Вывод параметров стального каната, влияющих на безопасность эксплуатации

Поляков С. В.¹

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: 555ots@mail.ru

Реферат

Введение. Подъемный канат как гибкий элемент, способный нести высокую растягивающую нагрузку, широко применяется в современной подъемно-транспортной технике. Трудно представить работу многих важнейших отраслей народного хозяйства без широкого использования подъемных канатов. Это прежде всего относится к строительной и горнодобывающей промышленности, где канат используется в подъемно-транспортном оборудовании.

Цель работы. На основе научных открытий российских ученых в области проектирования шахтных канатов определить основные параметры, влияющие на их безопасную эксплуатацию.

Методология. При эксплуатации подъемных канатов, работающих в условиях свободного подвеса на высоких подъемах глубоких шахт, происходит значительное раскручивание при растяжении, в результате чего наблюдается изменение углов свивки винтовых элементов каната, вызывающее геометрически нелинейный характер деформаций. Расчет радиуса и угла волнистости по недеформируемой расчетной схеме дает большие погрешности. В работе осуществлен вывод параметров, влияющих на безопасную эксплуатацию каната, с использованием нелинейной теории расчета канатов, что позволяет повысить надежность и долговечность шахтного каната.

Результаты. В предлагаемой статье определен и подтвержден параметр, влияющий на безопасную эксплуатацию шахтного подъемного каната. Выведено уравнение радиуса волнистости с помощью нелинейных зависимостей. Уточнено количественное значение допустимого радиуса волнистости.

Выводы. Полученные рекомендации благодаря выражениям, определяющим допустимое значение радиуса волнистости каната, повысят безопасность эксплуатации стального шахтного каната.

Ключевые слова: канат; деформации; допустимое значение; волнистость; угол свивки; теория расчета канатов.

Введение. При эксплуатации шахтных подъемных канатов из-за различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов в них появляется волнистость, при которой ось каната принимает форму пространственной винтовой линии. При этом необходимо знать допустимое значение радиуса волнистости, так как эта величина влияет на безопасную эксплуатацию каната [1–3].

В работах М. Н. Хальфина [4, 5] было получено выражение допустимого значения радиуса волнистости на основе линейной теории расчета шахтных подъемных канатов. Кроме того, была сделана попытка определения количественного значения радиуса волнистости, равного 1,08 мм, которое позже было включено в «Правила устройства безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов» и «Правила устройства безопасной эксплуатации пассажирских подвесных и буксировочных канатных дорог» (Правила устройства безопасной эксплуатации пассажирских подвесных и буксировочных канатных дорог. М.: НПО ОБТ, 2003. 80 с.; Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых по-

лезных ископаемых». Сер. 03. Вып. 78 / ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности». М., 2014. 276 с.).

Теоретическое определение параметров шахтного стального каната, влияющих на его безопасную эксплуатацию. Основополагающими зависимостями линейной теории расчета каната, полученными с учетом волнистости, являются геометрические уравнения равновесия внутренних силовых факторов, возникающих в винтовом элементе каната при действии на него внешних нагрузок, и уравнения, отражающие физические свойства элементов каната [4, 6].

Известно, что уравнение, определяющее параметры волнистости в канате, в линейной постановке имеет вид [4]:

$$R_b = \frac{\frac{1}{\rho_0} + \frac{\Delta_3}{\Delta} P_x R_{b0}}{\left(\frac{1}{\rho_0} + \frac{\Delta_3}{\Delta} P_x R_{b0} \right)^2 + \left(\frac{\sin \beta \cos \beta}{R_k} \pm \theta + \frac{\Delta_2}{\Delta} P_x R_{b0} \right)^2}, \quad (1)$$

где ρ_0 – начальная кривизна оси каната; θ – суммарное значение кручения каната от действия эксплуатационных факторов; R_{b0} – радиус волнистости, появляющийся при изготовлении каната; P_x – внешняя нагрузка; β – угол свивки каната; R_k – радиус каната;

