

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМОГО ЗНАЧЕНИЯ РАДИУСА ВОЛНИСТОСТИ ДЛЯ ПОДЪЕМНЫХ КАНАТОВ ПРИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАВИСИМОСТЯХ

С.В. Поляков, А.Е. Пушкарёв

В статье рассматривается вопрос повышения безопасности эксплуатации подъемных канатов. Предложено соотношение для определения допустимого значения радиуса волнистости для подъемных канатов при нелинейных зависимостях, алгоритм и методика его расчета, показанная на примере типовых канатов. В результате расчетного исследования определено количественное значение допустимого радиуса волнистости, при котором возможна дальнейшая эксплуатация каната, подготовлены рекомендации по повышению безопасности его эксплуатации.

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

THE METHOD OF DETERMINING THE ACCEPTED VALUE OF THE RADIUS WAVINESS TO THE LIFTING ROPES AT NONLINEAR DEPENDENCIES

S.V. Polyakov, A.E. Pushkarev

In the article there is described the issue of increasing safety at lifting rope operation. The algorithm for calculating the accepted value of the radius of undulation for the lifting rope with nonlinear dependencies is presented. An example of the calculation of the accepted value of the radius of undulation of the lifting rope with nonlinear dependencies is given. The quantitative value of the accepted radius of undulation is determined, at which further operation of the rope is possible, recommendations for improving the safety of operation of the lifting rope are prepared.

Keywords: rope, deformation, accepted value, waviness, angle of the coil, the calculation of the rope.

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 каната.

В работах проф. М.Н. Хальфина [1–3] было получено выражение допустимого значения радиуса волнистости на основе линейной теории расчета подъемных канатов. Также была сде-

лана попытка определения количественного значения радиуса волнистости, составляющее 1,08 мм, которое включено в редакцию «Правилами устройства безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов» [4] и «Правилами устройства безопасной эксплуатации пассажирских подвесных и буксировочных канатных дорог». Далее мы попытаемся получить выражение допустимого радиуса волнистости для подъемного каната при нелинейности деформации.

Целью исследования является получение соотношения для определения оптимального значения радиуса волнистости при нелинейных

связях в уравнениях статики и разработка методики его расчета. Знание величины радиуса волнистости при нелинейных связях позволит прогнозировать возможность дальнейшей эксплуатации подъемного каната.

Определение допустимого значения радиуса волнистости при нелинейных зависимостях

В Российской Федерации до 2003 г., согласно Правилам безопасной эксплуатации подвесных канатных дорог [4, 5], запрещалась эксплуатация подъемного каната при визуальном обнаружении неравномерности геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов в канате (волнистости). При этом количественное ограничение диаметра волнистости не было предусмотрено [4]. 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.

Допустимое значение радиуса волнистости при линейности деформаций определяется из условия прочности подъемного каната и для двойной свивки получено профессором М.Н. Хальфиным [3].

В связи с тем, что за период деформации каната происходит изменение геометрических параметров в виде углов свивки и механических свойств винтовых элементов, то на условие прочности каната оказывают влияние нелинейные процессы. С учетом указанных явлений и в результате преобразований условия прочности было получено соотношение для определения допустимого значения радиуса волнистости при нелинейных зависимостях:

$$\frac{d_b}{d_k} \leq 1 + \frac{R_b^H}{R_k} \leq \frac{\frac{1}{2} \left(A_{14} \Delta \varepsilon + A_{24} \Delta \theta + (A_{44} - mg_0) \frac{1}{\rho} + A_{411} \Delta \varepsilon^2 + A_{412} \Delta \varepsilon \Delta \theta + A_{422} \Delta \theta^2 + A_{414} \Delta \varepsilon \frac{1}{\rho} + A_{424} \Delta \theta \frac{1}{\rho} + A_{444} \left(\frac{1}{\rho} \right)^2 \right)}{R_k (A \varepsilon + C \theta + A_{11} \varepsilon^2 + A_{12} \varepsilon \theta + A_{22} \theta^2)}, \quad (1)$$

где d_E – диаметр спирали волнистости; d_k – диаметр стального каната; R_k – радиус каната; R_b^H – радиус волнистости с учетом нелинейности; A, B, C, d, e – агрегатные коэффициенты жесткости каната двойной свивки, полученные и обозначенные в работе [6]; $A_{14}, A_{24}, A_{34}, A_{44}, A_{441}, A_{442}$ – агрегатные коэффициенты жесткости каната двойной свивки [3]; $A_{412}, A_{411}, A_{422}, A_{414}, A_{424}, A_{444}$ – агрегатные коэффициенты жесткости каната двойной свивки, полученные авторами [7, 8].

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

На основании соотношения (1) был разработан алгоритм расчета допустимого значения радиуса волнистости для подъемного каната при нелинейных зависимостях, реализованный на компьютере *IBM PC* с использованием программы *MathCAD* [8]. Параметры свивки подъемного каната с учетом различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов для расчета допустимого значения радиуса волнистости при нелинейных зависимостях определяются в следующей последовательности:

- 1) находят изменение угла свивки подъемного каната с учетом неравномерности геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов;
- 2) определяют 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;
- 3) вычисляют дополнительные деформации: продольные, крутильные и изгибные [5], основные деформации растяжения и кручения;
- 4) определяют нормальные напряжения в поперечном сечении проволоки каната двойной свивки с учетом различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов при нелинейных зависимостях [10];
- 5) рассчитывают запас прочности подъемного каната с учетом различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов при нелинейных зависимостях, меняя растягивающие напряжения – σ_b для круглых проволок в пределах от 160 до 200 МПа;
- 6) определяют допустимое значение радиуса волнистости для подъемного каната при нелинейности деформаций (1).

