

УДК (UDC) 625.1/5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ НАТЯЖЕНИЯ КАНАТОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
МОБИЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ КАНАТНЫХ КОМПЛЕКСОВDETERMINATION OF TENSION FORCES OF ROPES DURING THE OPERATION
OF MOBILE TRANSPORT AND RELOADING ROPE COMPLEXESЛагерев А.В.¹, Лагерев И.А.¹, Таричко В.И.²
Lagerev A.V.¹, Lagerev I.A.¹, Tarichko V.I.²¹ – Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)² – АО «Брянский автомобильный завод» (Брянск, Россия)¹ – Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)² – Bryansk Automobile Plant JSC (Bryansk, Russian Federation)

Аннотация. При эксплуатации подвесных канатных дорог система несущих и несуще-тяговых канатов, обеспечивающая возможность перемещения пассажиров или транспортируемых грузов между конечными точками трассы, испытывает высокий уровень нагружения со стороны разнообразных эксплуатационных нагрузок и воздействий внешней среды. Эти нагрузки и воздействия формируют переменное по длине трассы канатной дороги натяжение канатной системы, которое оказывает определяющее воздействие на основные технико-экономические показатели мобильных канатных дорог, и тем самым определяет конкретные области их эффективного и нецелесообразного или недопустимого использования. В данной статье представлена инженерная методика построения диаграмм натяжения несуще-тяговых канатов при стационарном и нестационарных режимах работы мобильной канатной дороги. Приведены расчетные зависимости, позволяющие определить усилия натяжения канатов в характерных точках по их длине, а также расчетные зависимости для определения сил сопротивления движению канатов на характерных участках трассы мобильной канатной дороги. Эта методика может быть использована как для расчетной оценки нагруженности канатной системы на основе учета большого числа факторов, характеризующих эксплуатационные нагрузки, параметры рельефа местности и транспортируемого груза, так и для анализа направленности и значимости варьирования указанных факторов и основных конструктивных параметров основного технологического оборудования мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Также представлены результаты анализа влияния варьирования ряда значимых количественных параметров на изменение усилий натяжения несуще-тяговых канатов.

Ключевые слова: мобильная канатная дорога, несуще-тяговой канат, диаграмма натяжения.

Дата принятия к публикации: 03.09.2022
Дата публикации: 25.09.2022

Abstract. During the operation of aerial ropeways, the system of carrying and carrying-traction ropes, which provides the possibility of moving passengers or transported goods between the terminal points of the route, experiences a high level of loading from a variety of operational loads and environmental influences. These loads and influences form the tension of the ropeway system variable along the length of the ropeway route, which has a decisive impact on the main technical and economic indicators of mobile ropeways, and thereby determines specific areas of their effective and inappropriate or unacceptable use. This article presents an engineering technique for constructing tension diagrams of carrying-traction ropes in stationary and non-stationary modes of operation of a mobile ropeway. Calculated dependences are given to determine the tension forces of ropes at characteristic points along their length, as well as calculated dependences for determining the resistance forces to the movement of ropes on characteristic sections of the mobile ropeway route. This technique can be used both for calculating the loading of the rope system based on taking into account a large number of factors characterizing operational loads, terrain parameters and transported cargo, and for analyzing the direction and significance of the variation of these factors and the main design parameters of the main technological equipment of mobile transport and reloading rope complexes. The results of the analysis of the influence of the variation of a number of significant quantitative parameters on the change in the tension forces of the carrying-traction ropes are also presented.

Keywords: mobile ropeway, carrying-traction rope, tension diagram.

Date of acceptance for publication: 03.09.2022
Date of publication: 25.09.2022

Сведения об авторах:

Лагерев Александр Валерьевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе НИИ фундаментальных и прикладных исследований ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», *e-mail: bsu-avl@yandex.ru*.

ORCID: 0000-0003-0380-5456

Лагерев Игорь Александрович – доктор технических наук, доцент, проректор по инновационной работе ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», *e-mail: lagerev-bgu@yandex.ru*.

ORCID: 0000-0002-0921-6831

Таричко Вадим Игоревич – кандидат технических наук, заместитель генерального директора – главный конструктор АО «Брянский автомобильный завод», *e-mail: 32.6909@mail.ru*

Authors' information:

Alexander V. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice director of Research Institute of Fundamental and Applied Research, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University,

e-mail: bsu-avl@yandex.ru.

ORCID: 0000-0003-0380-5456

Igor A. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Vice rector for Innovations, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University,

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

ORCID: 0000-0002-0921-6831

Vadim I. Tarichko – Candidate of Technical Sciences, Deputy general director – General designer, Bryansk Automobile Plant JSC, *e-mail: 32.6909@mail.ru*.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-00798)

Acknowledgements

The study was supported by the grant of Russian science Foundation (project No. 22-29-00798)

1. Введение

Мобильные канатные дороги, формируемые на базе сопряженных единой канатной системой двух мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов на базе самоходных автономных колесных шасси высокой грузоподъемности и проходимости, являются перспективным видом подвесного канатного транспорта для перевозки людей и транспортирования грузов в сложных природных условиях, на необорудованной или труднодоступной местности и в зонах природных или техногенных аварий [1, 2]. Канатный транспорт, как важная составляющая внеуличного транспорта, также перспективен при реализации современной концепции «Умный город» [3]. Это обусловлено тем обстоятельством, что мобильные и стационарные канатные дороги совместно с традиционными наземными видами транспорта способны обеспечить важнейшее свойство умного города - «умную мобильность» [4].

В настоящее время наблюдается недостаток специализированных транспортно-перегрузочных канатных систем для практической реализации задач по использованию канатных технологий с надземным перемещением грузов или пассажиров. Это связано с недостаточной теоретической проработкой

фундаментальных основ и инженерных методов проектирования мобильных канатных дорог, а также с недостаточной конструкторской проработкой перспективных конструкций таких дорог на базе самоходных шасси и необходимого технологического оборудования, включая канатную систему и обслуживающих ее работу механизмов и несущих металлоконструкций. Как следствие, в области подвесных канатных дорог в последние годы проводятся достаточно интенсивные научно-практические исследования, находящие отражение в отечественных и зарубежных публикациях. К настоящему времени предложены эффективные конструкции мобильных канатных транспортно-перегрузочных канатных комплексов на базе автономных самоходных колесных шасси [2], предложены математические модели для исследования рабочих процессов в механизмах таких комплексов [5] и проектные методы оптимальной компоновки основного технологического оборудования на несущей раме колесных шасси [6, 7], а также исследованы вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации мобильных канатных комплексов, связанные с обеспечением устойчивости против опрокидывания в условиях действия значительных горизонтальных эксплуатационных нагрузок [8], прогнозирования кине-

тики количественных показателей надежности [9] и формирования оптимальных стратегий технического обслуживания и ремонта [10]. Указанные разработки позволили сформировать общую концепцию построения и структуру цифровых двойников мобильных канатных дорог на основе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов [11], которые позволят в дальнейшем обеспечить их проектирование на уровне современных требований в рамках концепции Индустрия 4.0 [12].

