

Ракша С.В., д-р техн. наук, професор,
Горячев Ю.К., канд. техн. наук, доцент
(ДНУЖТ ім. акад. В. Лазаряна),
Овчаренко Ю.Н., канд. техн. наук, доцент
(ДГАЭУ),
Куропятник А.С., магистр
(ДНУЖТ ім. акад. В. Лазаряна)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОПОР НА НАГРУЖЕННОСТЬ НЕСУЩЕГО КАНАТА ПОДВЕСНОЙ КАНАТНОЙ ДОРОГИ

Ракша С.В., д-р техн. наук, професор,
Горячев Ю.К., канд. техн. наук, доцент
(ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна)
Овчаренко Ю.М., канд. техн. наук, доцент
(ДДАЕУ),
Куроп'ятник О.С., магістр
(ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна)

АНАЛІЗ ВПЛИВУ РОЗМІЩЕННЯ ОПОР НА НАВАНТАЖЕНІСТЬ НЕСУЧОГО КАНАТА ПІДВІСНОЇ КАНАТНОЇ ДОРОГИ

Raksha S.V., D. Sc. (Tech.), Professor,
Goryachev Yu.K., Ph. D. (Tech.), Associate Professor
(DNURT named after Academician V. Lazaryan),
Ovcharenko Yu. N., Ph. D. (Tech.), Associate Professor
(DSAEU),
Kuropyatnik A.S., M.S. (Tech.)
(DNURT named after Academician V. Lazaryan)

HOW PILLAR LAYOUT IMPACTS ON THE TRACK CABLE LOADING IN THE OVERHEAD ROPEWAY

Аннотация. В работе сформулированы основные подходы к определению рационального расположения опор подвесной канатной дороги, учитывающих возможность снижения нагрузки несущего каната. Математическая модель составлена с использованием принципа модульной компоновки. Особенностью формирования математической модели является описание несущего каната в состоянии статического равновесия в каждом дискретном положении вагона на трассе. В ходе исследований установлено, что наибольшие усилия в канате возникают при расположении вагона посередине более длинного пролёта. При перемещении опорной точки в вертикальной плоскости натяжение несущего каната практически неизменно, а при перемещении опорной точки в горизонтальной плоскости изменение натяжения относительно стабильно. На основании полученных результатов было рекомендовано увеличение нормативного коэффициента запаса прочности несущего каната с 3,15 до 4.

Ключевые слова: канатная дорога, опора, несущий канат, нагрузка

Введение. Одним из этапов проектирования подвесных канатных дорог (ПКД) является выбор профиля трассы, параметры которого зависят от особенностей рельефа (пусть и в малой степени), назначения дороги, конструкции станций, размещения привода и натяжных устройств, прочих факторов. Поэтому определение оптимального профиля является сложной многокритериальной задачей, решение которой сегодня не обходится без использования ЭВМ. Однако, некоторые частные случаи моделирования дорог разных типов позволяют сформировать ряд рекомендаций по рациональному проектированию ПКД, применение которых существенно упрощает проектный расчёт. Так, в работе [1] рассмотрен особый подход к размещению опор маятниковых подвесных канатных дорог, позволяющий минимизировать продолжительность поездки и, следовательно, увеличить пропускную способность дороги.



Рисунок 1 – Расчётная схема при движении вагона в первом пролёте

Данная работа посвящена рассмотрению различных вариантов расположения опоры на трассе двухпролётной маятниковой подвесной дороги с целью формирования рекомендаций по её рациональному размещению с точки зрения минимизации натяжения несущего каната.

Методика. Для определения натяжения несущего каната при произвольном размещении вагона на трассе воспользуемся методикой, базирующейся на равновесии каната на опорных башмаках, основы которой изложены в работе [2].

Основным принципом формирования математической модели является описание пребывания несущего каната в состоянии статического равновесия в каждом дискретном положении вагона на трассе. Используя формулу Эйлера ($T_{нб}/T_{сб} = e^{\mu\varphi}$), составляем системы уравнений, характеризующие равновесие каната при движении вагона в первом и втором пролётах.

