

УДК 625.54, 625.57

А.В. Лагерева, И.А. Лагерева

ОПТИМИЗАЦИЯ ШАГА УСТАНОВКИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ОПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВДОЛЬ ЛИНИИ КАНАТНОГО МЕТРО

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. Выполнен анализ влияния конструктивных и стоимостных показателей на величину оптимального шага и стоимость строительства.

Ключевые слова: метро канатное, конструкция промежуточная опорная, шаг установки, оптимизация технико-экономическая, канат несущий, канат тяговый, канат грузоподъемный, прочность агрегатная, стоимость

В настоящее время для внутригородских перевозок используются различные виды наземного транспорта - трамвай, троллейбус, автобус, метрополитен, такси. При достаточно высокой потенциально возможной скорости движения этих средств средняя скорость перемещения пассажиров оказывается значительно ниже из-за характерных для урбанизированной среды недостатков формирования транспортного потока - наличия светофоров, перекрестков, «пробок», дорожно-транспортных происшествий, ремонта дорожного полотна, прокладки подземных коммуникаций и др. Эти обстоятельства не только замедляют перемещение пассажиров, но и делают практически невозможным планирование ими времени нахождения в пути.

В последнее время появилась эффективная альтернатива традиционным видам общественного транспорта – канатное метро [1, 2]. Его можно назвать скоростным городским транспортом, 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 [3]: в Австрии действуют более 2500 канатных дорог, во Франции – более 4000, в Италии – более 3000, в Швейцарии – более 2000. Для таких крупных городов, как Лондон, Милан, Барселона, Каир, Медельин, Каракас подвесной пассажирский канатный транспорт используется для разгрузки общественного транспорта в сильно застроенных деловых частях городов. Есть опыт и для российских городов – Оренбурга и Нижнего Новгорода.

Строительство канатного метро в условиях сильно урбанизированной городской среды – затратная технико-экономическая задача. Значительную составляющую в общую стоимость реализации этой задачи, включая расходы на проектно-конструкторские, проектно-изыскательские, строительно-монтажные работы, приобретение необходимого механического оборудования, создания автоматизированной 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 указанных затрат непосредственно зависит от числа промежуточных опор, расположенных по длине линии, т.е. зависит от 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. 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. При этом необходимо учитывать, что процессом изменения высоты опор, а, следовательно, и их единичной стоимости можно в определен-

ных пределах управлять целенаправленным натяжением несущих канатов, что позволяет изменять стрелу их провисания. Таким образом, возможно замедлить естественное увеличение высоты опорных конструкций с увеличением шага установки опор, хотя указанная мера и приведет к возникновению в канатах дополнительных осевых усилий и потребует применение канатов большего диаметра и большей стоимости.

Очевидно, задача расположения промежуточных опор канатного метро является задачей технико-экономической оптимизации. Ее цель заключается в обеспечении минимальной величины затрат на возведение опорных конструкций, приобретение тягового и несущих канатов, а также комплекта устанавливаемого на опору необходимого технологического оборудования. Постановка и решение данной оптимизационной задачи весьма актуальна, так как позволяет существенно удешевить строительство канатного метро.

Целевая функция, имеющая стоимостное выражение C , складывается из ряда слагаемых – стоимости самих промежуточных опор и фундамента под ними, а также стоимости тягового и несущих стальных канатов и технологического оборудования:

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

где C_t, C_f, C_e - единичная стоимость опорной конструкции, фундамента и комплекта технологического оборудования; C_{kt}, C_{kn} - стоимость 1 погонного метра тягового и несущего каната соответственно; $n_t = L_{tr} / L_t - 1$ - число опорных конструкций; L_{tr} - длина линии канатного метро; L_t - шаг установки опорных конструкций; n_{kn} - число несущих канатов; l_k - длина каната между соседними промежуточными опорами с учетом его провисания.

Единичная 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 определения эмпирических коэффициентов C_{t0} и a_t целесообразно использовать данные о стоимости опорных конструкций современных типов линий электропередач высокого напряжения. По своему конструктивному исполнению они достаточно близки к опорным конструкциям канатного метро. В табл. 1 приведены значения указанных коэффициентов, полученные обработкой методом наименьших квадратов ценовых данных ряда отечественных фирм-производителей опор линий электропередач [4]. Высота указанных типов опор находится в диапазоне 20...45 м.

