

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*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»

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

Санкт-Петербург – 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ.....	13
1.1 Основы теории расчета стальных канатов .....	13
1.1.1 Оценка линейной теории расчета канатов.....	16
1.2 Основные зависимости линейной теории расчета канатов без учета измене- ния геометрических параметров и механических свойств винтовых элемен- тов.....	20
1.3 Основные зависимости линейной теории расчета канатов с учетом волни- стости.....	25
1.4 Обзор теории геометрической нелинейности в грузоподъемных ка- натах.....	32
1.5 Постановка задачи.....	35
2 НЕЛИНЕЙНЫЕ УРАВНЕНИЯ СТАТИКИ КАНАТА С УЧЕТОМ ВОЛНИСТОСТИ.....	37
2.1 Вывод нелинейных уравнений статики для канатов двойной свивки с учетом волнистости .....	37
2.2 Алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния ка- натов с учетом волнистости .....	51
2.3 Нелинейные уравнения статики с учетом волнистости для канатов спиральной свивки .....	53
2.4 Нелинейные уравнения статики стального подъемного каната с учетом волнистости, полученные методом конечных приращений.....	57
2.5 Напряжения в проволоках каната двойной свивки с учетом волни- стости в нелинейной форме .....	62
2.6 Параметры, определяющие различия геометрических и механиче- ских свойств винтовых элементов в канате при нелинейных зависимо- стях.....	70
Выводы по главе.....	71
3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЪЕМНЫХ КАНАТОВ С УЧЕТОМ ВОЛНИСТОСТИ ПРИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАВИСИМОСТЯХ .....	73

3.1 Конструктивные факторы, влияющие на изменение геометрических параметров и механических свойств прядей каната двойной свивки в нелинейной постановке .....	73
3.1.1 Влияние угла свивки слоя прядей на напряженно-деформированное состояние стального подъемного каната при его растяжении с учетом волнистости, рассмотренное на основе нелинейных уравнений статики.....	73
3.1.2 Влияние угла свивки слоя прядей на напряженно-деформированное состояние подъемного каната с учетом волнистости, рассмотренное на основе нелинейных уравнений статики .....	78
3.2 Исследование эксплуатационных факторов на напряженно деформированное состояние каната двойной свивки в нелинейной постановке .....	84
3.2.1 Влияние натяжения каната двойной свивки на его напряженно-деформированное состояние с учетом волнистости при нелинейных зависимостях.....	84
3.2.2 Влияние запаса прочности наиболее нагруженной пряди каната двойной свивки на изменение его геометрических параметров и механических свойств прядей, рассмотренное на основе нелинейных уравнений статики .....	85
3.3 Исследование технологических факторов на напряженно-деформированное состояние каната двойной свивки в нелинейной постановке .....	91
3.3.1 Влияние предела прочности материала каната двойной свивки на изменение его геометрических параметров и механических свойств прядей, рассмотренное на основе нелинейных уравнений статики .....	91
3.3.2 Влияние допуска на диаметр проволок в прядях каната двойной свивки ГОСТ 7669-80 на изменение его геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, рассмотренное на основе нелинейных уравнений статики .....	92
3.3.3 Влияние технологического натяжения на образование в канате изменений геометрических параметров и механических свойств прядей, рассмотренное на основе нелинейных уравнений статики .....	94
3.3.4 Определение неравномерности длин прядей с помощью нелинейных уравнений статики при изготовлении каната двойной свивки.....	95
3.3.5 Влияние неравномерности технологического натяжения проволок в прядях двухслойного каната при нелинейных зависимостях.....	98

3.4 Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния подъемного каната с возникшими в нем изменениями геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.....	102
3.4.1 Цель экспериментальных исследований .....	102
3.4.2 Задачи экспериментальных исследований .....	102
3.4.3 Промышленные и экспериментальные установки для изготовления и исследования, опытных образцов канатов .....	103
3.4.4 Существующие методы экспериментального определения деформаций в подъемном канате .....	106
3.4.5 Объект исследования .....	107
3.4.6 Экспериментальная установка и измерительная аппаратура.....	112
3.4.7 Подготовка устройства к работе для измерения деформаций растяжения и кручения подъемного каната с учетом волнистости.....	119
3.4.8 Методика проведения экспериментальных исследований .....	121
3.4.9 Результаты экспериментальных исследований по нагружению канатов с учетом волнистости .....	122
3.4.10 Влияние неравномерности технологического натяжения на прочность каната двойной свивки.....	136
3.4.11 Сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований .....	138
Выводы по главе.....	139
<b>4. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМОГО ЗНАЧЕНИЯ РАДИУСА ВОЛНИСТОСТИ ДЛЯ ПОДЪЕМНЫХ КАНАТОВ ПРИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАВИСИМОСТЯХ .....</b>	<b>142</b>
4.1 Определение допустимого значения радиуса волнистости при нелинейных зависимостях.....	142
4.2 Алгоритм расчета допустимого значения радиуса волнистости для подъемного каната при нелинейных зависимостях.....	145
4.3. Методика оценки влияния волнистости на прочность и долговечность стальных канатов ПТМ .....	150
4.4 Определение оптимального значения допустимого радиуса волнистости.....	153
Выводы по главе.....	153
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>155</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>157</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>168</b>

Приложение 1. Документация по внедрению результатов диссертационных исследований.....	169
---	-----

## ВВЕДЕНИЕ

**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 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.

Наибольший вклад в теорию, расчет и конструирование стальных 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.

В последнее время с развитием высотного строительства в мире встает актуальный вопрос по применению грузоподъемной техники большой высоты. Самый большой приставной кран в мире достигал высоты 750 метров и возводил он небоскреб «Башню Халифа» (Burj Khalifa) в Дубае. В настоящее время при строительстве башни «Лахта» в Санкт-Петербурге применяются башенные краны Liebherr с

системами 24 НС 1000 и 24 НС 1250, наращиваются вне здания до высоты более 400м, с длиной каната более 1200 метров.

НИИМетиз, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», ВНИОМШС, Одесский политехнический университет, Волгоградский сталепроволочно-канатный, Магнитогорский калибровочный заводы и другие организации, занимающиеся расчетом и конструированием подъемных канатов, внесли большой вклад в совершенствование конструкций подъемных канатов, технологию изготовления и повышение безопасности их эксплуатации. 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). Браковка подъемных канатов в первые месяцы их эксплуатации по причине образования в них волнистости и обрывов проволок приводит к экономическим и социальным затратам.

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

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». 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 (длиной более 1000 метров), изгибом и изменением углов свивки, т.е. с изменением геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, которое необходимо учитывать при решении задач. При эксплуатации стальных канатов в них возникают изменение геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, при котором канат принимает форму про-

странственной винтовой линии. До 2003 года не было предусмотрено количественное ограничение радиуса волнистости  $R_B$ , при котором возможна дальнейшая эксплуатация канатов с учетом образовавшихся изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

При эксплуатации стальных канатов на высоких подъемах 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. В результате изменения угла свивки происходит образования различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, проявляется дефект волнистость, оказывающий существенное влияние на безопасность эксплуатации стального каната ПТМ. Изменение геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов стального каната (дефект – волнистость) рассчитанный с помощью линейных уравнений включен в редакцию «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения».

Влияние собственного веса подъемного каната существенно отражается на характере его деформаций.

Как известно учет геометрической нелинейности каната уменьшает значения соответствующих перемещений, рассчитанных по линейным уравнениям. Ошибка по удлинению каната при больших длинах (более 1000 метров) могут составляет 48 %, а по углу раскручивания доходить до 100 %.

Такое расхождение расчетов свидетельствует о том, что учет геометрической нелинейности является необходимым при анализе напряженно-деформированного состояния канатов ПТМ при его раскручивании и внесения корректировки в редакцию «Правил устройства безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов», «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения».

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.

**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.

**Объект исследования.** Объектом исследования в научной работе является стальной канат подъемно-транспортных машин.

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

**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.

**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** заключается в следующем:

- Впервые получены нелинейные уравнения статики, позволяющие определять сложное напряженно-деформированное состояние подъемного каната с учетом волнистости.
- Предложена методика исследования напряженно-деформированного состояния подъемного каната с учетом волнистости, позволяющая определять напряжения растяжения и кручения при нелинейных зависимостях.
- 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.
- Разработана методика определения допустимого значения радиуса волнистости подъемного каната, которая получена с помощью нелинейных уравнений статики.
- Разработана методика оценки влияния волнистости на прочность и долговечность стальных канатов ПТМ при нелинейных зависимостях.

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

**Достоверность и практическое значение научных положений.**

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.

Практическое значение заключается в разработке:

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.

**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 14 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 171 страницу машинописного текста, 10 таблиц, 71 рисунка, 164 формул, 1 приложение и список использованной литературы из 105 наименований.

# 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

## 1.1. Основы теории расчета стальных канатов

Большинство исследователей рассматривают упрощенную модель стального подъемного каната упругую либо упруго-вязкую нить, наделенную по аналогии с обычным стержнем идеальной гибкостью и продольной жесткостью. Реальный канат является неоднородной гибкой механической системой, элементы которого находятся в сложном напряженном состоянии. Рассматривая гибкую нить как модель реального каната, не учитывается важное свойство – способность канатов испытывать под действием продольной растягивающей нагрузки крутильные деформации, которые во многих случаях эксплуатации канатов являются определяющими при оценке его напряженно-деформированного состояния.

Теория гибкой нити во внешней механике каната сыграла свою прогрессивную роль. Наибольшие успехи в теории гибкой нити достигнуты советскими учеными А.Н. Динником, Г.Н. Савиным, А.С. Локшиным, Н.П. Нероновым, Ф.В. Флоринским и другие [65].

Однако задачи внешней механики каната еще не определяют фактического его напряженного состояния. Для этого необходимо иметь сведения о распределении общих усилий между отдельными элементами в канате. Решение этого вопроса требует изучения силового взаимодействия отдельных элементов в канате и построения, таким образом, внутренней механики работы каната в целом.

Хотя вопросы внутренней механики каната поднимались давно, однако после А.Н. Динника, рассмотревшего с несколько упрощенных позиций задачу простого растяжения каната, существенно нового внесено не было.

В практике канат часто работает на совместное растяжение и кручение. В этой связи заслуживает внимания работы Дреера, который так же, как и Бендорф, исходит из простых геометрических соображений и вводит угол скручивания каната. Однако выводы Дреера не отличаются необходимой общностью и строгостью. Поскольку здесь рассмотрен более общий случай, то решение Бендорфа –

Динника, полученное аналогичным путем для простого растяжения, должно вытекать из него как частное [101, 103, 21].

Наибольший интерес представляет теория кручения тросов многожильных пружин сжатия С.Д. Пономарева. Однако эта теория не может быть безоговорочно перенесена на проволочные канаты в силу некоторых их конструктивных особенностей [51].

Современные требования к расчетам подъемных стальных канатов на прочность вынуждают отказаться от гипотезы сплошности и рассматривать проволочный канат в дискретной схеме.

Подъемный стальной канат представляет собой сложную, статически неопределимую стержневую систему, в общем поддающуюся расчету методами строительной механики.

Более глубокие исследования модели каната были проведены доктором технических наук, проф. М.Ф. Глушко. При этом учитывалось, что в отличие от обычных стержневых систем, рассматриваемых в строительной механике, канат обладает той существенной особенностью, что все его элементы взаимно контактируют по длине, благодаря чему они работают совместно, сохраняя структурную целостность каната. Данная модель из всех существующих в настоящее время является наиболее совершенной и позволяет решить внутреннюю задачу каната, т.е. исследовать напряженно-деформированное состояние его элементов.

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 [9].

Расчету напряженно-деформированного состояния канатов, имеющих одинаковые геометрические параметры и механические свойства проволок (прядей), расположенных в одном слое, посвящены работы М.Ф. Глушко [9], С.Т. Сергеева [68], А.П. Ветрова [7]. Влияние эксплуатационных факторов на прочность и стойкость канатов рассматривается в работах С.Т. Сергеева [69–70], Г.П. Ксюнина [35, 36], А.М. Колчина [28], А.А. Короткого [30, 32], влияние технологических факторов на прочность и стойкость канатов – в работах профессоров П.П. Нестерова [43], В.Т.

Козлова [25, 26], Н.К. Гончаренко [18, 19], В.А. Рыжикова [60, 62], М.Н. Хальфина [83, 77, 91, 93].

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

При появлении неравномерности геометрических параметров и механических свойств проволок продольная ось каната из прямолинейной становится спиралевидной – в виде винтовой линии, короткие проволоки постоянно находятся на вогнутой стороне каната, а длинные – на выпуклой. Такие канаты снимаются с эксплуатации, хотя по периодическим механическим испытаниям проволок на растяжение по ГОСТ 10446 – 80 (ИСО 6892—84), на перегиб по ГОСТ 1579 – 93 (ИСО 7801-84) и на скручивание по ГОСТ 1545 – 80 канат признается годным к дальнейшей эксплуатации [35].

Нелинейность в теорию расчета стальных подъемных канатов проникает в физическом и геометрическом виде.

Физическая нелинейность является следствием, упругопластических деформаций, которую проволоки испытывают на этапе изготовления каната. Напряжения, возникающие в результате этих деформаций, названные технологическими достигают огромных значений и, как правило, превосходят по величине эксплуатационные. Таким образом, проволочный канат можно трактовать как предварительно напряженную конструкцию, а эксплуатационные напряжения как напряжения, возникающие при повторном нагружении. Поэтому, если технологические напряжения можно считать возникающими в результате упругопластических деформаций, то эксплуатационные напряжения, как правило, являются следствием упругих деформаций каната.

