

На правах рукописи



Поляков Сергей Владимирович

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ВОЛНИСТОСТИ
НА ПРОЧНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СТАЛЬНЫХ
КАНАТОВ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН**

Специальность 05.05.04
«Дорожные, строительные
и подъемно-транспортные машины»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Пушкарев Александр Евгеньевич

Официальные оппоненты: **Емельянова Галина Александровна**
доктор технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», кафедра «Мосты и тоннели», доцент;
Кускильдин Рафис Бурибаевич
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», кафедра «Транспортно-технологических процессов и машин», ассистент

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

Защита состоится «22» сентября 2020 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.02 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, зал заседаний (ауд. 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/polyakov-sergey-vladimirovich>.

Автореферат разослан: «17» августа 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д212.223.02,
кандидат технических наук,
доцент

 Олещенко Елена Михайловна

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Ускорение темпов роста объемов строительства, увеличение доли возведения высотных зданий обуславливают необходимость повышения прочности и долговечности стальных канатов подъемно-транспортных машин (ПТМ), представляющих собой основной элемент конструкции машин, осуществляющих подъем грузов. Надежность подъемного каната во многом определяется корректностью и обоснованностью методики его расчета, проведенного с учетом изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, выбором конструкции каната в зависимости от условий его эксплуатации, технологией изготовления, качеством исходных материалов. Однако существующие методики, основанные на линейной теории расчета канатов, не позволяют корректно учесть влияние его волнистости на прочностные характеристики канатов большой длины (более 1000 м), для которых характерны значительное кручение, изгиб и изменение углов свивки. При этом возникает необходимость научно обоснованного определения допустимого значения радиуса волнистости из условий безопасности, срока эксплуатации канатов с учетом возникающих изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

Таким образом, разработка методики оценки напряженно-деформированного состояния подъемных канатов подъемно-транспортных машин для определения допустимых геометрических параметров с учетом влияния волнистости на их прочность и долговечность является научно-технической задачей востребованной теорией и практикой их проектирования, производства и эксплуатации.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в теорию, расчет и конструирование подъемных канатов внесли М.М. Федоров, Г.Н. Савин, П.П. Нестеров, Б.С. Ковальский, М.Ф. Глушко, А.И. Дукельский, В.Д. Белый, С.Т. Сергеев, Г.П. Ксюнин, В.А. Каландадзе, А.П. Ветров, Н.Х. Гончаренко, В.И. Дворников, В.И. Бережинский, В.А. Малиновский, А. Е. Смирнов, А. Г. Ланг, С. А. Волков, М.Н. Хальфин, А.А. Короткий, В.А. Рыжиков, И.М. Чаюн, Г.Д. Трифанов и др. Изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов подъемного каната (дефект – волнистость), рассчитанные с помощью линейных уравнений, включены в редакцию «Правил безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения». Однако, несмотря на достигнутые успехи в конструировании подъемных канатов и технологии их изготовления, практика эксплуатации показывает, что сроки службы канатов, применяемых в ПТМ, изменяются

в больших пределах (от 90 до 1200 суток). Браковка канатов в первые месяцы эксплуатации по причине изменения их геометрических параметров, механических свойств винтовых элементов и обрывов проволок приводит к экономическим и социальным затратам. Всё это требует проведения дополнительных исследований, направленных на выявление новых и уточнение существующих закономерностей, отражающих влияние волнистости канатов в нелинейной постановке на их прочностные и эксплуатационные показатели, обеспечивающие обоснование срока службы и повышение безопасности работы подъемно-транспортных машин, что и определяет актуальность диссертации.

Объект исследования – стальной канат подъемно-транспортных машин.

Предмет исследования – методика оценки влияния волнистости на прочность и долговечность стальных канатов ПТМ при нелинейных зависимостях.

Цель диссертационной работы. Установление новых и уточнение существующих закономерностей, отражающих влияние волнистости канатов на их прочностные и эксплуатационные показатели, для научно обоснованного определения срока службы подъемных канатов, обеспечивающего повышение безопасности работы подъемно-транспортных машин.

Задачи исследования:

1. Произвести анализ и обобщение теоретических и экспериментальных материалов по теме исследований.

2. Разработать методику расчета напряженно-деформированного состояния подъемных канатов двойной и спиральной свивки с учетом волнистости при нелинейных зависимостях.

3. Исследовать влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на напряженно-деформированное состояние подъемных канатов с помощью нелинейной теории расчета канатов.

4. Экспериментально подтвердить теоретические выводы.

5. Разработать методику по определению допустимого значения радиуса волнистости при нелинейных зависимостях.

6. Разработать методику оценки влияния волнистости на прочность и долговечность стальных канатов ПТМ при нелинейных зависимостях.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Впервые получены нелинейные уравнения статики, позволяющие определять сложное напряженно-деформированное состояние подъемного каната с учетом волнистости.

2. Предложена методика исследования напряженно-деформированного состояния подъемного каната с учетом волнистости, позволяющая

определять напряжения растяжения и кручения при нелинейных зависимостях.

3. Получены экспериментальные данные подъемных канатов в нелинейной постановке, изготовленных как с равномерным натяжением винтовых элементов, так и с учетом изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

4. Разработана методика определения допустимого значения радиуса волнистости подъемного каната, которая получена с помощью нелинейных уравнений статики.

5. Разработана методика оценки влияния волнистости на прочность и долговечность стальных канатов ПТМ при нелинейных зависимостях.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в совершенствовании методики расчета подъемного каната, позволяющей обеспечить повышение безопасности работы подъемно-транспортных машин.