Таблица 1

Значения коэффициентов в регрессионной зависимости для определения C_t (руб)

Тип опорной металлоконструкции	Значения эмпирических коэффициентов	
	$C_{t0}, \text{руб/м}^{a_t}$	a_t
Многогранные стальные опоры типа		
ПГМ 500	2319,00	1,74
МУ 330	716,40	2,37
ПМ 220	2,84	3,60
АМ 220	14,32	3,44
КМ 220	28,61	3,30
Ферменные стальные опоры	5,68	3,60

Единичная стоимость фундамента C_f пропорциональна величине массы устанавливаемой опорной конструкции, т.е. ее высоте H_t . Поэтому для определения C_f возможно также использовать степенную регрессионную зависимость вида

$$C_f = C_{f0} H_t^{a_f},$$

причем стоимость C_f удобно принимать как фиксированную долю стоимости C_t : $\chi = C_f / C_t$. Значения эмпирических коэффициентов C_{f0} и a_f для нескольких значений доли стоимости χ приведены в табл. 2.

Таблица 2
Значения коэффициентов в регрессионной зависимости для определения C_t (руб)

Тип опорной металлоконструкции	Доля стоимости χ	Значения эмпирических коэффициентов	
		C_{f0} , руб/м ^{a_f}	a_f
Многогранные стальные опоры типа ПГМ 500	0,05	115,00	1,74
	0,10	232,00	
	0,15	348,00	
Многогранные стальные опоры типа МУ 330	0,05	35,82	2,37
	0,10	71,64	
	0,15	107,46	
Многогранные стальные опоры типа ПМ 220	0,05	0,14	3,60
	0,10	0,28	
	0,15	0,43	
Многогранные стальные опоры типа АМ 220	0,05	0,72	3,44
	0,10	1,43	
	0,15	2,15	
Многогранные стальные опоры типа КМ 220	0,05	1,43	3,30
	0,10	2,86	
	0,15	4,29	

Согласно требованиям Ростехнадзора [5] 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 грузолодские канаты по ГОСТ 2688-80, ГОСТ 3066-80, ГОСТ 3077-80, ГОСТ 3079-80, ГОСТ 3081-80, ГОСТ 7665-80 и ГОСТ 7667-80. Их конструкция приведена в табл. 3.

Таблица 3
Основные типы отечественных грузолодских стальных канатов

ГОСТ на канат	Тип каната	Конструкция	Диаметр каната, мм	
			минимальный d_k^{\min}	максимальный d_k^{\max}
ГОСТ 2688-80	Двойной свивки ЛК-Р	6×19(1+6+6/6)+1о.с.	3,6	56,0
ГОСТ 3066-80	Двойной свивки ЛК-Р	6×7(1+6)+1×7(1+6)	1,9	27,5
ГОСТ 3077-80	Двойной свивки ЛК-О	6×19(1+9+9)+1о.с.	4,6	46,0
ГОСТ 3079-80	Двойной свивки ТЛК-О	6×37(1+6+15+15)+1о.с.	5,8	75,0
ГОСТ 3081-80	Двойной свивки ТЛК-О	6×37(1+9+9)+7×7(1+6)	6,4	43,0
ГОСТ 7665-80	Двойной свивки ЛК-3	6×25(1+6; 6+12)+1о.с.	14,5	48,5
ГОСТ 7667-80	Двойной свивки ЛК-3	6×25(1+6;6+12)+7×7(1+6)	14,0	47,0

Используемые в дальнейших расчетах основные параметры грузолодских стальных канатов целесообразно представить в виде регрессионных соотношений в зависимости от диаметра каната d_k . Анализ показал, что наилучшее приближение к исходным данным достигается при использовании следующих регрессионных зависимостей:

- 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 в указанных регрессионных зависимостях (d_k - в мм), полученные обработкой методом наименьших квадратов данных соответствующих ГОСТ и ценовых данных отечественных фирм-изготовителей и поставщиков [6], приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения коэффициентов в регрессионных зависимостях для расчета параметров отечественных грузоподъемных канатов

