

УДК (УДК) 621.86.065.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДЪЕМНОГО КАНАТА С ВОЗНИКШИМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВИНТОВЫХ
ЭЛЕМЕНТОВTHE STUDY OF THE HOISTING ROPE WITH CHANGES IN GEOMETRIC
PARAMETERS AND MECHANICAL PROPERTIES OF SCREW ELEMENTS

Поляков С.В.

Polyakov S.V.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет” (Санкт-Петербург, Россия)
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Saint Petersburg, Russia)

Аннотация. При нагружении каната осевой растягивающей нагрузкой с учетом изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов пряди (проволоки) слоев взаимодействуют друг с другом и получают упругую деформацию, в связи с чем в канате возникает волнистость. Основным экспериментом, который может подтвердить правильность исследования напряженно-деформированного состояния подъемного каната с учетом волнистости при нелинейных зависимостях, является исследование деформаций растяжения и кручения канатов, изготовленных как с учетом образовавшихся изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, так и без учета образовавшихся изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов. Для исследования напряженно-деформированного состояния подъемного каната были изготовлены экспериментальные образцы подъемных канатов. Для проведения эксперимента было создано устройство, которое производит замер деформаций растяжения и кручения с достаточной точностью в лабораторных условиях с применением разрывной машины УММ-5. Экспериментально было определено удлинение каната и угол поворота. На основе полученных данных сделан вывод по использованию подъемных канатов, изготовленных как с учетом различия геометрических параметров, так и без учета геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов каната. Результаты экспериментальных исследований могут быть востребованы при конструировании подъемных канатов, а также при их эксплуатации.

Ключевые слова: канат, деформация, растяжение, волнистость, кручение, изгиб.

Дата принятия к публикации: 30.04.2019
Дата публикации: 25.06.2019

Сведения об авторе:

Поляков Сергей Владимирович – аспирант, ФГБОУ ВО “Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет”, 555ots@mail.ru.

Abstract. When loading the rope considering changes in the geo-metric parameters and mechanical properties of the screw elements of the axial tensile strands (wire) layers, interact with each other, get an elastic deformation, and therefore there is a waviness in the rope. The main experiment that can confirm the feasibility of the study of the stress-strain state of the lifting rope, taking into account the undulation in nonlinear relationships, is the study of the strain of stretching and torsion of ropes made both taking into account the developed changes in the geometric parameters and mechanical properties of the screw elements, and without taking into account the resulting changes in the geometric parameters and mechanical properties of the screw elements. To study the stress-strain state of the lifting rope, experimental samples of lifting ropes were made. To conduct the experiment, a device was created that measures the tensile and torsional deformations with enough accuracy in the laboratory conditions with the use of the breaking machine UMM-5. In laboratory-ton conditions, it was determined the elongation of the rope and the angle of rotation. Based on the data obtained, it was concluded that the use of lifting ropes made both considering the difference in geometric parameters and without considering the geometric parameters and mechanical properties of the screw elements of the rope. The results of experimental studies may be in demand in the construction of lifting ropes, as well as in their operation.

Keywords: rope, strain, tension, undulation, twist, bend.

Date of acceptance for publication: 30.04.2019
Date of publication: 25.06.2019

Author's information:

Sergey V. Polyakov – postgraduate, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 555ots@mail.ru.



1. Введение

Подъемный канат как гибкий элемент, способный нести высокую растягивающую нагрузку, широко применяется в современной подъемно-транспортной технике. Сейчас трудно себе представить работу многих важнейших отраслей народного хозяйства без широкого использования подъемных канатов. Прежде всего, это относится к строительной, горнодобывающей промышленности, где канат широко используемым в подъемно-транспортном оборудовании. Работа каната и связанных с ним механизмов во многом зависит от правильности его конструктивного использования согласно с условиями эксплуатации и точности расчета на прочность. 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 суток). При эксплуатации подъемных канатов на высоких подъемах, глубоких шахтах, работающих в условиях свободного подвеса, происходит их значительное раскручивание при растяжении. В результате происходит изменение углов свивки винтовых элементов каната, вызывающее геометрически нелинейный характер деформаций. В этом случае расчет каната с использованием недеформируемой расчетной схемы дает значительные погрешности. Браковка подъемных канатов в первые месяцы их эксплуатации по причине образования в них волнистости и обрывов проволок приводит к экономическим и социальным затратам [1-3]. Поэтому научные исследования, направленные на определение показателей, влияющих на качество стального подъемного каната с учетом волнистости, являются актуальными.