Практическая значимость. Практическое значение заключается в следующем:

1. Обоснован оригинальный алгоритм расчета подъемных канатов с помощью полученных нелинейных уравнений, учитывающий изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов;

2. Разработаны рекомендации по конструированию подъемного каната с целью предупреждения в нем изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов;

3. Разработана методика экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния подъемного каната с учетом их волнистости, которая позволяет определять деформации канатов спиральной и двойной свивки точнее на 20–25 % в отличие от линейной теории;

4. Разработана методика определения допустимого значения радиуса волнистости в нелинейной форме, позволяющая повысить безопасность подъемных канатов;

5. Разработана методика оценки влияния волнистости на прочность и долговечность стальных канатов ПТМ при нелинейных зависимостях;

6. Обосновано рекомендуемое значение допустимого радиуса волнистости, при котором запрещена дальнейшая эксплуатация подъемных канатов.

Защищаемые научные положения.

1. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены нелинейные уравнения статики для канатов двойной свивки и спиральной свивки, учитывающие волнистость, на основании которых разработана новая методика расчета напряженно-деформированного состояния подъемных канатов, учитывающая изменения геометрических параметров каната

и механических свойств винтовых элементов в процессе эксплуатации, позволившая повысить точность расчетов подъемных канатов на 20–25%.

2. Получена расчетная зависимость для определения значения радиуса волнистости подъемных канатов, учитывающая изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов в процессе эксплуатации, и определен допустимый радиус волнистости, что позволило обосновать необходимость прекращения дальнейшей эксплуатации подъемных канатов при достижении отношения диаметра спирали волнистости d_v к диаметру каната d_k равного 1,04, так как при данном значении обеспечивается безопасная эксплуатация стального подъемного каната подъемно-транспортной машины.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины.

Достоверность диссертационной работы. Достоверность научных положений подтверждается представленными объемами экспериментальных исследований, и расчетными данными, полученными на основе положений и методов строительной механики подъемного каната и теории надежности. А также подтверждается незначительными расхождениями результатов теоретических и экспериментальных исследований, не превышающими 10 % по напряженно-деформированному состоянию подъемных канатов с учетом волнистости при нелинейных зависимостях.

Апробация работы. Результаты исследования используются для решения вопросов производственной деятельности ООО «Вест-Компани», что подтверждено соответствующими справками о внедрении.

Теоретические положения и результаты работы используются в учебном процессе СПбГАСУ по направлению подготовки кадров высшей квалификации 15.03.03 – Бакалавриат, 15.04.03 – Магистратура (научная специальность 05.05.04 – «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины»). Изданы два учебных пособия – «Методика определения деформаций растяжения, кручения, изгиба с учетом волнистости в подъемном канате при нелинейных зависимостях» и «Методика определения допустимого значения радиуса волнистости для подъемных канатов при нелинейных зависимостях» в 2018 году.

Основные положения диссертационной работы доложены на конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (2018–2020 гг.); международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы геотехники: новые материалы, конструкции, технологии и расчеты» (6–8 февраля 2019 г., Санкт-Петербург, СПбГАСУ);

всероссийском научном семинаре «Повышение доступности Арктических регионов, развитие устойчивых, в том числе к климатическим воздействиям, сетей и систем транспорта» (31 октября 2019 г., Санкт-Петербург, СПбГАСУ); научно-технической конференции с международным участием «Глобальное потепление – главный вызов для индустрии холода. Перспективы и последствия» (29 января 2020 г., Санкт-Петербург, «Университет ИТМО»).

Публикации. По теме диссертации издана монография и опубликовано 15 печатных работ, пять из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАКом РФ, ссылки на которые даны по тексту работы, получено авторское свидетельство РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержит 167 страниц машинописного текста, 10 таблиц, 71 рисунка, 165 формул, 1 приложение и список использованной литературы из 105 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы ее цели и задачи, отражена научная новизна полученных результатов, положения, выносимые на защиту, апробация и практическая значимость работы.

В первой главе проводится анализ состояния вопроса исследования и постановка задач. Проведен обзор существующих на данный момент теорий расчета подъемного каната, с особенностью расчетной схемы для каждой теории. Подчеркнута актуальность применения нелинейной теории расчета подъемного каната с учетом изменения его геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

Проведен анализ существующих научных работ в области расчета и эксплуатации подъемных канатов.

Расчет канатов с помощью линейной статики вполне согласуется с опытными данными для многих практических задач, которые нет необходимости трактовать в более сложной нелинейной постановке. Это относится, к канатам обычных длин.

Но, наряду с канатами, расчет которых с достаточной для инженерной практики точностью можно проводить по линейной теории, существуют канаты, использование которых сопряжено со значительным кручением, изгибом и изменением углов свивки, т. е. с изменением геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, которое необходимо учитывать при решении задач – канаты, используемые в ПТМ и имеющие большую длину (более 1000 метров).

Сделан вывод о том, что в настоящее время нелинейная теория с учетом изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых

элементов является малоизученной и требует рассмотрения как с точки зрения потребностей практики, так и развития нелинейной теории расчета подъемного каната.

Вторая глава посвящена разработке методики расчета напряженно-деформированного состояния подъемного каната с учетом волнистости на основе нелинейных уравнений статики. Выведены уравнения для расчета подъемных канатов двойной свивки и спиральной свивки с учетом волнистости, полученные на основе нелинейных уравнений статики и методом конечных приращений. Разработан алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния подъемных канатов, позволяющий производить расчет дополнительных напряжений, возникающих в подъемном канате при изменении геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов. Сформированы уравнения радиуса волнистости при нелинейных зависимостях.