Геометрическая нелинейность рассматривает положение точек тела в первоначальном его состоянии (то есть до деформации) и их положения в окончательном его состоянии (то есть после деформации).

Геометрическая нелинейность обусловлена изменением первоначальных геометрических параметров каната за период его деформации. Существенному изменению во многих практических случаях, где эксплуатация канатов сопряжена с кручением, подвергается первоначальный угол свивки винтовых элементов, не учет которого приводит к погрешностям, недопустимым в инженерных расчетах [16, 66].

В настоящее время теория расчета подъемного каната с учетом волнистости является малоизученной и требует рассмотрения как с точки зрения потребностей практики, так и развития нелинейной теории расчета канатов.

### 1.1.1. Оценка линейной теории расчета канатов

Используя методы строительной механики, проф. М.Ф. Глушко создал теорию расчета прямого каната при совместном растяжении и кручении [8-10], основными уравнениями которой являются:

$$\left. \begin{aligned} T &= A\varepsilon + C\theta + d\varepsilon_r; \\ M_x &= C\varepsilon + B\theta + e\varepsilon_r; \\ f_n &= d\varepsilon + C\theta + g\varepsilon_r, \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

где  $T, M_x, f_n$  – соответственно, растягивающая сила, крутящий момент и нормальное давление;  $\varepsilon, \theta, \varepsilon_r$  – соответственно, относительные продольные, угловые и поперечные деформации каната;  $A, B, C, d, e, g$  – агрегатные коэффициенты жесткости, зависящие от рода свивки.

Основным элементом каната является стержень, ось представляет собой обыкновенную винтовую линию  $S$  на круговом базисном цилиндре (рисунок 1.1). Винтовая линия  $S$  пересекает образующие цилиндра под постоянным углом свивки  $\alpha$ .

В спиральном канате основным элементом является проволока, а для канатов двойной свивки – прядь.

Положение точки винтовой оси в пространстве определяется двумя системами координат: декартова  $x, y, z$ , ось  $x$  совпадает с осью каната, а оси  $y, z$  расположатся в его поперечном сечении. В поперечном сечении каната вводят полярные координаты  $r, \varphi$ . Единичные орты осей  $x, y, z$  представим соответственно через  $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ ; подвижная  $b, n, t$ , связанная с винтовой осью основного элемента каната так, что ось  $t$  является касательной к винтовой оси, ось  $n$  является продолжением полярного радиуса в данной точке, а ось  $b$  нормальна к первым двум так, что трехгранник  $b, n, t$  образует правую систему координат.

При этом параметрические уравнения, связывающие координаты  $x, y, z$  с  $r, \varphi$ , имеют вид:

$$x = r \varphi \operatorname{ctg} \alpha; \quad y = r \cos \varphi; \quad z = r \sin \varphi, \quad (1.2)$$

где  $\varphi$  – угол крутки винтовой оси.

Построение зависимостей линейной теории проф. Глушко М.Ф. основано на следующих допущениях:

1. Размеры поперечного сечения винтового элемента каната малы по сравнению с его длиной и радиусом кривизны, что позволяет понятие «винтовой элемент» отождествить с понятней «винтовая ось»;
2. Технологические напряжения в расчет не принимаются, т.е. считается, что первоначальное состояние винтового элемента является ненапряженным;
3. Свивка элементов каната происходит с тангенциальными зазорами, обеспечивающими отсутствие междупрядного и междупроволочного давления в этом направлении, а также отсутствие трения по длине винтовых элементов;
4. Геометрически равноправные винтовые элементы каната являются равноправными и в силовом отношении;
5. Винтовые элементы являются равномерно нагруженными по длине;
6. Материал проволок каната работает в упругой зоне деформаций;
7. Изменение углов свивки винтовых элементов каната за период деформации является несущественным и им можно пренебречь.

Первое из указанных допущений соответствует представлению винтового элемента каната как естественно закрученного стержня; 2–5-ое допущения были

подвергнуты экспериментальной проверке при создании линейной теории расчета; 6, 7-ое допущения свидетельствуют о том, что поставленные задачи в работе являются физически и геометрически линейными [17, 29, 33, 39, 42].

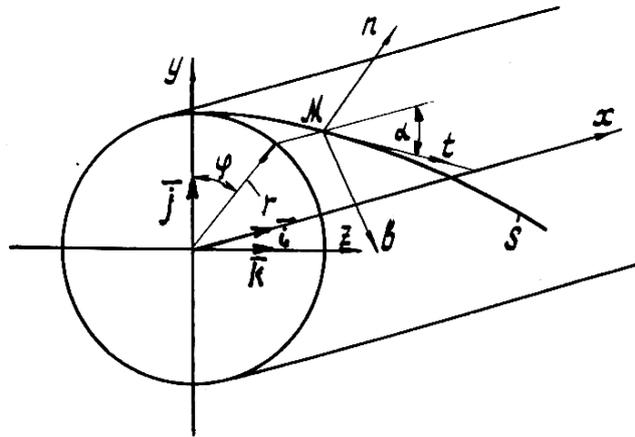


Рисунок 1.1 – К определению геометрических параметров винтового элемента

В дальнейших работах проф. М.Ф. Глушко и его учеников было произведено уточнение данной теории в нелинейной постановке:

$$\left. \begin{aligned} T &= A\varepsilon + C\theta + A_{11}\varepsilon^2 + A_{12}\varepsilon\theta + A_{22}\theta^2; \\ M_x &= C\varepsilon + B\theta + C_{11}\varepsilon^2 + C_{12}\varepsilon\theta + C_{22}\theta^2, \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

где  $A_{11}, A_{12}, A_{22}, C_{11}, C_{12}, C_{22}$  – агрегатные коэффициенты жесткости каната при нелинейной деформации.

Относительная деформация растяжения винтового элемента:

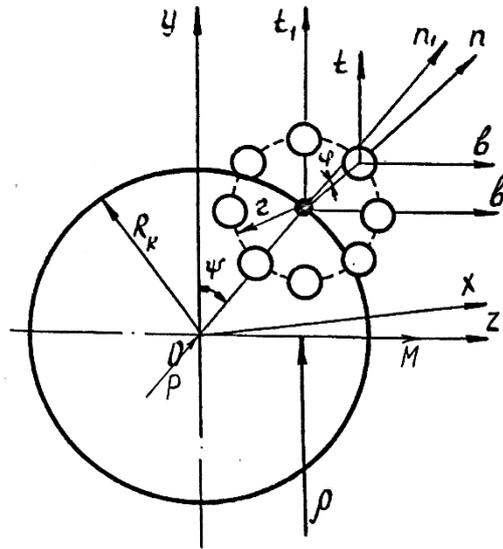
$$\varepsilon_s = \varepsilon \cos^2 \beta + \theta R_k \sin \beta \cos \beta + \varepsilon_r \sin^2 \beta + \frac{1}{2} \left[ (\varepsilon^2 + \theta^2 R_k^2) \left( \cos^2 \beta + \varepsilon_r \sin^2 \beta + \right) + R_k \theta \varepsilon_r \sin 2\beta \right], \quad (1.4)$$

где  $R_k$  и  $\beta$  соответственно радиус и угол свивки каната двойной свивки.

Уравнения также основаны на допущении одинаковости деформаций прядей или проволок одного слоя прямого каната.

Появление структурных дефектов типа волнистость объясняется воздействием несимметричного приложения растягивающей нагрузки. При этом не рассматриваются причины появления несимметричного приложения растягивающей нагрузки. Также, не учитывается, что при несимметричном действии растягивающей нагрузки на канат, вследствие неодинаковости геометрических параметров и

механических свойств, появится дополнительная деформация кручения [2, 3, 6, 83,74]. При определении в стальном канате изменений геометрических параметров



и механических свойств винтовых элементов пользуются системой декартовых координат  $x, y, z$  (рисунок 1.2), так что ось  $x$  совпадает с продольной осью каната, а  $y$  и  $z$  расположены в его поперечном сечении.

Рисунок 1.2 – К определению деформаций с учетом изменения геометрических параметров и механических свойств винтового элемента с помощью декартовой системы координат

Для ориентирования оси подъемного каната вводят систему координат  $t_1, n_1, b_1$  так, что ось  $t_1$  направлена по касательной, а  $n_1$  и  $b_1$ , соответственно, по нормали и бинормали к винтовой оси каната.

При помощи закономерностей из аналитической геометрии при заданном угле волнистости  $\gamma$  и полярном угле  $\psi$ , можно найти направляющие косинусы осей  $t_1, n_1, b_1$  в системе координат  $x, y, z$  (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Связь систем координат

Координаты	$x$	$y$	$z$
$b_1$	$\sin \gamma$	$-\cos \gamma \sin \psi$	$\cos \gamma \cos \psi$
$n_1$	0	$\cos \gamma$	$\sin \gamma$
$t_1$	$\cos \gamma$	$\sin \gamma \sin \psi$	$-\sin \gamma \cos \psi$

Для ориентирования оси проволоки вводят систему координат  $t, n, b$  так, что ось  $t$  направлена по касательной к оси подъемного каната, а  $n$  и  $b$  соответственно

по нормали и бинормали к винтовой оси проволок. Связь между координатами систем  $t_1, n_1, b_1$  и  $t, n, b$  также можно выразить в виде направляющих косинусов (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Параметры связи систем координат

Координаты	$t_1$	$n_1$	$b_1$
$b$	$\sin \alpha$	$-\cos \alpha \sin \varphi$	$\cos \alpha \cos \varphi$
$n$	0	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$
$t$	$\cos \alpha$	$\sin \alpha \sin \varphi$	$-\sin \alpha \cos \varphi$

Большое значение расчету стальных подъемных канатов, имеющих дефект волнистость придал академик Савин Г.П. [63, 64], который отмечал, что « ... до настоящего времени не выяснена природа появления такого дефекта в стальных канатах, как остаточная волнистость, а, следовательно, не найдены радикальные меры борьбы с этим явлением. Решение этого вопроса потребует дальнейшего изучения механизма распределения нагрузок между элементами каната, накопления остаточных структурных смещений в нем с позиций строительной механики каната» [4, 64].

Проф. Хальфиным М.Н. разработана теория расчета стальных подъемных канатов с учетом волнистости в линейной постановке. Однако при эксплуатации канатов в связи с большим кручением проявляется нелинейность деформаций, вызванная действием нагрузки, приводящая к изменению первоначального угла свивки винтовых элементов [86].

Таким образом, несмотря на большое количество работ, посвященных подъемному канату, в литературе отсутствует анализ его напряженно-деформированного состояния и расчет на прочность с учетом образовавшихся изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов в нелинейной форме.

## 1.2. Основные зависимости линейной теории расчета канатов без учета изменения геометрических параметров и механических свойств

### ВИНТОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Основополагающие зависимости линейной теории проф. Глушко М.Ф. без учета изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов применительно к канатам, основным элементом которых является либо проволока, свитая в спиральный канат, либо прядь, свитая в канат двойной свивки.

1. Уравнения деформаций винтовой оси без учета изменения геометрических параметров и механических свойств винтового элемента [8–9]:

$$\varepsilon_s = \varepsilon \cos^2 \alpha + r \theta \sin \alpha \cos \alpha + \varepsilon_r \sin^2 \alpha; \quad (1.5)$$

$$\Delta \alpha = r \theta \cos^2 \alpha + (\varepsilon_r - \varepsilon) \sin \alpha \cos \alpha; \quad (1.6)$$

$$\tilde{t} = \theta \cos^4 \alpha + (\varepsilon - \varepsilon_r) \frac{\sin^3 \alpha \cos \alpha}{r}; \quad (1.7)$$

$$\tilde{b} = \theta (1 + \cos^2 \alpha) \sin \alpha \cos \alpha + (\varepsilon_r - \varepsilon) \frac{\sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{r}, \quad (1.8)$$

где  $\varepsilon_s$ ,  $\tilde{t}$ ,  $\tilde{b}$  – деформации винтового элемента: осевая, кручения и кривизны;  $\varepsilon$ ,  $\theta$ ,  $\varepsilon_r$  – деформации каната: осевая, угловая и поперечная;  $\alpha$ ,  $r$  – угол и радиус свивки винтовой оси;  $\Delta \alpha$  – изменение угла свивки винтовой оси.

2. Уравнения равновесия внутренних силовых факторов, возникающих в винтовом элементе при действии на канат внешних нагрузок [9]:

$$\left. \begin{aligned} \omega_t P_b - \omega_b P_t &= -f_n; \\ \omega_t L_b - \omega_b L_t &= -P_b; \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

где  $P_t$ ,  $P_b$ ,  $L_t$ ,  $L_b$  – осевое усилие, поперечная сила, крутящий и изгибающий моменты;  $\omega_t$ ,  $\omega_b$  – кручение и кривизна винтовой оси, при этом:

$$\omega_t = \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{r}; \quad \omega_b = \frac{\sin^2 \alpha}{r}. \quad (1.10)$$

3. Уравнения, отражающие физические свойства винтового элемента для проволоки спирального каната:

$$P_t = E f \varepsilon_s; \quad L_t = G I_p \tilde{t}; \quad L_b = E I \tilde{b}, \quad (1.11)$$

для пряди каната двойной свивки:

$$\left. \begin{aligned} P_t &= a_0 \varepsilon_{\text{пр}} + c_0 \tilde{t}_{\text{пр}}; \\ L_t &= c_0 \varepsilon_{\text{пр}} + b_0 \tilde{t}_{\text{пр}}; \\ L_b &= g_0 \tilde{b}_{\text{пр}}, \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

где  $E, G$  – модули упругости 1-го и 2-го рода материала проволок;  $f$  – площадь поперечного сечения проволоки;  $I, I_p$  – осевой и полярный моменты инерции поперечного сечения проволоки.