ГОСТ на канат	Значения коэффициентов при расчете						
	веса (Н) q_{k0}	агрегатной прочности каната* (Н)			стоимости каната ² (руб/м)		
		r_{k0}	r_{k1}	r_{k2}	c_{k0}	c_{k1}	c_{k2}
ГОСТ 2688-80	0,00375	122,8	11,0	624,2	5,04	0,2946	0,1635
ГОСТ 3066-80	0,00419	58,4	12,4	749,7	4,23	0,3039	0,1582
ГОСТ 3077-80	0,00370	-2354,0	317,8	619,5	-1,38	1,4100	0,1573
ГОСТ 3079-80	0,00354	3850,9	-413,0	614,0	-0,09	1,3740	0,1469
ГОСТ 3081-80	0,00401	-10825,5	966,5	737,1	2,43	0,7968	0,1793
ГОСТ 7665-80	0,00375	-8730,0	897,2	590,8	0,19	-0,3620	0,1860
ГОСТ 7667-80	0,00421	-11400,0	1135,0	718,5	22,58	-0,0622	0,1786

Примечания: * – для канатов маркировочной группы 2060 (210) Н/мм² (кгс/мм²);

Расчетная схема участка линии канатного метро между двумя соседними промежуточными опорами для случая их горизонтальной установки приведена на рис. 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} и осевого усилия натяжения каната T_k . При дальнейших расчетах сосредоточенные нагрузки Q_{cab} удобно заменить распределенными интенсивностью

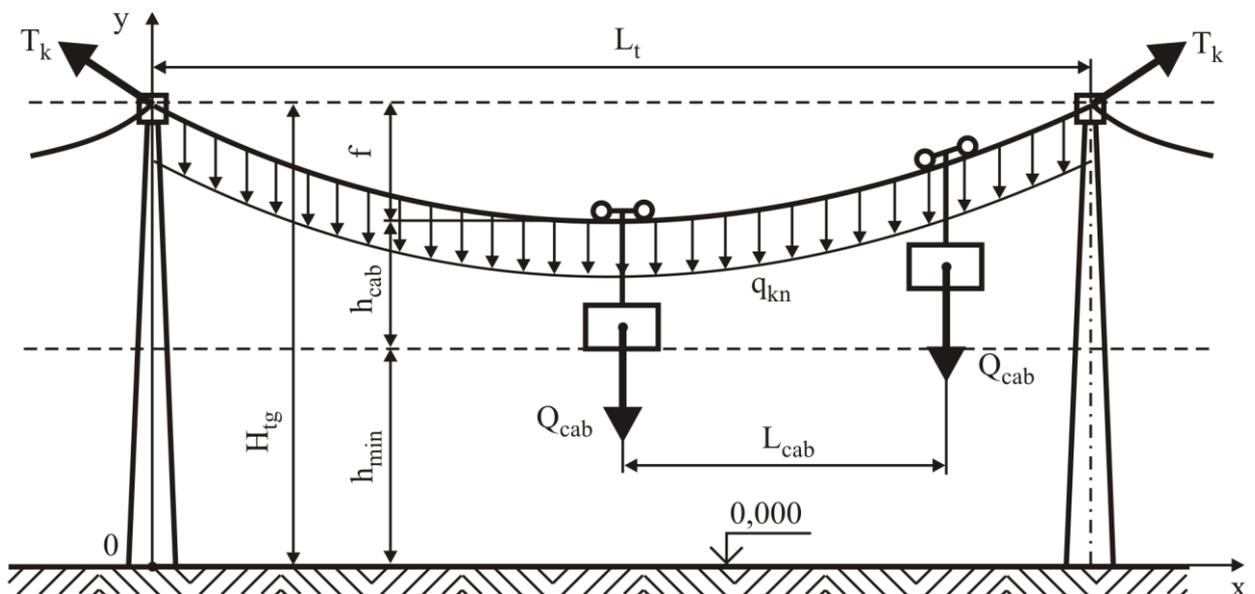


Рис. 1. Расчетная схема участка линии канатного метро

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

где L_{cab} - расстояние между соседними пассажирскими кабинами.

В процессе эксплуатации канатного метро на несущие канаты наряду с весовыми статическими нагрузками действуют также динамические нагрузки, связанные с раскачиванием пассажирских кабин при их движении. Они приводят к повышению уровня действующих к канатам напряжений от весовых нагрузок и к увеличению стрелы провисания. Аналогично тому, как подобные динамические нагрузки учитываются при выполнении проектных расчетов подъемно-транспортной техники [7, 8], при расчете канатной системы целесообразно использовать коэффициент динамичности $\psi_d > 1$.