2. Постановка задачи исследования

Эксплуатация подъемных канатов в условиях, обуславливающих их кручение, вызывает явление геометрической нелинейности, которое экспериментальным путем подтвер-

ждено в работах [4, 5] на примерах свободного растяжения канатов.

Проведение подобных экспериментов связано с трудностью доступа к прядям (проволам) внутренних слоев в момент приложения растягивающей нагрузки и сложностью измерения деформаций прядей (проволок), вызванных этой нагрузкой. Из существующих методов необходимо выбрать такой, который бы обеспечивал надежность и достоверность выводов.

В связи с этим основными задачами проведенных исследований являлись:

- 1) изготовление образцов стальных канатов, соответствующих конструкциям, применяемым в настоящее время, а также конструирование и изготовление образцов канатов, с учетом возникших изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов;
- 2) определение деформации в канате при различном натяжении винтовых элементов;
- 3) выбор наиболее простого и надежного метода исследования напряжений, учитывающий изменение геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

3. Объект исследования

Вследствие различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, расположенных в одном слое, продольная ось каната при нагружении растягивающей нагрузкой принимает форму винтовой спирали, т.е. приобретает волнистость. Согласно «Правилам устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов» [6] запрещается навешивать и эксплуатировать подъемные канаты с волнистостью. Кроме того, в [6] не предусмотрено количественное ограничение радиуса волнистости, при котором возможна дальнейшая эксплуатация таких кранов [7].

Анализ профильного международного стандарта ИСО [8] показывает, что в нем отсутствует описание волнистости, которая появляется вследствие различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

Исследование напряженно-деформированного состояния подъемного каната с учетом волнистости необходимо проводить с использованием образцов канатов, отвечающих требованиям ГОСТ [9, 10].

Основными этапами проведения подготовительных работ являются:

- выбор материала;
- выбор конструкции образца каната;
- изготовление канатов;
- подготовка образцов к эксперименту;
- подготовка концов каната к проведению эксперимента.

Важным этапом при проведении эксперимента является выбор конструкции и изготовление образцов каната. Было рассмотрено несколько вариантов образцов канатов с металлическим сердечником. Для экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния подъемного каната с учетом образовавшихся в нем изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов было изготовлено из металлической проволоки 8 образцов [11]. Спиральных канатов было выбрано 4 образца диаметром 2,4 мм и 5 мм. Образцы диаметром 2,4 мм и 5 мм были изготовлены как с различным натяжением (рис. 1 и 3), так и с равномерным натяжением проволок (рис. 2 и 4). Аналогичным образом были изготовлены и канаты двойной свивки (рис. 5-8).

Проволока 1, 5 спирального каната диаметром 2,4 мм имела натяжение 30 Н, а проволоки 2, 4, 6 и сердечник - 15 Н, к проволоке 3 прикладывалось натяжение 35 Н.

К проволокам 1, 4 и 5 спирального каната диаметром 5 мм прикладывалось натяжение 30 Н, к проволокам 2, 3, 6 - 15 Н, сердечник имел натяжение 70 Н.

