

Новый способ определения радиуса волнистости канатов с помощью нелинейных уравнений

Сергей Владимирович ПОЛЯКОВ*

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, Санкт-Петербург

Актуальность работы. Подъемный канат как гибкий элемент, способный нести высокую растягивающую нагрузку, широко применяется в современной подъемно-транспортной технике. Надежность подъемного каната во многом определяется его расчетом, проведенным с учетом различий геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, выбором конструкции каната в зависимости от условий его эксплуатации, технологией изготовления, качеством исходных материалов. Однако, несмотря на достигнутые успехи в конструировании подъемных стальных канатов и технологии их изготовления, практика эксплуатации показывает, что сроки службы подъемных канатов изменяются в больших пределах (от 90 до 1200 сут). Браковка подъемных канатов в первые месяцы их эксплуатации по причине образования в них волнистости и обрывов проволок приводит к экономическим и социальным затратам.

Целью данной работы является повышение безопасности эксплуатации подъемного каната путем определения с помощью нелинейных уравнений статки допустимого значения радиуса волнистости, при котором разрешена эксплуатация подъемного каната. При эксплуатации стальных канатов в них появляется волнистость в результате различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, при которой ось каната принимает форму пространственной винтовой линии. При этом необходимо знать допустимое значение радиуса волнистости, при котором возможна дальнейшая эксплуатация каната. В данной работе подготовлена методика определения допустимого значения радиуса волнистости для подъемных канатов при нелинейных уравнениях. Представлен пример расчета допустимого значения радиуса волнистости подъемного каната при нелинейных уравнениях.

Методология исследования. Использован системный подход, включающий аналитические и вычислительные методы с применением нелинейной части теории расчета подъемного каната, а также классических положений расчета подъемного каната.

Результатом работы является определение допустимого значения радиуса волнистости при нелинейных уравнениях статки, полученного с помощью подготовленной методики, при котором возможна дальнейшая эксплуатация подъемного каната.

Выводы. Подготовленная методика обеспечит повышение безопасности подъемного каната в подъемно-транспортном оборудовании, что имеет большое практическое значение для строительной отрасли России.

Ключевые слова: канат, деформации, допустимое значение, волнистость, угол свивки, расчет каната.

Введение
При эксплуатации подъемных канатов в них появляется волнистость в результате различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, при которой ось каната принимает форму пространственной винтовой линии. При этом необходимо знать допустимое значение радиуса волнистости, при котором возможна дальнейшая эксплуатация подъемного каната [1, 2].

В работах проф. М. Н. Хальфина [3, 4] было получено выражение допустимого значения радиуса волнистости на основе линейной теории расчета подъемных канатов. Также была сделана попытка определения количественного значения радиуса волнистости, составляющего 1,08 мм, которое включено в редакцию «Правилами устройства безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов» [5] и «Правилами устройства безопасной эксплуатации пассажирских подвесных и буксировочных канатных дорог». Далее мы попытаемся получить выражение допустимого радиуса волнистости для подъемного каната при нелинейных уравнениях статки.

Определение допустимого значения радиуса волнистости при нелинейных зависимостях

Допустимое значение радиуса волнистости при линейных зависимостях определяется из условия прочности подъемного каната, полученного в работе [6].

Допустимая величина радиуса волнистости для каната двойной свивки, согласно исследованиям [4, 7], была получена проф. М. Н. Хальфиным

В связи с тем, что учитывается изменение углов свивки винтовых элементов каната за период его деформации, то условие прочности каната с учетом изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов с помощью нелинейных уравнений было получено исследователем.

После математических преобразований было получено уравнение допустимого значения радиуса волнистости при нелинейных зависимостях:

$$\frac{d_b}{d_k} \leq 1 + \frac{R_b^n}{R_k} \leq 1 + \frac{\frac{1}{2} \left(A_{14} \Delta \varepsilon + A_{24} \Delta \theta + (A_{44} - m g_0) \frac{1}{\rho} + A_{411} \Delta \varepsilon^2 + A_{412} \Delta \varepsilon \Delta \theta + A_{422} \Delta \theta^2 + A_{414} \Delta \varepsilon \frac{1}{\rho} + A_{424} \Delta \theta \frac{1}{\rho} + A_{444} \left(\frac{1}{\rho} \right)^2 \right)}{R_k (A \varepsilon + C \theta + A_{11} \varepsilon^2 + A_{12} \varepsilon \theta + A_{22} \theta^2)}, \quad (1)$$