В третьей главе рассмотрено влияние конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на напряженно-деформированное состояние подъемного каната с учетом волнистости, с помощью полученных нелинейных уравнений статики.

Проведены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния подъемного каната с учетом волнистости.

Получены нелинейные уравнения, позволяющие определить допустимое значение радиуса волнистости и запас прочности для каната двойной свивки.

В четвертой главе разработана методика определения допустимого значения радиуса волнистости для подъемных канатов при нелинейных зависимостях. Подготовлена методика расчета подъемных канатов ПТМ с учетом их волнистости.

На основе полученных нелинейных уравнений, определено допустимое значение радиуса волнистости и запас прочности для каната двойной свивки. Реализация данной методики позволит решить востребованную научно-практическую задачу по повышению безопасности эксплуатации подъемных канатов с образовавшимися изменениями геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены нелинейные уравнения статики для канатов двойной свивки и спиральной свивки, учитывающие волнистость, на основании которых разработана новая методика расчета напряженно-деформированного состояния подъемных канатов, учитывающие изменения геометрических параметров каната и механических свойств винтовых элементов в процессе эксплуатации, позволившие повысить точность расчетов подъемных канатов на 20–25%.

Большинство исследователей рассматривали упрощенную модель каната как упругую либо упруго-вязкую нить, наделенную по аналогии с обычным стержнем идеальной гибкостью и продольной жесткостью.

Используя методы строительной механики, проф. М.Ф. Глушко создал теорию расчета прямого каната при совместном растяжении и кручении. Отличительной чертой теории М.Ф. Глушко является линейность всех её искомых функций. Линейная теория хорошо согласуется с данными экспериментов для канатов, эксплуатация которых ограничивает их скручивание.

М.Ф. Глушко рассматривал напряженно-деформированного состояния канатов, имеющих одинаковые геометрические параметры и механические свойства проволок (прядей), расположенных в одном слое.

Согласно статистике Ростехнадзора проведенной в 2017 году, практика эксплуатации подъемных стальных канатов с металлическим сердечником показывает, что примерно 21 % бракуется по причине появления волнистости.

Для расчета стальных канатов, учитывающих волнистость профессором Хальфиным М.Н. была построена линейная теория.

Однако при эксплуатации канатов в связи с большим кручением проявляется нелинейность деформаций, вызванная действием нагрузки, приводящая к изменению первоначального угла свивки винтовых элементов.

Для определения напряженно-деформированного состояния подъемного каната с образовавшимися в нем изменениями геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов были получены нелинейные уравнения статики подъемного каната с учетом волнистости, которые имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} P_x &= mA\varepsilon + mC\theta + md\varepsilon_r + mA_{11}\varepsilon^2 + mA_{12}\varepsilon\theta + \\ &+ mA_{22}\theta^2 + mA_{13}\varepsilon\varepsilon_r + mA_{23}\theta\varepsilon_r + mA_{33}\varepsilon_r^2, \\ M_x &= mC\varepsilon + mB\theta + me\varepsilon_r + mC_{11}\varepsilon^2 + mC_{12}\varepsilon\theta + \\ &+ mC_{22}\theta^2 + mC_{13}\varepsilon\varepsilon_r + mC_{23}\theta\varepsilon_r + mC_{33}\varepsilon_r^2; \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{xi} &= (A_{11}\Delta\varepsilon + A_{12}\Delta\theta + A_{13}\Delta\varepsilon_r + A_{14}\frac{1}{\rho} + A_{111}\Delta\varepsilon^2 + A_{112}\Delta\varepsilon\Delta\theta + \\ &+ A_{122}\Delta\theta^2 + A_{113}\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon_r + A_{123}\Delta\theta\Delta\varepsilon_r + \\ &+ A_{133}\Delta\varepsilon_r^2 + A_{114}\Delta\varepsilon\frac{1}{\rho} + A_{124}\Delta\theta\frac{1}{\rho} + A_{134}\Delta\varepsilon_r\frac{1}{\rho} + A_{144}\left(\frac{1}{\rho}\right)^2) \cos^2 \varphi_i; \\ \Delta M_{xi} &= (A_{12}\Delta\varepsilon + A_{22}\Delta\theta + A_{23}\Delta\varepsilon_r + A_{24}\frac{1}{\rho} + \\ &+ A_{211}\Delta\varepsilon^2 + A_{212}\Delta\varepsilon\Delta\theta + A_{222}\Delta\theta^2 + A_{213}\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon_r + A_{223}\Delta\theta\Delta\varepsilon_r + \\ &+ A_{233}\Delta\varepsilon_r^2 + A_{214}\Delta\varepsilon\frac{1}{\rho} + A_{224}\Delta\theta\frac{1}{\rho} + A_{234}\Delta\varepsilon_r\frac{1}{\rho} + A_{244}\left(\frac{1}{\rho}\right)^2) \cos^2 \varphi_i; \\ M_z + P_x R_b^H &= \frac{m}{2} A_{14}\Delta\varepsilon + \frac{m}{2} A_{24}\Delta\theta + \frac{m}{2} A_{34}\Delta\varepsilon_r + \frac{m}{2} A_{44}\frac{1}{\rho} + \frac{m}{2} A_{411}\Delta\varepsilon^2 + \\ &+ \frac{m}{2} A_{412}\Delta\varepsilon\Delta\theta + \frac{m}{2} A_{422}\Delta\theta^2 + \frac{m}{2} A_{413}\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon_r + \frac{m}{2} A_{423}\Delta\theta\Delta\varepsilon_r + \frac{m}{2} A_{433}\Delta\varepsilon_r^2 + \\ &+ \frac{m}{2} A_{414}\Delta\varepsilon\frac{1}{\rho} + \frac{m}{2} A_{424}\Delta\theta\frac{1}{\rho} + \frac{m}{2} A_{434}\Delta\varepsilon_r\frac{1}{\rho} + \frac{m}{2} A_{444}\left(\frac{1}{\rho}\right)^2, \end{aligned} \right\} (2)$$