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} A_{11} - \mu_1 A_{13} & A_{14} - \mu_1 A_{23} \\ A_{12} - \mu_1 A_{23} & A_{24} - \mu_1 \frac{A_{23}}{A_{13}} \end{vmatrix};$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} A_{11} - \mu_1 A_{13} & A_{12} - \mu_1 A_{23} \\ A_{12} - \mu_1 A_{23} & A_{22} - \mu_1 \frac{(A_{23})^2}{A_{13}} \end{vmatrix}; \quad (2)$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} \frac{m}{2} (A_{14} - \mu_1 A_{34}) & \frac{m}{2} \left(A_{24} - \mu_1 \frac{A_{34} A_{23}}{A_{13}} \right) & \frac{m}{2} \left(A_{44} - \mu_1 \frac{(A_{34})^2}{A_{13}} \right) \\ A_{11} - \mu_1 A_{13} & A_{12} - \mu_1 A_{23} & A_{14} - \mu_1 A_{34} \\ A_{12} - \mu_1 A_{23} & A_{22} - \mu_1 \frac{(A_{23})^2}{A_{13}} & A_{24} - \mu_1 \frac{A_{34} A_{23}}{A_{13}} \end{vmatrix},$$

m – число винтовых элементов в каждом слое каната; μ_1 – коэффициент сужения каната; $A_{11}, A_{12}, A_{14}, A_{22}, A_{23}, A_{24}, A_{34}, A_{44}$ – агрегатные коэффициенты жесткости.

Примем поперечную деформацию $\varepsilon_r = 0$, тогда после математических преобразований получим уравнение, определяющее изменение геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов в канате в нелинейной постановке [7, 8]:

$$R_b^H = \frac{(X_1 + X_2 + X_3)}{2(A\varepsilon + C\theta + A_{11}\varepsilon^2 + A_{12}\varepsilon\theta + A_{22}\theta^2)}, \quad (3)$$

где $X_1 = A_{14}\Delta\varepsilon + A_{24}\Delta\theta + (A_{44} - mg_0)\frac{1}{\rho}$; $X_2 = A_{411}\Delta\varepsilon^2 + A_{412}\Delta\varepsilon\Delta\theta + A_{422}\Delta\theta^2$;

$X_3 = A_{414} \Delta \epsilon \frac{1}{\rho} + A_{424} \Delta \theta \frac{1}{\rho} + A_{444} \left(\frac{1}{\rho} \right)^2$; $\Delta \epsilon$, $\Delta \theta$, $1/\rho$ – дополнительные продольная, крутильная и изгибная деформации каната; g_0 – жесткость пряжи на изгиб; A_{411} , A_{412} , A_{414} , A_{422} , A_{424} , A_{444} – агрегатные коэффициенты жесткости каната двойной свивки, полученные автором; A , C – агрегатные коэффициенты жесткости каната двойной свивки, полученные с помощью линейной теории расчета канатов.

Изгибающий момент можно представить как

$$M_z = \sum_{i=1}^n \sqrt{(0,51\sigma_T \delta^2 \Delta \delta)^2 + (0,17\delta^3 \Delta \sigma_T)^2 + (\Delta T R_k \cos \alpha)^2}, \quad (4)$$

где σ_T – предел текучести; δ – допуск на диаметр проволоки, полученный с помощью линейных уравнений; $\Delta \delta$ – допуск на диаметр проволоки; ΔT – разбег технологического натяжения проволоки.

Как известно, угол волнистости, согласно [3], равен

$$\gamma = \frac{2\pi R_b}{H_k}, \quad (5)$$

где H_k – шаг свивки наружного слоя каната.