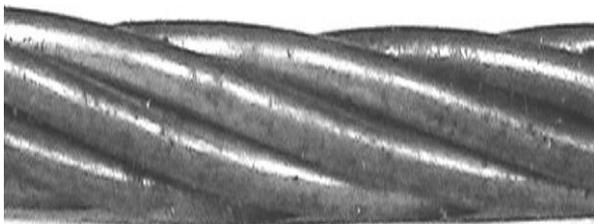


Рис. 1. Образец № 1 спиральной свивки диаметром 2,4 мм изготовленный с неравномерным натяжением проволок

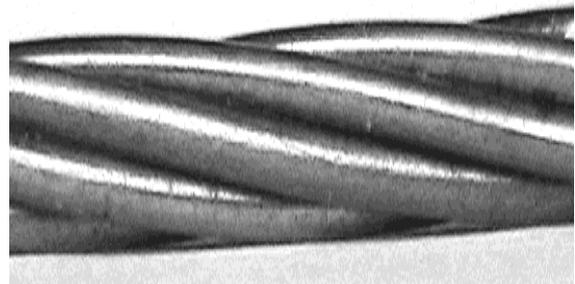


Рис. 2. Образец № 2 спиральной свивки диаметром 2,4 мм изготовленный с равномерным натяжением проволок

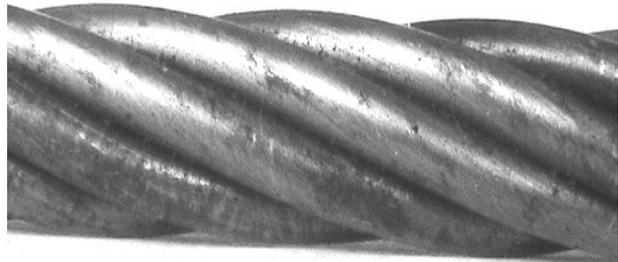


Рис. 3. Образец № 3 спиральной свивки диаметром 5 мм изготовленный с неравномерным натяжением проволок



Рис. 4. Образец № 4 спиральной свивки диаметром 5 мм изготовленный с равномерным натяжением проволок

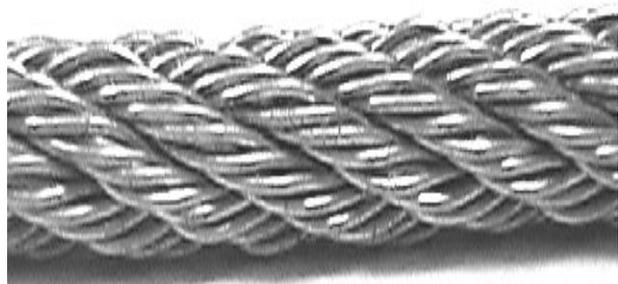


Рис. 5. Образец № 1 каната двойной свивки диаметром 3,4 мм изготовленный с неравномерным натяжением



Рис. 6. Образец № 2 каната двойной свивки диаметром 3,4 мм 4 мм изготовленный с равномерным натяжением прядей

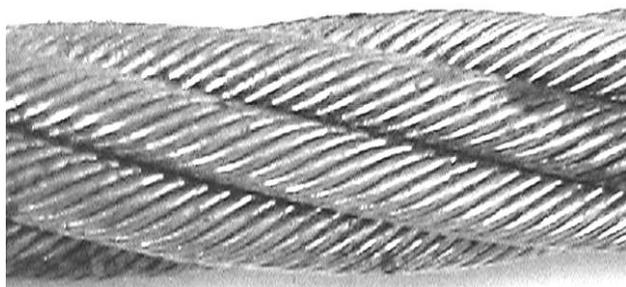


Рис. 7. Образец № 3 каната двойной свивки диаметром 4 мм изготовленный с неравномерным натяжением прядей

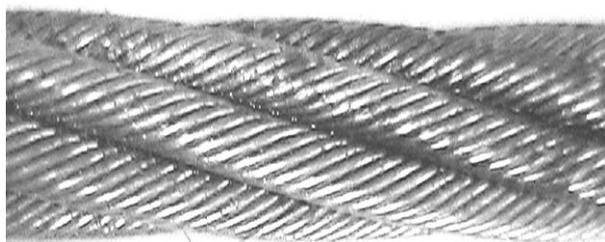


Рис. 8. Образец № 4 каната двойной свивки диаметром изготовленный с равномерным натяжением прядей

Пряди 1, 3 каната двойной свивки диаметром 3,4 мм подвергались натяжению 10

Н, пряди 2,6 – натяжению 20 Н, прядь 4 - натяжение 35 Н, прядь 5 - натяжению 12,5 Н, сердечник – натяжению 5 Н.