где P_x, M_x – внешние нагрузки, действующие на канат; $\Delta P_{xi}, \Delta M_{xi}, M_z$ – дополнительная растягивающая сила, крутящий и изгибающий моменты; m – число винтовых элементов в каждом слое каната; $\varepsilon, \theta, \varepsilon_r$ – соответственно, относительные продольные, угловые и поперечные деформации каната; $\Delta\varepsilon, \Delta\theta, \Delta\varepsilon_r$ – соответственно, дополнительные относительные продольные, угловые и поперечные деформации каната; R_b^H – радиус волнистости с учетом нелинейности; A, B, C, d, e – агрегатные коэффициенты жесткости каната двойной свивки, полученные с помощью линейных уравнений;

$$A_{11}(\varepsilon^2), A_{12}(\varepsilon\theta), A_{22}(\theta^2), A_{13}(\varepsilon\varepsilon_r), A_{23}(\theta\varepsilon_r), A_{33}(\varepsilon_r^2), C_{11}(\varepsilon^2), C_{12}(\varepsilon\theta), C_{22}(\theta^2), \\ C_{13}(\varepsilon\varepsilon_r), C_{23}(\theta\varepsilon_r), C_{33}(\varepsilon_r^2) -$$

агрегатные коэффициенты жесткости каната двойной свивки, полученные проф. М.Ф. Глушко; $A_{14}, A_{24}, A_{34}, A_{44}$ – агрегатные коэффициенты жесткости каната двойной свивки, полученные проф. Хальфиным М.Н.; $A_{111}, A_{112}, A_{122}, A_{113}, A_{123}, A_{133}, A_{114}, A_{124}, A_{134}, A_{144}, A_{211}, A_{212}, A_{222}, A_{213}, A_{223}, A_{233}, A_{214}, A_{224}, A_{234}, A_{244}, A_{411}, A_{412}, A_{422}, A_{413}, A_{423}, A_{433}, A_{414}, A_{424}, A_{434}, A_{444}$ – агрегатные коэффициенты жесткости каната двойной свивки, полученные нами.

Дополнительный крутящий момент определяется из уравнений статики по формуле:

$$\Delta M_x = kd\Delta P_x \cdot 10^{-3} = kdg \left(Q_k + \frac{qL}{2} \right) 10^{-3}, \quad (3)$$

где k – коэффициент упругой связи между крутящим моментом и растягивающим усилием; d – диаметр каната; g – ускорение свободного падения; Q_k – масса концевой груза; q – линейная масса каната; L – длина каната.

Получено уравнение радиуса волнистости стального каната в нелинейной постановке:

$$R_B^H = \frac{\frac{1}{2} \left(A_{14}\Delta\varepsilon + A_{24}\Delta\theta + (A_{44} - mg_0) \frac{1}{\rho} + A_{411}\Delta\varepsilon^2 + A_{412}\Delta\varepsilon\Delta\theta + A_{422}\Delta\theta^2 + A_{414}\Delta\varepsilon \frac{1}{\rho} + A_{424}\Delta\theta \frac{1}{\rho} + A_{444} \left(\frac{1}{\rho} \right)^2 \right)}{A\varepsilon + C\theta + A_{11}\varepsilon^2 + A_{12}\varepsilon\theta + A_{22}\theta^2}, \quad (4)$$

где g_0 – изгибная жесткость пряди.

Полученные выражения позволяют определить допустимые значения радиуса волнистости подъемного каната в зависимости от его кручения, изгиба и предела прочности материала канатной проволоки.

Установлено, что основным фактором, влияющим на возникновение волнистости, является неравномерность технологического натяжения, приводящая к образованию дополнительных напряжений. Для устранения этого дефекта предложен способ свивки двухслойного подъемного каната, при котором достигается равномерность натяжения винтовых элементов. На способ получен патент РФ.

Доказано, что наиболее значимым показателем при расчете подъемных канатов являются дополнительные напряжения с учетом волнистости. Поэтому при расчете подъемных канатов необходимо учитывать эти напряжения.

Так, выведены уравнение нормального напряжения в поперечном сечении проволоки каната двойной свивки в общем виде от ее осевого растяжения с учетом волнистости при нелинейных зависимостях:

$$\sigma = \sigma_{p.l} + \Delta\sigma_{p.l} + \sigma_{p.n} + \Delta\sigma_{p.n} , \quad (5)$$

где $\sigma_{p.l}$ – напряжения растяжения в проволоке от действия натяжения и кручения, вызванное действием растягивающей силы и определяемое по линейным уравнениям без учета волнистости; $\Delta\sigma_{p.l}$ – дополнительные напряжения растяжения в проволоке стального каната, имеющего изменение геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, полученные с помощью линейной теории расчета канатов; $\sigma_{p.n}$ – напряжения растяжения в проволоке от действия натяжения и кручения, вызванное действием растягивающей силы и определяемое по нелинейным уравнениям без учета волнистости; $\Delta\sigma_{p.n}$ – дополнительные напряжения растяжения в проволоке стального каната, с учетом волнистости, полученные с помощью нелинейных уравнений статики.