Коэффициенты жесткости проволок, свитых в прядь каната двойной свивки без учета изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов  $a_0, b_0, c_0$  имеют вид следующих зависимостей [8, 9]:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \sum_{i=1}^n \left\{ E f \cos^3 \alpha + E I \frac{\sin^4 \alpha}{r^2} \cos^2 \alpha + G I_p \frac{\sin^6 \alpha}{r^2} \cos^2 \alpha \right\}; \\ b_0 &= \sum_{i=1}^n \left\{ E f r^2 \cos \alpha \sin^2 \alpha + G I_p \cos^7 \alpha + E I (1 + \cos^2 \alpha)^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha \right\}; \\ c_0 &= \sum_{i=1}^n \left\{ E f r \cos^2 \alpha \sin \alpha + G I_p \frac{\cos^4 \alpha}{r} \sin^3 \alpha - E I (1 + \cos^2 \alpha) \frac{\sin^3 \alpha \cos^2 \alpha}{r} \right\}. \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

Изгибная жесткость пряди определяется выражением:

$$g_0 = \xi \sum_{i=1}^n E I, \quad (1.14)$$

где  $\xi$  – конструктивный коэффициент, учитывающий свивку пряди, обычно равный единице [9].

Уравнения, осуществляющие связь значений внутренних силовых факторов, отнесенных, к системам координат  $x y z$  и  $\vec{t} \vec{b} \vec{n}$ :

$$\left. \begin{aligned} P_x &= P_b \sin \alpha + P_t \cos \alpha; \\ L_x &= L_b \sin \alpha + L_t \cos \alpha + r(P_t \sin \alpha - P_b \cos \alpha), \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

$$T = \sum_{i=1}^n P_{xi}; \quad M = \sum_{i=1}^n L_{xi}, \quad (1.16)$$

где  $P_x, L_x$  – усилие и крутящий момент, приложенные к винтовой оси и действующие, соответственно, вдоль оси  $x$  и относительно оси  $x$ ;  $T, M$  – внешнее осевое усилие и скручивающий момент, приложенные к канату (рисунок 1.3).

С целью определения из систем уравнений (1.11 или 1.12) и (1.15–1.16) неизвестных параметров существует еще одно уравнение, отражающее эмпирическую связь значений контактного давления  $f_n$  и поперечного сужения  $\varepsilon_r$  [9, 11]:

$$\varepsilon_r = -k_n f_n, \quad (1.17)$$

где  $k_n$  – опытный коэффициент.

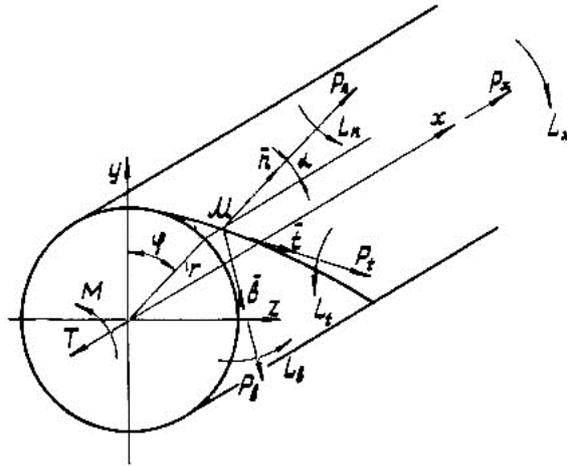


Рисунок 1.3 – К определению связи внутренних силовых факторов винтового элемента

Агрегатные уравнения статики прямого каната получены на основе зависимостей (1.5–1.9) и (1.15, 1.16), они отражают связь деформаций каната с внешними усилиями, действующими на него, и имеют вид:

– для спиральных канатов:

$$\left. \begin{aligned} T &= a\varepsilon + c\theta; \\ M &= c\varepsilon + b\theta, \end{aligned} \right\} \quad (1.18)$$

– для канатов двойной свивки:

$$\left. \begin{aligned} T &= A_{11}\varepsilon + A_{12}\theta + A_{13}\varepsilon_r; \\ M &= A_{12}\varepsilon + A_{22}\theta + A_{23}\varepsilon_r, \end{aligned} \right\} \quad (1.19)$$

где  $a, b, c$  и  $A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{22}, A_{23}$  – агрегатные коэффициенты жесткости, зависящие от рода свивки, соответственно, для спиральных канатов и канатов двойной свивки.

Для канатов двойной свивки без учета изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов коэффициенты жесткости имеют вид [8, 10]:

$$\begin{aligned} A_{11} &= \sum_{j=1}^m A'_{11} - \mu A'_{13}; & A_{12} &= \sum_{j=1}^m A'_{12} - \mu A'_{23}; \\ A_{22} &= \sum_{j=1}^m A'_{22} - \mu \frac{(A'_{23})^2}{A'_{13}}, \end{aligned} \quad (1.20)$$

причем:

$$\left. \begin{aligned}
 A'_{11} &= a_0 \cos^3 \beta + 2 \frac{c_0}{R} \sin^3 \beta \cos^2 \beta + \frac{b_0 \sin^2 \beta + g_0 \cos^2 \beta}{R^2} \sin^4 \beta \cos \beta; \\
 A'_{22} &= a_0 R^2 \sin^2 \beta \cos \beta + b_0 \cos^7 \beta + g_0 (1 \sin^2 \beta \cos \beta + 2 c_0 R \cos^4 \beta \sin \beta); \\
 A'_{12} &= a_0 R \cos^2 \beta \sin \beta + c_0 (1 + \operatorname{tg}^4 \beta) \cos^5 \beta + \frac{b_0 \cos^2 \beta - g_0 (1 + \cos^2 \beta)}{R} \sin^3 \beta \cos^2 \beta; \\
 A'_{13} &= a_0 \sin^2 \beta - \frac{c_0}{R} \cos 2\beta \sin^3 \beta - \frac{b_0 \sin^2 \beta + g_0 \cos^2 \beta}{R^2} \sin^4 \beta \cos \beta; \\
 A'_{23} &= a_0 R \sin^3 \beta + c_0 \cos 2\beta \sin^2 \beta \cos \beta - \frac{b_0 \cos^2 \beta - g_0 (1 + \cos^2 \beta)}{R} \sin^3 \beta \cos^2 \beta,
 \end{aligned} \right\} (1.21)$$

где  $\beta$ ,  $R$  – угол и радиус свивки пряди в канат двойной свивки.

При  $\alpha = \beta$ ,  $r = R$ ,  $c_0 = 0$ ,  $a_0 = EF$ ,  $b_0 = GI_p$ ,  $g_0 = EI$ , можно получить значения коэффициентов жесткости для спирального каната.

Выражения для напряжений с одинаковыми геометрическими параметрами и механическими свойствами винтовых элементов.

Основными напряжениями в канате являются нормальные растягивающие  $\sigma_p$  и нормальные изгибающие  $\sigma_{изг}$  [8-12].

Нормальные растягивающие:

$$\sigma_p = E \varepsilon_s. \quad (1.22)$$

Нормальные изгибающие:

$$\sigma_{изг} = E \varepsilon_{изг}, \quad (1.23)$$

где  $\varepsilon_{изг}$  – деформация изгиба винтовой оси, определяемая по формуле:

$$\varepsilon_{изг} = \xi (\tilde{b} \sin \gamma - \tilde{n} \cos \gamma), \quad (1.24)$$

где  $\xi$ ,  $\gamma$  – координаты, определяющие положение точки в поперечном сечении проволоки [9].

Деформации изгиба упругой линии проволоки могут быть выражены через изгибающие моменты:

$$\tilde{b} = \frac{L_b}{EI_b}; \quad \tilde{n} = \frac{L_n}{EI_n}, \quad (1.25)$$

где  $I_b$  и  $I_n$  – соответствующие осевые моменты инерции площади сечения проволоки.

Иногда приходится учитывать касательные напряжения кручения  $\tau_t$ . Касательные напряжения в проволоках от поперечных сил  $P_b$  и  $P_n$ , как и в других стержневых системах, обычно получаются незначительными, и ими можно пренебречь.

Касательные от кручения:

$$\tau_t = G \frac{\xi}{2} \tilde{t}. \quad (1.26)$$

Полные нормальные напряжения в данной точке:

$$\sigma_t = \sigma_p + \sigma_{изг}. \quad (1.27)$$

Эквивалентные напряжения по четвертой теории прочности определяются:

$$\sigma_{эkv.} = \sqrt{\sigma_t^2 + 4\tau_t^2}. \quad (1.28)$$

Все эти выражения (1.5–1.8), (1.9), (1.12), (1.15–1.17), (1.18 или 1.19), а также (1.22–1.28) дают необходимый теоретический аппарат для решения линейных задач статики прямых канатов, без учета изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

### 1.3. Основные зависимости линейной теории расчета канатов с учетом волнистости

Вследствие различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов каната, расположенных в одном слое, продольная ось каната изгибается по винтовой линии с шагом, равным шагу свивки каната, т.е. канат имеет дефект волнистость. Причем проволоки (пряди) такого каната расположены постоянно либо на вогнутой, либо на выпуклой его сторонах.

Запишем основополагающие зависимости линейной теории, полученные проф. Хальфиным М.Н. с учетом волнистости необходимые для расчета стального подъемного каната [2, 79, 86, 91].

1. Уравнения деформаций винтовой оси с учетом волнистости [79–81, 86]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_s = & \varepsilon \cos^2 \alpha + r\theta \sin \alpha \cos \alpha + \varepsilon_r \sin^2 \alpha + \\ & + \Delta \varepsilon \cos^2 \alpha \cos \varphi + \Delta \theta r \sin \alpha \cos \alpha \cos \varphi + \\ & + \Delta \varepsilon_r \sin^2 \alpha \cos \varphi + \frac{r}{\rho} \cos^2 \alpha \cos \varphi; \end{aligned} \quad (1.29)$$

$$\begin{aligned} \Delta \alpha = & r\theta \cos^2 \alpha + (\varepsilon_r - \varepsilon) \sin \alpha \cos \alpha + \\ & + r\Delta \theta \cos^2 \alpha \cos \varphi + \left( \Delta \varepsilon_r - \Delta \varepsilon + \frac{r}{\rho} \right) \sin \alpha \cos \alpha \cos \varphi; \end{aligned} \quad (1.30)$$

$$\begin{aligned} \tilde{t} = & \theta \cos^4 \alpha + (\varepsilon - \varepsilon_r) \frac{\sin^3 \alpha \cos \alpha}{r} - \frac{g_0}{H} \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{\rho} \cos \varphi + \\ & + \Delta \theta \cos^4 \alpha \cos \varphi + (\Delta \varepsilon - \Delta \varepsilon_r) \frac{\sin^3 \alpha \cos \alpha}{r} \cos \varphi; \end{aligned} \quad (1.31)$$

$$\begin{aligned} \tilde{b} = & \theta (1 + \cos^2 \alpha) \sin \alpha \cos \alpha + (\varepsilon_r - \varepsilon) \frac{\sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{r} + \frac{1}{\rho} \cos^2 \alpha \cos \varphi - \\ & + \Delta \theta (1 + \cos^2 \alpha) \sin \alpha \cos \alpha \cos \varphi + (\Delta \varepsilon_r - \Delta \varepsilon) \frac{\sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{r} \cos \varphi; \end{aligned} \quad (1.32)$$

$$\tilde{n} = \frac{1}{\rho} \cos \alpha \sin \varphi \quad (1.33)$$

где  $\tilde{n}$  – деформация изгиба винтового элемента [29];  $\Delta \varepsilon, \Delta \theta, \frac{1}{\rho}$  – дополнительные продольная, крутильная и изгибная деформация каната [86];  $\varphi$  – полярный угол;  $g_0, H$  – жесткость пряди на изгиб, свободное кручение.

2. Уравнения равновесия внутренних силовых факторов, возникающих в винтовом элементе с учетом волнистости, при действии на канат внешних нагрузок:

$$\left. \begin{aligned} f_n &= \omega_b P_t - \omega_t P_b; \\ P_b &= \omega_b L_t - \omega_t L_b. \end{aligned} \right\} \quad (1.34)$$

3. Уравнения, отражающие физические свойства винтового элемента с учетом изменения его геометрических параметров и механических свойств:

– для проволоки спирального каната:

$$P_t = E f \varepsilon_s; \quad L_t = G I_p \tilde{t}; \quad L_b = E I \tilde{b}; \quad L_n = E I \tilde{n}, \quad (1.35)$$

– для пряди каната двойной свивки:

$$\left. \begin{aligned} P_t &= a_0 \varepsilon_s + c_0 \tilde{t}; \\ L_t &= c_0 \varepsilon_s + b_0 \tilde{t}; \\ L_b &= g_0 \tilde{b}; \\ L_n &= g_0 \tilde{n}. \end{aligned} \right\} \quad (1.36)$$

Коэффициенты жесткости, учитывающие различие длин, проволок и механических свойств для канатов спиральной свивки:

$$\left. \begin{aligned} A_{14} &= E F r \cos^3 \alpha - \frac{E I}{r} \sin^3 \alpha \cos^3 \alpha - \frac{G I_p}{r} (1 + \mu) \cos \alpha \sin^2 \alpha; \\ A_{24} &= E F r^2 \sin \alpha \cos^2 \alpha + E I \sin \alpha \cos^2 \alpha (1 + \mu) - G I_p (1 + \mu) \cos^4 \alpha \sin \alpha; \\ A_{44} &= A_{44_1} + A_{44_2}; \\ A_{44_1} &= E F r^2 \cos^3 \alpha + E I \cos^3 \alpha + G I_p \sin^2 \alpha \cos \alpha (1 + \mu); \\ A_{44_2} &= E I \cos \alpha, \end{aligned} \right\} \quad (1.37)$$

где  $\mu$  – коэффициент поперечного сужения каната.