К прядям 2, 3 каната двойной свивки диаметром 4 мм прикладывалось натяжение 35 Н, к прядям 4, 5 - натяжение 10 Н, к пряди 1 - натяжение 12,5 Н, к пряди 6 и сердечнику - натяжение 20 Н.

Один образец спирального каната диаметром 2,4 мм был изготовлен с радиусом волнистости $R_g = 0,24$ мм, а другой образец спирального каната диаметром 5 мм - с радиусом волнистости $R_g = 0,58$ мм. Образцы каната двойной свивки диаметром 3,4 мм и 4 мм были изготовлены с радиусами волнистости соответственно $R_g = 0,69$ мм и $R_g = 0,58$ мм.

Образец спирального каната диаметром 2,4 мм с равномерным натяжением был изготовлен с натяжением проволок 10 Н, образец диаметром 5 мм - с натяжением проволок 30 Н.

Пряди каната двойной свивки диаметром 3,4 мм подвергались натяжению 5 Н, а пряди каната двойной свивки диаметром 4 мм - натяжению 10 Н [12, 13].

В табл. 1 представлены основные параметры свивки образцов спиральных канатов.

В табл. 2 представлены параметры свивки каната двойной свивки.

Все образцы подъемных канатов изготовлены на действующем оборудовании в экспериментальной лаборатории. Машина выбиралась с возможностью изготовления канатов как с различным натяжением проволок (прядей) так и с равномерным натяжением для исследования деформаций кручения и растяжения в данных образцах канатов [14-16].

Таблица 1

Параметры свивки экспериментальных образцов спиральных канатов

Параметр свивки	Значение параметра свивки для образца каната			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Конструкция каната	1+6	1+6	1+6	1+6
Диаметр проволок, мм	0,8	0,8	1,5	1,5
Диаметр сердечника, мм	0,8	0,8	1,5	1,5
Диаметр каната, мм	2,4	2,4	5	5
Шаг свивки каната, мм	49	60	40	32
Угол свивки каната, рад	0,153	0,125	0,374	0,456
Направление свивки каната	правая	правая	правая	правая
Радиус волнистости, мм	0,24	-	0,58	-

Таблица 2

Параметры свивки экспериментальных образцов каната двойной свивки

Параметр свивки	Значение параметра свивки для образца каната			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Конструкция каната	6x9(1+6)+ +1x7(1+6)	6x9(1+6)+ +1x7(1+6)	6x19(1+6+12)+ +1x7(1+6)	6x19(1+6+12)+ +1x7(1+6)
Диаметр проволок, мм	0,26	0,26	0,29	0,29
Диаметр пряди, мм	1,1	1,1	1,3	1,3
Диаметр каната, мм	3,4	3,4	4	4
Шаг свивки пряди, мм	16	16	7	7
Угол свивки пряди, рад	0,231	0,231	0,561	0,561
Шаг свивки каната, мм	48	54	70	67
Угол свивки каната, рад	0,219	0,198	0,178	0,185
Направление свивки каната	правая	правая	правая	правая
Радиус волнистости, мм	0,691	-	0,58	-

После изготовления образцы подготавливались к проведению эксперимента. Образцы подъемных канатов были изготовлены длиной 550 мм, причем образцы считались годными при отсутствии видимых дефектов (жучков, смятий, обрывов проволок).

Длина образца была выбрана равной 550 мм из условия размещения в разрывной машине УММ-5.