2. Методика расчета

Расчетные схемы однопролетной мобильной канатной дороги с маятниковым характером перемещения транспортируемых грузов, образованной двумя сопряженными единой канатной системой мобильными транспортно-перегрузочными канатными комплексами на базе автономных самоходных шасси повышенной грузоподъемности и проходимости, показаны на рис. 1. На расчетных схемах обозначены характерные

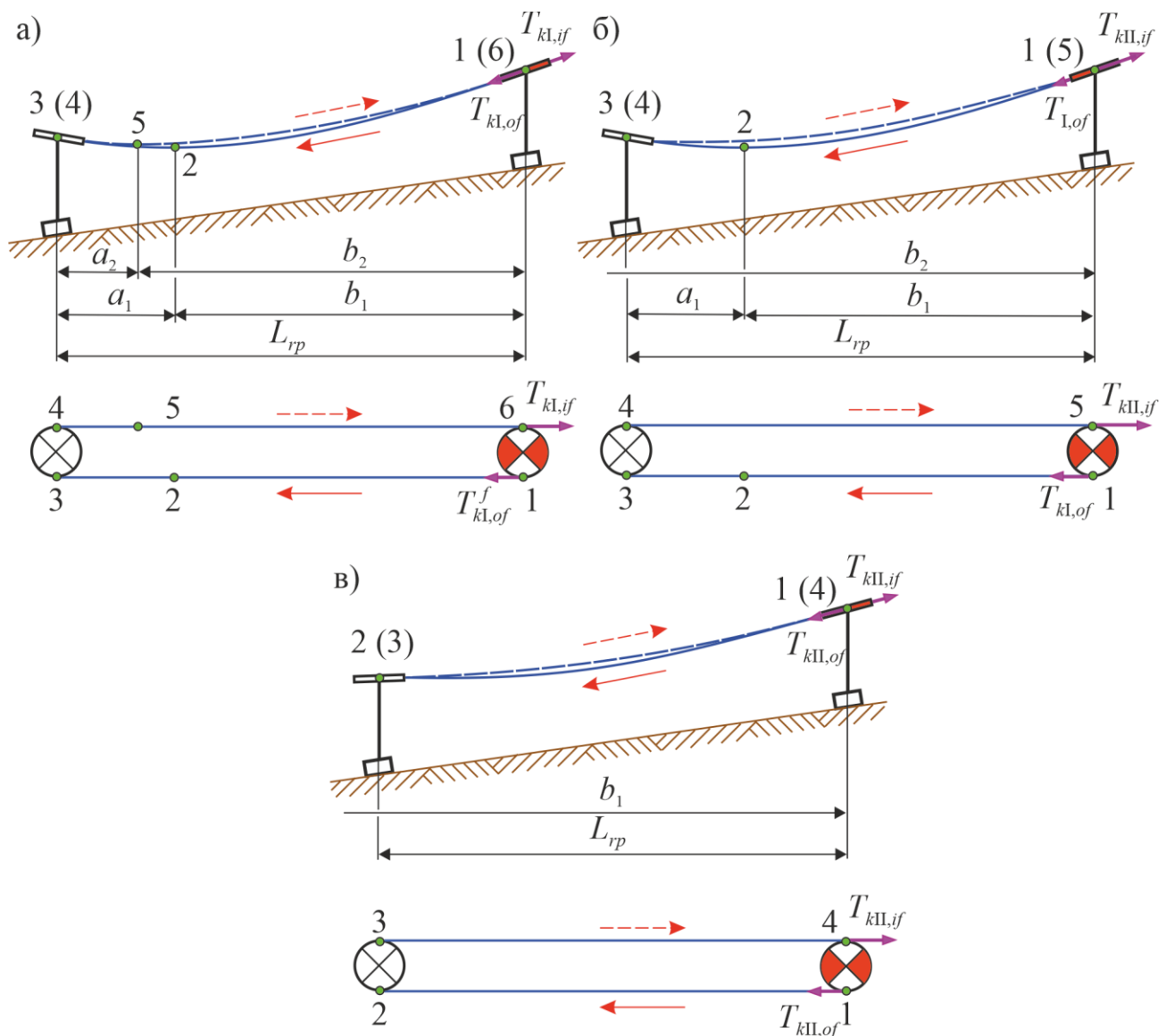


Рис. 1. Расчетные схемы замкнутой трассы мобильной канатной дороги маятникового типа (виды сбоку и сверху): а – I форма провисания обеих ветвей каната; б – I и II формы провисания ветвей каната; в – II форма провисания обеих ветвей каната

участки трассы канатной дороги, в пределах которых определяются силы сопротивления перемещению несуще-тяговых канатов (с грузом и без груза), а также обозначены расчетные точки, в которых определяется натяжение несуще-тяговых канатов.

Указанное число расчетных схем обусловлено тем обстоятельством, что, как показано в [13 - 15], в пролете между конечными точками крепления каната возможна реализация трех форм его провисания (рис. 2) под действием эксплуатационных нагрузок (собственного веса каната, веса транспортируемого груза и грузозахватного приспособления, ветрового давления). Однако для рас-

сматриваемой технической задачи форма III не учитывается, так как она может считаться частным случаем формы II. Таким образом, следует учитывать только две формы провисания канатов - I и II. В зависимости от режима эксплуатации мобильной канатной дороги могут реализовываться три варианта сочетаний форм провисания несуще-тяговых канатов двух ветвей трассы:

- 1) обе ветви имеют провисание по I форме;
- 2) обе ветви имеют провисание по II форме;
- 3) одна из ветвей имеет провисание по I форме, другая – по II форме.

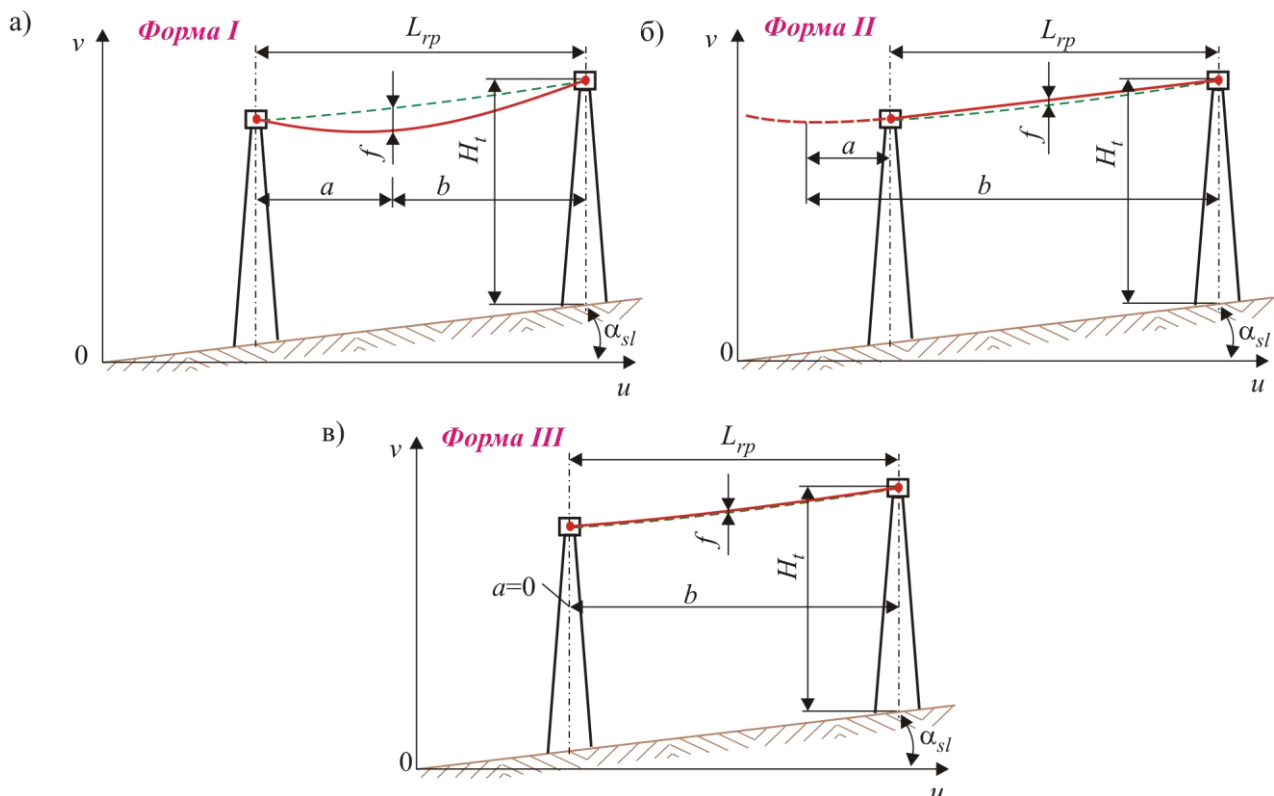


Рис. 2. Формы провисания несуще-тягового каната однопролетной канатной дороги: а – I форма провисания; б – II форма провисания; в – III форма провисания

При маятниковом характере индивидуального перемещения транспортируемого груза, находящегося лишь на одной из ветвей канатной системы, происходит либо его прямое, либо его возвратное движение между приводным и натяжным мобильными транспортно-технологическими комплексами. Однако рассмотрение дополнительных расчетных схем не требуется, так как харак-

терные участки и расчетные точки зеркально отражаются относительно продольной оси мобильной канатной дороги и не требуют получения и использования дополнительных расчетных зависимостей.