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 между соседними опорами может быть представлена параболической зависимостью вида [9]

$$y(x) = H_t - \frac{\psi_d(q_{kn} + q_{cab})}{2T_k} x(L_t - x)$$

со стрелой провисания в середине пролета

$$f = \frac{\psi_d(q_{kn} + q_{cab})L_t^2}{8T_k}.$$

При этом длина самого несущего каната будет составлять

$$l_k = L_t \left[1 + \frac{\psi_d^2 (q_{kn} + q_{cab})^2 L_t^2}{24T_k^2} \right],$$

а его минимальный диаметр, определяемый из условия агрегатной прочности, выражается соотношением:

$$d_{kn} = 0,5 \left[\sqrt{r_{k1}^2 - 4r_{k2}(r_{k0} - [n]_k T_k)} - r_{k1} \right] / r_{k2},$$

где $[n]_k$ - минимальный коэффициент запаса прочности каната, установленный требованиями Ростехнадзора ПБ 10-559-03 [5].

С учетом минимально допустимого по условиям городской застройки вдоль линии канатного метро высотного приближения пассажирских кабин к зданиям и сооружениям h_{\min} и вертикального габаритного размера кабины h_{cab} геометрическая высота промежуточной опорной конструкции определяется зависимостью

$$H_{tg} = h_{\min} + h_{cab} + f.$$

Вследствие необходимости натяжения тягового и несущих канатов требуется усиление конструкции опор, что повышает их массу и, соответственно, стоимость изготовления и монтажа. Это обстоятельство при проведении дальнейших расчетов удобно учесть путем некоторого увеличения расчетной высоты опор по сравнению с их геометрической высотой пропорционально принятому натяжению T_k . Таким образом, в выражении для определения единичной стоимости опоры (2) необходимо использовать расчетную высоту, составляющую:

$$H_t = H_{tg} \left(1 + \psi \frac{[n]_k T_k}{R_{kn}} \right),$$

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.

Анализ приведенных зависимостей, составляющих математическую модель рассматриваемой технической проблемы, позволяет сделать вывод о том, что в качестве варьируемых параметров задачи оптимизации шага установки промежуточных опор канатного метро следует взять две независимые величины: расстояние между опорами L_t и усилие натяжения несущих канатов T_k . Из них формируется вектор управляемых параметров

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

Остальные величины являются фиксированными, так как либо задаются в качестве исходных данных, либо вычисляются в зависимости от указанных управляемых параметров. К первой группе относятся: $L_{tr}, L_{cab}, Q_{cab}, h_{\min}, h_{cab}, \psi, \psi_d, [n]_k, C_{f0}, a_f, C_{t0}, a_t, q_{k0}, r_{k0}, r_{k1}, r_{k2}, c_{k0}, c_{k1}, c_{k2}$. Ко второй группе относятся: $q_{kn}, q_{cab}, f, d_{kt}, d_{kn}, H_{tg}, l_k, n_t$. Из величин второй группы формируется вектор неуправляемых параметров, которые не подлежат варьированию в процессе решения оптимизационной задачи:

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

Окончательно задача технико-экономической оптимизации шага установки промежуточных опорных конструкций канатного метро на горизонтальной плоскости сводится к минимизации целевой функции – суммарной стоимости изготовления и монтажа опор, приобретения тягового и несущих канатов, которая согласно (1) имеет вид:

$$\begin{aligned} C(\{x\}, \{z\}) = & \frac{L_{tr}}{x_1} \left\langle C_{f0} \left[h_{\min} + h_{cab} + \frac{\psi_d (z_1 + z_2) x_1^2}{8x_2} \right] \left(1 + \psi \frac{x_2 [n]_k}{R_{kn}} \right)^{a_f} + \right. \\ & \left. + C_{t0} \left[h_{\min} + h_{cab} + \frac{\psi_d (z_1 + z_2) x_1^2}{8x_2} \right] \left(1 + \psi \frac{x_2 [n]_k}{R_{kn}} \right)^{a_t} + C_e \right\rangle + \\ & + \left(\frac{L_{tr}}{x_1} - 1 \right) (C_{kt} + n_{kn} C_{kn}) x_1 \left[1 + \frac{\psi_d^2 (z_1 + z_2)^2 x_1^2}{24x_2^2} \right] \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (3)$$

