

УДК 621.89

doi 10.54708/19926502_2025_29110788

Исследование долговечности стальных канатов в зависимости от применяемого смазочного материала и внешних условий эксплуатации

В.П. Головин

Хозрасчетный творческий центр Уфимского авиационного института, г. Уфа, Россия

Аннотация. В работе представлена зависимость определения числа циклов изгиба стального каната до разрушения в зависимости от типа стального каната, его эксплуатационных факторов, а также применяемого смазочного материала и внешних условий эксплуатации. Разработана методика определения значений коэффициентов C_1 и K , учитывающих влияние применяемого смазочного материала и внешние условия эксплуатации стального каната соответственно. Установлено, что смазочный материал увеличивает долговечность стального каната минимум в 1,9 раза при испытании в нормальных климатических условиях, в 1,7 раза при воздействии отрицательной температуры минус 60 °С и в 1,3 раза при воздействии морской воды по отношению к несмазанному канату.

Ключевые слова: канатный смазочный материал, стальной канат, испытания, долговечность стального каната.

rosoil@rosoil.ru

Введение

С момента промышленного применения стальных проволоочных канатов (1827 г.) проблема определения ресурса канатов стояла на первом месте. Одним из первых исследователей в 1915 г. были экспериментально установлены два основных фактора, влияющих на ресурс стального каната:

- отношение d/D , где d – диаметр каната, а D – диаметр огибаемого блока или барабана;
- число перегибов каната на блоке, N .

В последующем, исследования влияния различных факторов на ресурс стального каната продолжались. Некоторые обобщения таких исследований приводились и в технической литературе. Например, в книге профессора Бетмана Г., шестое издание которой было переведено на русский язык в 1930 г., приведены результаты исследований других зарубежных ученых, выполненных в 1915–1924 годах. В нашей стране такие работы проводились профессором Житковым Д.Г., были предложены зависимости для определения ресурса стальных канатов отечественного производства. В исследованиях учитывались следующие факторы: металлургические, технологические, конструктивные, эксплуатационные. Целью исследований было установление зависимостей ресурса канатов в числе перегибов на блоках N , от усилия растяжения F и отношения d/D , а также от названных выше факторов. Такие исследования проводились и в последующем, их результаты приведены в многочисленных работах [1–5].

В 1961–1965 годы во «ВНИИнефтемаш» на пробегной машине был проведен комплекс работ по выявлению усталостных характеристик талевого каната при работе на шкивах. Данные экспериментов представлены в Табл. 1.

Таблица 1. Показатели испытаний на усталость талевых канатов с органическим сердечником при изгибах на шкивах.

Диаметр каната d_k , мм	Предел прочности материала проволоки, МПа	Растягивающее усилие в канате, Т, кН	Число циклов изгибов каната до разрушения, N	Коэффициент пропорциональности, С
25	1666	105,5	$44,8 \times 10^3$	$2,64 \times 10^3$
28	1666	93,3	$69,2 \times 10^3$	$4,65 \times 10^3$
32	1666	122,3	$51,2 \times 10^3$	$8,14 \times 10^3$
35	Прогнозируется			

Обработка статистических данных показала, что число циклов изгибов каната до разрушения при работе на шкивах выражается зависимостью (1):

$$N = \frac{\left(\frac{D}{d}\right)^k}{T^m} * C, \quad (1)$$

где N – число изгибов каната до разрушения, D – диаметр шкива, d – диаметр каната; $k = 2,5 \dots 3$ – показатель степени, $m = 1,7$ – показатель степени кривой усталости каната, T – усилие в канате, C – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции и типоразмера каната [6].

Методика оценки долговечности стальных канатов, базирующаяся на кривых усталости, на данном этапе отсутствует из-за недостаточности статистических экспериментальных данных в области усталостной прочности канатной проволоки и конструктивных особенностей каната, влияющих на его долговечность.

В зависимости от типоразмера замена вышедшего из строя стального каната может составлять существенные затраты, которые определяются не только стоимостью самого каната, но и стоимостью доставки каната к месту замены. Например, доставка каната в отдаленные, труднодоступные районы или на платформы морского нефтегазового комплекса является дорогостоящей. Учитывая большие финансовые затраты и время на подготовку, закупку и доставку нового каната к месту замены, необходимо заблаговременно планировать данную операцию. Однако момент возникновения необходимости замены стального каната зависит от многих факторов, которые определяются как техническими характеристиками самого каната, так и конкретными условиями его эксплуатации.