где d_b – диаметр спирали волнистости; d_k – диаметр стального каната; R_k – радиус каната (линейная теория); R_b^n – радиус волнистости (нелинейная теория); m – число винтовых элементов в каждом слое каната; μ_1 – коэффициент сужения каната; $A_{11}, A_{12}, A_{14}, A_{22}, A_{23}, A_{24}, A_{34}, A_{44}, A_{411}, A_{412}, A_{414}, A_{422}, A_{424}, A_{444}$ – агрегатные коэффициенты жесткости; $\Delta \varepsilon, \Delta \theta, 1/\rho$ – дополнительная продольная, крутильная и изгибная деформация каната; g_0 – жесткость пряди на изгиб.

Алгоритм расчета допустимого значения радиуса волнистости для подъемного каната при нелинейных зависимостях

Исследования по определению допустимого значения радиуса волнистости проводились на ПК IBM PC по разработанному алгоритму.

Исходные данные к расчету подъемного каната:

Конструкция каната $6 \cdot 36(1 + 7 + 7/7 + 14) + 7 \cdot 7(1 + 6)$

Диаметр проволоки

Диаметр слоя проволоки

Площадь поперечного сечения проволоки

Диаметр слоя прядей

Шаг свивки слоя проволоки

Шаг свивки слоя прядей

Угол свивки слоев проволоки

Угол свивки слоев прядей

Радиус свивки проволоки

Радиус свивки прядей

Натяжение стального каната

Временное сопротивление (маркировочная группа)

Количество прядей в каждом слое: центральная прядь (круглая); первый слой (круглая); второй слой (круглая).

Модуль упругости I рода $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа

Модуль упругости II рода $G = 0,8 \cdot 10^5$ МПа

Определение параметров свивки подъемного каната

Определение параметров свивки подъемного каната с учетом различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов для расчета допустимого значения радиуса волнистости при нелинейных зависимостях производится в следующей последовательности.

Определяется изменение угла свивки подъемного каната с учетом неравномерности геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

Определяются агрегатные коэффициенты жесткости для двух вариантов свивки каната:

– все слои прядей направлены в одну сторону;

– наружный слой прядей направлен в одну сторону, а остальные – в противоположную.

Определяются дополнительные деформации: продольные, крутильные и изгибные [8–10], основные деформации растяжения и кручения.

Определяются нормальные напряжения в поперечном сечении проволоки каната двойной свивки с учетом различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов при нелинейных зависимостях [10].

Определяется запас прочности подъемного каната с учетом различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов при нелинейных зависимостях и изменении σ_w – растягивающих напряжений для круглых проволок в пределах от 160 до 200 МПа [11, 12].

Определяется допустимое значение радиуса волнистости для подъемного каната при нелинейных зависимостях (1).

Примеры расчета допустимого значения радиуса волнистости подъемного каната при нелинейности деформаций

При известных конструкциях канатов, при его натяжении можно определить допустимое значение радиуса волнистости в нелинейной форме.

Для проведения исследований по определению допустимого значения радиуса волнистости, полученного в нелинейной форме, нами были использованы канаты: 14,5 – Г-В-Л-О-Р-1960, ГОСТ 7669-80; 16 – Г-В-Л-О-Р-1960, ГОСТ 7669-80; 21 – Г-В-Л-О-Р-1960, ГОСТ 7669-80; 30 – Г-В-Л-О-Р-1670, ГОСТ 7669-80; 35,5 – Г-В-Л-О-Р-1960, ГОСТ 7669-80.

Конструктивные данные к расчету допустимого значения радиуса волнистости при нелинейности деформаций:

Конструкция каната – $6 \cdot 36(1 + 7 + 7/7 + 14) + 7 \cdot 7(1 + 6)$

Диаметр каната – 14,5; 16; 21; 30; 35,5 мм

Маркировочная группа – 1670; 1960 Н/мм²

Модуль упругости I рода – $E = 2,1 \times 10^5$ МПа

В таблице представлены расчетные допустимые значения радиуса волнистости, полученные на основе (1).