Алгоритм построения диаграммы натяжения несуще-тяговых канатов мобильной канатной дороги принципиально сходен с алгоритмом тягового расчета конвейеров с

грузонесущим тяговым органом [16 - 19]. Указанный алгоритм предусматривает расчет усилий натяжения несущих-тяговых канатов T_{kj} в j -й расчетной точке путем обхода трассы мобильной канатной дороги по контуру по направлению движения каната. При этом выполняется суммирование сил сопротивления движению каната W_{i-j} в пределах каждого характерного участка $i-j$ трассы между соседними последовательно расположенными расчетными точками i и j (рис. 1).

Усилия натяжения несущих-тяговых канатов в расчетных точках вдоль трассы мобильной канатной дороги для расчетных схем, приведенных на рис. 1, выражаются следующими соотношениями:

- для расчетной схемы на рис. 1,а (при I форме провисания обеих ветвей несущего-тягового каната)

$$\begin{aligned} T_{kI,1} &= T_{kI,of}; \\ T_{kI,2} &= T_{kI,1} + W_{I,1-2}; \\ T_{kI,3} &= T_{kI,2} + W_{I,2-3} = T_{kI,1} + W_{I,1-2} + W_{I,2-3}; \\ T_{kI,4} &= k_{pr}(T_{kI,3}) = k_{pr}(T_{kI,1} + W_{I,1-2} + W_{I,2-3}); \\ T_{kI,5} &= T_{kI,4} + W_{I,4-5} = \\ &= k_{pr}(T_{kI,1} + W_{I,1-2} + W_{I,2-3}) + W_{I,4-5}; \\ T_{kI,6} &= T_{kI,if} = T_{kI,5} + W_{I,5-6} = \\ &= k_{pr}(T_{kI,1} + W_{I,1-2} + W_{I,2-3}) + W_{I,4-5} + W_{I,5-6}, \end{aligned}$$

- для расчетной схемы на рис. 1,б (при I и II формах провисания ветвей несущего-тягового каната)

$$\begin{aligned} T_{kI,1} &= T_{kI,of}; \\ T_{kI,2} &= T_{kI,1} + W_{I,1-2}; \\ T_{kI,3} &= T_{kI,2} + W_{I,2-3} = T_{kI,1} + W_{I,1-2} + W_{I,2-3}; \\ T_{kI,4} &= k_{pr}(T_{kI,3}) = k_{pr}(T_{kI,1} + W_{I,1-2} + W_{I,2-3}); \\ T_{kII,5} &= k_{pr}(T_{kI,4}) + W_{II,4-5} = \\ &= k_{pr}(T_{kI,1} + W_{I,1-2} + W_{I,2-3}) + W_{II,4-5} = T_{kII,if}, \end{aligned}$$

- для расчетной схемы на рис. 1,в (при II форме провисания обеих ветвей несущего-тягового каната)

$$\begin{aligned} T_{kII,1} &= T_{kII,of}; \\ T_{kII,2} &= T_{kII,1} + W_{II,1-2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{kII,3} &= k_{pr}(T_{kII,2}) = k_{pr}(T_{kII,1} + W_{II,1-2}); \\ T_{kII,4} &= T_{kII,3} + W_{II,3-4} = \\ &= k_{pr}(T_{kII,1} + W_{II,1-2}) + W_{II,3-4} = T_{kII,if}, \end{aligned}$$

где $T_{kI,if}$, $T_{kII,if}$ - усилия в набегающей на приводной канатный шкив ветви каната; $T_{kI,of}$, $T_{kII,of}$ - усилия в сбегающей с приводного канатного шкива ветви каната; k_{pr} - коэффициент сопротивления при огибании канатом канатного шкива.

Для определения усилий натяжения несущих-тяговых канатов в соответствии с приведенными системами уравнений необходимо определение усилий в набегающей $T_{k,if}$ и сбегающей $T_{k,of}$ ветвях каната на приводном канатном шкиве. Согласно уравнению Эйлера эти усилия связаны между собой следующим соотношением:

$$T_{k,if} / T_{k,of} = \exp(\mu_f \alpha_p).$$

Поэтому расчет неизвестных значений $T_{k,if}$ и $T_{k,of}$ выполняется решением систем алгебраических уравнений вида:

- для расчетной схемы на рис. 1,а (при I форме провисания обеих ветвей несущего-тягового каната)

$$\begin{cases} T_{kI,if} = \exp(\mu_f \alpha_p) T_{kI,of} \\ T_{kI,if} = k_{pr}(T_{kI,of} + W_{I,1-2} + W_{I,2-3}) + W_{I,4-5} + W_{I,5-6} \end{cases};$$

- для расчетной схемы на рис. 1,б (при I и II формах провисания ветвей несущего-тягового каната)

$$\begin{cases} T_{II,if} = \exp(\mu_f \alpha_p) T_{kI,of} \\ T_{kII,if} = k_{pr}(T_{kI,of} + W_{I,1-2} + W_{I,2-3}) + W_{kII,4-5} \end{cases};$$

- для расчетной схемы на рис. 1,в (при II форме провисания обеих ветвей несущего-тягового каната)

$$\begin{cases} T_{kII,if} = \exp(\mu_f \alpha_p) T_{kII,of} \\ T_{kII,if} = k_{pr}(T_{kII,of} + W_{II,1-2}) + W_{II,3-4} \end{cases}.$$

Таким образом, получаем:

- для расчетной схемы на рис. 1,а (при I форме провисания обеих ветвей несущего-тягового каната)

$$T_{kI,of} = \frac{k_{pr}(W_{I,1-2} + W_{I,2-3}) + W_{I,4-5} + W_{I,5-6}}{\exp(\mu_f \alpha_p) - k_{pr}};$$

$$T_{kI,if} = \frac{\exp(\mu_f \alpha_p)}{\exp(\mu_f \alpha_p) - k_{pr}} \times$$

$$\times [k_{pr}(W_{I,1-2} + W_{I,2-3}) + W_{I,4-5} + W_{I,5-6}],$$

- для расчетной схемы на рис. 1,б (при I и II формах провисания ветвей несущего каната)

$$T_{kI,of} = \frac{k_{pr}(W_{I,1-2} + W_{I,2-3}) + W_{II,4-5}}{\exp(\mu_f \alpha_p) - k_{pr}};$$

$$T_{II,if} = \frac{\exp(\mu_f \alpha_p)}{\exp(\mu_f \alpha_p) - k_{pr}} \times$$

$$\times [k_{pr}(W_{I,1-2} + W_{I,2-3}) + W_{II,4-5}],$$

- для расчетной схемы на рис. 1,в (при II форме провисания обеих ветвей несущего каната)

$$T_{kII,of} = \frac{k_{pr}W_{II,1-2} + W_{II,3-4}}{\exp(\mu_f \alpha_p) - k_{pr}};$$

$$T_{kII,if} = \frac{\exp(\mu_f \alpha_p)}{\exp(\mu_f \alpha_p) - k_{pr}} (k_{pr}W_{II,1-2} + W_{II,3-4}).$$

Силы сопротивления движению несущего каната в пределах каждого характерного участка трассы W_{i-j} между последовательно расположенными расчетными точками i и j определяются суммированием отдельных составляющих силы сопротивления. Для определения перечня и количественных значений указанных составляющих применительно к специфике работы мобильной канатной дороги можно воспользоваться соответствующими наработками, известными для стационарных подвесных канатных дорог и кабельных кранов [16], а также конвейеров с грузонесущей лентой различных модификаций [17, 18, 20].