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

- допустимому диапазону изменения величины шага установки соседних опор

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

- допустимым диапазонам изменения диаметров тягового и несущих канатов

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

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

- максимально допустимой величине провисания несущего каната между опорами

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

- минимальному усилию натяжения каната согласно требованиям ПБ 10-559-03 [9]

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

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

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

- максимальной высоте промежуточной опоры

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

где $L_{t \max}$ - предельное расстояние между промежуточными опорами; $d_{kt \max}$, $d_{kn \max}$ - максимальный диаметр тягового и несущего канатов (табл.3); $d_{kt \min}$, $d_{kn \min}$ - минимальный диаметр тягового и несущего канатов (табл. 3); ψ_f - коэффициент допустимого провисания каната между опорами; n_{cab} - число пассажирских кабин, одновременно находящихся в пределах одного пролета; $R_{kn}(d_{kn \max})$ - агрегатная прочность каната максимального диаметра выбранной конструкции (табл. 3); $H_{t \max}$ - предельная высота промежуточной опоры.

Для нахождения минимума целевой функции (3) с учетом принятых ограничений необходимо использовать один из прямых методов условной оптимизации [10, 11], основанный на непосредственном вычислении величины целевой функции $\Pi(\{x\}, \{z\})$.

Технико-экономические показатели оптимального варианта установки промежуточных опорных конструкций канатного метро в значительной мере зависят от стоимости комплекта технологического оборудования, монтируемого на опоре, и самой опоры. На рис. 2 приведены результаты оптимизации в зависимости от величины C_e для двух вариантов линии канатного метро на основе использования опор, аналогичных по стоимости опорам типа ПГМ 500 и типа МУ 330, при двух несущих и одном тяговом канатах по ГОСТ 3079-80 маркировочной группы $G_k = 2160 (220)$ кН/мм² (кгс/мм²). Для характеристики стоимостных показателей на рис. 2,б приведены графики $C_1(C_e)$ и $C_{1km}(C_e)$, которые определяют соответственно стоимость одного пролета линии (суммарную стоимость