Верхний и нижний концы опытных образцов каната заливались баббитом.

4. Результаты исследования

Экспериментальные исследования с применением сконструированного устройства и методики проведения исследований проводились в экспериментальной лаборатории на образцах с различным натяжением и с равномерным натяжением винтовых элементов.

Устройство крепилось на экспериментальном образце каната, в свою очередь об-

разец устанавливался в зажимы разрывной машины УММ-5. Аппаратура устанавливалась на расстоянии 2 м.

Испытывались четыре пары образцов, причем обследовалось напряженное состояние образцов как с учетом различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, так и с равномерным натяжением винтовых элементов.

В результате расшифровки осциллограмм получены экспериментальные данные об удлинении и угле поворота каната с учетом различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов [17]. Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 3. В табл. 3 занесены средние значения удлинения и угла поворота, а также деформаций растяжения и кручения при натяжении 1000 Н.

После сопоставления с длиной образца получим значения деформаций растяжения и кручения, которые представлены в табл. 4.

Таблица 3

Экспериментальные значения удлинения и угла поворота канатов (при 1000 Н)

№ п/п	Конструкция каната	Диаметр каната, мм	R_0 , мм	Удлинение, мм	Угол поворота, град
1	1+6	2,4	0,24	0,6	0,0037
2	1+6	5	0,58	0,85	0,012
3	6x9(1+6)+ +1x7(1+6)	3,4	0,691	0,55	0,008
4	6x9(1+6)+ +1x7(1+6)	4	0,58	0,41	0,0078

Таблица 4

Экспериментальные значения деформаций растяжения и кручения

№ п/п	Конструкция каната	Диаметр каната, мм	R_b , мм	Удлинение, ε , мм/мм	Кручение, θ , рад/м	Натяжение, Н
1	1+6	2,4	0,24	0,00109	0,00039	1000
				0,0021	0,00072	1500
				0,00297	0,000998	2000
				0,0033	0,00108	2500
				0,00353	0,001154	3000
2	1+6	5	0,58	0,00155	0,000396	1000
				0,0031	0,000732	3000
				0,0045	0,000984	5000
				0,0056	0,001153	7000
				0,0065	0,001284	9000
				0,007	0,001363	11000
				0,0074	0,00142	13000
3	6x9(1+6)+ +1x7(1+6)	3,4	0,691	0,001	0,000246	1000
				0,001731	0,000448	2000
				0,002074	0,000582	3000
				0,002207	0,000657	4000
				0,002291	0,000713	5000
4.	6x9(1+6)+ +1x7(1+6)	4	0,58	0,00123	0,000244	2000
				0,00215	0,000475	4000
				0,0027	0,000666	6000
				0,003	0,0008	8000
				0,0032	0,000873	10000

Полученные экспериментальные результаты, представленные в табл. 3 и 4, были использованы для проведения сравнительного анализа с теоретическими данными.

5. Заключение

В результате проведенных исследований было установлено, что у каната с одинаковыми геометрическими параметрами и механическими свойствами винтовых элементов деформации растяжения и кручения на порядок меньше, чем у канатов изготовленных с учетом различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов. Причем у канатов с учетом различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов острее проявляется нелинейность деформаций. Так, для канатов спиральной свивки диаметром 2,4 и 5 мм деформации растяжения в среднем боль-

ше в 1,3 и 1,33 раза, а кручения - в 1,38 и 2 раза по сравнению с канатом с одинаковыми геометрическими параметрами и механическими свойствами проволок. Для канатов двойной свивки диаметром 3,4 и 4 мм деформации растяжения в среднем больше в 1,6 и 1,44 раза, а кручения - в 1,4 и 1,2 раза. В целом, деформации растяжения и кручения при приложении нагрузки к канату, изготовленному с учетом различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, в среднем 1,5 раза больше деформаций, чем у канатов с одинаковыми геометрическими параметрами и механическими свойствами винтовых элементов.