По физической природе силы сопротивления можно классифицировать как:

- массовые силы, обусловленные собственной массой подвижных элементов канатной системы мобильной канатной дороги;

- фрикционные силы, обусловленные трением в подшипниковых опорах вращающихся элементов канатной системы мобильной канатной дороги;

- упругие силы, обусловленные деформированием гибких канатов при прохожде-

нии отклоняющих шкивов, барабанов и роликов;

- ветровые силы, обусловленные ветровым воздействием на транспортируемый груз и грузозахватное устройство;

- инерционные силы, обусловленные ускоренным (замедленным) линейным перемещением или вращением подвижных элементов канатной системы мобильной канатной дороги.

Так как ряд указанных составляющих силы сопротивления имеют инерциальную природу, то для каждой расчетной схемы на рис. 1 целесообразно определение усилий натяжения несущего каната для каждого из характерных режимов работы канатной системы мобильной канатной дороги. Таковыми режимами являются:

- режим стационарного движения транспортируемого груза (стадия установившегося движения каната с постоянной скоростью и линейном ускорении $a_k = 0$);

- режим ускоренного движения транспортируемого груза (начальная стадия ускоренного движения каната с постоянным линейным ускорением $a_k > 0$);

- режим замедленного движения транспортируемого груза (конечная стадия замедленного движения каната с постоянным линейным ускорением $a_k < 0$ при подходе к точке останова).

В пределах участков, образующих ветви несущего каната (т.е. участков 1-2, 2-3, 4-5 и 5-6 расчетной схемы на рис. 1,а; участков 1-2, 2-3 и 4-5 расчетной схемы на рис. 1,б; участков 1-2 и 3-4 расчетной схемы на рис. 1,в) составляющие силы сопротивления включают:

- распределенную массовую силу сопротивления от веса канатов вдоль трассы мобильной канатной дороги $w_{r,k}$, которая исходя из наклонного расположения расчетных участков может рассматриваться как сумма двух составляющих вдоль горизонтальной $w_{rg,k}$ и вдоль вертикальной $w_{rv,k}$ проекций расчетного участка трассы:

$$w_{r,k} = w_{rg,k} \pm w_{rv,k} = \xi_k q_k l_s \pm \xi_k q_k \Delta h_s;$$

- распределенную массовую силу сопротивления от веса транспортируемого груза G и грузозахватного устройства G_{hd} , определяемую по аналогии с силой сопротивления $w_{r,k}$ при условии равномерного распределения сосредоточенных весов G и G_{hd} вдоль всей длины несущего-тягового каната в пролете мобильной канатной дороги:

$$w_{r,G} = w_{rg,G} \pm w_{rv,G} = \frac{G_c + G_{hd}}{L_{rp}} \left(l_s \pm \frac{\Delta h_s}{\xi_k} \right);$$

- ветровую силу сопротивления при перемещении транспортируемого груза и грузозахватного устройства, обусловленную действием ветрового давления и учитывающую как его статическую составляющую (средний уровень ветрового воздействия на поверхность конструкции), так и динамическую составляющую (случайные пульсации ветрового воздействия из-за пульсаций скорости ветра) согласно ГОСТ 1451-77 [21] и СНиП 2.01.07-85 [22]:

$$w_{r,w} = \pm w_0 C_A k_w (1 + \beta_w) A_G;$$

- инерционную силу сопротивления от веса несущего-тяговых канатов, обусловленную ускоренным движением канатов во время нестационарных режимов работы мобильной канатной дороги:

$$w_{r,k}^{in} = \frac{a_k \xi_k q_k l_s}{g} = \frac{\varepsilon_p D_p \xi_k q_k l_s}{2g}$$

$$\text{при } l_s \leq [l_s] = \frac{d_k \tau_{nst}}{2000} \sqrt{\frac{k_E E_n g}{\pi q_k}},$$

$$w_{r,k}^{in} = \frac{a_k \xi_k q_k [l_s]}{g} = \frac{\varepsilon_p D_p \xi_k q_k [l_s]}{2g} \text{ при } l_s > [l_s];$$

- инерционную силу сопротивления от веса транспортируемого груза и грузозахватного устройства, обусловленную ускоренным движением канатов во время нестационарных режимов работы мобильной канатной дороги:

для режима ускоренного движения транспортируемого груза

$$w_{r,G}^{in} = \frac{a_k (G_c + G_{hd})}{g} = \frac{\varepsilon_p D_p (G_c + G_{hd})}{2g};$$

для режима замедленного движения транспортируемого груза

$$w_{r,G}^{in} = \frac{a_k (G_c + G_{hd})}{g} = \frac{\varepsilon_p D_p (G_c + G_{hd})}{2g}, \text{ если } \Delta l_G \leq [l_s];$$

$$w_{r,G}^{in} = 0, \text{ если } \Delta l_G > [l_s],$$

где q_k - погонный вес каната, Н; ξ_k - коэффициент увеличения длины каната вследствие его провисания; l_s - длина горизонтальной проекции расчетного участка, м; Δh_s - перепад высот в пределах расчетного участка трассы, м; L_{rp} - длина трассы мобильной канатной дороги, м; w_0 - нормативное значение ветрового давления в зависимости от номера того ветрового района (от I до VII) [21, 22], в котором предполагается преимущественное использование мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса, Па; C_A - аэродинамический коэффициент транспортируемого груза и грузозахватного устройства (для контейнерной транспортировки грузов в зависимости от соотношения ширины и длины контейнера в направлении перемещения максимальные значения составляют $C_A = 1,6 \dots 2,1$); k_w - коэффициент возрастания ветрового давления по высоте; β_w - динамический коэффициент учета пульсации ветрового воздействия ($\beta_w = 1,2 \dots 1,3$ [23]); A_G - расчетная площадь транспортируемого груза и грузозахватного устройства, м²; g - ускорение свободного падения, м/с²; k_E - эмпирический коэффициент (для стальных канатов двойной свивки $k_E = 0,65 \dots 0,85$; тройной свивки $k_E \sim 0,21$ [16, 24]); ε_p - угловое ускорение вращения приводного канатного шкива, рад/с²; D_p - диаметр канатного шкива, м; d_k - диаметр каната, м; τ_{nst} - длительность нестационарного режима, с; E_n - модуль упругости канатной проволоки, Па; Δl_G - расстояние от транспортируемого груза до приводного шкива в момент начала торможения, м.

На указанных участках полное значение силы сопротивления движению несущего-тягового каната $W_{I(II),i-j}$ определяется сум-

мированием перечисленных выше составляющих с учетом направленности их вклада:

- при движении транспортируемого груза по нисходящему участку каната распределенные массовые силы сопротивления от веса канатов вдоль трассы мобильной канатной дороги, транспортируемого груза и грузозахватного устройства $w_{r,k} < 0$ и $w_{r,G} < 0$, при движении по восходящему участку $w_{r,k} > 0$ и $w_{r,G} > 0$;

- при совпадении направления скорости ветра с направлением движения транспортируемого груза (при попутном ветре) ветровая сила сопротивления при перемещении транспортируемого груза и грузозахватного устройства $w_{r,w} < 0$, при встречном ветре $w_{r,w} > 0$.