Одним из элементов конструкции стального каната является смазочный материал, наносимый на канат во время производства и эксплуатации, который противодействует износу и защищает от коррозии. Общеизвестно, что смазочный материал позволяет повысить ресурс стального каната в несколько раз, но на данный момент отсутствуют методики оценки долговечности стального каната в зависимости от применяемого смазочного материала и внешних условий эксплуатации [7]. При производстве канатных смазочных материалов, производители руководствуются физико-химическими показателями, которые не всегда достоверно отражают свое влияние на долговечность стального каната. В данной работе предпринята попытка предложить такие методики, использование которых позволит рассчитать число циклов изгибов стального каната до разрушения при работе на шкивах, учитывая влияние смазочного материала и его внешние условия эксплуатации.

Методы и материалы

Стальной канат относится к сложной, неремонтопригодной металлоконструкции, математический расчет долговечности которой крайне затруднителен. Натурное испытание конструкции стального каната на износостойкость, включая испытание влияния различных смазочных материалов в различных условиях эксплуатации, является чрезвычайно дорогостоящим и длительным процессом, поэтому перед такими испытаниями целесообразно произвести предварительный расчет долговечности или лабораторные испытания износостойкости стального каната.

ГОСТ 2172-80 «Канаты стальные авиационные. Технические условия (с Изменениями № 1–5)» предусматривает при приемке стального каната его испытание на выносливость по ГОСТ 2387-80 «Канаты стальные. Методы испытания на выносливость». Данный метод заключается в испытании стального каната на установке по предложенной схеме (Рис. 1) с определенным натяжением ветви каната и диаметром сменного ролика в зависимости от диаметра каната. В соответствии с требованиями стандартов на металлопродукцию испытание проводят:

- до обрыва первой проволоки образца;
- до заданного числа обрывов проволок на длине одного шага свивки образца;

- до заданного числа изгибов образца вокруг сменного ролика;
- до полного разрушения образца каната.

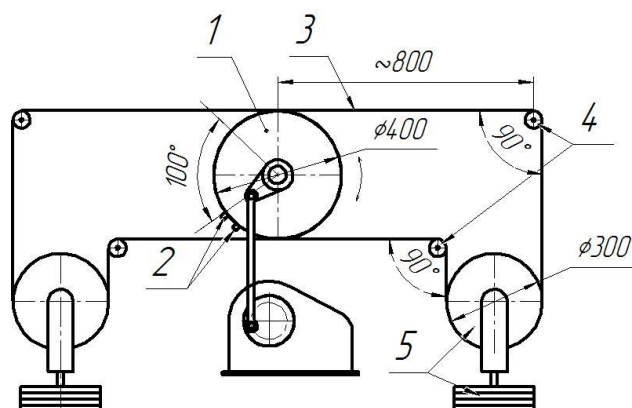


Рисунок. 1. Схема машины для испытания стальных канатов на выносливость:
1 – ведущий барабан, 2 – зажимы, 3 – испытуемый образец, 4 – сменные ролики,
5 – грузовой ролик с грузом.

Однако данный метод, так же, как и зависимость (1), не учитывает наличие и влияние смазочного материала, нанесенного на стальной канат, а также внешние условия эксплуатации [8].

Для их учета предлагается в зависимость (1) добавить дополнительные коэффициенты C_1 и K , тогда зависимость примет вид:

$$N = \frac{\left(\frac{D}{d}\right)^k}{T^m} * C * C_1 * K, \quad (2)$$

где C_1 – коэффициент, характеризующий свойства смазочного материала, K – коэффициент, учитывающий внешние условия эксплуатации.

Значения коэффициентов C_1 и K можно определить экспериментальным путем при проведении серии испытаний на износостойкость стального каната при воздействии различных внешних условий эксплуатации и исследованием различных смазочных материалов в лабораторных условиях.

Для экспериментального определения коэффициентов C_1 и K имеются способ и устройство для испытания стальных канатов на выносливость в жидких агрессивных средах при повышенных или пониженных температурах [9].

Суть метода испытания стальных канатов на выносливость в жидких агрессивных средах заключается в том, что установка дополнительно оснащается направляющим роликом и съемной емкостью, в которую заливается жидкая среда, например, пресная или соленая (морская) вода (Рис. 2).