Вследствие неодинаковости геометрических параметров и механических свойств ось каната изгибается по винтовой линии с радиусом  $R_B$ .

Для получения уравнения статики каната, имеющего различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, были приняты следующие допущения [86]:

1. Вследствие различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов каната, расположенных в одном слое, продольная ось каната изгибается по винтовой линии с шагом, равным шагу свивки каната, т. е. канат имеет дефект волнистость. Причем проволоки (пряди) такого каната расположены постоянно либо на вогнутой, либо на выпуклой его сторонах.

2. Радиус каната является величиной малого порядка по сравнению с радиусом кривизны оси изогнутого каната при волнистости.

3. Угол  $\gamma$ , который представляет собой угол свивки винтовой линии оси каната с волнистостью, является величиной малого порядка в сравнении с углом свивки каната.

4. Силы трения между смежными проволоками (прядами) одного слоя отсутствуют вследствие наличия тангенциального зазора.

5. Перемещения винтовых элементов находятся в пределах упругих деформаций каната.

6. Размеры поперечного сечения винтового элемента каната малы в сравнении с его длиной и радиусом кривизны.

Изгиб каната, с учетом изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, совершается по оси  $z$  (рисунок 1.4). Тогда полярный угол  $\psi = 0$  [79, 80]. Учитывая, что при изменении геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов  $\gamma \ll \beta$ ,  $R_B \ll R_k$ , то можно получить уравнения осуществляющие связь значений внутренних силовых факторов, отнесенных, к системам координат  $x y z$  и  $\vec{t} \vec{b} \vec{n}$ :

$$\left. \begin{aligned} P_x &= P_b \sin \alpha + P_t \cos \alpha; \\ L_x &= L_b \sin \alpha + L_t \cos \alpha + (P_t \sin \alpha - P_b \cos \alpha) R_k; \\ L_z + P_x R_B &= L_b \cos \alpha \cos \varphi - L_t \sin \alpha \cos \varphi - L_n \sin \varphi + \\ &+ (P_b \sin \alpha + P_t \cos \alpha) R_k \cos \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (1.38)$$

$$T = \sum_{i=1}^n P_{xi}; \quad M_{кр.} = \sum_{i=1}^n L_{xi}; \quad M_{изг.} = \sum_{i=1}^n L_{zi}, \quad (1.39)$$

где  $L_z$  – изгибающий момент, приложенные к винтовой оси и действующие, соответственно, вдоль оси  $z$  и относительно оси  $z$ ;  $M_{изг.}$  – изгибающий момент, приложенный к канату.

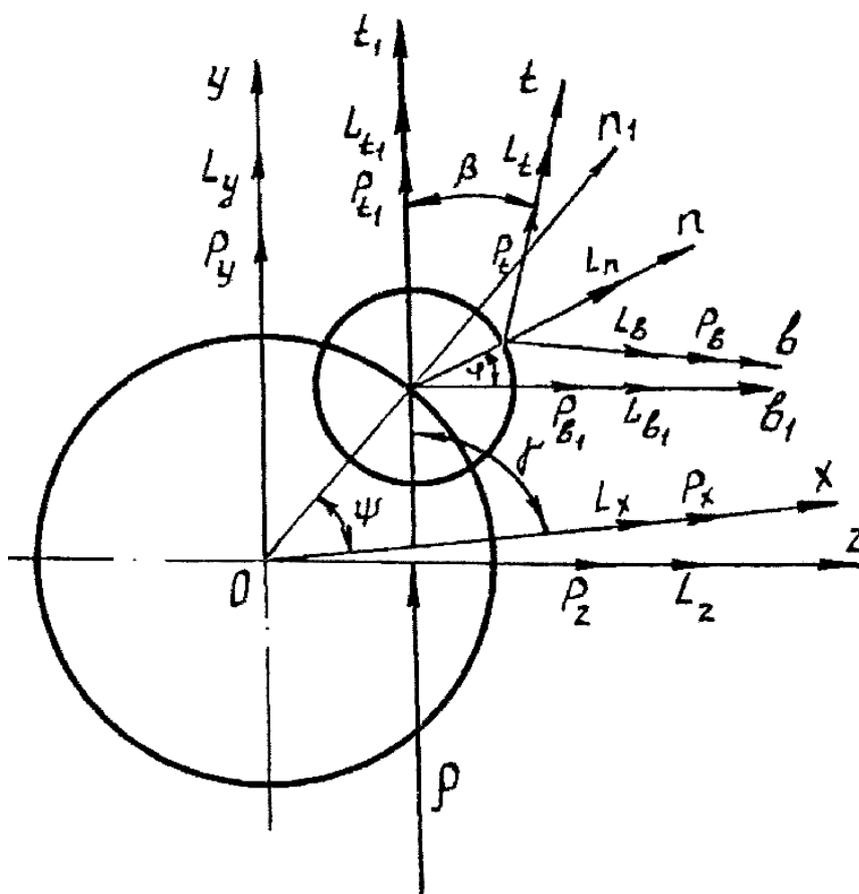


Рисунок 1.4 – К выводу уравнений статики подъемного каната с учетом изменения его геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов

С целью определения всех неизвестных из системы уравнений (1.38), была получена зависимость, отражающая связь значений контактного давления  $\Delta f_n$  каната с учетом волнистости, и поперечного сужения  $\Delta \varepsilon_r$  [2–7, 79, 86]:

$$\Delta \varepsilon_r = -k_n \Delta f_n. \quad (1.40)$$

На основании допущений, принятых в работах [85, 86], получены уравнения статики каната, имеющего изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{xi} &= \left( \Delta \varepsilon A_{11} + \Delta \theta A_{12} + \frac{1}{\rho} A_{14} \right) \cos^2 \varphi_i, \\ \Delta M_{xi} &= \left( \Delta \varepsilon A_{12} + \Delta \theta A_{22} + \frac{1}{\rho} A_{24} \right) \cos^2 \varphi_i, \\ M_z + P_x R_B &= \left( \Delta \varepsilon A_{14} + \Delta \theta A_{24} + \frac{1}{\rho} A_{44} \right) \cos^2 \varphi_i, \end{aligned} \right\} \quad (1.41)$$

где  $\Delta P_{xi}$ ,  $\Delta M_{xi}$ ,  $M_z$  – дополнительная растягивающая сила, крутящий и изгибающий моменты;  $R_B$  – радиус волнистости;  $\varphi$  – полярный угол.

Коэффициенты жесткости с учетом волнистости для канатов двойной свивки [85]:

$$\left. \begin{aligned} A_{14} &= a_0 R_k \cos^3 \beta \pm c_0 \sin \beta \cos^2 \beta \left( -\frac{g_0}{H} + \sin^2 \beta \right) - \\ &\quad - \frac{b_0}{R_k} \sin^4 \beta \cos \beta \frac{g_0}{H} - \frac{g_0}{H} \sin^2 \beta \cos^2 \beta; \\ A_{24} &= a_0 R_k^2 \sin \beta \cos^2 \beta \pm c_0 R_k \left( \cos^5 \beta - \sin^2 \beta \cos \beta \frac{g_0}{H} \right) - \\ &\quad - b_0 \sin \beta \cos^4 \beta \frac{g_0}{H} + g_0 \sin \beta \cos^2 \beta (1 + \cos^2 \beta); \\ A_{34} &= a_0 \sin^2 \beta \cos \beta R_k \pm c_0 \sin^3 \beta \left( \frac{g_0}{H} + \cos^2 \beta \right) - \\ &\quad - \frac{b_0 g_0}{R_k H} \sin^4 \beta \cos \beta + \frac{g_0}{H} \sin^2 \beta \cos^3 \beta; \\ A_{44} &= A_{44_1} + A_{44_2}; \\ A_{44_1} &= a_0 R_k^2 \cos^3 \beta \pm c_0 \sin \beta \cos^2 \beta \left( \cos^2 \beta + \frac{g_0}{H} \right) + \\ &\quad + b_0 \sin^2 \beta \cos \beta (1 + \sin^2 \beta) \frac{g_0}{H} + g_0 \cos^2 \beta; \\ A_{44_2} &= g_0 \cos \beta \end{aligned} \right\} \quad (1.42)$$

Учитывая, что изменения угла свивки каната, с учетом изменения его геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, в зависимости от угла  $\varphi$  незначительно, можно считать, что агрегатные коэффициенты жесткости  $A_{11}$ ,  $A_{12}$ ,  $A_{14}$ ,  $A_{22}$ ,  $A_{23}$ ,  $A_{24}$ ,  $A_{34}$ ,  $A_{44}$  являются постоянными.

Решая уравнения относительно дополнительных деформаций растяжения  $\Delta\varepsilon$ , кручения  $\Delta\theta$  и изгиба  $\frac{1}{\rho}$ , получим

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varepsilon &= \frac{\Delta_1}{\Delta} (M_z + P_x R_B); \\ \Delta\theta &= \frac{\Delta_2}{\Delta} (M_z + P_x R_B); \\ \frac{1}{\rho} &= \frac{\Delta_3}{\Delta} (M_z + P_x R_B), \end{aligned} \right\} \quad (1.43)$$

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \begin{vmatrix} A_{12} - \mu_1 A_{23} & A_{14} - \mu_1 A_{34} \\ A_{22} - \mu_1 \frac{(A_{23})^2}{A_{13}} & A_{24} - \mu_1 \frac{A_{34} A_{23}}{A_{13}} \end{vmatrix}; \\ \Delta_2 &= \begin{vmatrix} A_{11} - \mu_1 A_{13} & A_{14} - \mu_1 A_{23} \\ A_{12} - \mu_1 A_{23} & A_{24} - \mu_1 \frac{A_{23}}{A_{13}} \end{vmatrix}; \\ \Delta_3 &= \begin{vmatrix} A_{11} - \mu_1 A_{13} & A_{12} - \mu_1 A_{23} \\ A_{12} - \mu_1 A_{23} & A_{22} - \mu_1 \frac{(A_{23})^2}{A_{13}} \end{vmatrix}; \end{aligned} \quad (1.44)$$

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

где здесь  $m$  – число винтовых элементов в каждом слое каната;  $\mu_1$  – коэффициент сужения каната [70].

Дополнительные напряжения растяжения с учетом волнистости:

– для каната одинарной свивки [76, 86]:

$$\Delta\sigma = E \left( \Delta\varepsilon \cos^2 \alpha + \Delta\theta r \sin \alpha \cos \alpha + \frac{1}{\rho} r \cos^2 \alpha \right) \cos \alpha. \quad (1.45)$$

– для каната двойной свивки [76, 86]:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma &= E \cos^2 \alpha \left[ \Delta\varepsilon (\cos^2 \beta - \mu_1 \sin^2 \beta) + \frac{r_k}{R_k} \cos \alpha (1 - \mu_1) \sin^3 \beta \cos \beta \right] + \\ &+ \Delta\theta R_k \left[ \sin \beta \cos \beta + \frac{r_k}{R_k} \operatorname{tg} \alpha \left( \cos^4 \beta - \frac{\sin^4 \beta \cos \beta}{R_k} \mu_1 \right) + \frac{R_k}{\rho} \cos^2 \beta \right]. \end{aligned} \quad (1.46)$$

Показатели волнистости в канате, выражение радиуса волнистости:

$$R_B = \frac{\frac{1}{\rho_0} + \frac{\Delta_3}{\Delta} Q R_{B0}}{\left( \frac{1}{\rho_0} + \frac{\Delta_3}{\Delta} Q R_{B0} \right)^2 + \left( \frac{\sin \beta \cos \beta}{R_k} + \theta + \frac{\Delta_2}{\Delta} Q R_{B0} \right)^2}, \quad (1.47)$$

где  $P_x$  – эксплуатационная нагрузка;  $\rho_0$  – начальная кривизна оси каната;  $\theta$  – суммарное значение кручения каната от действия эксплуатационных факторов;  $R_{\text{во}}$  – радиус волнистости, появляющийся при изготовлении каната [86].

$$R_{\text{во}} = \frac{M_z \frac{\Delta_3}{\Delta}}{\left(M_z \frac{\Delta_3}{\Delta}\right)^2 + \left(\frac{\sin \alpha \cos \alpha}{r} - M_z \frac{\Delta_2}{\Delta} - \frac{M_{\text{max}}}{H}\right)^2}, \quad (1.48)$$

здесь

$$M_z = \sum_{i=1}^n \sqrt{(0,51\sigma_T \delta^2 \Delta \delta)^2 + (0,17\delta^3 \Delta \sigma_T)^2 + (\Delta T R_k \cos \alpha)^2}, \quad (1.49)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести;  $\Delta \delta$  – допуск на диаметр проволоки;  $\Delta T$  – разбег технологического натяжения проволоки [86].

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 (длиной более 1000 метров), изгибом и изменением углов свивки, т.е. с изменением геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, которое необходимо учитывать при решении задач.

Как было показано нами ранее, при эксплуатации стальных канатов в них возникают изменение геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, при котором канат принимает форму пространственной винтовой линии. До 2003 года не было предусмотрено количественное ограничение радиуса волнистости  $R_{\text{в}}$ , при котором возможна дальнейшая эксплуатация канатов с учетом образовавшихся изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов. Браковка канатов в первые месяцы их эксплуатации по причине образования волнистости приводит к значительным экономическим затратам. Расчет напряженно-деформированного состояния подъемного каната, при котором происходят изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов с учетом нелинейной статики еще мало изучен и требует тщательного рассмотрения.