С учетом волнистости, подставив уравнение (3) в (5), получим выражение угла волнистости в нелинейной форме:

$$\gamma^n = 2\pi \left(\frac{(X_1 + X_2 + X_3)}{2(A\epsilon + C\theta + A_{11}\epsilon^2 + A_{12}\epsilon\theta + A_{22}\theta^2)} \right) H_k^{-1}. \quad (6)$$

Полученные выражения позволяют определить допустимые значения волнистости и угла волнистости шахтного стального каната в зависимости от его кручения, изгиба и предела прочности материала канатной проволоки [9–13].

Расчет основных параметров шахтного стального каната, влияющих на безопасную эксплуатацию. При известных конструкциях канатов, при его натяжении можно определить допустимое значение радиуса волнистости в нелинейной форме [13] (Калужина А. А., Фурманюк А. А., Хальфин М. Н. *Напряжения в несущих закрытых канатах подвесных канатных дорог при их эксплуатации. Депонированная рукопись № 359-В2014 30.12.2014*).

Для проведения расчета допустимого значения радиуса волнистости, полученного в нелинейной форме, автором 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.

Исходные данные к расчету допустимого значения радиуса волнистости при нелинейных зависимостях: конструкция каната – $6 \times 36(1 + 7 + 7/7 + 14) + 7 \times 7(1 + 6)$; диаметр каната – 14,5 мм; 16 мм; 21 мм; 30 мм; 35,5 мм; маркировочная группа – 1670 Н/мм²; 1960 Н/мм²; модуль упругости I рода $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа.

Расчет допустимого значения радиуса волнистости проведен с использованием программы MathCAD по разработанному алгоритму.

В таблице представлены расчетные допустимые значения радиуса волнистости, полученные на основе (3).

Заключение. Целью статьи было выявить основные параметры шахтного стального каната с учетом волнистости, влияющие на его безопасную эксплуатацию. Основными параметрами, влияющими на аварийные ситуации в шахтном подъемно-транспортном оборудовании, использующем стальной канат, являются волнистость и угол волнистости стального каната.

Допустимые значения радиуса волнистости подъемных канатов при нелинейных зависимостях

Permissible values of the radius of waviness of hoisting wire ropes at nonlinear dependences

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

При исследовании канатов М. Н. Хальфиным с помощью линейной теории расчета канатов были получены допустимые значения радиуса волнистости, составляющие 1,08, которые включены в «Правила устройства безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов» [4, 19] (*Правила устройства и безопасной эксплуатации грузовых подвесных канатных дорог. М.: Недра, 1995. 29 с.*).

Как было показано ранее, при эксплуатации стальных канатов в них происходят изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов. С помощью полученных автором теоретических и экспериментальных исследований выведено значение допустимого радиуса волнистости подъемного каната при нелинейных зависимостях, составляющее 1,04–1,05.

При достижении отношения диаметра спирали волнистости d_b к диаметру каната d_k , равного 1,04, рекомендуется прекращение дальнейшей эксплуатации шахтных 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.

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований установлены новые и подтверждены существующие закономерности влияния конструктивных параметров подъемных канатов на их прочностные характеристики, позволяющие обосновать оптимальные параметры канатов с учетом волнистости при нелинейных зависимостях, которые обеспечат повышение надежности и долговечности подъемных канатов, что имеет большое практическое значение для горнодобывающей отрасли России.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Stiepanov A., Koskin A. A few words more on the properties of viscoelastic winding ropes // *Minine hoisting '96. Vol. 2: International Scientific and Technical Conference; 8–10 October 1996, Gliwice, Poland. S. 65–68.*
2. Nemtsov M. V., Trifanov G. D. A magnetic method of wire-rupture detection in steel cables. *Russian Electrical Engineering. 2017. Vol. 88. No. 5. C. 285–288.*
3. Chayun I. M., Nepomnyashchyi A. V. Tension optimization of the conductor-and-support cable elements during stranding process // *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi. 2016. No. 3 (50). P. 21–28.*
4. 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.*