Таким образом, сила сопротивления $W_{I(II),i-j}$ определяется следующими зависимостями:

- для режима стационарного движения транспортируемого груза

$$W_{I(II),i-j}^{st} = w_{r,g,k} \pm w_{r,v,k} + w_{r,G} \pm w_{r,v,G} \pm w_{r,w};$$

- для режимов нестационарного (ускоренного или замедленного) движения транспортируемого груза

$$W_{I(II),i-j}^{nst} = W_{I(II),i-j}^{st} + w_{r,k}^{in} + w_{r,G}^{in}.$$

Усилия натяжения несущего каната в конечных точках указанных расчетных участков определяются последовательно с помощью зависимостей

$$T_{k,j}^{st} = T_{k,i}^{st} + W_{I(II),i-j}^{st};$$

$$T_{k,j}^{nst} = T_{k,i}^{nst} + W_{I(II),i-j}^{nst}.$$

В пределах участков, контактирующих с поверхностью канатных шкивов (т.е. участков 3-4 и 6-1 расчетной схемы на рис. 1,а; участков 3-4 и 5-1 расчетной схемы на рис. 1,б; участков 2-3 и 4-1 расчетной схемы на рис. 1,в) составляющие силы сопротивления включают:

- фрикционную силу сопротивления вследствие трения в подшипниковых опорах натяжного канатного шкива:

$$w_{r,e} = \frac{f_{t,e} d_{v,e} (T_{ke,if} + T_{ke,of})}{D_p + d_k} \sin\left(\frac{\alpha_e}{2}\right);$$

- фрикционную силу сопротивления вследствие трения в подшипниковых опорах приводного шкива, определяемая по аналогии с фрикционной силой сопротивления $w_{r,e}$:

$$w_{r,p} = \frac{f_{t,p} d_{v,p} (T_{k,if} + T_{k,of})}{D_p + d_k} \sin\left(\frac{\alpha_p}{2}\right);$$

- упругую силу сопротивления деформируемого каната на натяжном или приводном канатном шкиве, обусловленную затратами энергии на упругий изгиб отдельных проволок каната и гистерезисными потерями каната в целом и определяемую согласно [17]:

$$w_{r,b} = 0,01 \frac{10^4 d_k^2 + 0,3}{10(D_p + d_k) - 1} T_{ke,if};$$

- инерционную силу сопротивления от приводного и натяжного шкивов канатной системы, определяемую их конструктивным исполнением:

$$w_{r,p}^{in} = J_p a_k / D_p^2 = J_p \varepsilon_p / 2D_p;$$

- инерционную силу сопротивления от поворотных стоек (валов или осей) приводного и натяжного канатных шкивов:

$$w_{r,c}^{in} = J_c a_k / D_p^2 = J_c \varepsilon_p / 2D_p,$$

где $f_{t,e}$ - коэффициент трения в цапфе вала натяжного шкива; $d_{v,e}$ - диаметр цапфы вала натяжного шкива, м; $T_{ke,if}$, $T_{ke,of}$ - силы натяжения набегающей и сбегающей ветвей каната на натяжной шкив, Н; α_e - угол перегиба каната на натяжном шкиве; $f_{t,p}$ - коэффициент трения в цапфе вала приводного шкива; $d_{v,p}$ - диаметр цапфы вала приводного шкива, м; α_p - угол обхвата канатом приводного шкива, рад; J_p - момент инерции канатного шкива, кг·м²; J_c - момент инерции стойки, кг·м².

На указанных участках полное значение силы сопротивления движению несущего каната $W_{I(II),i-j}$ определяется суммированием перечисленных выше составляющих:

- для режима стационарного движения транспортируемого груза

$$W_{I(II),i-j}^{st} = w_{r,e} + w_{r,p} + w_{r,b};$$

- для режимов нестационарного (ускоренного или замедленного) движения транспортируемого груза

$$W_{I(II),i-j}^{nst} = W_{I(II),i-j}^{st} + w_{r,p}^{in} + w_{r,c}^{in}.$$

Усилия натяжения несущего каната в конечных точках указанных расчетных участков определяются с помощью зависимостей

$$T_{k,j}^{st} = k_p^{st} T_{ke,if}^{st} = \left(1 + \frac{W_{I(II),i-j}^{st}}{T_{ke,if}^{st}} \right) T_{ke,if}^{st};$$

$$T_{k,j}^{nst} = k_p^{nst} T_{ke,if}^{nst} = \left(1 + \frac{W_{I(II),i-j}^{nst}}{T_{ke,if}^{nst}} \right) T_{ke,if}^{nst}.$$

3. Обсуждение результатов

Анализ расчетных зависимостей, представленных в разделе 2, показывает, что на величину усилий натяжения несущего каната в характерных точках трассы мобильной канатной дороги в наибольшей степени оказывают влияние следующие параметры:

- величина пролета L_{rp} и угол наклона к горизонтальной плоскости прямой, проходящей через центры канатных шкивов сопряженных мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов α_{sl} ;

- вес G_c и вертикальный габарит h_G транспортируемого груза, минимальный вертикальный габарит приближения транспортируемого груза к посторонним предметам h_{min} ;

- длина концевой опоры l_t ;

- параметры ветровой нагрузки (нормативное значение ветрового давления w_0 , расчетная площадь транспортируемого груза A_G , направление ветра относительно направлению перемещения груза).

Влияние вертикального габарита h_G транспортируемого груза наряду с нормативно заданным минимальным вертикальным габаритом приближения транспортируемого груза к посторонним предметам h_{min} и длиной концевой опоры обусловлено их влиянием на минимально допустимую

величину усилия натяжения несущего каната в сбегающей с приводного канатного шкива ветви $T_{kl,of}$ или $T_{kII,of}$, так как минимально возможные значения указанных усилий $T_{kl,of}^{min}$ или $T_{kII,of}^{min}$ находятся из условия:

$$\min(H_G) = h_{min}, \quad 0 \leq u \leq 2L_{rp}$$

где левая часть данного условия – операция нахождения минимального вертикального расстояния между самой нижней точкой транспортируемого груза и посторонними предметами на земной поверхности H_G в пределах всей трассы мобильной канатной дороги.

Очевидно, что чем выше концевая опора l_t и меньше вертикальный габарит груза h_G , тем при допустимом нормативном значении h_{min} можно допустить большее провисание несущего каната в пролете и выполнить наименьшее натяжение канатной системы. В качестве усилия натяжения несущего каната в сбегающей с приводного канатного шкива ветви $T_{kl,of}$ или $T_{kII,of}$, естественно, можно использовать большие значения, чем $T_{kl,of}^{min}$ или $T_{kII,of}^{min}$, однако это приводит к повышению уровня напряженно-деформированного состояния несущих металлоконструкциях напряжений мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов вследствие необходимости повышения усилий натяжений канатной системы мобильной канатной дороги.

При маятниковом характере перемещения одинаковых по своим количественным параметрам транспортируемых грузов диаграмма натяжения несущего каната будет иметь количественные различия в зависимости от направления перемещения груза – либо от приводного мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса к натяжному, либо в противоположном направлении. Этот факт иллюстрирует рис. 3, на котором приведены диаграммы натяжения несущего каната для мобильной канатной дороги с длиной пролета и концевой опоры $L_{rp} = 100$ м и $l_t = 10$ м соответственно, весом и вертикальным габаритом

транспортируемого груза $G_c = 10$ кН и $h_G = 2$ м соответственно при вертикальном габарите приближения $h_{\min} = 1,5$ м (ветровая нагрузка не учитывалась).