#### 1.4. Обзор теории геометрической нелинейности в грузоподъемных канатах

В процессе развития сталепроволочного канатного производства всегда большое внимание уделялось вопросу повышения эффективности состояния подъемных канатов. До настоящего времени невозможно было определить образования на канатах структурных дефектов.

В мировой практике сложились различные критерии оценки качества каната [4, 5, 23, 41, 52–59].

Кроме того, экспериментальным подтверждением нелинейного характера деформаций служат данные испытаний [102].

Замеры шага свивки проводились в Южной Африке с промежутком в месяц в течение одного года на четырех канатах длиной 1810 м,  $\Phi$  47,5 мм. Для верхнего конца каната шаг свивки оказался в среднем равным 475 мм, а на нижнем 318 мм. Полное увеличение шага свивки составило в среднем 145 мм или примерно 45 % длины шага свивки на нижнем конце каната. Среднюю величину шага свивки 390 мм можно считать равной его начальному значению. Увеличение шага свивки в верхнем конце каната получается и без влияния кручения вследствие разности натяжения. Однако если учесть, что кручения нет, то такое относительное удлинение в верхнем его конце, как 45 %, выходит далеко за пределы разрушающего. Следовательно, причина здесь кроется в кручении канатов.

Теоретическое описание явления геометрической нелинейности деформаций прямых канатов на модели гибкой нити предпринято в работе [67], где записаны уравнения динамики нити переменной длины для случая, когда зависимости усилие – деформация нелинейная (геометрическая и физическая нелинейность).

В связи с тем, что модель гибкой нити не учитывает способность каната испытывать крутильные деформации, то в уравнениях [67] отражена только геометрическая нелинейность, возникающая при больших осевых упругих деформациях, которые на практике встречаются редко, лишь у очень гибких канатов. Геометрическая же нелинейность, вызванная кручением канатов в [67] не отражена в силу упрощенной расчетной схемы.

Однако, попытка теоретического описания явления геометрической нелинейности деформаций в прямом канате, как агрегате, была предпринята Э.А. Шахназаряном применительно к кабель – канатам [86, 87].

В [86] получены для кабель – канатов агрегатные уравнения в виде:

$$\left. \begin{aligned} T &= \sum_{i=1}^n E f(1+\varepsilon) \cos \alpha \\ &\left\{ 1 - [(1+\varepsilon)^2 \cos^2 \alpha + (1+\varepsilon_r)^2 (1+r\theta \operatorname{ctg} \alpha)^2 \sin^2 \alpha]^{\frac{1}{2}} \right\} \\ M &= \sum_{i=1}^n E f(1+\varepsilon_r) (1+r\theta \operatorname{tg} \alpha) \sin \alpha \\ &\left\{ 1 - [(1+\varepsilon)^2 \cos^2 \alpha + (1+\varepsilon_r)^2 (1+r\theta \operatorname{ctg} \alpha)^2 \sin^2 \alpha]^{\frac{1}{2}} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (1.50)$$

и уравнение деформаций винтовой оси проволоки:

$$\varepsilon_s = \left[ \frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha + \Delta \alpha)} (1 + \varepsilon)^{-1} \right]. \quad (1.51)$$

К принципиальным недостаткам данной работы можно отнести следующее:

1. Не учет в уравнениях (1.53) значений изгибной и крутильной жесткостей проволок каната;

2. Ограниченный круг практического применения уравнений (1.53–1.54), распространяющийся только на конструкции спиральных канатов.

В работе [87] автор получил агрегатные уравнения для кабель – канатов с учетом геометрической нелинейности в виде:

$$\left. \begin{aligned} T &= A\varepsilon + C\theta + D\varepsilon_r + A_{11}\varepsilon^2 + A_{12}\varepsilon\theta + A_{22}\theta^2 + A_{13}\varepsilon\varepsilon_r + A_{23}\theta\varepsilon_r + A_{33}\varepsilon_r^2; \\ M &= C\varepsilon + B\theta + E\varepsilon_r + C_{11}\varepsilon^2 + C_{12}\varepsilon\theta + C_{22}\theta^2 + C_{13}\varepsilon\varepsilon_r + C_{23}\theta\varepsilon_r + C_{33}\varepsilon_r^2, \end{aligned} \right\} \quad (1.52)$$

где  $A, B, C, D, E, A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{22}, A_{23}, A_{33}, C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{22}, C_{23}, C_{33}$  – агрегатные коэффициенты жесткости при линейных и нелинейных компонентах деформаций.

При выводе уравнений (1.55) автором была допущена неточность, заключающаяся в пренебрежении величиной изменения угла свивки в уравнениях, связывающих значения внутренних силовых факторов в системах координат  $\vec{t} \vec{b} \vec{n}$  и  $x$   $y$   $z$ . В [87] запись этих уравнений имеет вид:

$$P_x = P_t \cos \alpha; \quad L_x = r P_t \sin \alpha. \quad (1.53)$$

Тем самым, с учетом геометрической нелинейности уравнения (1.56) должны принять вид:

$$P_x = P_t \cos(\alpha + \Delta \alpha); \quad L_x = r P_t \sin(\alpha + \Delta \alpha). \quad (1.54)$$

Указанные ошибки делают уравнения (1.55) несостоятельными, вследствие чего значения коэффициентов жесткости при нелинейных компонентах деформаций здесь не приведены.

Также попытки теоретического описания геометрической нелинейности в прямом канате были предприняты Л.И. Шигариной [13, 14]. В результате чего автором были получены уравнения, описывающие напряженно-деформированное состояния каната в нелинейной форме, имеющие вид:

$$\left. \begin{aligned} T &= A\varepsilon + C\theta + D\varepsilon_r + A_{11}\varepsilon^2 + A_{12}\varepsilon\theta + A_{22}\theta^2 + A_{13}\varepsilon\varepsilon_r + A_{23}\theta\varepsilon_r + A_{33}\varepsilon_r^2; \\ M &= C\varepsilon + B\theta + E\varepsilon_r + C_{11}\varepsilon^2 + C_{12}\varepsilon\theta + C_{22}\theta^2 + C_{13}\varepsilon\varepsilon_r + C_{23}\theta\varepsilon_r + C_{33}\varepsilon_r^2, \end{aligned} \right\} \quad (1.55)$$

Были получены уравнения деформаций винтовой оси каната в виде нелинейной функции от значений деформаций каната с точностью равной их вторым степеням представлено в виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon_s = \varepsilon \cos^2 \alpha + r\theta \cos \alpha \sin \alpha + \varepsilon_r \sin^2 \alpha + \frac{1}{2} \cos^2 \alpha (\varepsilon^2 + r^2 \theta^2) + \\ + \frac{1}{2} \varepsilon_r^2 \sin^2 \alpha + r\theta \varepsilon_r \sin \alpha \cos \alpha \end{aligned} \quad (1.56)$$

Таким образом, в работе [13, 14] была рассмотрена модель каната с одинаковыми геометрическими и механическими свойствами винтовых элементов. Однако при эксплуатации каната возникают изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов появляются структурные деформации – волнистость, когда его продольная ось принимает форму винтовой спирали.

В своей работе автор сделал следующие пренебрежения:

1. Расчет напряженно-деформированного состояния каната производился без учета различий геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

2. Постановочный характер задачи.

В работе [13, 14] автор получил агрегатные уравнения для канатов с учетом геометрической нелинейности деформаций.

Также не было учтено смещение равнодействующей винтовых элементов, появляющийся вследствие различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, не рассмотрено влияние технологического натяжения на качество подъемного каната.

Указанные ошибки делают уравнения (1.58, 1.59) несостоятельными и требуют доработки, вследствие чего значения коэффициентов жесткости при нелинейных компонентах деформации здесь не приведены.

Анализ работы [13–15, 40] показывает, что она носит постановочный характер и не решает проблемы создания теоретического аппарата, описывающего напряженно-деформированное состояние стальных канатов имеющих различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов с учетом геометрической нелинейности.

### **1.5. Постановка задачи**

Из обзора, сделанного в этой главе следует:

1. В настоящее время существует широкий круг отраслей, в которых возможно применение стальных подъемных канатов, где их эксплуатация связана со значительным кручением, изгибом, вызывающим явление геометрической нелинейности.

2. Нельзя не учитывать, что вследствие различия геометрических параметров и механических свойств, перемещения винтовых элементов, находящихся в одном слое, неодинаковы. Вследствие этого появляются структурные деформации, приводящие к снижению срока службы подъемных канатов.

В то же время отсутствие должного теоретического обоснования и неприемлемость линейной теории расчета [9], для канатов, эксплуатирующихся в режиме значительного кручения, изгиба, что позволяет сделать вывод о насущности создания геометрически нелинейной теории расчета стальных подъемных канатов с учетом волнистости.

Задачей данной работы является:

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.

## 2. НЕЛИНЕЙНЫЕ УРАВНЕНИЯ СТАТИКИ КАНАТА С УЧЕТОМ ВОЛНИСТОСТИ

### 2.1. Вывод нелинейных уравнений статики для канатов двойной свивки с учетом волнистости

В первой главе было указано, что основополагающими зависимостями линейной теории расчета каната полученными с учетом волнистости являются геометрические уравнения деформаций (1.29–1.33), уравнения равновесия внутренних силовых факторов, возникающих в винтовом элементе каната при действии на него внешних нагрузок (1.34), и уравнения (1.35, 1.36), отражающие физические свойства элементов каната. Уравнения статики представлены зависимостями (1.18) – для спиральных канатов; (1.35) – для спиральных канатов с учетом изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов и (1.19) – для канатов двойной свивки; (1.36) – для канатов двойной свивки с учетом волнистости. Указанные уравнения совместно с уравнениями напряженного состояния (1.22–1.28) и (1.48, 1.49) дают необходимый теоретический аппарат для решения линейных задач.

Все допущения, кроме 7-го, принятые для построения линейной теории расчета [9] переносятся без изменения и для вывода геометрически нелинейной теории расчета стальных канатов.

Седьмое допущение, гласящее о том, что изменение углов свивки винтовых элементов каната за период его деформации имеет малую величину, которой можно пренебречь, будем считать неправомерным, т.к. в данной работе рассматривается напряженно-деформированное состояние канатов, эксплуатирующихся в условиях значительного кручения и изгиба с учетом волнистости. В этих случаях изменения углов свивки винтовых элементов может достигать величин, которые нельзя не учитывать в инженерных расчетах.

Прежде чем приступить к математическим выкладкам вывода нелинейных уравнений примем, что характер направления усилий, приложенных к винтовой оси, является следящим. Это значит, что углы между направлением приложения усилий  $P_t, P_b, P_n$ , моментов  $L_t, L_b, L_n$  и осями трехгранника  $\vec{t} \vec{b} \vec{n}$ , изменяющего

свое направление при деформации винтовой оси, остаются неизменными (рисунок 1.4). Данное допущение позволяет оставить структуру уравнений (1.34) и (1.38), необходимых для вывода нелинейных уравнений статики, без изменения.

Вывод нелинейных уравнений статики подъемного каната, учитывающий изменение углов свивки винтовых элементов за период их деформации, будет базироваться, как и вывод аналогичных линейных зависимостей, на уравнениях, отражающих геометрические характеристики деформаций, физические свойства и условия равновесия силовых факторов винтового элемента каната. Отличие будет заключаться в том, что в основу вывода нелинейных уравнений будут заложены нелинейные уравнения равновесия, построенные на основе (1.34) и (1.38), но учитывающие изменение углов свивки за период деформации и изменение геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

Для вывода нелинейных уравнений статики воспользуемся уравнением (1.34):

$$\left. \begin{aligned} f_n &= \omega_b P_t - \omega_t P_b; \\ P_b &= \omega_b L_t - \omega_t L_b. \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Применительно к винтовому элементу каната двойной свивки – пряди, угол и радиус свивки которой обозначим соответственно  $\beta$  и  $R$ .

Запишем уравнения кручения и кривизны оси пряди, соответствующие моменту окончания деформации:

$$\omega_b = \frac{\sin^2(\beta + \Delta\beta)}{R}; \quad \omega_t = \frac{\sin(\beta + \Delta\beta)\cos(\beta + \Delta\beta)}{R}, \quad (2.2)$$

где  $\Delta\beta$  – изменение угла свивки пряди за период деформации.

Подставляя (2.2) в (2.1) и меняя знаки, получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sin^2(\beta + \Delta\beta)}{R} P_t - \frac{\sin(\beta + \Delta\beta)\cos(\beta + \Delta\beta)}{R} &= f_n; \\ \frac{\sin^2(\beta + \Delta\beta)}{R} L_t - \frac{\sin(\beta + \Delta\beta)\cos(\beta + \Delta\beta)}{R} &= P_b. \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Значение изменения радиуса свивки за период деформации в уравнения (2.2–2.3) не введено, т. к. эта величина является незначительной и ею можно пренебречь.

Примем обозначения:

$$\tilde{\beta} = \beta + \Delta\beta, \quad (2.4)$$

где  $\tilde{\beta}$  – значение угла свивки, соответствующее моменту окончания деформации.