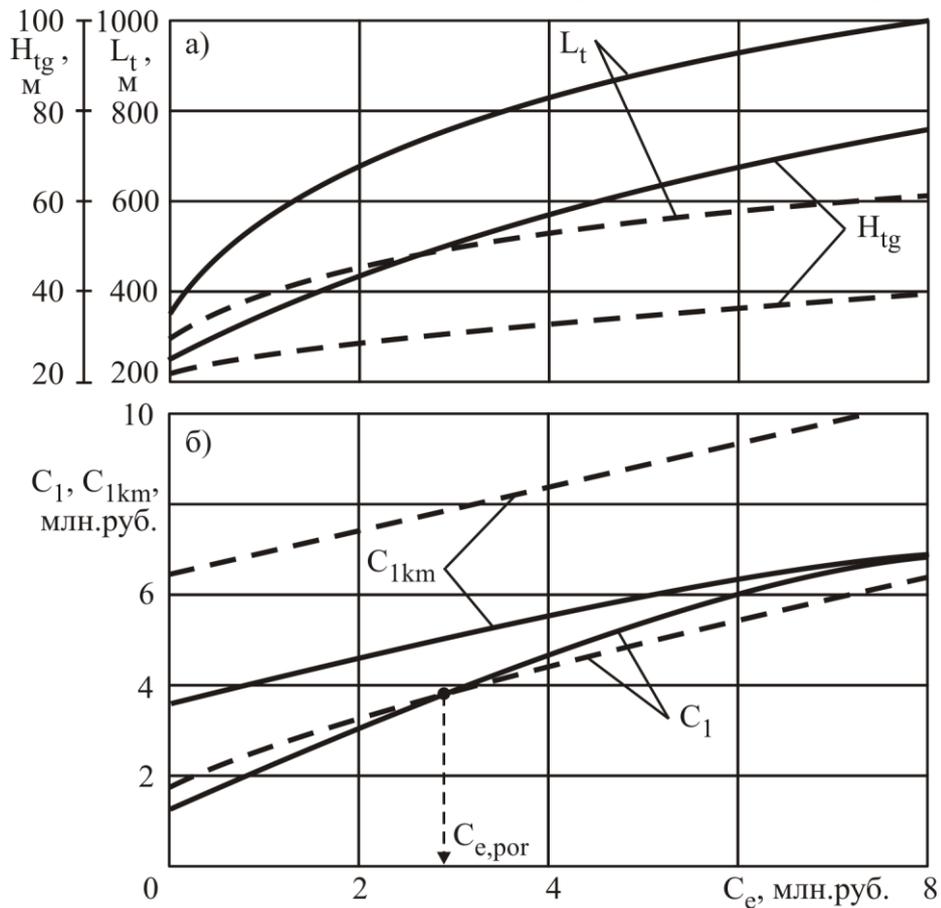


Рис. 2. Влияние стоимости опоры и комплекта технологического оборудования на показатели оптимального варианта установки промежуточных опор: а - технические показатели; б - стоимостные показатели (— - опора типа ПГМ 500; - - - опора типа МУ 330)

опоры, фундамента и канатов в пролете между соседними опорами без стоимости установленного оборудования) и стоимость 1 км линии канатного метро. Расчеты показывают, что опоры, более дорогие в стоимостном выражении (типа МУ 330), требуют применение меньших шагов их установки L_t , так как в данном случае возможно использование опор меньшей высоты H_{tg} . При этом стоимость одного пролета C_1 в зависимости от стоимости оборудования C_e сначала оказывается выше соответствующей стоимости для более дешевых типов опор (типа ПГМ 500), а начиная с некоторого порогового значения $C_e > C_{e,por}$, оказывается ниже. Однако стоимость 1 км линии канатного метро C_{1km} всегда выше независимо от величины C_e .

На рис. 3 показано взаимное влияние стоимостных показателей опорных конструкций и канатов на оптимальный шаг установки опор L_t (рис. 3,а) и стоимость 1 км линии канатного метро C_{1km} (рис. 3,б) при стоимости комплекта технологического оборудования $C_e = 1,0$ млн. руб. и числе несущих канатов $n_{kn} = 3$ маркировочной группы $G_k = 2160$ (220) кН/мм² (кгс/мм²). Стоимостные показатели опорных конструкций существенно влияют на оптимальную величину шага L_t и стоимость C_{1km} , тогда как влияние стоимостных показателей 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. В этом случае наиболее целесообразно использовать канаты по ГОСТ 3081-80 в сочетании с опорами типа ПГМ 500. Немного худшие результаты дают канаты по ГОСТ 3079-80 и ГОСТ 7667-80 также в сочетании с опорами типа ПГМ 500. При наличии достаточных резервов землеотведения приоритетной становится задача максимального снижения стоимости строительства. В этом случае наиболее целесообразно использовать канаты по ГОСТ 3079-80 в сочетании с опорами типа ПМ 220. Немного худшие результаты дают канаты по ГОСТ 3081-80 и ГОСТ 7667-80 также в сочетании с опорами типа ПМ 220.