Получены уравнения нормального напряжения изгиба и касательные напряжения от кручения в общем виде с учетом волнистости:

$$\sigma_{из} = \sigma_{из.l} + \Delta\sigma_{из.l} + \sigma_{из.n} + \Delta\sigma_{из.n} ; \quad (6)$$

$$\sigma_{кр} = \sigma_{кр.l} + \Delta\sigma_{кр.l} + \sigma_{кр.n} + \Delta\sigma_{кр.n} , \quad (7)$$

где $\sigma_{из.l}$ ($\sigma_{кр.l}$) – напряжения изгиба (касательные от кручения) в проволоке, вызванное действием растягивающей силы и определяемое по линейным уравнениям без учета волнистости; $\Delta\sigma_{из.l}$ ($\Delta\sigma_{кр.l}$) – дополнительные напряжения изгиба (касательные от кручения) стального каната, с учетом волнистости, полученные с помощью линейной теории расчета канатов; $\sigma_{из.n}$ ($\sigma_{кр.n}$) – напряжения изгиба (касательные от кручения) в проволоке, вызванное действием растягивающей силы и определяемое по нелинейным уравнениям без учета волнистости; $\Delta\sigma_{из.n}$ ($\Delta\sigma_{кр.n}$) – дополнительные напряжения изгиба (касательные от кручения) подъемного каната, с учетом волнистости, полученные с помощью нелинейных уравнений.

Дополнительные напряжения растяжения в проволоке подъемного каната, с учетом волнистости, полученные с помощью нелинейных уравнений статики имеют вид:

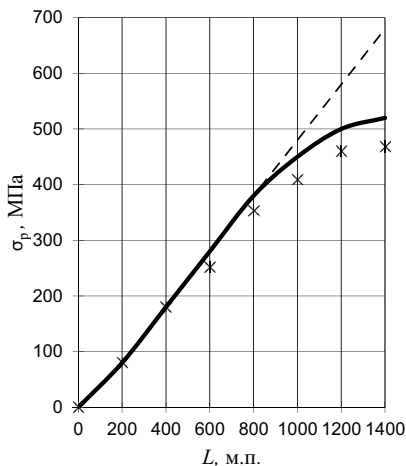
$$\begin{aligned}
\Delta\sigma_{\text{п.н.}} = E \cos^2 \alpha \cos^2 \varphi & \left\{ \begin{aligned} & \left[\begin{aligned} & \Delta\varepsilon^2 \left[\begin{aligned} & \sin^2 \beta \cos^2 \beta - \mu^1 (2 \sin^2 \beta \cos^2 \beta - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta) + \frac{r}{R} \operatorname{tg} \alpha \sin^5 \beta \cos \beta - \\ & - \left(2 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} \right) \mu^1 \end{aligned} \right] - \\ & - \Delta\theta^2 R^2 \left[\begin{aligned} & \sin^2 \beta \cos^2 \beta - \mu^1 (\sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta) + \frac{r}{R} \operatorname{tg} \alpha (\sin \beta \cos^5 \beta - \\ & - \mu^1 \left(-\sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} \right)) \end{aligned} \right] + \end{aligned} \right. \\ & + \Delta\varepsilon \Delta\theta R \left[\begin{aligned} & -\sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \mu^1 (-2 \sin^2 \beta \cos^2 \beta - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta) + (R \sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \\ & - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta) + \sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu^1 \left(\left(-2 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} \right) + \right. \\ & \left. + \left(-\sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} \right) \right) \right] + \end{aligned} \right. \\ & + \Delta\varepsilon \frac{1}{\rho} \left[\begin{aligned} & 2R \sin^2 \beta \cos^2 \beta - \mu^1 (-2 \sin^2 \beta \cos^2 \beta - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta) - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta + \sin^3 \beta \cos \beta \left(\sin^2 \beta - \frac{g_0}{H} \right) - \\ & - \mu^1 \left(\left(2 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} \right) + \left(\sin^3 \beta \cos \beta \left(\frac{g_0}{H} - \sin^2 \beta \right) - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} \right) \right) \right] + \end{aligned} \right. \\ & + \Delta\theta \frac{1}{\rho} R \left[\begin{aligned} & -R \sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \mu^1 \left((R \sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta) - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta \right) + \\ & + \sin^2 \beta \cos^2 \beta \left(\frac{g_0}{H} - \cos^2 \beta \right) - \mu^1 \left(\left(-\sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} \right) + \right. \\ & \left. + \left(\sin^3 \beta \cos \beta \left(\frac{g_0}{H} - \sin^2 \beta \right) - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} \right) \right) \right] + \end{aligned} \right. \\ & + \left(\frac{1}{\rho} \right)^2 R \left[\begin{aligned} & \sin^2 \beta \cos^2 \beta - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta + \sin^3 \beta \cos \beta \frac{g_0}{H} - \mu^1 \left(\sin^3 \beta \cos \beta \left(\frac{g_0}{H} - \sin^2 \beta \right) - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (8)
\end{aligned}$$

где φ – полярный угол; E – модуль упругости I рода; β – угол свивки каната, μ^1 – коэффициент поперечного сужения каната с учетом волнистости, R – радиус каната; r – радиус свивки винтовой оси; H – жесткость пряди на изгиб.

Аналогичным образом были получены нелинейные уравнения дополнительного напряжения изгиба (касательные от кручения) подъемного каната, с учетом волнистости.

Уравнения (5–8) нормальные напряжения растяжения, изгиба и касательные от кручения с учетом волнистости, обеспечат научно обоснованный инженерный расчет, который необходим при конструировании и эксплуатации подъемного каната.