Математическая модель, описывающая равновесие несущего каната на опорном башмаке при движении вагона в первом пролёте (рисунок 1), имеет вид:

$$H_1 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_1^h} = H_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_2^e} \exp \left(\mu \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha_2^e - \operatorname{tg} \alpha_1^h}{1 + \operatorname{tg} \alpha_2^e \operatorname{tg} \alpha_1^h} \right); \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2^e = \operatorname{tg} \beta_2 + \frac{ql_2}{2H_2 \cos \beta_2}; \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_1^h = \operatorname{tg} \beta_1 - \frac{ql_1}{2H_1 \cos \beta_1} (1 + 2k_1 \delta_1); \quad (3)$$

$$k_1 = \frac{P}{ql_1} \cos \beta_1; \quad (4)$$

$$L_k = \left[\frac{l_1}{\cos \beta_1} + \frac{q^2 l_1^3 \cos \beta_1}{24H_1^2} (1 + 12\delta_1(1 - \delta_1)(k_1^2 + k_1)) \right] + \left[\frac{l_2}{\cos \beta_2} + \frac{q^2 l_2^3 \cos \beta_2}{24H_2^2} \right], \quad (5)$$

где H_1, H_2 – горизонтальные составляющие натяжения несущего каната в первом и втором пролётах соответственно, которые, ввиду отсутствия натяжного устройства к несущему канату, не равны; l_1, l_2 – длины пролётов; h_1, h_2 – перепады высот по опорным точкам каната; β_1, β_2 – углы наклона хорд пролётов; q – погонный вес несущего каната; P – вес вагона (в пределах данной работы рассматривается как сумма веса металлоконструкции (корпуса) вагона и веса пассажиров); μ – коэффициент трения в паре «несущий канат – опорный башмак»; α_1^H, α_2^B – углы наклона касательных к кривой провисания несущего каната по обе стороны от опоры; $\delta_1 = x_1/l_1$ – переменная, определяющая относительное положение вагона в первом пролёте; k_1 – коэффициент дополнительной нагрузки, введённый для упрощения записи математической модели; L_k – длина несущего каната на трассе, которая, ввиду отсутствия натяжного устройства к несущему канату, является постоянной.

Максимальное усилие – это натяжение каната в наивысшей точке профиля, поэтому для первого случая моделирования

$$T_{\max} = T_1^e = H_1 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_1^e}; \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_1^B = \operatorname{tg} \beta_1 + \frac{ql_1}{2H_1 \cos \beta_1} [1 + 2k_1(1 - \delta_1)], \quad (7)$$

где α_1^e – угол наклона касательной к кривой провисания несущего каната в точке, соответствующей опоре верхней станции.

Второй расчётный случай характеризуется перемещением вагона во втором пролёте (рис. 2), вследствие чего математическая модель принимает вид:

$$H_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_2^e} = H_1 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_1^H} \exp \left(\mu \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha_2^B - \operatorname{tg} \alpha_1^H}{1 + \operatorname{tg} \alpha_2^B \operatorname{tg} \alpha_1^H} \right); \quad (8)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2^e = \operatorname{tg} \beta_2 + \frac{ql_2}{2H_2 \cos \beta_2} [1 + 2k_2(1 - \delta_2)]; \quad (9)$$



$$\operatorname{tg} \alpha_1^H = \operatorname{tg} \beta_1 - \frac{ql_1}{2H_1 \cos \beta_1}; \quad (10)$$

$$k_2 = \frac{P}{ql_2} \cos \beta_2; \quad (11)$$

$$L_k = \left[\frac{l_1}{\cos \beta_1} + \frac{q^2 l_1^3 \cos \beta_1}{24H_1^2} \right] + \left[\frac{l_2}{\cos \beta_2} + \frac{q^2 l_2^3 \cos \beta_2}{24H_2^2} (1 + 12\delta_2 (1 - \delta_2) (k_2^2 + k_2)) \right], \quad (12)$$

где $\delta_2 = x_2/l_2$ – переменная, определяющая относительное положение вагона в пролёте; k_2 – коэффициент дополнительной нагрузки, введённый для упрощения записи математической модели.

Остальные обозначения приняты по рис. 1.

Максимальное натяжение каната, как и ранее, определяется по формуле (6); при этом

$$\operatorname{tg} \alpha_1^B = \operatorname{tg} \beta_1 + \frac{ql_1}{2H_1 \cos \beta_1}. \quad (13)$$

Анализ результатов. Рассмотрим пример двухпролётной подвесной канатной дороги маятникового типа с такими параметрами: расстояние между конечными станциями $l = 200$ м; перепад высот между конечными станциями $h = 35$ м, что соответствует углу наклона хорды трассы $\beta = 10^\circ$; несущий канат диаметром 52 мм с погонным весом $q = 0,15$ кН/м; вес вагона $P = 50$ кН (40 пассажиров); провисание каната в каждом пролёте – 5 %.