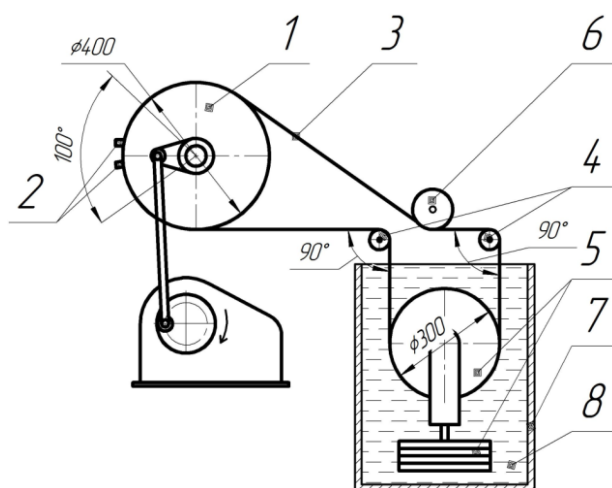


Рисунок 2. Схема машины для испытания канатов на выносливость в жидких средах:

- 1 – ведущий барабан, 2 – зажимы для крепления образца каната, 3 – образец каната,
4 – сменные ролики, 5 – грузовой ролик с грузом, 6 – направляющий ролик,
7 – съемная емкость, 8 – жидкая среда.

Испытание стальных канатов на выносливость при повышенных или пониженных температурах проводят на установке, установленной в термохолодамере, где во время испытания поддерживается заданная температура, например, плюс 60 °С или минус 60 °С (Рис. 3).

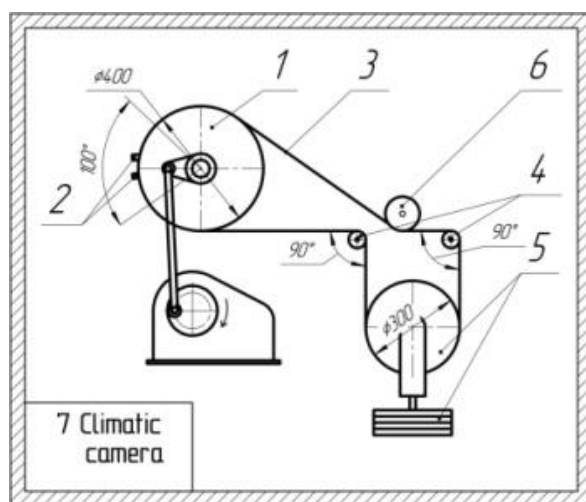


Рисунок 3. Схема машины для испытания канатов на выносливость при повышенных или пониженных температурах:

- 1 – ведущий барабан, 2 – зажимы для крепления образца каната, 3 – образец каната,
4 – сменные ролики, 5 – грузовой ролик с грузом, 6 – направляющий ролик,
7 – термохолодамера.

Испытания стального каната по данным методикам позволяют при минимальных затратах определить значения коэффициентов C_1 и K и оценить влияние смазочного материала и внешних воздействующих факторов, влияющих на износостойкость стального каната, в наибольшей степени достоверно отражая долговечность стального каната в реальных условиях эксплуатации [10–11].

Для определения значений данных коэффициентов на предприятии ПАО «Мечел» был заказан стальной канат марки 5,6-Г-1-Н-Р-1770, изготовленный по ГОСТ 2688-80 «Канаты двойной свивки типа ЛК-Р 6×19(1+6+6/6)+1 о.с. Сортамент», при изготовлении которого на сердечник, пряди и канат в целом смазочный материал не наносился. Данный тип каната был

выбран исходя из его конструктивной схожести с талевым канатом, который был исследован в вышеописанной работе.

Для определения значений коэффициента C_1 использовалась канатная смазка Росойл - Торсиол-55, изготовленная по требованиям ГОСТ 20458-2022 «Смазка Торсиол-55. Технические условия», а также канатная смазка Росойл - Торсиол - 35, изготовленная по ТУ 0254-076-06377289-2012 и являющаяся наиболее универсальным смазочным материалом, применяемым в нашей стране производителями и потребителями стальных канатов.

Результаты и обсуждение

На первом этапе проводились испытания в соответствии с ГОСТ 2387-80 «Канаты стальные. Метод испытания на выносливость» при скорости вращения барабана 120 колебаний в минуту, обеспечивающей возвратно-поступательное перемещение образца стального каната на длине примерно 350 мм. Нагрузка на одну ветвь каната составляла 245 Н. Сменные ролики диаметром 55 мм обеспечивали изгиб образца на 90°. Диаметр сменных роликов и нагрузка на одну ветвь каната выбирались по ГОСТ 2172-80 «Канаты стальные авиационные. Технические условия».