С учетом формулы (2.4) запишем уравнения (2.3), равновесия внутренних силовых факторов, возникающих в винтовом элементе, при действии на канат внешних нагрузок в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sin^2 \tilde{\beta}}{R} P_t - \frac{\sin \tilde{\beta} \cos \tilde{\beta}}{R} P_b &= f_n; \\ \frac{\sin^2 \tilde{\beta}}{R} L_t - \frac{\sin \tilde{\beta} \cos \tilde{\beta}}{R} L_b &= P_b. \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

С учетом волнистости получим уравнение равновесия внутренних силовых факторов, возникающих в винтовом элементе при действии на канат внешних нагрузок [79–81].

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sin^2 \beta}{R} \Delta P_t - \frac{\sin \beta \cos \beta}{R} \Delta P_b &= \Delta f_n; \\ \frac{\sin^2 \beta}{R} \Delta L_t - \frac{\sin \beta \cos \beta}{R} \Delta L_b &= \Delta P_b \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

где  $\Delta P_t, \Delta P_b, \Delta L_t, \Delta L_b$  – дополнительное осевое усилие, перерезывающая сила, крутящий и изгибающий моменты;  $\Delta f_n$  – нормальное давление для вогнутого каната.

В результате подстановки (2.4) в (2.6) получим уравнение равновесия внутренних силовых факторов, возникающих в винтовом элементе при действии на канат внешних нагрузок с учетом различия длин его винтовых элементов, расположенных в одном слое:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sin^2 \tilde{\beta}}{R} \Delta P_t - \frac{\sin \tilde{\beta} \cos \tilde{\beta}}{R} \Delta P_b &= \Delta f_n; \\ \frac{\sin^2 \tilde{\beta}}{R} \Delta L_t - \frac{\sin \tilde{\beta} \cos \tilde{\beta}}{R} \Delta L_b &= \Delta P_b. \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

С целью определения из системы (2.7) неизвестных значений силовых факторов  $\Delta P_t, \Delta P_b, \Delta L_t, \Delta L_b$ , введем в рассмотрение еще три уравнения, отражающих связь этих факторов с усилиями  $\Delta P_{xi}, \Delta M_{xi}$  и  $M_Z + P_x R_b$  [47, 88–89].

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{xi} &= (\Delta P_t \cos \tilde{\beta} + \Delta P_b \sin \tilde{\beta}) \cos \varphi; \\ \Delta M_{xi} &= (\Delta L_t \cos \tilde{\beta} + \Delta L_b \sin \tilde{\beta} + R(\Delta P_t \sin \tilde{\beta} - \Delta P_b \cos \tilde{\beta})) \cos \varphi; \\ M_Z + P_x R_b &= \Delta L_b \cos \tilde{\beta} \cos \varphi - \Delta L_t \sin \tilde{\beta} \cos \varphi - \\ &\quad - \Delta L_n \sin \varphi + R_k (\Delta P_b \sin \tilde{\beta} + \Delta P_t \cos \tilde{\beta}) \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

где  $\Delta P_{xi}, \Delta M_{xi}, M_Z$  – дополнительная растягивающая сила, крутящий и изгибающий моменты.

Значение поперечной деформации  $\varepsilon_r$ , будет иметь вид [9].

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta D}{2R}, \quad (2.9)$$

где  $\Delta D$  – диаметральное сужение каната.

Изменение угла свивки  $\beta$  с учетом различия длин его винтовых элементов, расположенных в одном слое [47, 86, 88, 89] примет вид:

$$\Delta\beta = R\theta\cos^2\beta + (\varepsilon_r - \varepsilon)\sin\beta\cos\beta + \Delta\theta R\cos^2\beta\cos\varphi + (\Delta\varepsilon_r - \Delta\varepsilon + \frac{R}{\rho})\sin\beta\cos\beta\cos\varphi. \quad (2.10)$$

Для определения деформаций каната  $\varepsilon$ ,  $\theta$ ,  $\varepsilon_r$ ,  $\Delta\varepsilon$ ,  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\varepsilon_r$  и  $\frac{R}{\rho}$ , входящие в (2.10), получим уравнения статики с учетом различия длин его винтовых элементов расположенных в одном слое, а также воспользуемся (1.36 и 2.1):

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_t &= a_0\varepsilon_s + c_0\tilde{\tau}; \\ \Delta L_t &= c_0\varepsilon_s + b_0\tilde{\tau}; \\ \Delta L_b &= g_0\tilde{b}, \\ \Delta L_n &= g_0\tilde{n}, \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

где  $a_0, c_0, b_0$  – агрегатные коэффициенты жесткости проволок, свитых в прядь каната двойной свивки;  $g_0$  – изгибная жесткость пряди [38].

С учетом (2.4) выражение  $\sin\tilde{\beta}$  и  $\cos\tilde{\beta}$  примет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \sin\tilde{\beta} &= \sin(\beta + \Delta\beta) = \sin\beta\cos\Delta\beta + \cos\beta\sin\Delta\beta; \\ \cos\tilde{\beta} &= \cos(\beta + \Delta\beta) = \cos\beta\cos\Delta\beta - \sin\beta\sin\Delta\beta. \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

Если  $\Delta\beta \rightarrow 0$ , т.е. мало, функции  $\cos\Delta\beta$  и  $\sin\Delta\beta$ , будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} \cos\Delta\beta &= 1 - \frac{(\Delta\beta)^2}{2}; \\ \sin\Delta\beta &= \Delta\beta. \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Функции (2.12) с учетом (2.13) и (2.10) примут следующий вид:

$$\begin{aligned}
& \sin \tilde{\beta} = \sin \beta + R\theta \cos^3 \beta + (\varepsilon_r - \varepsilon) \sin \beta \cos^2 \beta + \Delta\theta R \cos^3 \beta \cos \varphi + \\
& + \left( \Delta\varepsilon_r - \Delta\varepsilon + \frac{R}{\rho} \right) \sin \beta \cos^2 \beta \cos \varphi - 0,5R^2\theta^2 \sin \beta \cos^4 \beta + R\theta(\varepsilon - \varepsilon_r) \sin^2 \beta \cos^3 \beta - \\
& - 0,5(\varepsilon_r - \varepsilon)^2 \sin^3 \beta \cos^2 \beta + \theta\Delta\theta R^2 \sin \beta \cos^4 \beta \cos \varphi + R\theta \left( \Delta\varepsilon_r - \Delta\varepsilon + \frac{R}{\rho} \right) \sin^2 \beta \cos^3 \beta \cos \varphi + \\
& + \Delta\theta(\varepsilon_r - \varepsilon)R \sin^2 \beta \cos^3 \beta \cos \varphi + (\varepsilon_r - \varepsilon) \left( \Delta\varepsilon_r - \Delta\varepsilon + \frac{R}{\rho} \right) \sin^3 \beta \cos^2 \beta \cos \varphi - \\
& - 0,5\Delta\theta^2 R^2 \sin \beta \cos^4 \beta \cos^2 \varphi + \Delta\theta R \left( \Delta\varepsilon_r - \Delta\varepsilon + \frac{R}{\rho} \right) \sin^2 \beta \cos^3 \beta \cos^2 \varphi - \\
& - 0,5 \left( \Delta\varepsilon_r - \Delta\varepsilon + \frac{R}{\rho} \right) \sin^3 \beta \cos^2 \beta \cos^2 \varphi; \\
& \cos \tilde{\beta} = \cos \beta - R\theta \sin \beta \cos^2 \beta - (\varepsilon_r - \varepsilon) \sin^2 \beta \cos \beta - \Delta\theta R \sin \beta \cos^2 \beta \cos \varphi - \\
& - \left( \Delta\varepsilon_r - \Delta\varepsilon + \frac{R}{\rho} \right) \sin^2 \beta \cos \beta \cos \varphi - 0,5R^2\theta^2 \cos^5 \beta + R\theta(\varepsilon - \varepsilon_r) \sin \beta \cos^4 \beta - \\
& - 0,5(\varepsilon_r - \varepsilon)^2 \sin^2 \beta \cos^3 \beta + \theta\Delta\theta R^2 \cos^5 \beta \cos \varphi + R\theta \left( \Delta\varepsilon_r - \Delta\varepsilon + \frac{R}{\rho} \right) \sin \beta \cos^4 \beta \cos \varphi + \\
& + \Delta\theta(\varepsilon_r - \varepsilon)R \sin \beta \cos^4 \beta \cos \varphi + (\varepsilon_r - \varepsilon) \left( \Delta\varepsilon_r - \Delta\varepsilon + \frac{R}{\rho} \right) \sin^2 \beta \cos^3 \beta \cos \varphi - \\
& - 0,5\Delta\theta^2 R^2 \cos^5 \beta \cos^2 \varphi + \Delta\theta R \left( \Delta\varepsilon_r - \Delta\varepsilon + \frac{R}{\rho} \right) \sin \beta \cos^4 \beta \cos^2 \varphi - \\
& - 0,5 \left( \Delta\varepsilon_r - \Delta\varepsilon + \frac{R}{\rho} \right)^2 \sin^2 \beta \cos^3 \beta \cos^2 \varphi.
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Подставляя значения относительных деформаций винтового элемента (1.29) в формулы для определения внутренних силовых факторов (2.11), получим с учетом (2.8) уравнения, отражающие связь усилия  $\Delta P_x$  и момента  $\Delta M_x$ ,  $M_z + P_x R_B^H$  с деформациями каната:

$$\left. \begin{aligned}
P_x &= mA\varepsilon + mC\theta + md\varepsilon_r + mA_{11}\varepsilon^2 + mA_{12}\varepsilon\theta + \\
&+ mA_{22}\theta^2 + mA_{13}\varepsilon\varepsilon_r + mA_{23}\theta\varepsilon_r + mA_{33}\varepsilon_r^2, \\
M_x &= mC\varepsilon + mB\theta + me\varepsilon_r + mC_{11}\varepsilon^2 + mC_{12}\varepsilon\theta + \\
&+ mC_{22}\theta^2 + mC_{13}\varepsilon\varepsilon_r + mC_{23}\theta\varepsilon_r + mC_{33}\varepsilon_r^2;
\end{aligned} \right\} \tag{2.15}$$

$$\begin{aligned}
\Delta P_{xi} &= (A_{11}\Delta\varepsilon + A_{12}\Delta\theta + A_{13}\Delta\varepsilon_r + A_{14}\frac{1}{\rho} + A_{111}\Delta\varepsilon^2 + A_{112}\Delta\varepsilon\Delta\theta + \\
&+ A_{122}\Delta\theta^2 + A_{113}\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon_r + A_{123}\Delta\theta\Delta\varepsilon_r + \\
&+ A_{133}\Delta\varepsilon_r^2 + A_{114}\Delta\varepsilon\frac{1}{\rho} + A_{124}\Delta\theta\frac{1}{\rho} + A_{134}\Delta\varepsilon_r\frac{1}{\rho} + A_{144}\left(\frac{1}{\rho}\right)^2) \cos^2 \phi_i; \\
\Delta M_{xi} &= (A_{12}\Delta\varepsilon + A_{22}\Delta\theta + A_{23}\Delta\varepsilon_r + A_{24}\frac{1}{\rho} + \\
&+ A_{211}\Delta\varepsilon^2 + A_{212}\Delta\varepsilon\Delta\theta + A_{222}\Delta\theta^2 + A_{213}\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon_r + A_{223}\Delta\theta\Delta\varepsilon_r + \\
&+ A_{233}\Delta\varepsilon_r^2 + A_{214}\Delta\varepsilon\frac{1}{\rho} + A_{224}\Delta\theta\frac{1}{\rho} + A_{234}\Delta\varepsilon_r\frac{1}{\rho} + A_{244}\left(\frac{1}{\rho}\right)^2) \cos^2 \phi_i; \\
M_z + P_x R_g^h &= \frac{m}{2} A_{14}\Delta\varepsilon + \frac{m}{2} A_{24}\Delta\theta + \frac{m}{2} A_{34}\Delta\varepsilon_r + \frac{m}{2} A_{44}\frac{1}{\rho} + \frac{m}{2} A_{411}\Delta\varepsilon^2 + \\
&+ \frac{m}{2} A_{412}\Delta\varepsilon\Delta\theta + \frac{m}{2} A_{422}\Delta\theta^2 + \frac{m}{2} A_{413}\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon_r + \frac{m}{2} A_{423}\Delta\theta\Delta\varepsilon_r + \frac{m}{2} A_{433}\Delta\varepsilon_r^2 + \\
&+ \frac{m}{2} A_{414}\Delta\varepsilon\frac{1}{\rho} + \frac{m}{2} A_{424}\Delta\theta\frac{1}{\rho} + \frac{m}{2} A_{434}\Delta\varepsilon_r\frac{1}{\rho} + \frac{m}{2} A_{444}\left(\frac{1}{\rho}\right)^2,
\end{aligned} \tag{2.16}$$

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;  $R_g^h$  – радиус волнистости с учетом нелинейности;  $A, B, C, d, e$  – агрегатные коэффициенты жесткости каната двойной свивки, полученные и обозначенные в работе [9];  $A_{11}(\varepsilon^2), A_{12}(\varepsilon\theta), A_{22}(\theta^2), A_{13}(\varepsilon\varepsilon_r), A_{23}(\theta\varepsilon_r), A_{33}(\varepsilon_r^2), C_{11}(\varepsilon^2), C_{12}(\varepsilon\theta), C_{22}(\theta^2), C_{13}(\varepsilon\varepsilon_r), C_{23}(\theta\varepsilon_r), C_{33}(\varepsilon_r^2)$  – агрегатные коэффициенты жесткости каната двойной свивки [17];  $A_{14}, A_{24}, A_{34}, A_{44}, A_{44_1}, A_{44_2}$  – агрегатные коэффициенты жесткости каната двойной свивки [86];

$A_{111}, A_{112}, A_{122}, A_{113}, A_{123}, A_{133}, A_{114}, A_{124}, A_{134}, A_{144}, A_{211}, A_{212}, A_{222}, A_{213}, A_{223}, A_{233}, A_{214}, A_{224}, A_{234}, A_{244}, A_{411}, A_{412}, A_{422}, A_{413}, A_{423}, A_{433}, A_{414}, A_{424}, A_{434}, A_{444}$ .