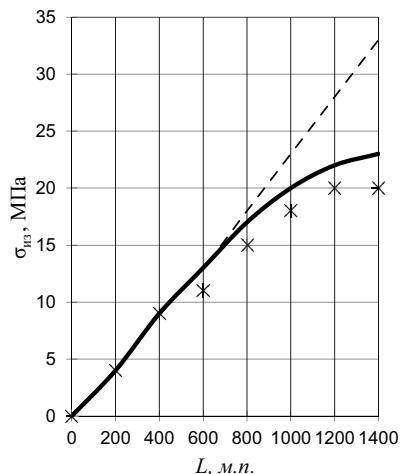
Влияние длины подъемного каната на напряжения, возникающие в нем, представлено на рисунках 1–3.



— Подъемный канат d=41 мм, ГОСТ 3077-80 при (нелинейности деформаций)
 - - - Подъемный канат d=41 мм, ГОСТ 3077-80 по линейной теории

× Экспериментальные данные растягивающих напряжений для подъемного каната d= 41 мм

Рисунок 1 – Влияние длины подъемного каната на растягивающие напряжения



— Подъемный канат d=41 мм, ГОСТ 3077-80 при (нелинейности деформаций)
 - - - Подъемный канат d=41 мм, ГОСТ 3077-80 по линейной теории

× Экспериментальные данные изгибающих напряжений для подъемного каната d=41 мм

Рисунок 2 – Влияние длины подъемного каната на величину изгибающих напряжений

Из рисунков 1–3 видно, что нелинейность начинает проявляться при достижении длины каната от 600 метров.

С помощью нелинейных уравнений статики разработана методика расчета подъемных канатов с учетом волнистости, которая позволила произвести расчет подъемных канатов спиральной и двойной свивки. На рисунках 1–3 представлены результаты расчетов с использованием линейной теории, нелинейной теории и экспериментальных исследований. Установлено, что расхождение экспериментальных результатов и расчетов по нелинейной методике не превышают 10 %. Причем линейная теория расчета для канатов двойной свивки с органическим сердечником дает расхождение до 35–50 %, а для канатов двойной свивки с металлическим сердечником до 15–20 %. Таким образом расчеты по нелинейной теории обеспечивают более точный (от 20 до 25 %) расчет подъемного каната.

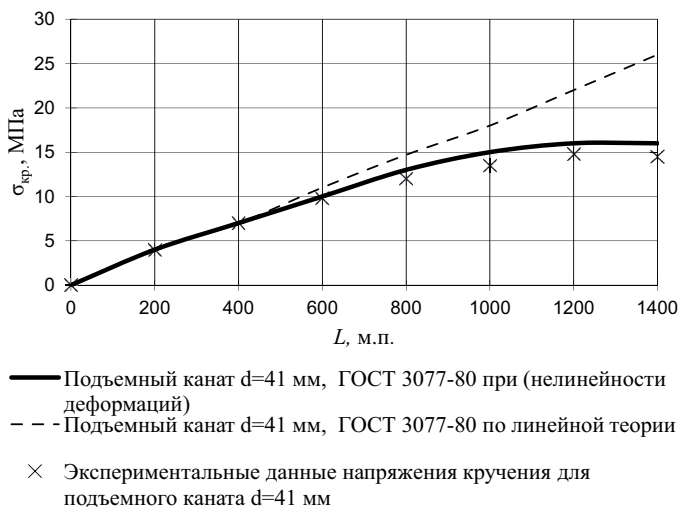


Рисунок 3 – Влияние длины подъемного каната на касательные напряжения от кручения

Испытания образцов канатов на разрыв проводилось на разрывной машине УММ-5. Для определения влияния неравномерности технологического натяжения на прочность стального подъемного каната были проведены испытания на разрыв. При изготовлении образцов канатов, прядям давалось различное натяжение. Были изготовлены 2 стальных подъемных каната с различной неравномерностью технологического натяжения прядей. Проведенный эксперимент показал, что образцы канатов, изготовленные с неравномерным натяжением прядей, с возрастанием растягивающей нагрузки происходило увеличение изменения геометрических параметров и механических свойств прядей, приводящих к возникновению волнистости. Прочность подъемного каната зависела от неравномерности технологического натяжения, наибольшая неравномерность натяжения соответствовала наименьшей прочности каната. Уменьшение прочности подъемного каната составило 20 %.

Кроме того, по результатам экспериментальных исследований видно, что при длине каната более 1000 м явно проявляется расхождение расчетных данных, полученных по линейной теории и экспериментальных. Это вызвано тем, что при таких длинах, в результате кручения подъемного каната, проявляются дополнительные напряжения, являющиеся следствием дефекта волнистости. Следовательно, линейной теорией можно пользоваться

для приблизительного определения деформации растяжения, только для случая, когда концы каната жестко заделаны (кручение отсутствует) и нельзя для определения деформаций, когда присутствует кручение концов каната (при длинах более 1000 м).

Анализ результатов испытаний при свободном растяжении опытных образцов канатов, изготовленных с учетом изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, показал: с возрастанием растягивающей нагрузки происходило увеличение радиуса волнистости. Наибольшая неравномерность натяжения соответствовала наименьшей прочности опытных моделей каната.

2. Получена расчетная зависимость для определения значения радиуса волнистости подъемных канатов, учитывающая изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов в процессе эксплуатации, и определен допустимый радиус волнистости, что позволило обосновать необходимость прекращения дальнейшей эксплуатации подъемных канатов при достижении отношения диаметра спирали волнистости d_b к диаметру каната d_k равного 1,04, так как при данном значении обеспечивается безопасная эксплуатация подъемного каната подъемно-транспортной машины.