Примеры расчета допустимого значения радиуса волнистости

При известных конструкциях канатов и их натяжении можно определить допустимое значение радиуса волнистости в нелинейной форме. Для проведения исследований по определению допустимого значения радиуса волнистости полученного в нелинейной форме 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, 16, 21, 30 и 35,5 мм;
- маркировочная группа – 1670 Н/мм², 1960 Н/мм²;
- модуль упругости I рода – $E = 2,1 \times 10^5$ МПа.

В таблице 1 представлены расчетные допустимые значения радиуса волнистости, полученные на основе соотношения (1). При исследовании канатов проф. Хальфиным М.Н. были получены по линейной теории допустимые значения радиуса волнистости, составляющие 1,08 и включенные в редакцию «Правил устройства безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов» [4].

Как было показано ранее, при эксплуатации стальных канатов в них появляются изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов. С помощью полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований было выведено значение допустимого радиуса волнистости

подъемного каната при нелинейных зависимостях, составляющее 1,04–1,05.

Заключение

Полученная методика позволяет, исходя из конструкции подъемного каната, растягивающей нагрузки и запаса прочности, повысить безопасность эксплуатации подъемного каната путем определения с помощью нелинейных уравнений статике допустимого значения радиуса волнистости в канате с учетом образовавшихся в нем изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов [11].

При достижении отношения диаметра спирали волнистости d_v к диаметру каната d_k равного 1,04 рекомендуется прекращение дальнейшей эксплуатации стальных канатов в целях безопасности.

Полученная методика по определению допустимого значения радиуса волнистости при нелинейных зависимостях на 30% эффективнее расчетов, проведенных с помощью линейной теории расчета подъемных канатов.

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 различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов при нелинейных зависимостях. Это призвано обеспечить повышение надежности и долговечности подъемных канатов, что имеет большое практическое значение для строительной отрасли России.

Таблица 1

Допустимые значения радиуса волнистости подъемных канатов при нелинейных зависимостях

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
	16	1960	1,046
	21	1960	1,043
	30	1670	1,042
	35,5	1670	1,042

Список литературы

1. Stiepanov A., Koskin A. A few words more on the properties of viscoelastic winding ropes // Mining Hoisting '96. Vol. 2: International Scientific and Technical Conference; 8–10 October 1996, Gliwice, Poland. P. 65–68.
2. Хальфин М.Н. Расчет шахтного подъемного каната с учетом неодинаковости физико-механических свойств его винтовых элементов // Очистные и проходческие машины и инструменты. 1988. С. 122–126.
3. Хальфин М.Н. Расчет стальных канатов с целью различия геометрических параметров и механических свойств проволок // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. техн. науки. 2005. Спец. выпуск. С. 5–13.
4. Правила устройства безопасной эксплуатации пассажирских подвесных и буксировочных канатных дорог. М.: НПО. ОБТ, 2003. – 80 с.
5. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузовых подвесных канатных дорог. М.: Недра, 1995. – 29 с.
6. Кирьянов Д.В. Самоучитель MathCAD 11. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 560 с.
7. Глушко М.Ф., Малиновский В.А., Шигарина Л.И. Расчет прямого каната с учетом нелинейности деформаций // Прочность и долговечность стальных канатов. 1981. С. 31–37. – Деп. в ЦНТБЧМ.
8. Нелинейные уравнения равновесия прямого каната / М.Ф. Глушко и др. // Прикладная механика. 1979. № 12. С. 127–129.
9. Поляков С.В. Уравнение нелинейной статки 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.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. – Вып. 6. С. 83–88.
10. Поляков С.В. Уравнение нелинейной статки каната спирального каната с учетом волнистости // Новые технологии управления движением технических объектов: материалы 8 Междунар. науч.-техн. конф., г. Новочеркасск, 14 декабря 2005 г. – Ростов-н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. – Вып. 6. С. 88–91.
11. Бережинский В.И., Шатило А.Н. Канаты шахтных подъемных установок. М.: Университетская книга, 2015. – 232 с.

ПОЛЯКОВ Сергей Владимирович

E-mail: 555ots@mail.ru
Тел.: (921) 935-19-57

Аспирант кафедры наземных транспортно-технологических машин, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: теоретические и экспериментальные исследования технологии машиностроения, канатостроение. Автор 12 научных публикаций.

ПУШКАРЕВ Александр Евгеньевич

E-mail: pushkarev-agn@mail.ru
Тел.: (921) 630-52-28

Профессор, доктор технических наук, доцент кафедры наземных транспортно-технологических машин, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет». Сфера научных интересов: теоретические и экспериментальные исследования технологии машиностроения. Автор 40 научных публикаций.