Поскольку ГОСТ 2387-80 «Канаты стальные. Метод испытания на выносливость» не устанавливает требований по поддержанию определенного диапазона температуры и влажности окружающего воздуха, испытания проводились при температуре 15–25 °С и относительной влажности 20–70%, результаты которых представлены в Табл. 2. Стоит отметить, что усталостные испытания характеризуются большим разбросом результатов, поэтому при проведении данной работы испытывались по 15 образцов каждого вида каната и замерялось число изгибов стального каната о рабочий ролик до полного разрушения образца.

Таблица 2. Результаты испытаний стального каната на выносливость по ГОСТ 2387.

Показатель		Канат без смазки	Канат пропитан Росойл-Торсиол - 35	Канат пропитан Росойл-Торсиол - 55
Количество изгибов образца до полного разрушения каната	$X_{\max}$	179 753	550 903	349 829
	$X_{\min}$	100 617	336 604	149 629
	$\bar{X}$	141 089	405 754	269 904

Полученные данные можно использовать для расчета коэффициента пропорциональности C , значение которого зависит от конструкции и типоразмера стального каната. В нашем случае коэффициент пропорциональности определен для стального каната марки 5,6-Г-1-Н-Р-1770.

Для исследуемого стального каната без смазочного материала и в нормальных климатических условиях значения коэффициентов C_1 и K принимаем равными единице, а значение коэффициента пропорциональности C , рассчитанное исходя из формулы (2), составит 27,05.

Зная значение коэффициента пропорциональности C и результаты испытаний стального каната, пропитанного различными смазочными материалами, на выносливость, по формуле (2) можно определить значение коэффициента C_1 , которое будет равно 2,875 и 1,913 для смазок Росойл-Торсиол-35 и Росойл-Торсиол-55 соответственно.

Сравнивая полученные результаты значений коэффициентов C и C_1 с результатами, полученными предыдущими исследователями, в работах которых исследовался смазанный канат, можно предположить, что коэффициент пропорциональности имеет функциональную зависимость от диаметра каната $C=f(d)$ (рис. 4), на которой видно, что определенные нами значения коэффициентов соответствуют данной зависимости.

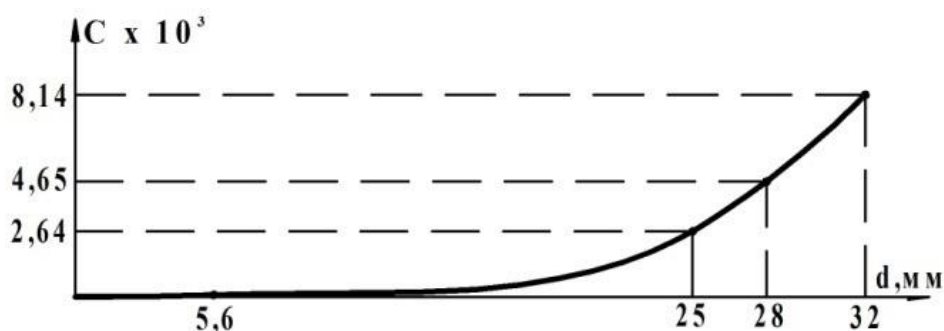


Рисунок 4. Зависимость коэффициента пропорциональности от диаметра каната.

Используя значения коэффициентов C и C_1 , а также результаты испытаний стального каната на выносливость по предложенной методике, определяем значение коэффициента K , который позволит учитывать внешние условия эксплуатации при расчете числа изгибов стального каната до разрушения.

Если в нормальных климатических условиях значение коэффициента K равно единице, то, используя результаты испытаний стального каната при минус 60°C , приведенные в Табл. 3, по формуле (2) определяем значения коэффициента K , которые будут равны 0,973, 0,590 и 1,286 для стального каната без смазочного материала, пропитанного смазками Росойл-Торсиол-35 и Росойл-Торсиол-55 соответственно.

Таблица 3. Результаты испытаний стального каната на выносливость при температуре минус 60°C .

Показатель		Канат без смазки	Канат пропитан Росойл-Торсиол - 35	Канат пропитан Росойл-Торсиол - 55
Количество изгибов образца до полного разрушения каната	$X_{\max}$	159851	260827	437165
	$X_{\min}$	120303	217556	280521
	$\bar{X}$	137366	239192	347165

Аналогичным образом, используя результаты испытаний в морской воде, приведенные в Табл. 4, определяем значения коэффициента K , которые будут равны 0,291, 0,132 и 0,202, для стального каната без смазочного материала, пропитанного смазками Росойл-Торсиол-35 и Росойл-Торсиол-55 соответственно.