Редакцией «Правил безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» определено количественное значения радиуса волнистости, составляющее 1,08 мм. Допустимое значение радиуса волнистости было получено с помощью линейной теорией расчета подъемного каната. Но при эксплуатации подъемных канатов при длине более 1000 п.м. в ПТМ, вследствие действия собственного веса, происходит значительное раскручивание при растяжении, в результате чего происходит изменение углов свивки винтовых элементов каната, вызывающее геометрически нелинейный характер деформаций. Учет геометрической нелинейности является необходимым при анализе напряженно-деформированного состояния канатов ПТМ при его раскручивании.

Получено уравнение, допустимого значения радиуса волнистости при нелинейности деформаций:

$$\frac{d_b}{d_k} \leq 1 + \frac{R_b^H}{R_k} \leq 1 + \frac{\frac{1}{2} \left(A_{14} \Delta \varepsilon + A_{24} \Delta \theta + (A_{44} - mg_0) \frac{1}{\rho} + A_{411} \Delta \varepsilon^2 + A_{412} \Delta \varepsilon \Delta \theta + A_{422} \Delta \theta^2 + A_{414} \Delta \varepsilon \frac{1}{\rho} + A_{424} \Delta \theta \frac{1}{\rho} + A_{444} \left(\frac{1}{\rho} \right)^2 \right)}{R_k (A \varepsilon + C \theta + A_1 \varepsilon^2 + A_2 \varepsilon \theta + A_2 \theta^2)}, \quad (9)$$

где d_b – диаметр спирали волнистости; d_k – диаметр стального каната, R_b^H – радиус волнистости подъемного каната, полученный нами; R_k – радиус каната, полученный с помощью линейных уравнений.

В таблице 1 представлены расчетные допустимые значения радиуса волнистости, полученные на основе (4), при длине каната 1500 м.п.

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
$6 \times 19(1+9+9) + 1o.c$	14	1770	1,052
$6 \times 19(1+9+9) + 1o.c$	16,5	1770	1,046
$6 \times 19(1+9+9) + 1o.c$	20,5	1770	1,043
$6 \times 19(1+9+9) + 1o.c$	30,5	1770	1,042
$6 \times 19(1+9+9) + 1o.c$	35	1670	1,042

На основании полученных выражений (4), нами были проведены исследования влияния радиуса волнистости подъемного каната на его запас прочности.

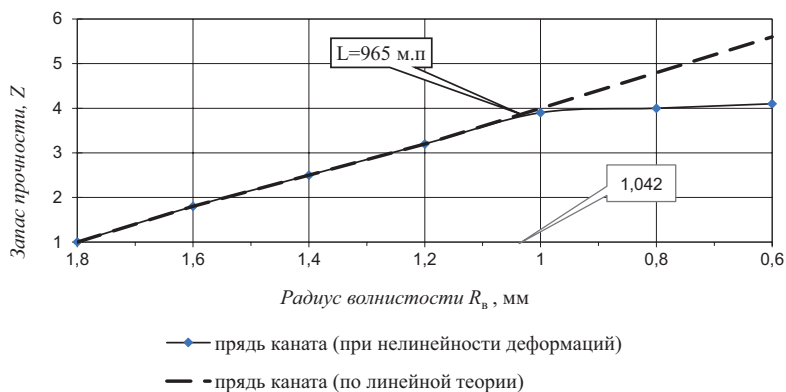


Рисунок 4 – Влияние радиуса волнистости на запас прочности каната

Для исследований был выбран канат двойной свивки ГОСТ 3077 – 80 диаметром 30,5 мм с длиной 1500 метров.

В результате сравнения с данными (рис. 4) полученными при расчете подъемного каната диаметром 30 мм с аналогичными исходными данными, полученными с помощью линейных уравнений, можно сделать вывод, что с увеличением радиуса волнистости запас прочности каната снижается. Причем при расчете подъемного каната длиной 1500 м.п. с помощью полученных нелинейных уравнений с учетом изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов показатели запаса прочности снизились в 1,5-2 раза показателей, полученных с аналогичными исходными данными по линейной теории расчета подъемного каната.

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

Однако при эксплуатации стальных канатов в них появляются изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, и с помощью полученных теоретических и экспериментальных исследований определено значение допустимого радиуса волнистости подъемного каната при нелинейных зависимостях, составляющее 1,04–1,05. При достижении отношения диаметра спирали волнистости d_v к диаметру каната d_k равного 1,04 нами рекомендуется прекращение дальнейшей эксплуатации стальных подъемных канатов с целью повышения безопасности.

Для определения рекомендуемого значения радиуса волнистости разработана методика оценки влияния волнистости на прочность и долговечность стальных канатов ПТМ, построенная на полученных нелинейных уравнениях статики, включающая методику расчета НДС и рекомендации по повышению безопасности подъемного каната с учетом образовавшихся в нем изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена важная научно-техническая задача – на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований установлены новые и уточнены существующие закономерности, отражающие влияние волнистости канатов в нелинейной постановке на их прочностные и эксплуатационные показатели, что позволило усовершенствовать методики расчета и обоснование срока эксплуатации подъемных канатов для повышения безопасности работы подъемно-транспортных машин.

Научные выводы и практические результаты, полученные в процессе диссертационного исследования, заключаются в следующем:

1. С помощью нелинейных уравнений статики разработана методика расчета подъемных канатов с учетом волнистости, которая позволяет проводить расчет канатов спиральной и двойной свивки точнее на 20–25 % в отличие от линейной теории расчета канатов.

