem mobilnykh mnogotselevykh transportno-tekhnologicheskikh mashin i kompleksov* [Modeling of work processes in manipulation systems for mobile multi-purpose transport and technological machines and complexes]. Bryansk, RIO BGTU, 2016. 371 p. (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](mailto:bsu-avl@yandex.ru).

Igor A. Lagerev - Candidate of Technical Sciences, Vice rector for Innovations at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, [lagerev-bgu@yandex.ru](mailto:lagerev-bgu@yandex.ru).

Дата публикации  
(Date of publication):  
25.09.2017