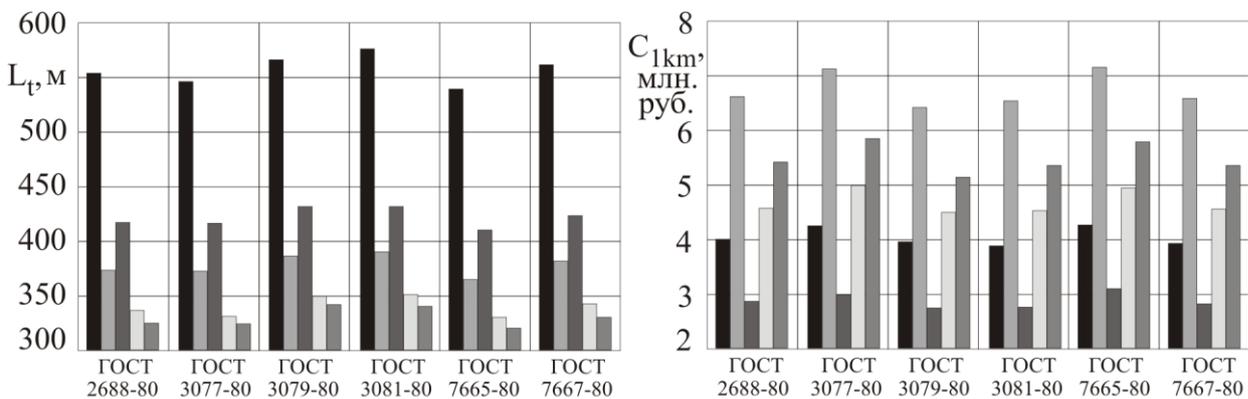


Рис. 3. Влияние стоимостных показателей промежуточных опор и несущих канатов на оптимальный шаг установки опор (а) и стоимости 1 км линии канатного метро (б):
 ■ - ПГМ 500; ■ - МУ 330; ■ - ПМ 220; ■ - АМ 220; ■ - КМ 220)

Число несущих канатов n_{kn} оказывает незначительное влияние на оптимальный шаг установки опор: с увеличением их числа с 2 до 4 канатов оптимальное значение L_t увеличивается лишь на 1,0...1,5 % или на 4...9 м, а высота промежуточной опоры H_{tg} – на 0,5...1,5 % или на 0,2...0,5 м. Однако увеличение числа канатов приводит к заметному уменьшению их диаметра d_k и требуемого усилия натяжения T_k : при $n_{kn} = 2, 3$ и 4 соот-

ветствующие значения диаметров составляют 57, 46 и 36...40 мм, а значения усилий натяжения – 390, 260 и 195 кН. Уменьшение необходимого диаметра каната приводит к снижению его погонной стоимости C_k и, как следствие, к снижению стоимости 1 км линии канатного метро C_{1km} даже несмотря на увеличение суммарной длины несущих канатов. Указанное снижение C_{1km} может достигать 7 % или 0,4 млн. руб.

Агрегатная прочность несущих канатов имеет первостепенное влияние на конструктивные и стоимостные показатели шага установки промежуточных опор канатного метро. Представление об этом дает рис. 4, на котором представлены результаты оптимизационных расчетов оптимального шага L_t и высоты H_{tg} опор, диаметра несущих канатов d_k и стоимости 1 км линии метро C_{1km} в зависимости от маркировочной группы G_k каната по ГОСТ 3079-80 при использовании промежуточных опор, аналогичных по стоимости многогранным опорам типа ПГМ 500, стоимости комплекта технологического оборудования $C_e = 1,0$ млн. руб. и числе несущих канатов $n_{kn} = 3$. Обращает внимание тот факт, что с увеличением агрегатной прочности канатов существенное увеличение оптимального шага L_t влечет за собой незначительное увеличение высоты опор H_{tg} : в интервале изменения маркировочной группы $G_k = 1770$ (180)... 3930 (400) кН/мм² (кгс/мм²) шаг опор меняется в интервале $L_t = 520...717$ м (почти на 200 м), тогда как высота – в интервале $H_{tg} = 35,5...36,4$ м (всего лишь на 0,9 м). Этим объясняется наблюдаемое существенное снижение стоимости 1 км линии канатного метро C_{1km} с 4,46 до 2,80 млн. руб., т.е. в 1,6 раза.