Результаты проведенного исследования могут быть востребованы при конструировании подъемного каната, а также при его эксплуатации на больших подъемах в подъемно-транспортном оборудовании.

Список литературы

1. Stiepanov, A. A few words more on the properties of viscoelastic winding ropes / A. Stiepanov, A. Koskin // *Minine hoisting '96*. Vol. 2: International Scientific and Tehnical Conference; 8–10 October 1996, Gliwice, Poland. – Pp. 65-68.
2. Nemtsov, M.V. A magnetic method of wire-rupture detection in steel cables / M.V. Nemtsov, G.D. Trifanov // *Russian Electrical Engineering*. - 2017. - Vol. 88. - № 5. - Pp. 285-288.
3. Chayun, I.M. Tension optimization of the conductor and support cable elements during stranding process / I.M. Chayun, A.V. Nepomnyashchyi // *Труды Одесского политехнического университета*. - 2016. - № 3 (50). - С. 21-28.
4. Хальфин, М.Н. Расчет шахтного подъемного каната с учетом неодинаковости физико-механических свойств его винтовых элементов / М.Н. Хальфин // *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 / М.Н. Хальфин // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки*. – 2005. – Спец. выпуск. – С. 5–13.
6. Правила устройства безопасной эксплуатации пассажирских подвесных и буксировочных канатных дорог. – М.: НПО ОБТ, 2003. – 80 с.
7. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». Сер. 03. Вып. 78 / ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности». – М., 2014. – 276 с.
8. Lepekha, O. Increasing the residual life of hoisting cables by improving the methods of their deflected mode calculation / O. Lepekha // *Вестник Харьковського національного автомобільно-дорожного університету*. - 2012. - № 57. - С. 289-291.
9. Глушко, М.Ф. Стальные подъемные канаты / М.Ф. Глушко. – Киев: Техника, 1966. – 327 с.

References

1. Stiepanov A., Koskin A. *A few words more on the properties of viscoelastic winding ropes*. *Minine hoisting 96*. Vol. 2: International Scientific and Tehnical Conf., 8–10 October 1996, Gliwice, Poland, pp. 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, pp. 285-288. (In Russian).
3. Chayun I.M., Nepomnyashchyi A.V. Tension optimization of the conductor and support cable elements during stranding process. *Proceedings of the Odessa Polytechnic University*, 2016, No. 3 (50), pp. 21-28.
4. Halfin M.N. Raschet shakhtnogo podemnogo kanata s uchetom neodinakovosti fiziko-mekhanicheskikh svoystv ego vintovykh elementov. *Ochistnye i prohodcheskie mashiny i instrument*. Novocherkassk, 1988, pp. 122–126. (In Russian).
5. Halfin M.N. Raschet stalnykh kanatov s tselyu razlichiya geometricheskikh parametrov i mekhanicheskikh svoystv provolok. *Izvestiya. vuzov. Sever-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki*, 2005, Spec. issue, pp. 5–13. (In Russian).
6. *Pravila ustroystva bezopasnoy ekspluatatsii passazhirskikh podvesnykh i buksirovochnykh kanatnykh dorog*. Moscow, NPO OBT, 2003. 80 p. (In Russian).
7. *Federalnye normy i pravila v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Pravila bezopasnosti pri vedenii gornykh robot i pererabotke tverdykh poleznykh iskopaemykh»*. Ser. 03. Vyp. 78. Moscow, ZAO «Nauchno-tekhnicheskii tsentr issledovaniy problem promyshlennoy bezopasnosti», 2014. 276 p. (In Russian).
8. Lepekha O. Increasing the residual life of hoisting cables by improving the methods of their deflected mode calculation. *Vestnik Harkovskogo nacionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta*, 2012, No. 57, pp. 289-291.
9. Glushko M.F. *Stalnye podemnye kanaty*. Kiev, Tekhnika, 1966. 327 p.
10. Glushko M.F. Nelineynye uravneniya ravnovesiya pryamogo kanata. *Prikladnaya mekhanika*, 1979, No. 12, pp. 127–129. (In Russian).