Видно, что при перемещении транспортируемого груза в направлении от приводного мобильного комплекса к натяжному имеет место наибольшая нагрузка на несущетяговый канат. Также этот вариант оказывается наиболее энергозатратным, вследствие чего при постоянной мощности механизма перемещения каната скорость транспортирования груза и пропускная способность мобильной канатной дороги оказываются наи-

меньшими, а время транспортирования – наибольшим. Таким образом, оценку уровня натяжения несущетягового каната и связанной с ней оценку грузо-высотных характеристик мобильных канатных дорог на базе сопряженных мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов целесообразно проводить на основе учета следующего направления перемещения транспортируемого груза – от приводного мобильного комплекса к натяжному мобильному комплексу.

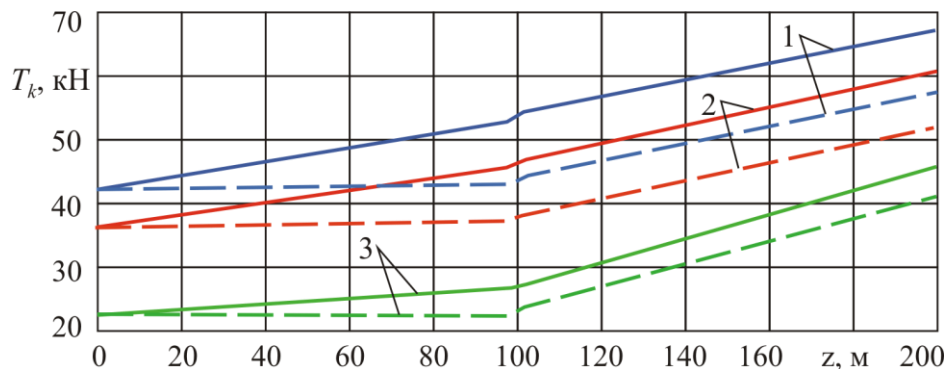


Рис. 3. Диаграмма натяжения несущетягового каната для различных углов наклона трассы: 1 - $\alpha_{sl} = 5^\circ$; 2 - $\alpha_{sl} = 10^\circ$; 3 - $\alpha_{sl} = 30^\circ$ (— - груз перемещается по направлению к натяжному мобильному комплексу; - - - - - груз перемещается по направлению к приводному мобильному комплексу)

Представленный на рис. 3 вариант мобильной канатной дороги принят в качестве «эталонного» варианта. Сравнение диаграмм натяжения несущетягового каната на этом рисунке с диаграммами натяжения несущетягового каната на рис. 4 - 9 позволяет оценить направленность и значимость влияния перечисленных выше значимых количественных параметров мобильной канатной дороги.

На рис. 4 приведены диаграммы натяжения несущетягового каната для мобильной канатной дороги с длиной трассы $L_{rp} = 200$ м. Увеличение длины канатной дороги приводит к прямо пропорциональному увеличению необходимого натяжения несущетягового каната. Однако такой рост усилия натяжения T_k неодинаков для разных значений угла наклона α_{sl} : наибольшее увеличе-

ние характерно для малых значений α_{sl} , с увеличением этого угла рост необходимого натяжения несущетягового каната при увеличении пролета канатной дороги резко снижается. Так, увеличение длины трассы с 100 до 200 м при $\alpha_{sl} = 5^\circ$ приводит к повышению необходимого натяжения каната в 2,5...2,8 раза, тогда как при $\alpha_{sl} = 10^\circ$ повышение составляет 1,8...2,1 раза, при $\alpha_{sl} = 30^\circ$ – 1,7...2,0 раза.

На рис. 5 приведены диаграммы натяжения несущетягового каната для мобильной канатной дороги с длиной концевой опоры $l_t = 16$ м. Увеличение длины l_t положительно сказывается на необходимом натяжении несущетягового каната, приводя к его снижению. Это объясняется возможностью допус-

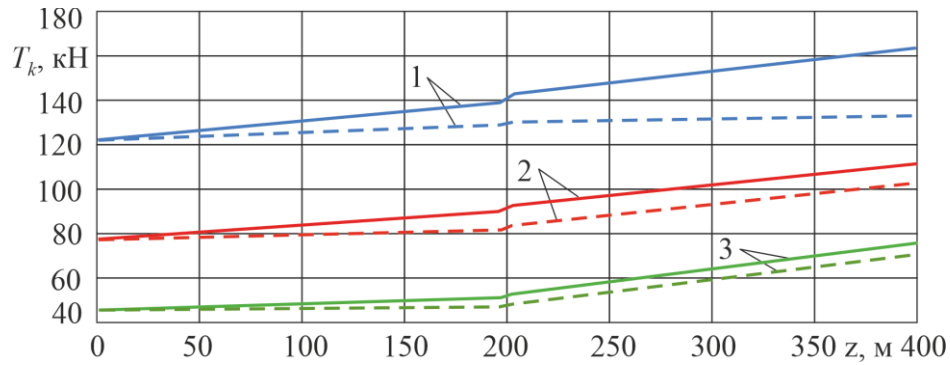


Рис. 4. Диаграмма натяжения несуще-тягового каната при длине трассы мобильной канатной дороги $L_{пр} = 200$ м (обозначения графиков соответствуют рис. 3)

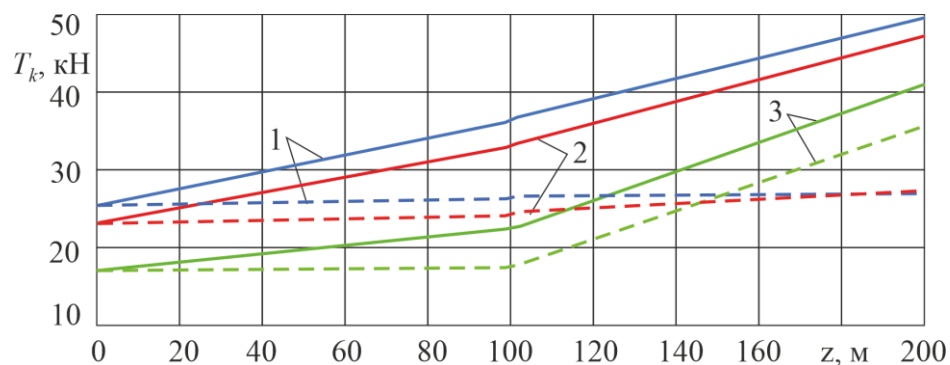


Рис. 5. Диаграмма натяжения несуще-тягового каната для мобильной канатной дороги с длиной концевой опоры $l_t = 16$ м (обозначения графиков соответствуют рис. 3)

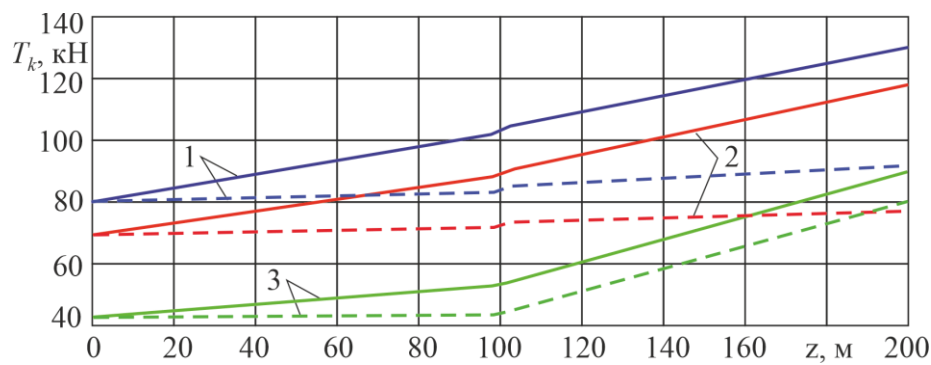


Рис. 6. Диаграмма натяжения несуще-тягового каната при транспортировании груза весом $G_c = 20$ кН (обозначения графиков соответствуют рис. 3)

тить большее провисание каната в пролете между концевыми опорами мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов.