При исследовании канатов проф. М. Н. Хальфиным были получены с помощью линейной теории расчета канатов допустимые значения радиуса волнистости, составляющие 1,08, которые включены в редакцию «Правил устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов» [3, 13, 14].

Как было показано ранее, при эксплуатации стальных канатов в них появляются изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, но с помощью полученных нами теоретических и экспериментальных исследований выведено значение допустимого радиуса волнистости подъемного каната при нелинейности деформаций,

Допустимые значения радиуса волнистости подъемных канатов при нелинейных зависимостях. Permissible values of the radius of waviness of the winding ropes with non-linear dependencies.

Конструкция каната	Диаметр каната, мм	Маркировочная группа, Н/мм ²	Допустимое значение радиуса волнистости
$6 \cdot 36(1 + 7 + 7/7 + 14) + 7 \cdot 7(1 + 6)$	14,5	1960	1,052
$6 \cdot 36(1 + 7 + 7/7 + 14) + 7 \cdot 7(1 + 6)$	16,0	1960	1,046
$6 \cdot 36(1 + 7 + 7/7 + 14) + 7 \cdot 7(1 + 6)$	21,0	1960	1,043
$6 \cdot 36(1 + 7 + 7/7 + 14) + 7 \cdot 7(1 + 6)$	30,0	1670	1,042
$6 \cdot 36(1 + 7 + 7/7 + 14) + 7 \cdot 7(1 + 6)$	35,5	1670	1,042

составляющее 1,04–1,05. При достижении отношения диаметра спирали волнистости d_b к диаметру каната d_k , равного 1,04, нами рекомендуется прекращение дальнейшей эксплуатации стальных канатов с целью повышения безопасности.

Сравнение допустимых значений радиуса волнистости, полученных при нелинейной теории расчета канатов с рекомендованными в литературе линейными значениями радиуса волнистости, показывает, что нелинейная теория дает более точные значения и на 30 % меньше при идентичных исходных данных.

Заключение

В нашей стране до 2003 г., согласно «Правилам безопасной эксплуатации подвесных канатных дорог» [5, 11], запрещалась эксплуатация подъемного каната при визуальном обнаружении неравномерности геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов (волнистости) в канате. При этом [5] количественное ограничение диаметра волнистости не было предусмотрено. В то же время «Правилами устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов» предусматривается эксплуатация при отношении диаметра спирали волнистости d_b к диаметру каната d_k , меньшем 1,08, что позволяет значительно повысить безопасность эксплуатации и продлить срок службы подъемных канатов с образовавшимися изменениями геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

Для определения оптимального значения радиуса волнистости нами разработана методика, построенная на полученных нелинейных уравнениях статики, включающая рекомендации по повышению безопасности подъемного каната с образовавшимися в нем изменениями геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов (волнистости). При достижении отношения диаметра спирали волнистости d_b к диаметру каната d_k , равного 1,04, нами рекомендуется прекращение дальнейшей эксплуатации стальных канатов с целью повышения безопасности.

Целью методики является, исходя из конструкции подъемного каната, растягивающей нагрузки и запаса прочности, повышение безопасности эксплуатации подъемного каната путем определения с помощью нелинейных уравнений статики допустимого значения радиуса волнистости в канате с учетом образовавшихся в нем изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов (волнистости) [9, 10].