10. Глушко, М.Ф. Нелинейные уравнения равновесия прямого каната / М.Ф. Глушко // Прикладная механика. – 1979. – №12. – С. 127–129.

11. Хальфин, М.Н. Уравнения нелинейной статики кранового каната с учетом различия геометрических параметров и механических свойств проволок / М.Н. Хальфин, В.С. Исаков // Результаты исследований-2015: матер. I Нац. конф. проф.-препод. состава и научн. работников. – Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2015. – С. 143-145.

12. Поляков, С.В. Уравнение нелинейной статики каната двойной свивки с учетом волнистости / С.В. Поляков // 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.

13. Поляков, С.В. Уравнение нелинейной статики каната спирального каната с учетом волнистости / С.В. Поляков // 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.

14. Осипова, Т.Н. Уменьшение динамических нагрузок в канатах барабанных подъемников / Т.Н. Осипова, А.П. Нестеров // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 2. – № 7 (68). – С. 17-22.

15. Кошкин, А.П. Канаты для подъемных установок / А.П. Кошкин, Г.Д. Трифанов. – Пермь: Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, 2014. – 107 с.

16. Калюжина, А.А. Напряжения в несущих закрытых канатах подвесных канатных дорог при их эксплуатации / А.А. Калюжина, А.А. Фурманюк, М.Н. Хальфин // Депонир. рук. № 359-B2014 30.12.2014.

17. Пат. US 5565771 (A) Канада. МПК G01N27/82. Apparatus for increasing linear resolution of electromagnetic wire rope testing/Michel Hamelin, Frank Kitzienger. 1996.

(Russian).

11. Halfin M.N., Isakov V.S. Uravneniya nelineynoy statiki kranovogo kanata s uchetom razlichiya geometricheskikh parametrov i mekhanicheskikh svoystv provolok. *Sbornik materialov I Nacionalnoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava i nauchnykh rabotnikov "Rezultaty issledovaniy-2015"*. Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy politekhnicheskii universitet (NPI) imeni M.I. Platova, 2015, pp. 143-145. (In Russian).

12. Polyakov S.V. Uravnenie nelineynoy statiki kanata dvoynoy svivki s uchetom volnistosti. *Materialy 8 Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. "Novye tekhnologii upravleniya dvizheniem tekhnicheskikh obektov"*, Novocherkassk, 14 dekabrya 2005. Rostov-n/D, SKNC VSH, 2006, I. 6, pp. 83–88. (In Russian).

13. Polyakov S.V. Uravnenie nelineynoy statiki kanata spiralnogo kanata s uchetom volnistosti. *Materialy 8 Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. "Novye tekhnologii upravleniya dvizheniem tekhnicheskikh obektov"*, Novocherkassk, 14 dekabrya 2005. Rostov-n/D, SKNC VSH, 2006, I. 6, pp. 88–91. (In Russian).

14. Osipova T.N., Nesterov A.P. Umen'shenie dinamicheskikh nagruzok v kanatakh barabannykh podemnikov. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologii*, 2014, Vol. 2, No. 7 (68), pp. 17-22. (In Russian).

15. Koshkin A.P., Trifanov G.D. *Kanaty dlya podemnykh ustanovok*. Perm, Permskiy natsionalnyy issledovatel'skiy politekhnicheskii universitet, 2014. 107 p. (In Russian).

16. Kalyuzhina A.A., Furmanyuk A.A., Halfin M.N. *Napryazheniya v nesushchikh zakrytykh kanatakh podvesnykh kanatnykh dorog pri ikh ekspluatatsii*. Preprint No. 359-V2014, 30.12.2014 (In Russian).

17. Patent US 5565771 (A). МПК G01N27/82. Apparatus for increasing linear resolution of electromagnetic wire rope testing. Hamelin M., Kitzienger. F. 1996. <https://www.google.com/patents/US5565771>.