На рис. 6 приведены диаграммы натяжения несуще-тягового каната для мобильной канатной дороги, предназначенной для транспортирования груза весом $G_c = 20$ кН. Увеличение веса транспортируемого груза приводит практически к прямо пропорциональному увеличению необходимого натя-

жения несуще-тягового каната, причем указанное увеличение не зависит от угла наклона α_{sl} . Так, увеличение веса транспортируемого груза в 2 раза (с 10 до 20 кН) при углах $\alpha_{sl} = 5^\circ, 10^\circ$ и 30° приводит к одинаковому повышению необходимого натяжения каната в $\sim 1,9$ раза.

На рис. 7 приведены диаграммы натяжения несуще-тягового каната для мобильной канатной дороги, предназначенной для транспортирования груза с вертикальным

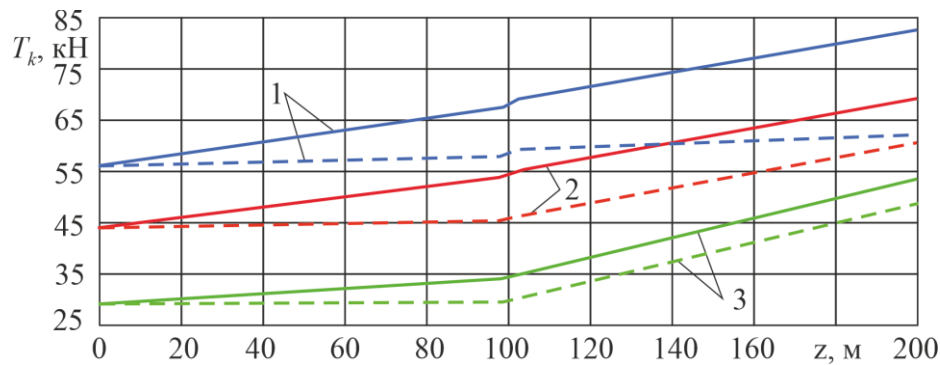


Рис. 7. Диаграмма натяжения несуще-тягового каната при транспортировании груза с вертикальным габаритом $h_G = 4$ м (обозначения графиков соответствуют рис. 3)

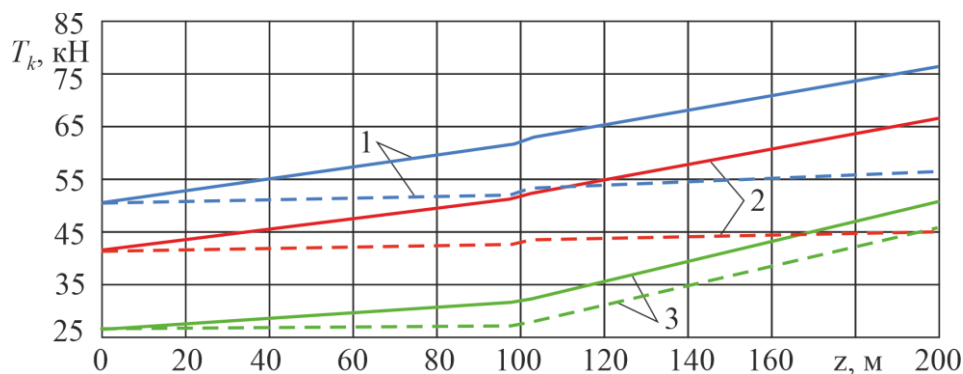


Рис. 8. Диаграмма натяжения несуще-тягового каната при транспортировании груза при вертикальном габарите приближения $h_{\min} = 2,5$ м (обозначения графиков соответствуют рис. 3)

габаритом $h_G = 4$ м. Увеличение габарита транспортируемого груза приводит к пропорциональному увеличению необходимого натяжения несуще-тягового каната вследствие необходимости обеспечить его меньшее провисание в пролете мобильной канатной дороги. Указанное увеличение зависит от угла наклона α_{sl} незначительно: увеличение вертикального габарита транспортируемого груза с 2 до 4 м при $\alpha_{sl} = 5^\circ$ приводит к повышению необходимого натяжения каната в 1,3...1,2 раза, тогда как при $\alpha_{sl} = 10^\circ$ и 30° повышение составляет $\sim 1,2 \dots 1,1$ раза.

На рис. 8 приведены диаграммы натяжения несуще-тягового каната для мобильной канатной дороги, предназначенной для транспортирования груза при вертикальном габарите приближения $h_{\min} = 2,5$ м. Увеличение вертикального габарита приближения приводит к пропорциональному увеличению необходимого натяжения несуще-тягового каната, причем указанное увеличение не зависит от угла наклона α_{sl} . Так, увеличение

величины h_{\min} с 1,5 до 2,5 м при углах $\alpha_{sl} = 5^\circ, 10^\circ$ и 30° приводит к одинаковому повышению необходимого натяжения каната в $\sim 1,1 \dots 1,2$ раза.

На рис. 9 приведены диаграммы натяжения несуще-тягового каната при воздействии на транспортируемый груз расчетной площади $A_G = 3,2$ м² ветрового давления $w_0 = 1000$ Па (соответствует нормативному значению ветрового давления VII ветрового района, т.е. горным районам Кавказа, Сибири, Средней Азии, северного и северо-восточного побережья России [9, 10]). В целом, ветровое воздействие, рассматриваемое выше в стационарной постановке, не оказывает существенного влияния на уровень требуемого натяжения канатной системы мобильной канатной дороги (хотя ветровое воздействие вследствие стохастического характера пульсации скорости и давления ветра оказывают существенное воздействие на дополнительные динамические усилия в несуще-тяговом канате [25 - 27]). Как видно из анализа рис. 9,б, при небольших углах на-

клона α_{sl} во время движения транспортируемого груза от натяжного мобильного комплекса к приводному в условиях попутного ветра наблюдается значительное снижение усилия натяжения несущего-тягового каната в набегающей на приводной шкив ветви, вследствие чего оказывается, что $T_{H(II),if} < T_{H(II),of}$. Для рассматриваемого ва-

рианта исполнения мобильной канатной дороги это наблюдается при углах $\alpha_{sl} = 5^\circ$ и 10° , а при угле $\alpha_{sl} = 30^\circ$ данное явление уже не наблюдается. Переход, т.е. $T_{H(II),if} \approx T_{H(II),of}$, наблюдается при $\alpha_{sl} \sim 13^\circ$.