Для определения параметров рационального размещения опоры между станциями произведём расчёт усилия в несущем канате, изменяя характеристики пролётов ($l_1, l_2, \beta_1, \beta_2$) путём перемещения опорной точки каната в вертикальной и горизонтальной плоскостях, разбивая l и h на пропорциональные отрезки.

Отметим, что наибольшее значение натяжения соответствует размещению вагона по середине одного из пролётов (рис. 3).

Анализируя приведённые результаты, заключаем:

- наибольшие усилия в канате возникают при расположении вагона посередине более длинного пролёта;
- при перемещении опорной точки в вертикальной плоскости натяжение несущего каната практически неизменно, что также подтверждается результатами дополнительных исследований, приведёнными на рис. 4;
- изменение Δ натяжения несущего каната при перемещении опорной точки в горизонтальной плоскости относительно стабильно (26...30 %);
- рациональными с точки зрения минимизации натяжения несущего каната может считаться профиль, для которого положение опорной точки определено соотношениями l_1/l_2 и h_1/h_2 , выделенными в таблице; однако, на основании выводов относительно высотного размещения опорной точки, также может быть рекомендован профиль $l_1/l_2 = h_1/h_2 = 1/1$.

Выводы. Обобщая выше сказанное, можно выдать следующие рекомендации по рациональному размещению опоры двухпролётной маятниковой подвесной канатной дороги:

- изменением натяжения несущего каната при перемещении опоры в вертикальной плоскости можно пренебречь (поскольку оно сравнимо с погрешностью проектных расчётов) и использовать данный эффект для улучшения профиля дороги по другим критериям;
- увеличить нормативный коэффициент запаса прочности с 3,15, который устанавливается Правилами устройства и безопасной эксплуатации пассажирских подвесных канатных дорог, до 4, что позволит не учитывать изменение натяжения каната при горизонтальном перемещении опоры в поисках рационального профиля дороги.

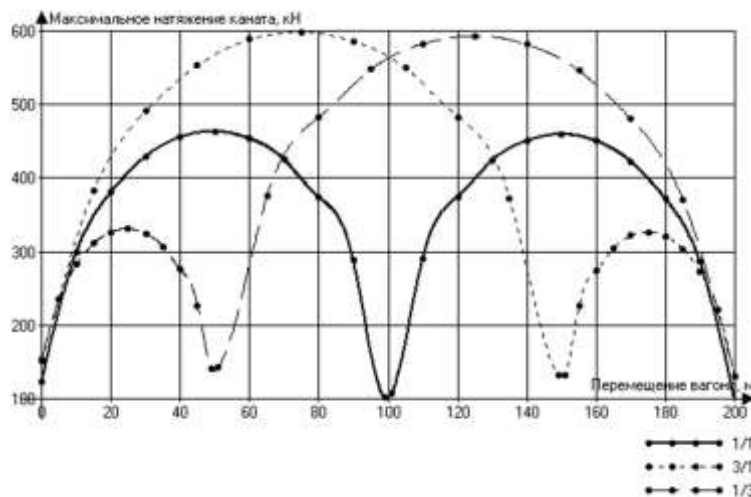


Рисунок 3 – Диаграммы натяжения несущего каната при горизонтальном смещении опоры (указано l_1/l_2 при $h_1 = h_2$)

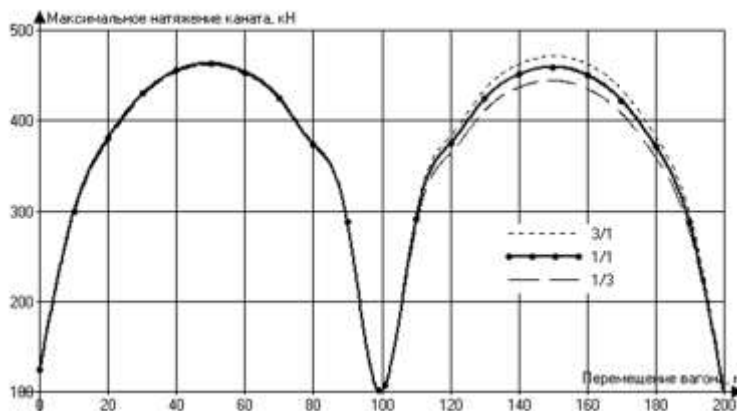


Рисунок 4 – Диаграммы натяжения несущего каната при вертикальном смещении опоры (указано h_1/h_2 при $l_1 = l_2$)

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Горячев, Ю.К. До питання про раціональне розміщення опор підвісної канатної дороги маятникового типу / Ю.К. Горячев, О.С. Куроп'ятник // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2011. – № 2 (33). – С. 30-37.