5. Хальфин М. Н. Расчет стальных канатов с целью различия геометрических параметров и механических свойств проволок // Известия вузов Северо-Кавказского региона. Технические науки. 2005. Спец. вып. С. 5–13.
6. Лепеха О. Г. Підвищення залишкового ресурсу підіймальних канатів удосконаленням методів розрахунку їх напружено-деформованого стану // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета: сб. науч. тр. Харьков: ХНАДУ, 2012. Вып. 57. С. 289–291.
7. Глушко М. Ф. Стальные подъемные канаты. Киев: Техника, 1966. 327 с.
8. Глушко М. Ф., Малиновский В. А., Шигарина Л. И., Каноненко Л. А. Нелинейные уравнения равновесия прямого каната // Прикладная механика. 1979. № 12. С. 127–129.
9. Хальфин М. Н., Исаков В. С. Уравнения нелинейной статике кранового каната с учетом различия геометрических параметров и механических свойств проволок // Матер. I Национальной конференции профессорско-преподавательского состава и научных работников. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова, г. Новочеркасск, 2015. С. 143–145.
10. Поляков С. В. Уравнение нелинейной статике каната двойной свивки с учетом волнистости // Новые технологии управления движением технических объектов: матер. 8 Междунар. науч.-техн. конф., г. Новочеркасск, 14 декабря 2005 г. Ростов-н/Д.: СКНЦ ВШ, 2006. Вып. 6. С. 83–88.
11. Поляков С. В. Уравнение нелинейной статике спирального каната с учетом волнистости // Новые технологии управления движением технических объектов: матер. 8 Междунар. науч.-техн. конф., г. Новочеркасск, 14 декабря 2005 г. Ростов-н/Д.: СКНЦ ВШ, 2006. Вып. 6. С. 88–91.
12. 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.
13. Кошкин А. П., Трифанов Г. Д. Канаты для подъемных установок. Пермь: ПНИПУ, 2014. 107 с.
14. Пат. US 5565771 (A) Канада. МПК G01N27/82. Apparatus for increasing linear resolution of electromagnetic wire rope testing / Michel Hamelin, Frank Kitzinger. 1996. URL: <https://www.google.com/patents/US5565771> (дата обращения 20.10.2016).

Поступила в редакцию 8 апреля 2019 года

Сведения об авторах:

Поляков Сергей Владимирович – аспирант кафедры наземных транспортно-технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета. E-mail: 555ots@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-118-123

Determination of steel wire rope parameters affecting the safety of operation

Sergei V. Poliakov¹

¹ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia.

Abstract

Introduction. Winding wire rope, being a flexible element capable of carrying high tensile load, is widely used in modern hoisting equipment. Now it is hard to imagine the majority of important sectors of economy without the well-used hoisting wire ropes. This primarily applies to construction and mining where wire rope is widely used in hoisting equipment.

Research aim. Based on scientific discoveries in mine wire ropes design made by the Russian scientists, the present research aims to determine the main parameters affecting mine wire rope safe operation.

Methodology. Hoisting wire ropes in service, operating in the conditions of free suspension, are subject to significant unwinding in tension in deep hoisting shafts, as a result, spiral elements lay angles of wire rope change and cause a geometrically nonlinear nature of strains. Calculating the radius and angle of waviness using an inflexible calculation model results in low accuracy. The present research determines the parameters affecting wire rope safe operation; nonlinear theory of wire ropes calculation has been applied making it possible to improve the reliability and durability of the mine wire rope.

Results. The present article defines and provides support for the parameter affecting the safe operation of mine hoisting wire ropes. The equation of the radius of waviness is derived through nonlinear dependences. The quantitative value of the permissible radius of waviness is specified.

Summary. The obtained formulae allow to determine the permissible value of the radius of waviness wherein future safe operation of mine wire rope is possible. Due to the formulae which determine the permissible value of the radius of waviness, the recommendations given in this article will improve the security of steel mine wire rope operation.

Key words: wire rope; strains; permissible value; waviness, lay angle; theory of wire rope.