Таблица 4. Результаты испытаний при воздействии морской воды.

Показатель		Канат без смазки	Канат пропитан Росойл-Торсиол - 35	Канат пропитан Росойл-Торсиол - 55
Количество изгибов образца до полного разрушения каната	$X_{\max}$	44065	57551	64020
	$X_{\min}$	36318	49546	48857
	$\bar{X}$	41066	53412	54661

Таким образом, проведя серию испытаний стального каната на выносливость в лабораторных условиях, можно определить значения коэффициентов C , C_1 и K , которые будут соответствовать определенному типу стального каната, смазочному материалу, применяемого для пропитки каната, и внешним условиям эксплуатации каната. В данной работе определены: коэффициент пропорциональности для стального каната марки 5,6-Г-1-Н-Р-1770, коэффициенты для смазочных материалов Росойл-Торсиол-35 и Росойл-Торсиол-55, а также коэффициенты,

учитывающие воздействие температуры минус 60 °С и морской воды на стальной канат. Полученные значения коэффициентов представлены в Табл. 5.

Таблица 5. Значения коэффициентов.

Коэффициент		Без смазки	Росойл-Торсиол-35	Росойл-Торсиол-55
С		27,05		
С ₁		1	2,875	1,913
К	В нормальных климатических условиях	1		
	При температуре минус 60 °С	0,973	0,590	1,286
	При воздействии морской воды	0,291	0,132	0,202

Имея значения данных коэффициентов и эксплуатационные характеристики стального каната, по формуле (2) можно посчитать количество циклов изгиба стального каната до разрушения при работе на шкивах в зависимости от применяемого смазочного материала и внешних условий эксплуатации.

Заключение

В результате проделанной работы разработана методика определения значений коэффициентов С₁ и К, позволяющая рассчитать число циклов изгиба стального каната определенного типа до разрушения в зависимости от применяемого смазочного материала и внешних условий эксплуатации.

Установлено, что смазочный материал увеличивает долговечность стального каната минимум в 1,9 раза при испытании в нормальных климатических условиях, в 1,7 раза при воздействии отрицательной температуры минус 60 °С и в 1,3 раза при воздействии морской воды по отношению к несмазанному канату.

Литература:

1. Глушко М.Ф. Стальные подъемные канаты. Киев: Техника, 1966. 327 с. [Glushko M.F. Steel lifting ropes. Kiev: Tekhnika, 1966. 327 p. (in Russian)].
2. Малиновский В.А. Стальные канаты. Одесса: Астропринт, 2001. 188 с. [Malinovsky V.A. Steel ropes. Odessa: Astroprint, 2001. 188 p. (in Russian)].
3. Мархель И.И. Крановые канаты. - М.: Машиностроение, 1983. 128 с. [Markhel I.I. Crane ropes. Moscow: Mashinostroenie, 1983. 128 p. (in Russian)].
4. Будрин, С. Б. Ресурс стальных канатов грузоподъемных машин / С. Б. Будрин // Проблемы транспорта Дальнего Востока. Доклады научно-практической конференции. – 2019. – Т. 1. – С. 66-71. – EDN SKCLYK. [Budrin, S. B. The resource of steel ropes of lifting machines // Problems of Transport of the Far East. Reports of the Scientific and Practical Conference. - 2019. – Vol. 1. – pp. 66-71. – EDN SKCLYK (in Russian)].
5. Feyrer K. Wire Ropes. – Berlin-Heidelberg: Springer Verlag. - 2007. 322 p.
6. Ефимченко С.И. Расчеты ресурса несущих элементов буровых установок: учебное пособие. - М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2001 г. - 171 с. [Efimchenko S.I. Calculations of the resource of bearing elements of drilling rigs: a study guide. Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2001. - 171 p. (in Russian)].
7. Агеев, А. Г. Обзор методов испытаний стальных авиационных тросов на выносливость / А. Г. Агеев, В. В. Козлов, Д. С. Гарюнов // XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых) : Материалы Международной молодежной научной конференции. Сборник докладов, Казань, 09–10 ноября 2023 года. – Казань: ИП Сагиев А.Р., 2023. – С. 8-11. – EDN TIBRRC. [A. G. Ageev, V. V. Kozlov, D. S. Garyunov, Review of methods of testing steel aircraft cables for

endurance // XXVI Tupolev Readings (School of Young Scientists) : Proceedings of the International Youth Scientific Conference. Collection of reports, Kazan, November 09-10, 2023. – Kazan: IP Sagiev A.R., 2023. – pp. 8-11. – EDN TIBRRC (in Russian)].