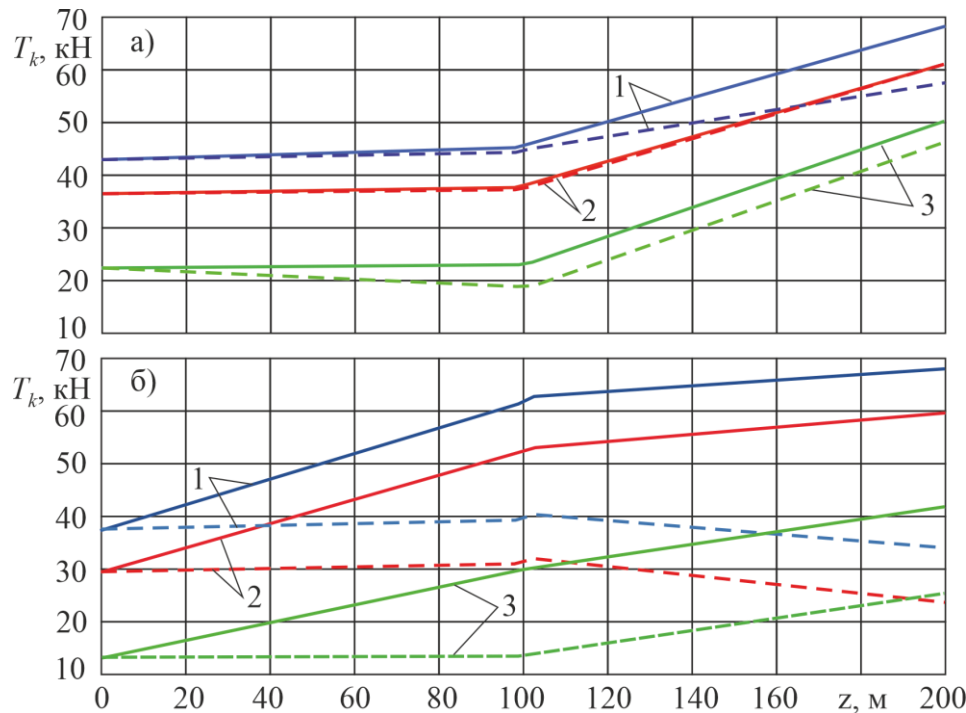


Рис. 9. Диаграммы натяжения несущего-тягового каната при ветровом воздействии:
 а - направление ветра от приводного мобильного комплекса к натяжному;
 б - направление ветра от натяжного мобильного комплекса к приводному
 (обозначения графиков соответствуют рис. 3)

4. Заключение

Для мобильных канатных дорог, формируемых на базе сопряженных единой канатной системой двух мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов на базе самоходных автономных колесных шасси высокой грузоподъемности и проходимости, расчет усилий натяжения несущего-тяговых канатов является важным этапом их проектирования. Представленная в данной статье методика, ориентированная на построение диаграмм натяжения несущего-тяговых канатов при стационарном и нестационарных режимах работы мобильной канатной дороги, может быть использована как для расчетной оценки нагруженности канатной систе-

мы на основе учета большого числа факторов, характеризующих эксплуатационные нагрузки, параметры рельефа местности и транспортируемого груза, так и для анализа направленности и значимости варьирования указанных факторов и основных конструктивных параметров основного технологического оборудования мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов.

Было показано, что в наибольшей степени на натяжение несущего-тяговых канатов в характерных точках трассы мобильной канатной дороги оказывают влияние ряд параметров, которые характеризуют трассу мобильной канатной дороги (величина пролета, минимальный вертикальный габарит приближения транспортируемого груза к посто-

ронным предметам, длина концевой опоры), профиль поверхности в месте установки мобильной канатной дороги (угол наклона к горизонтальной плоскости прямой, проходящей через центры канатных шкивов сопряженных мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов), транспортируемый груз (вес, вертикальный и горизонтальный габарит, расчетная площадь), ветровое воздействие на канатную систему и транспортируемый груз (нормативное значение ветрового давления, направление ветра относительно направлению перемещения груза). Изменение указанных количественных параметров по-разному влияет на изменение усилий натяжения в несущие-тяговых канатах. Увеличение длины концевой опоры и угол наклона прямой, проходящей через центры канатных шкивов сопряженных мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов позволяет использовать меньшее натяжение канатной системы, так

как увеличение указанных параметров допускает большее естественное провисание несущие-тяговых канатов в пролете мобильной канатной дороги. Увеличение остальных вышеперечисленных параметров требует использовать большее натяжение канатной системы, чтобы таким образом уменьшить естественное провисание канатов.

В дальнейшем, разработанная методика расчета усилий натяжения несущие-тяговых канатов может быть применена для анализа технических возможностей и основных технических характеристик мобильных канатных дорог, сформированных на базе двух сопряженных мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов, и для выявления той области множества возможных значений грузо-высотных характеристик транспортных систем, в пределах которой целесообразно использовать мобильные канатные дороги рассматриваемой конструкции.

Список литературы

1. Короткий А.А. Канатный транспорт (канатные дороги и лифты). Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. 114 с.
2. Лагереv А.В., Лагереv И.А., Таричко В.И. Конструкции и основы проектирования мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Брянск: РИСО БГУ, 2020. 207 с.
3. PAS 183:2017 Smart cities – Guide to establishing a decision-making framework for sharing data and information services. BSI 2017.
4. Panfilov A.V., Korotkiy A.A., Panfilova E.A., Lagerev I.A. Development of transport infrastructure of urban mobility based on cable metro technology // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 786, pp. 012067. DOI: 10.1088/1757-899X/786/1/012067
5. Лагереv А.В., Лагереv И.А., Таричко В.И. Моделирование рабочих процессов мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Брянск: РИСО БГУ, 2021. 204 с. DOI: 10.5281/zenodo.6044972.
6. Лагереv А.В., Таричко В.И., Лагереv

References

1. Korotkiy A.A. *Kanatnyy transport (kanatnye dorogi i lifty)* [Cable transport (cable cars and elevators)]. Rostov-na-Donu, DGTU, 2018. 114 p. (In Russian)
2. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Konstruksii i osnovy proektirovaniya mobilnykh transportno-peregruzochnykh kanatnykh kompleksov* [Structures and design fundamentals of mobile transporting and overloading rope facilities]. Bryansk, RISO BGU, 2020. 207 p. (In Russian)
3. PAS 183:2017 Smart cities – Guide to establishing a decision-making framework for sharing data and information services. BSI 2017.
4. Panfilov A.V., Korotkiy A.A., Panfilova E.A., Lagerev I.A. Development of transport infrastructure of urban mobility based on cable metro technology. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 786, p. 012067. DOI: 10.1088/1757-899X/786/1/012067
5. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Modelirovanie rabochikh protsessov mobilnykh transportno-peregruzochnykh*

натов. <http://repo.uipa.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/890/3/Smolyakov%20S.L.pdf>. (дата обращения: 05.06.2022).

25. Petrova R.V., Hoffmann K., Liehl R. Modelling and simulation of bicable ropeways under cross-wind influence // *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems: Methods, Tools and Applications in Engineering and Related Sciences*. 2007. №1. P. 63-81. DOI: 10.1080/13873950600562907

26. Guštinčič J., Raffi L.M.G. Analysis of oscillations in a cableway: wind load effects // *Modeling in Science Education and Learning*. 2013. №6. P. 145-155.

27. Лагереv И.А., Лагереv А.В., Панфилов А.В., Марченко Э.В. Моделирование динамики пассажирской кабины транспортной системы «Канатное метро» // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2018. Т. 18. № 1. С. 16-21. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-1-16-21

standartov, 2003. 16 p. (In Russian)

22. SP 20.13330.2011. *Nagruzki i vozdeystviya* [Loads and effects]. Moscow, OAO “NITs ”Stroitelstvo”, 2011. 85 p. (In Russian)

23. Lagerev A.V. *Nagruzhenost podemno-transportnoy tekhniki* [Load lifting and transport equipment]. Bryansk, BGTU, 2010. 180 p. DOI: 10.5281/zenodo.1306614 (In Russian)

24. Smolyakov S.L. *Uprugie svoystva kanatov* (Elastic properties of ropes) [site]. Available at: <http://repo.uipa.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/890/3/Smolyakov%20S.L.pdf> (accessed 05 June 2022). (In Russian)

25. Petrova R.V., Hoffmann K., Liehl R. Modelling and simulation of bicable ropeways under cross-wind influence. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems: Methods, Tools and Applications in Engineering and Related Sciences*, 2007, No.1, pp. 63-81. DOI: 10.1080/13873950600562907

26. Guštinčič J., Raffi L.M.G. Analysis of oscillations in a cableway: wind load effects. *Modeling in Science Education and Learning*, 2013, No.6, pp. 145-155.

27. Lagerev I.A., Lagerev A.V., Panfilov A.V., Marchenko E.V. Cabin dynamics simulation of “Rope Metro” transport system. *Vestnik of DSTU*, 2018, Vol. 18, No.1, pp. 16-21. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-1-16-21 (In Russian)