2. Горячев, Ю.К. Применение принципа модульной компоновки к математическому моделированию нагруженности несущего каната маятниковой подвесной дороги / Ю.К. Горячев, А.С. Куропятник // Збірник наукових праць ПолтНТУ. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава. – 2010. – № 2 (27). – С. 205-214.

REFERENCES

1. Goryachev, Yu.K. and Kuropyatnik A.S. (2011), "On the question of rational placing pillars of pendulum ropeway", *Herald of the Donbass State Engineering Academy*, no. 2 (33), pp. 30-37.

2. Goryachev, Yu.K. and Kuropyatnik A.S. (2010), "Applying the principle of a modular layout to the mathematical modeling of loading of the track cable of pendulum ropeway", *Zbirnik naukovih prac' PoltNTU*, no. 2 (27), pp. 205-214.

Об авторах

Ракша Сергей Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной механики, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (ДНУЖТ им. акад. В. Лазаряна), Днепропетровск, Украина, raksha@ukr.net

Горячев Юрий Константинович, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (ДНУЖТ им. акад. В. Лазаряна), Днепропетровск, Украина, dnuzt@diit.edu.ua

Овчаренко Юрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры надежности и ремонта машин, Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет (ДГАЭУ), Днепропетровск, Украина, info@dsau.dp.ua

Куропятник Алексей Сергеевич, магистр, ассистент кафедры прикладной механики, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (ДНУЖТ им. акад. В. Лазаряна), Днепропетровск, Украина, kuropyatnick@gmail.com

About the authors

Raksha Sergej Vasil'evich, Doctor of Technical Science (D. Sc.), Professor, Head of Department of Applied Mechanics, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (DNURT named after Acad. V. Lazaryan), Dnepropetrovsk, Ukraine, raksha@ukr.net

Goryachev Yuriy Konstantinovich, Candidate of Technical Science (Ph. D.), Associate Professor, Department of Applied Mechanics, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (DNURT named after Acad. V. Lazaryan), Dnepropetrovsk, Ukraine, dnuzt@diit.edu.ua

Ovcharenko Yuriy Nikolayevich, Candidate of Technical Science (Ph. D.), Associate Professor, Department of reliability and repair of machinery, Dnepropetrovsk State Agrarian Economic University (DSAEU), Dnepropetrovsk, Ukraine, info@dsau.dp.ua

Kuropyatnik Aleksey Sergeevich, Master of Science, Assistant Lecturer, Department of Applied Mechanics, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (DNURT named after Acad. V. Lazaryan), Dnepropetrovsk, Ukraine, kuropyatnick@gmail.com

Анотація. У роботі сформульовано основні підходи до визначення раціонального розташування опори підвісної канатної дороги, які враховують можливість зменшення навантаженості несучого каната. Математичну модель складено з використанням принципу модульного компонування. Особливістю формування математичної моделі є опис несучого каната у стані статичної рівноваги в кожному дискретному положенні вагона на трасі. У ході досліджень встановлено, що найбільші зусилля в канаті виникають у разі розташування вагона посередині більш довгого прогону. Під час переміщення опорної точки у вертикальній площині натяг несучого каната практично не змінюється, а при переміщенні опорної точки в горизонтальній площині зміна натягу відносно стабільна. На основі отриманих результатів було рекомендовано збільшення нормативного коефіцієнта запасу міцності несучого каната з 3,15 до 4.

Ключові слова: канатна дорога, опора, несучий канат, навантаженість

Abstract. The paper sets out basic approaches to determination of the pillars rational arrangement for the ropeway with taking into account possible reduction of the track cable load. A mathematical model is based on the principle of modular layout. Peculiarity of the mathematical model is the cable description in the state of static equilibrium in each discrete location of the car on the track. The research has found that the greatest efforts occur in the cable when the car is in the center of the longer span. When a fulcrum moves vertically tension of the cable is substantially unchanged, and when it moves horizontally tension change is relatively stable. Basing on the findings it was recommended to increase normative safety factor for the cable from 3.15 to 4.

Keywords: ropeway, pillar, cable, loading

Статья поступила в редакцию 15.04.2015

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук, проф. В.И. Дырдой