8. Стендовые ресурсные испытания стальных канатов / А. Н. Абрамов, В. Ю. Шолом, О. Л. Крамер, В. П. Головин // Письма о материалах. – 2020. – Т. 10, № 2(38). – С. 195-199. – DOI 10.22226/2410-3535-2020-2-195-199. – EDN VLVOBX. [A. N. Abramov, V. Yu. Sholom, O. L. Kramer, V. P. Golovin, Stand resource testing of steel ropes // Letters on Materials. – 2020. – Vol. 10, No. 2(38). – pp. 195-199. – DOI 10.22226/2410-3535-2020-2-195-199. – EDN VLVOBX (in Russian)].

9. Патент № 2640319 Российская Федерация, МПК G01N 3/08. Способ и устройство для испытания канатов на выносливость в жидких агрессивных средах и при разных температурах: № 2016122006: заявл. 02.06.2016: опубл. 27.12.2017 / В. Ю. Шолом, В. В. Никольская, К. А. Абрамов [и др.]; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «ХОЗРАСЧЕТНЫЙ ТВОРЧЕСКИЙ ЦЕНТР УФИМСКОГО АВИАЦИОННОГО ИНСТИТУТА». – EDN ZUJEIP. [Patent No. 2640319 Russian Federation, IPC G01N 3/08. Method and device for testing ropes for durability in liquid aggressive media and at different temperatures: No. 2016122006; application 06/02/2016; published 12/27/2017 / V. Y. Sholom, V. V. Nikolskaya, K. A. Abramov [et al.]; applicant "SELF-SUPPORTING CREATIVE CENTER OF UFA AVIATION INSTITUTE" LLC. – EDN ZUJEIP (in Russian)].

10. Шолом В. Ю., Крамер О. Л., Головин В. П., Корнилова О. П., Абрамов А.Н., Вагапов Р.Ф. Влияние смазочного материала на износостойкость стальных канатов, эксплуатирующийся в коррозионно-активных средах. Письма о материалах. 2021. Т.11. №2. С.125-128. [Sholom V. Yu., Kramer O. L., Golovin V. P., Kornilova O. P., Abramov A.N., Vagapov R.F. Influence of the lubricant on the endurance of steel ropes operating in corrosive environments. Letters on Materials. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 125-128 (in Russian)].

11. Методы испытаний низкотемпературных свойств смазочных материалов для канатов / В. Ю. Шолом, О. Л. Крамер, В. П. Головин [и др.] // Письма о материалах. – 2021. – Т. 11, № 2(42). – С. 187-191. – DOI 10.22226/2410-3535-2021-2-187-191. – EDN BPTNKV. [V. Yu. Sholom, O. L. Kramer, V. P. Golovin, et al. Tests of low-temperature properties of rope lubricant // Letters on Materials. – 2021. – Vol. 11, No. 2(42). – pp. 187-191. – DOI 10.22226/2410-3535-2021-2-187-191. – EDN BPTNKV (in Russian)].

Об авторе:

ГОЛОВИН Василий Петрович, старший научный сотрудник лаборатории ИТСМ ООО «ХТЦ УАИ», дипл. инженер (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. смазочных материалов для пропитки стальных канатов.

Metadata:

Title: Investigation of the durability of steel ropes depending on the used lubricant and external operating conditions.

Author: Vasily Petrovich Golovin, Senior Researcher, ITSM Laboratory SSCC UAI, dipl. engineer (USATU, 2003). Research in the area of lubricants for the impregnation of steel ropes.

Abstract: The paper presents the dependence of determining the number of cycles of bending the steel rope before destruction, depending on the type of a steel rope, its operational factors, as well as the used lubricant and external operating conditions. A method has been developed to determine the values of the C_1 and K coefficients, taking into account the influence of the lubricant used and the external operating conditions of the steel rope, respectively. It was found that the lubricant increases the durability of the steel rope at least 1,9 times when tested under normal climatic conditions, 1,7 times when exposed to a negative temperature of minus 60° C and 1,3 times when exposed to sea water, in relation to the non-lubricated rope.

Keywords: rope lubricant, steel rope, tests, durability of steel rope.