– агрегатные коэффициенты жесткости каната двойной свивки, полученные нами [47, 88]:

$$\begin{aligned}
a_{111} &= a_0 \cos^3 \beta \sin^2 \beta \pm \frac{c_0}{R} \cos^2 \beta \sin^3 \beta (\sin^2 \beta - 3 \cos^2 \beta) - \\
&\quad - \frac{3b_0 \sin^2 \beta + g_0 (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta)}{R^2} \cos^3 \beta \sin^4 \beta; \\
a_{112} &= -a_0 R \sin \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta \pm 4c_0 \cos^2 \beta \sin^2 \beta \cos 2\beta - \\
&\quad - \frac{3b_0 \cos^2 \beta \cos 2\beta - g_0 (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) (1 + \cos^2 \beta)}{R} \cos^2 \beta \sin^3 \beta; \\
a_{122} &= -a_0 R^2 \cos^3 \beta \sin^2 \beta \pm c_0 \cos^4 \beta \sin \beta (3 \sin^2 \beta - \cos^2 \beta) + \\
&\quad + \left[ 3b_0 \cos^4 \beta - g_0 (1 + \cos^2 \beta) (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \right] \cos^3 \beta \sin^2 \beta; \\
a_{113} &= -a_0 \cos \beta \sin^2 \beta \cos 2\beta \pm \frac{c_0}{R} \cos^2 \beta \sin^3 \beta (3 \cos^2 \beta - 5 \sin^2 \beta) + \\
&\quad + 2 \frac{b_0 \sin^2 \beta + g_0 (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta)}{R^2} \sin^4 \beta \cos^3 \beta; \\
a_{123} &= -2a_0 R \cos^2 \beta \sin^3 \beta \pm c_0 \cos^3 \beta \sin^2 \beta (\cos^2 \beta - 7 \sin^2 \beta) + \\
&\quad + \frac{3b_0 \cos^2 \beta \cos 2\beta - g_0 (1 + 2 \cos^2 \beta) (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta)}{R} \cos^2 \beta \sin^3 \beta; \\
a_{133} &= -a_0 \cos \beta \sin^4 \beta \pm 4 \frac{c_0}{R} \cos^2 \beta \sin^5 \beta - \\
&\quad - \frac{3b_0 \sin^2 \beta + g_0 (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta)}{R^2} \cos^3 \beta \sin^4 \beta; \\
a_{114} &= \pm c_0 \sin^3 \beta \cos^2 \beta \left( \frac{g_0}{H} + \sin^2 \beta \right) + \\
&\quad + \frac{3b_0 \sin^2 \beta \frac{g_0}{H} + g_0 (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta)}{R} \sin^2 \beta \cos^3 \beta (1 + \sin^2 \beta); \\
a_{124} &= -a_0 R^2 \sin \beta \cos^2 \beta (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta) \pm c_0 \sin^2 \beta \cos^3 \beta (1 + 3 \cos^2 \beta) \left( \frac{g_0}{H} - \cos^2 \beta \right) - \\
&\quad - 3b_0 \sin^3 \beta \cos^4 \beta (1 - \cos^2 \beta) \frac{g_0}{H} - g_0 \sin \beta \cos^2 \beta (\cos^2 \beta + \sin^2 \beta) (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) (1 + \cos^2 \beta); \\
a_{134} &= -a_0 R \sin^2 \beta \cos \beta (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta) \pm 4c_0 \sin^3 \beta \cos^2 \beta (5 \sin^2 \beta + 3 \cos^2 \beta) \left( \frac{g_0}{H} + \sin^2 \beta \right) - \\
&\quad - \frac{3b_0 \sin^2 \beta \frac{g_0}{H} + g_0 (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta)}{R} \sin^2 \beta \cos^3 \beta (1 + \sin^2 \beta); \\
a_{144} &= -a_0 R^2 \sin^2 \beta \cos^3 \beta \pm c_0 R \sin^3 \beta \cos^2 \beta \left( \frac{g_0}{H} + 3 \cos^2 \beta \right) - \\
&\quad - \left[ 3b_0 \sin^2 \beta \frac{g_0}{H} + g_0 (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \right] \sin^2 \beta \cos^3 \beta;
\end{aligned} \tag{2.17}$$

$$\begin{aligned}
a_{211} &= -a_0 R \cos^4 \beta \sin \beta \pm c_0 \cos^3 \beta \sin^2 \beta (3 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) + \\
&+ \frac{3b_0 \sin^2 \beta + g_0 (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta)}{R} \sin^3 \beta \cos^4 \beta; \\
a_{212} &= a_0 R^2 \cos^3 \beta \cos 2\beta \pm 4c_0 R \cos^3 \beta \sin \beta \cos 2\beta + \\
&+ [3b_0 \cos^2 \beta \cos 2\beta - g_0 (1 + 2 \cos^2 \beta) (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta)] \cos^3 \beta \sin^2 \beta; \\
a_{222} &= a_0 R^3 \cos^4 \beta \sin \beta \pm c_0 R^2 \cos^5 \beta (\cos^2 \beta - 3 \sin^2 \beta) - \\
&- R [3b_0 \cos^4 \beta - g_0 (1 + \cos^2 \beta) (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta)] \sin \beta \cos^4 \beta; \\
a_{213} &= a_0 R \cos^2 \beta \sin \beta \cos 2\beta \pm c_0 \cos^3 \beta \sin^2 \beta (5 \sin^2 \beta - 3 \cos^2 \beta) - \\
&- 2 \frac{b_0 \sin^2 \beta + g_0 (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta)}{R} \cos^4 \beta \sin^3 \beta; \\
a_{223} &= 2a_0 R^2 \cos^3 \beta \sin^2 \beta \pm c_0 R \cos^4 \beta \sin \beta (7 \sin^2 \beta - \cos^2 \beta) - \\
&- [3b_0 \cos^2 \beta \cos 2\beta - g_0 (1 + 2 \cos^2 \beta) (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta)] \cos^3 \beta \sin^2 \beta; \\
a_{233} &= a_0 R \cos^2 \beta \sin^3 \beta \pm 4c_0 \cos^3 \beta \sin^4 \beta + \\
&+ \frac{3b_0 \sin^2 \beta + g_0 (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta)}{R} \cos^4 \beta \sin^3 \beta; \\
a_{214} &= \pm c_0 R \sin^2 \beta \cos^3 \beta \left( \frac{g_0}{H} + \sin^2 \beta \right) - \left[ 3b_0 \sin^2 \beta \frac{g_0}{H} + g_0 (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \right] \sin \beta \cos^4 \beta (1 + \sin^2 \beta); \\
a_{224} &= a_0 R^3 \cos^3 \beta (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta) \pm c_0 R \sin \beta \cos^4 \beta (1 + 3 \cos^2 \beta) \left( \frac{g_0}{H} - \cos^2 \beta \right) + \\
&+ \left[ 3b_0 \sin^2 \beta \cos^2 \beta (1 - \cos^2 \beta) \frac{g_0}{H} + g_0 (\cos^2 \beta + \sin^2 \beta) (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) (1 + \cos^2 \beta) \right] R \cos^3 \beta; \\
a_{234} &= a_0 R^2 \sin \beta \cos^2 \beta (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta) \pm 4c_0 \sin^2 \beta \cos^3 \beta (3 \cos^2 \beta - 5 \sin^2 \beta) \left( \frac{g_0}{H} + \sin^2 \beta \right) R + \\
&+ \left[ 3b_0 \sin^2 \beta \frac{g_0}{H} + g_0 (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \right] \sin \beta \cos^4 \beta (1 + \sin^2 \beta); \\
a_{244} &= -a_0 R^3 \sin^3 \beta \cos^2 \beta \pm c_0 R^2 \sin^2 \beta \cos^3 \beta \left( \frac{g_0}{H} + 3 \cos^2 \beta \right) + \\
&+ \left[ 3b_0 \sin^2 \beta \frac{g_0}{H} + g_0 (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \right] R \sin \beta \cos^4 \beta.
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Сравнивая формулы (2.17) и (2.18), можно записать следующие соотношения:

$$\begin{aligned}
a_{211} &= -a_{111} R \operatorname{ctg} \beta; & a_{212} &= -a_{112} R \operatorname{ctg} \beta; & a_{222} &= -a_{122} R \operatorname{ctg} \beta; \\
a_{213} &= -a_{113} R \operatorname{ctg} \beta; & a_{223} &= -a_{123} R \operatorname{ctg} \beta; & a_{233} &= -a_{133} R \operatorname{ctg} \beta;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_{214} &= -a_{114} R \operatorname{ctg} \beta; & a_{234} &= -a_{134} R \operatorname{ctg} \beta; \\
a_{224} &= -a_{124} R \operatorname{ctg} \beta; & a_{244} &= -a_{144} R \operatorname{ctg} \beta
\end{aligned} \tag{2.19}$$

$$\begin{aligned}
a_{411} &= a_0 R \cos^3 \beta \sin^2 \beta \pm c_0 \cos^2 \beta \sin \beta \cos 2\beta (\sin^2 \beta - 3 \cos^2 \beta) + \\
&+ \frac{3b_0 \sin^2 \beta (1 - \sin^2 \beta) + g_0 \cos 2\beta (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta)}{R} \cos^3 \beta \sin^2 \beta; \\
a_{412} &= -a_0 R^2 \sin \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta \pm 4c_0 R \cos^2 \beta \cos 2\beta (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta) + \\
&+ [3b_0 (1 - \sin^2 \beta) \cos^2 \beta - g_0 (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) (1 + \cos^2 \beta)] \sin \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta; \\
a_{422} &= -a_0 R^3 \cos^3 \beta \sin^2 \beta \pm c_0 R^2 (3 \sin^2 \beta - \cos^2 \beta) - \\
&- [3b_0 \cos^4 \beta (1 - \sin^2 \beta) - g_0 (1 + \cos^2 \beta) (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \cos 2\beta] R \cos^3 \beta; \\
a_{413} &= -a_0 R \cos \beta \sin^2 \beta \cos 2\beta \pm c_0 \cos^2 \beta \sin \beta (3 \cos^2 \beta - 6 \sin^2 \beta) - \\
&- 2 \frac{b_0 \sin^2 \beta (1 - \sin^2 \beta) + g_0 \cos 2\beta (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta)}{R} \sin^2 \beta \cos^3 \beta; \\
a_{423} &= -2a_0 R^2 \cos^2 \beta \sin^3 \beta \pm c_0 R \cos^3 \beta \sin^2 \beta (\cos^2 \beta - 7 \sin^2 \beta) + \\
&+ [-3b_0 \cos^2 \beta (1 - \sin^2 \beta) + g_0 (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) (1 + 2 \cos^2 \beta)] \sin \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta; \\
a_{433} &= -a_0 R \cos \beta \sin^4 \beta \pm 4c_0 \cos^2 \beta \sin^3 \beta (1 - \sin^2 \beta) + \\
&+ \frac{3b_0 \sin^2 \beta (1 - \sin^2 \beta) + g_0 \cos 2\beta (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta)}{R} \cos^3 \beta \sin^2 \beta; \\
a_{414} &= \pm c_0 R \sin^3 \beta \cos^2 \beta \left( \frac{g_0}{H} + \sin^2 \beta \right) + \\
&+ \left[ -3b_0 \frac{g_0}{H} (1 - \sin^2 \beta) \cos^2 \beta + g_0 (1 - 2 \cos^2 \beta) (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \right] (1 + \sin^2 \beta) \sin^2 \beta \cos \beta; \\
a_{424} &= -a_0 R^3 \sin \beta \cos^2 \beta (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta) \pm c_0 R^2 \cos^3 \beta (3 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \left( \frac{g_0}{H} - \cos^2 \beta \right) + \\
&+ 3b_0 R \sin \beta \cos^4 \beta \frac{g_0}{H} (1 - \cos^2 \beta) (1 - \sin^2 \beta) + \\
&+ g_0 R \sin \beta \cos^2 \beta [1 - (\cos^2 \beta + \sin^2 \beta) (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) (1 + \cos^2 \beta)]; \\
a_{434} &= -a_0 R^2 \sin^2 \beta \cos \beta (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta) \pm 4c_0 R \sin \beta \cos^2 \beta (4 \sin^2 \beta + 3 \cos^2 \beta) \left( \frac{g_0}{H} + \sin^2 \beta \right) + \\
&+ \left[ 3b_0 \frac{g_0}{H} (1 - \sin^2 \beta) \cos^2 \beta + g_0 (1 - 2 \cos^2 \beta) (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \right] (1 + \sin^2 \beta) \sin^2 \beta \cos \beta; \\
a_{444} &= -a_0 R^3 \sin^2 \beta \cos^3 \beta \pm c_0 R^2 \sin \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta \left( \frac{g_0}{H} + 3 \cos^2 \beta \right) + \\
&+ \left[ 3b_0 \sin^2 \beta \frac{g_0}{H} (1 - \sin^2 \beta) \cos^2 \beta - g_0 (1 + 2 \cos^2 \beta) (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \right] R \sin^2 \beta \cos \beta;
\end{aligned} \tag{2.20}$$