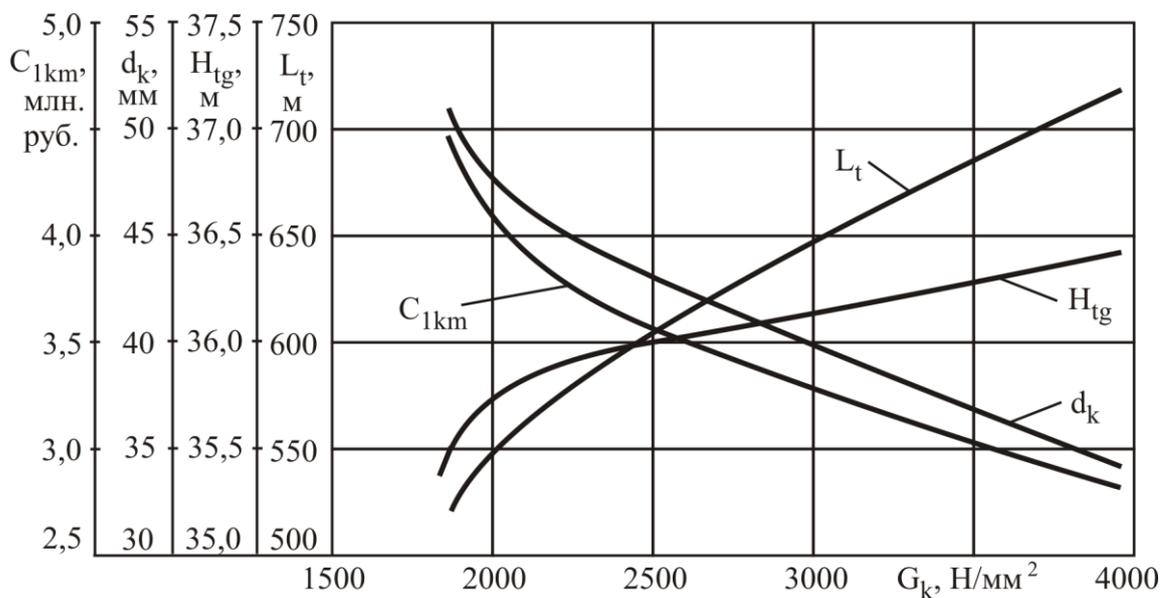


Рис. 4. Влияние маркировочной группы несущих канатов на конструктивные и стоимостные показатели шага установки промежуточных опор

При проектировании линий канатного метро с помощью разработанной оптимизационной математической модели проектировщик может выполнить качественный технико-экономический анализ влияния значительного числа исходных факторов на величину оптимального шага установки промежуточных опорных конструкций и, таким образом, определить наиболее экономичный вариант строительства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Лагерев, А.В. 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. 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.
3. Канатное метро // ИКЦ «Мысль» НГТУ: [сайт]. - Режим доступа: <http://www.ikcmysl.ru/kanatnoe-metro>.
4. Многогранные стальные опоры ЛЭП // ООО НПО «Легион»: [сайт]. – Режим доступа: www.legionural.ru/text_group/show/mnogogrannnye-opory-lep/.
5. 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.
6. ООО «МосКанат»: [сайт]. - Режим доступа: www.mos-kanat.ru/prise_2012.xls.
7. Александров, М.П. Грузоподъемные машины / М.П. Александров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 552 с.
8. Лагерев, А.В. Нагруженность подъемно-транспортной техники / А.В. Лагерев. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2010. – 180 с.
9. Биргер, И.А. Расчет на прочность деталей машин / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Р.М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение, 1966. – 616 с.
10. Лагерев, И.А. Оптимальное проектирование подъемно-транспортных машин / И.А. Лагерев, А.В. Лагерев. – Брянск: БГТУ, 2013. – 228 с.
11. Гилл, Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. – М.: Мир, 1985. – 509 с.

УДК 625.54, 625.57

А.В. Лагереv, И.А. Лагереv

ОПТИМИЗАЦИЯ ШАГА УСТАНОВКИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ОПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВДОЛЬ ЛИНИИ КАНАТНОГО МЕТРО

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. Выполнен анализ влияния конструктивных и стоимостных показателей на величину оптимального шага и стоимость строительства.

Ключевые слова: метро канатное, конструкция промежуточная опорная, шаг установки, оптимизация технико-экономическая, канат несущий, канат тяговый, канат грузоподъемной, прочность агрегатная, стоимость

UDK 625.54, 625.57

A.V. Lagerev, I.A. Lagerev

CABLE TRANSPORT SYSTEM “KANATNOE METRO” TOWERS DISTANCE OPTIMISATION

The task of cable transport system “kanatnoe metro” towers distance nonlinear conditional optimization in case of strong urbanized city environment is under consideration in this article. The analysis of structural and cost factors influence on towers distance and total cost was made during this research.

Keywords: cable transport system, kanatnoe metro, tower, distance, optimization, pulling cable, stay cable, strength, cost.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛАГЕРЕВ Александр Валерьевич – д.т.н., проф., заведующий каф. «Подъемно-транспортные машины и оборудование» БГТУ.

Тел. раб.(4832) 58-82-13

E-mail: avl@tu-bryansk.ru

ЛАГЕРЕВ Игорь Александрович – к.т.н., доц. каф. «Механика и динамика и прочность машин» БГТУ, проректор по инновационной работе БГУ им. И.Г. Петровского.

E-mail: lagerev-bgu@yandex.ru.

Тел. (4832) 64-81-17.