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований установлены новые и подтвержденные существующие закономерности влияния конструктивных параметров подъемных канатов на их прочностные характеристики, позволяющие обосновать оптимальные параметры канатов с учетом различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов при нелинейности деформаций, обеспечивающие повышение надежности и долговечности подъемных машин, что имеет большое практическое значение для строительной отрасли России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stiepanov A., Koskin A. A few words more on the properties of viscoelastic winding ropes // Mine hoisting '96: International Scientific and Technical Conference, 8–10 October 1996, Gliwice, Poland. Vol. 2. P. 65–68.
2. Nemtsov M. V., Trifanov G. D. A magnetic method of wire-rupture detection in steel cables // Russian Electrical Engineering. 2017. Т. 88, № 5. P. 285–288.
3. Хальфин М. Н. Расчет шахтного подъемного каната с учетом неодинаковости физико-механических свойств его винтовых элементов // Очистные и проходческие машины и инструменты. Новочеркасск, 1988. С. 122–126.
4. Хальфин М. Н. Расчет стальных канатов с целью различия геометрических параметров и механических свойств проволок // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2005. Спец. вып. С. 5–13.
5. Правила устройства безопасной эксплуатации пассажирских подвесных и буксировочных канатных дорог. М.: НПО ОБТ, 2003. 80 с.
6. Глушко М. Ф. Стальные подъемные канаты. Киев: Техника, 1966. 327 с.
7. Глушко М. Ф., Малиновский В. А., Шигарина Л. И., Каноненко Л. А. Нелинейные уравнения равновесия прямого каната // Прикладная механика. 1979. №12. С. 127–129.
8. Осипова Т. Н., Нестеров А. П. Уменьшение динамических нагрузок в канатах барабанных подъемников // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 2, № 7 (68). С. 17–22.
9. Поляков С. В. Уравнение нелинейной статики каната двойной свивки с учетом волнистости // Новые технологии управления движением технических объектов: материалы 8 Междунар. науч.-техн. конф. (Новочеркасск, 14 дек. 2005 г.). Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. Вып. 6. С. 83–88.
10. Поляков С. В. Уравнение нелинейной статики спирального каната с учетом волнистости // Новые технологии управления движением технических объектов: материалы 8 Междунар. науч.-техн. конф. (Новочеркасск, 14 дек. 2005 г.). Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. Вып. 6. С. 88–91.
11. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузовых подвесных канатных дорог. М.: Недра, 1995. 29 с.
12. Бережинский В. И., Шатило А. Н. Канаты шахтных подъемных установок. М.: Университетская книга, 2015. 232 с.
13. Осипова Т. Н., Нестеров А. П. Уменьшение динамических нагрузок в канатах барабанных подъемников // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 2, № 7 (68). С. 17–22.
14. Хальфин М. Н., Мамаев Ю. Д., Иванов Б. Ф. Несущие закрытые канаты грузовых подвесных канатных дорог. Новочеркасск: НГТУ, 1998. 128 с.
15. Поляков С. В. Исследование подъемного каната с возникшими изменениями геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов // Научно-технический журнал Брянского государственного ун-та. 2019. С. 257-264.

Статья поступила в редакцию 08 апреля 2019 года

New way to determine the radius of waviness of ropes with the help of nonlinear equations

Sergey Vladimirovich POLYAKOV*

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

Relevance of the work. The winding ropes as a flexible element capable of carrying a high tensile load is widely used in modern hoisting-and-transport equipment. The reliability of the winding rope is largely determined by its calculation, taking into account the differences in the geometric parameters and mechanical properties of the screw elements, the choice of the rope design depending on its operating conditions, manufacturing technology, and the quality of the basic material. However, despite the success achieved in the design of steel winding ropes and their manufacturing technology, operating practice shows that the lifespan of winding ropes varies over a wide range (from 90 to 1200 days). The rejection of winding ropes in the first months of their operation due to the formation of waviness and wire ruptures in them leads to economic and social costs.

The purpose of this work is to increase the safety of the operation of a winding rope by determining, using nonlinear equations of statics, the permissible value of the radius of waviness at which the winding rope is allowed to operate. During the operation of steel ropes, undulation appears in them as a result of differences in the geometric parameters and mechanical properties of screw elements, in which the axis of the rope takes the form of a spiral line. In this case, it is necessary to know the permissible value of the radius of waviness at which further operation of the rope is possible. In this paper, we have prepared a methodology for determining the permissible value of the radius of waviness for winding ropes with non-linear equations. An example of calculating the permissible value of the radius of undulation of a winding rope for non-linear equations is presented.

Methodology of research. A systematic approach was used, including analytical and computational methods using the nonlinear part of the theory of calculation of a winding rope, as well as the classical principles of calculating a winding rope.

The result of the work is the determination of the permissible value of the radius of undulation for non-linear equations of static obtained using the prepared methodology, in which further operation of the winding rope is possible.

Conclusions. The prepared methodology will increase the safety of the winding rope in hoisting-and-transport equipment, which is of great importance for the construction industry in Russia.