2. Исследовано влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на напряженно-деформированное состояние подъемных канатов с помощью нелинейной теории расчета канатов. Установлено, что у канатов, изготовленных с учетом различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, деформации растяжения и кручения выше в 1,5 раза относительно канатов с одинаковыми геометрическими параметрами и механическими свойствами винтовых элементов.

3. Сравнение экспериментальных и теоретических значений деформаций каната показали хорошее совпадение опыта и расчета для подъемных канатов. Установлено, что расхождение экспериментальных результатов и расчетов по нелинейной методике не превышает 10%. Теория расчета подъемных канатов с учетом волнистости при нелинейных зависимостях подтверждена экспериментально.

4. Разработана методика по определению допустимого значения радиуса волнистости при нелинейных зависимостях. Обосновано значение допустимого радиуса волнистости подъемного каната при нелинейных зависимостях, составляющее 1,04–1,05.

5. Разработана методика оценки влияния волнистости на прочность и долговечность стальных канатов ПТМ, построенная на полученных нелинейных уравнениях статики, включающая методику расчета НДС и рекомендации по повышению безопасности подъемного каната. При достижении отношения диаметра спирали волнистости к диаметру каната равного 1,04 рекомендуется прекращение дальнейшей эксплуатации подъемных канатов с целью повышения безопасности.

Разработаны:

– методика определения напряжения растяжения и кручения с учетом их волнистости при нелинейных зависимостях.

– методика определения допустимого значения радиуса волнистости при нелинейных зависимостях.

– методика оценки влияния волнистости на прочность и долговечность стальных канатов ПТМ.

Результаты работы применены:

- В строительной компании ООО «Вест-Компани».

- На горнодобывающем предприятии ООО «Южной угольной компанией».

- На кафедре наземных транспортно-технологических машин в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» 2018-2020 г.

Таким образом, задачи и цель, поставленные в диссертационном исследовании, достигнуты.

VI. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства науки
и высшего образования Российской Федерации*

1. Поляков С.В. Исследование подъемного каната с возникшими изменениями геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, – 2019, № 2, – С. 257–264, DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-257-264.

2. Поляков С.В., Пушкарев А.Е. Методика определения допустимого значения радиуса волнистости для подъемных канатов при нелинейных зависимостях // Машиностроение и инженерное образование. – 2019. – № 2 – С. 10–13, ISSN 1815-1051.

3. Поляков С.В. Новый способ определения радиуса волнистости канатов с помощью нелинейных уравнений // Известия УГГУ. – 2019. – Вып. 4(56), – С. 111–123, DOI 10.21440/2307-2091-2019-4.

4. Поляков С.В. Вывод параметров стального каната, влияющих на безопасность эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Горный журнал, – 2019. – № 6, – С. 118–123, ISSN 0536-1028, DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-118-123.

5. Поляков С.В., Пушкарев А.Е. Определения деформаций растяжения, кручения и изгиба в подъемном канате с учетом различия геометрических параметров и механических свойств // Машиностроение и инженерное образование. – 2019. – № 3 – С. 11–17, ISSN 1815-1051.

*Остальные положения диссертационной работы опубликованы
в следующих работах*

1. Polyakov S.V., Pushkarev A.E., Parameters determining differences between geometric and mechanical properties of spiral elements in rope, affecting development of emergency situations // Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction / CRC Press/Balkema/ 2019 Taylor&Francis Group, London, ISBN 978-0-367-17983-0. 270-273 s.

2. Поляков С.В., Хальфин М.Н. Уравнение статики каната двойной свивки с учетом различия геометрических параметров и механических свойств проволок // Известия Тульского гос. ун-та. Сер. «Подъемно-транспортные машины и оборудование» – Тула. – 2006. – Вып.7 – С. 60–71.

3. Поляков С.В., Хальфин М.Н. Уравнение статики каната спиральной свивки с учетом различия геометрических параметров и механических свойств проволок // Известия Тульского гос. ун-та. Сер. «Подъемно-транспортные машины и оборудование» – Тула. – 2006. – Вып.7 – С. 72–80.

4. Поляков С.В. Способ повышения качества многослойного каната // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. техн. науки. – 2007. - №1. – С. 75–77.

5. Поляков С.В. Уравнение нелинейной статики каната двойной свивки 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.83–88.

6. Поляков С.В. Уравнение нелинейной статики 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.

7. Поляков С.В. Вывод уравнений статики прямого каната с учетом различия геометрических параметров и механических свойств проволок методом конечных приращений // Моделирования. Теория, методы и средства: Материалы VI Междунар. науч.практ. конф., г. Новочеркасск, 7 апр. 2006.: В 5 ч. / Юж.-Рос.гос. техн. Ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ. – 2006. – Ч.3. – С. 56–61.

8. Поляков С.В. Уравнения напряжения изгиба и кручения в проволоках каната двойной свивки в нелинейной форме с учетом различия геометрических параметров и механических свойств проволок // Моделирования. Теория, методы и средства: Материалы VI Междунар. науч.практ. конф., г. Новочеркасск, 7 апр. 2006.: В 5 ч. / Юж.-Рос.гос. техн. Ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ. – 2006. – Ч.5. – С. 70–76.

9. Поляков С.В., Хальфин М.Н. Патент РФ № 2330137 Российская Федерация, МПК Д07В3/00. Способ свивки двухслойного каната – Заявл. 14.08.2006; Оpubл. 27.07.2008. Бюл. № 21.

10. Поляков С.В. Методика расчета подъемных канатов с учетом волнистости при нелинейных зависимостях. Монография. – Санкт-Петербург: ИД «Петрополис», 2020. – 166 с.

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 29.06.2020. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,34. Тираж 120 экз. Заказ 65.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4. Отпечатано на МФУ.

198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.