REFERENCES

1. Stiepanov A., Koskin A. A few words more on the properties of viscoelastic winding ropes. In: *Mine hoisting '96. Vol. 2: International Scientific and Technical Conference; 8–10 October 1996, Gliwice, Poland.* p. 65–68.
2. Nemtsov M. V., Trifanov G. D. A magnetic method of wire-rupture detection in steel cables. *Russian Electrical Engineering.* 2017; 88 (5): 285–288.
3. Chayun I. M., Nepomnyashchy A. V. Tension optimization of the conductor-and-support cable elements during stranding process. *Odeskyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi.* 2016; 3 (50): 21–28.
4. Khalfin M. N. Mine hoisting wire rope calculation with the account of unequal physical-mechanical properties of its spiral elements. In: *Heading and winning machines and tools.* Novocherkassk; 1988. p. 122–126. (In Russ.)
5. Khalfin M. N. Steel wire ropes calculation for the purpose of distinguishing between geometric parameters and mechanical properties of wires. *Izvestiya vuzov Severo-Kavkazskogo regiona. Tekhnicheskie nauki = University New North-Caucasian Region. Technical Sciences Series.* 2005; special edition: 5–13. (In Russ.)
6. Lepekha O. G. Increasing the residual life of hoisting cables by improving the methods of their deflected mode calculation. *Vestnik Kharkovskogo natsionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta = Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University: collection of scientific works.* Kharkiv: KhNADU Publishing; 2012; 57: 289–291.
7. Glushko M. F. *Steel hoisting wire ropes.* Kiiv: Tekhnika Publishing; 1966. (In Russ.)
8. Glushko M. F., Malinovskii V. A., Shigarina L. I., Kanonenko L. A. Nonlinear equilibrium equations for straight wire strand. *Prikladnaia mekhanika = International Applied Mechanics.* 1979; 12: 127–129. (In Russ.)
9. Khalfin M. N., Isakov V. S. Nonlinear static equations for crane cable taking into account the differences between the geometric parameters and mechanical properties of wires. In: *Proceedings of the 1st National Conference for Professors, Lecturers, and Scientific Researchers. Platov South Russian State Polytechnic University (NPI).* Novocherkassk; 2015. p. 143–145. (In Russ.)
10. Poliakov S. V. Nonlinear static equations for double lay wire rope with the account of waviness. In: *New technologies in technical units motion control: Proceedings of the 8th Science and Technology Conference, Novocherkassk, 14 December 2005.* Rostov-on-Don: SKNTs VSh Publishing; 2006; 6. p. 83–88. (In Russ.)
11. Poliakov S. V. Nonlinear static equation for a spiral wire rope with the account of waviness. In: *New technologies in technical units motion control: Proceedings of the 8th Science and Technology Conference, Novocherkassk, 14 December 2005.* Rostov-on-Don: SKNTs VSh Publishing; 2006; 6. p. 88–91. (In Russ.)
12. Osipova T. N., Nesterov A. P. Reducing the dynamic load in ropes of drum hoists. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii = Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2014; 2 (7; 68): 17–22. (In Russ.)
13. Koshkin A. P., Trifanov G. D. *Wire ropes for hoisters.* Perm: PNPRU Publishing; 2014. (In Russ.)
14. Michel Hamelin, Frank Kitzinger. *Apparatus for increasing linear resolution of electromagnetic wire rope testing.* United States Patent, no. 5565771; 1996. Available from: <https://www.google.com/patents/US5565771> [Accessed 20 October 2016].

Received 8 April 2019

Information about authors:

Sergei V. Poliakov – PhD student, Department of Land Transport Technological Vehicles, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. E-mail: 555ots@mail.ru

Для цитирования: Поляков С. В. Вывод параметров стального каната, влияющих на безопасность эксплуатации // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 6. С. 118–123. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-118-123

For citation: Poliakov S. V. Determination of steel wire rope parameters affecting the safety of operation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2019; 6: 118–123 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-118-123