Keywords: rope, deformation, permissible value, waviness, twist angle, rope calculation.

REFERENCES

1. Stiepanov A., Koskin A. 1996, A few words more on the properties of viscoelastic winding ropes. Mine hoisting '96: International Scientific and Technical Conference, Gliwice, Poland. Vol. 2. P. 65–68.
2. Nemtsov M. V., Trifanov G. D. 2017, A magnetic method of wire-rupture detection in steel cables. Russian Electrical Engineering. Vol. 88, No 5. P. 285–288.
3. Khalfin M. N. 1988, *Raschet shakhtnogo pod'yemnogo kanata s uchetom neodinakovosti fiziko-mekhanicheskikh svoystv yego vintovykh elementov. Ochistnyye i prokhodcheskiye mashiny i instrumenty* [Calculation of a mine winding rope, taking into account the different physical and mechanical properties of its screw elements. Cleaning and sinking machines and tools]. Novochoerkassk, P. 122–126.
4. Khalfin M. N. 2005, Calculation of steel ropes in order to distinguish geometric parameters and mechanical properties of wires. *Izvestiya VU-Zov. Severo-Kavkazskiy region* [University News. North Caucasus region]. Technical Sciences Series, Special issue, P. 5–13. (In Russ.)
5. 2003, *Pravila ustroystva bezopasnoy ekspluatatsii passazhirskikh podvesnykh i buksirovochnykh kanatnykh dorog* [Rules for the safe operation of passenger skyline and hauling ropeways]. Moscow, 80 p.
6. Glushko M. F. 1966, *Stal'nyye pod'yemnyye kanaty* [Steel winding ropes]. Kyiv, 327 p.
7. Glushko M. F., Malinovsky V. A., Shigarina L. I., Kanonenko L. A. 1979, Nonlinear equilibrium equations of a straight rope. *Prikladnaya mekhanika* [Applied mechanics], No 12, P. 127–129. (In Russ.)
8. Osipova T. N., Nesterov A. P. 2014, Reduction of dynamic loads in the ropes of elevating drum. East-European Journal of Advanced Technologies. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies], vol. 2, No 7 (68). P. 17–22. (In Russ.)
9. Polyakov S.V. 2006, *Uravneniye nelineynoy statiki kanata dvoynoy svivki s uchetom volnistosti. Novyye tekhnologii upravleniya dvizheniyem tekhnicheskikh ob'yektov* [Equation of nonlinear statics of a double twist rope taking into account waviness. New technologies for controlling the movement of technical objects], proceedings of 8th International scientific conference, Novochoerkassk, Rostov-on-Don, Issue 6. P. 83–88.
10. Polyakov S. V. *Uravneniye nelineynoy statiki spiral'nogo kanata s uchetom volnistosti. Novyye tekhnologii upravleniya dvizheniyem tekhnicheskikh ob'yektov* [Equation of nonlinear statics of a spiral rope taking into account waviness. New technologies for controlling the movement of technical objects], proceedings of 8th International scientific conference, Novochoerkassk, Rostov-on-Don. Issue 6. P. 88–91.
11. 1995, *Pravila ustroystva i bezopasnoy ekspluatatsii gruzovykh podvesnykh kanatnykh dorog* [Rules for the design and safe operation of skyline ropeways]. Moscow, 29 p.
12. Berezhinsky V. I., Shatilo A. N. 2015, *Kanaty shakhtnykh pod'yemnykh ustanovok* [Mine winding plant ropes], Moscow, 232 p.
13. Osipova T. N., Nesterov A. P. 2014, Reduction of dynamic loads in the ropes of elevating drum. East-European Journal of Advanced Technologies. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies], vol. 2, No 7 (68). P. 17–22. (In Russ.)
14. Khalfin M. N., Mamayev Yu. D., Ivanov B. F. 1998, *Nesushchiye zakrytyye kanaty gruzovykh podvesnykh kanatnykh dorog* [Conveying locked rope ropes of skyline ropeways], Novochoerkassk, 128 p.
15. Polyakov S. V. 2019, Study of a winding rope with changes in the geometric parameters and mechanical properties of screw elements. *Nauchno-tekhnicheskyy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific and Technical Journal of Bryansk State University], P. 257-264. (In Russ.)

The article was received on April 08, 2019