С учетом (2.19) систему уравнений (2.16) можно записать в виде

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{xi} &= (A_{11}\Delta\varepsilon + A_{12}\Delta\theta + A_{13}\Delta\varepsilon_r + A_{14}\frac{1}{\rho} + A_{111}\Delta\varepsilon^2 + A_{112}\Delta\varepsilon\Delta\theta + A_{122}\Delta\theta^2 + A_{113}\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon_r + \\
 &+ A_{123}\Delta\theta\Delta\varepsilon_r + A_{133}\Delta\varepsilon_r^2 + A_{114}\Delta\varepsilon\frac{1}{\rho} + A_{124}\Delta\theta\frac{1}{\rho} + A_{134}\Delta\varepsilon_r\frac{1}{\rho} + A_{144}\left(\frac{1}{\rho}\right)^2) \cos^2 \varphi_i; \\
 \Delta M_{xi} &= -Rctg(A_{12}\Delta\varepsilon + A_{22}\Delta\theta + A_{23}\Delta\varepsilon_r + A_{24}\frac{1}{\rho} + A_{211}\Delta\varepsilon^2 + A_{212}\Delta\varepsilon\Delta\theta + A_{222}\Delta\theta^2 + A_{213}\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon_r + \\
 &+ A_{223}\Delta\theta\Delta\varepsilon_r + A_{233}\Delta\varepsilon_r^2 + A_{214}\Delta\varepsilon\frac{1}{\rho} + A_{224}\Delta\theta\frac{1}{\rho} + A_{234}\Delta\varepsilon_r\frac{1}{\rho} + A_{244}\left(\frac{1}{\rho}\right)^2) \cos^2 \varphi_i; \\
 M_z + P_x R_e^n &= A_{14}\Delta\varepsilon \cos^2 \varphi + A_{24}\Delta\theta \cos^2 \varphi + A_{34}\Delta\varepsilon_r \cos^2 \varphi + A_{44}\frac{1}{\rho} \cos^2 \varphi + A_{411}\Delta\varepsilon^2 \cos^2 \varphi + \\
 &+ A_{412}\Delta\varepsilon\Delta\theta \cos^2 \varphi + A_{422}\Delta\theta^2 \cos^2 \varphi + A_{413}\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon_r \cos^2 \varphi + A_{423}\Delta\theta\Delta\varepsilon_r \cos^2 \varphi + A_{433}\Delta\varepsilon_r^2 \cos^2 \varphi + A_{414}\Delta\varepsilon\frac{1}{\rho} \cos^2 \varphi + \\
 &A_{424}\Delta\theta\frac{1}{\rho} \cos^2 \varphi + A_{434}\Delta\varepsilon_r\frac{1}{\rho} \cos^2 \varphi + A_{444}\left(\frac{1}{\rho}\right)^2 \cos^2 \varphi.
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

С целью решения системы уравнений (2.21), относительно неизвестных значений деформаций каната  $\Delta\varepsilon$ ,  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\varepsilon_r$ ,  $\frac{1}{\rho}$  добавим уравнение. В результате преобразований, сделанных при выводе (2.16), уравнение примет вид:

$$\begin{aligned}
 \Delta f_n &= \frac{\cos\beta}{R} (A_{511}\Delta\varepsilon^2 + A_{512}\Delta\varepsilon\Delta\theta + A_{522}\Delta\theta^2 + A_{513}\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon_r + A_{523}\Delta\theta\Delta\varepsilon_r \\
 &+ A_{533}\Delta\varepsilon_r^2 + A_{514}\Delta\varepsilon\frac{1}{\rho} + A_{524}\Delta\theta\frac{1}{\rho} + A_{534}\Delta\varepsilon_r\frac{1}{\rho} + A_{544}\left(\frac{1}{\rho}\right)^2) \cos\phi_i.
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

Неопределенные формулами (2.17-2.18) и (2.20) коэффициенты жесткости, входящие в (2.22), имеют вид:

$$\begin{aligned}
g &= a_0 \frac{\sin^4 \beta}{\cos \beta} \pm 2 \frac{c_0}{R} \sin \beta \cos \beta + \frac{b_0 \sin^2 \beta + g_0 \cos^2 \beta}{R^2} \sin^4 \beta \cos \beta; \\
a_{511} &= -2a_0 \cos^3 \beta \sin^2 \beta \pm 3 \frac{c_0}{R} \cos^2 \beta \sin^3 \beta \cos \beta + \\
&+ \frac{b_0 \sin^2 \beta (3 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) + 2g_0 \cos^2 \beta \cos 2\beta}{R^2} \sin^4 \beta \cos \beta; \\
a_{512} &= 2a_0 R \cos^2 \beta \sin \beta \cos 2\beta \pm c_0 \cos^2 \beta \sin^2 \beta \cos 2\beta (5 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) + \\
&+ \frac{b_0 (3 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) - 2g_0 (1 + \cos^2 \beta)}{R} \sin^3 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta; \\
a_{522} &= 2a_0 R^2 \cos^3 \beta \sin^2 \beta \pm c_0 R \cos^2 \beta \sin \beta \cos 2\beta (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) - \\
&- \left[ b_0 \cos^2 \beta (3 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) - 2g_0 \cos 2\beta (1 + \cos^2 \beta) \right] \cos^3 \beta \sin^2 \beta; \\
a_{513} &= 2a_0 \cos \beta \sin^2 \beta \cos 2\beta \pm \frac{c_0}{R} \sin^3 \beta \cos \beta \left[ \begin{aligned} &3 \cos^2 \beta (2 \sin^2 \beta - \cos^2 \beta) + \\ &+ \sin^2 \beta (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \end{aligned} \right] - \\
&- 2 \frac{b_0 \sin^2 \beta (3 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) + 2g_0 \cos^2 \beta \cos 2\beta}{R^2} \sin^4 \beta \cos \beta; \\
a_{523} &= 4a_0 R \cos^2 \beta \sin^3 \beta \pm 2c_0 \cos \beta \sin^2 \beta \left[ \begin{aligned} &\cos^2 \beta (\cos^2 \beta - 2 \sin^2 \beta) + \\ &+ \sin^2 \beta (\sin^2 \beta - 2 \cos^2 \beta) \end{aligned} \right] - \\
&- \frac{b_0 (3 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) - 2g_0 (1 + 2 \cos^2 \beta)}{R} \cos^2 \beta \sin^3 \beta \cos 2\beta; \\
a_{533} &= 2a_0 \sin^4 \beta \cos \beta \pm \frac{c_0}{R} \sin^5 \beta (5 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) + \\
&+ \frac{b_0 (3 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \sin^2 \beta - 2g_0 \cos^2 \beta \cos 2\beta}{R^2} \sin^4 \beta \cos \beta; \\
a_{514} &= \pm c_0 \frac{g_0}{H} \sin^3 \beta \left[ (3 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) + \sin^2 \beta (5 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \right] - \\
&- \frac{b_0 \sin^2 \beta \left[ \sin^2 \beta (3 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) + 2 \frac{g_0}{H} (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \right] + 2g_0 \cos^2 \beta \cos 2\beta (1 + \sin^2 \beta)}{R} \sin^2 \beta \cos \beta; \\
a_{524} &= 2a_0 R^2 \sin \beta \cos^2 \beta (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta) \pm c_0 \frac{g_0}{H} R \sin^2 \beta \cos \beta \left[ \sin^2 \beta (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) + (3 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \right] - \\
&- b_0 \sin^3 \beta \cos^2 \beta \left[ \cos^2 \beta (3 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) - 2 \frac{g_0}{H} (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \right] + \\
&+ 2g_0 \sin \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta \left[ \sin^2 \beta (1 + \cos^2 \beta) + \cos^2 \beta \right]; \\
a_{534} &= 2a_0 R \sin^2 \beta \cos \beta (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta) \pm c_0 \frac{g_0}{H} \sin^3 \beta \left[ \cos^3 \beta + 3(\cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \right] + \\
&+ \frac{b_0 \sin^2 \beta \left[ \sin^2 \beta (3 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) + 2 \frac{g_0}{H} (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \right] + 2g_0 \cos^2 \beta \cos 2\beta (1 + \sin^2 \beta)}{R} \sin^2 \beta \cos \beta; \\
a_{544} &= 2a_0 R^2 \sin^2 \beta \cos^3 \beta \pm c_0 \frac{g_0}{H} R \sin^3 \beta \left[ (3 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) + \cos^3 \beta \right] + \\
&+ 2 \sin^2 \beta \cos \beta \left[ b_0 \frac{g_0}{H} \sin^2 \beta (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta + g_0 \cos^2 \beta \cos 2\beta) \right].
\end{aligned} \tag{2.23}$$

Представим относительную поперечную деформацию как [9]:

$$\Delta \varepsilon_r = -K_n \Delta f_n, \tag{2.24}$$

где  $K_n$  – коэффициент поперечной податливости сердечника на внедрения проволоки.

Используя выражения (2.24) и (2.22), получим:

$$\Delta \varepsilon_r = -\mu_1 \Delta \varepsilon - \mu_1 \frac{A_{34}}{A_{13}} \frac{1}{\rho} - \mu_1 \frac{A_{23}}{A_{13}} \Delta \theta - \mu^1 \frac{1}{A_{13}} (\Delta f_n), \quad (2.25)$$

где  $\mu_1$  – коэффициент поперечного сужения каната [86, 92];  $\mu^1$  – коэффициент поперечного сужения каната с учетом волнистости [88], определяемый выражением:

$$\mu^1 = \frac{K_n \cos \beta / R_k A_{13} \cos \varphi}{1 + A_{33} \cos \beta / r_k K_n \cos \varphi}. \quad (2.26)$$

Для определения неизвестных параметров деформаций  $\varepsilon, \theta, \varepsilon_r, \Delta \varepsilon, \Delta \theta, \Delta \varepsilon_r$  и  $\frac{1}{\rho}$  необходимы уравнения (2.21) и дополнительное (2.25).

С целью упрощения решения системы нелинейных уравнений примем допущение, суть которого заключается в пренебрежении изменения угла свивки за период деформации на величину контактного давления. В результате таких преобразований уравнение (2.25) вырождается в линейное:

$$\Delta \varepsilon_r = -\mu_1 \Delta \varepsilon - \mu_1 \frac{A_{34}}{A_{13}} \frac{1}{\rho} - \mu_1 \frac{A_{23}}{A_{13}} \Delta \theta. \quad (2.27)$$

Подставляя зависимость (2.27) в систему уравнений (2.16) получим:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{xi} &= (A_{11} \Delta \varepsilon + A_{12} \Delta \theta + A_{14} \frac{1}{\rho} + A_{111} \Delta \varepsilon^2 + A_{112} \Delta \varepsilon \Delta \theta + A_{122} \Delta \theta^2 + A_{114} \Delta \varepsilon \frac{1}{\rho} + \\ &+ A_{124} \Delta \theta \frac{1}{\rho} + A_{144} \left( \frac{1}{\rho} \right)^2) \cos^2 \varphi_i; \\ \Delta M_{xi} &= (A_{12} \Delta \varepsilon + A_{22} \Delta \theta + A_{24} \frac{1}{\rho} + A_{211} \Delta \varepsilon^2 + A_{212} \Delta \varepsilon \Delta \theta + A_{222} \Delta \theta^2 + A_{214} \Delta \varepsilon \frac{1}{\rho} + \\ &+ A_{224} \Delta \theta \frac{1}{\rho} + A_{244} \left( \frac{1}{\rho} \right)^2) \cos^2 \varphi_i; \\ M_z + P_x R_g'' &= A_{14} \Delta \varepsilon \cos^2 \varphi + A_{24} \Delta \theta \cos^2 \varphi + A_{44} \frac{1}{\rho} \cos^2 \varphi + A_{411} \Delta \varepsilon^2 \cos^2 \varphi + \\ &+ A_{412} \Delta \varepsilon \Delta \theta \cos^2 \varphi + A_{422} \Delta \theta^2 \cos^2 \varphi + A_{414} \Delta \varepsilon \frac{1}{\rho} \cos^2 \varphi + A_{424} \Delta \theta \frac{1}{\rho} \cos^2 \varphi + \\ &+ A_{444} \left( \frac{1}{\rho} \right)^2 \cos^2 \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A_{11} &= \sum_{j=1}^m A'_{11} - \mu_1 A'_{13}; A_{12} = \sum_{j=1}^m A'_{12} - \mu_1 A'_{23}; A_{14} = \sum_{j=1}^m A'_{14} - \mu_1 A'_{34}; \\ A_{22} &= \sum_{j=1}^m A'_{22} - \mu_1 \frac{(A'_{23})^2}{A'_{13}}; A_{24} = \sum_{j=1}^m A'_{24} - \mu_1 \frac{A'_{34} A'_{23}}{A'_{13}}; A_{44} = \sum_{j=1}^m A'_{44} - \mu_1 \frac{A'_{34}}{A'_{13}}. \end{aligned} \right\} (2.29)$$

$$\left. \begin{aligned} A_{111} &= \sum_{j=1}^m a_{111} - \mu^1 a'_{113}; A_{122} = \sum_{j=1}^m a_{122} - \mu^1 a'_{123}; A_{144} = \sum_{j=1}^m a_{144} - \mu^1 a'_{134}; \\ A_{112} &= \sum_{j=1}^m a_{112} - \mu^1 (a'_{113} + a'_{123}); A_{114} = \sum_{j=1}^m a_{114} - \mu^1 (a'_{113} + a'_{134}); A_{124} = \sum_{j=1}^m a_{124} - \mu^1 (a'_{123} + a'_{134}); \end{aligned} \right\} (2.30)$$

$$\left. \begin{aligned} A_{211} &= \sum_{j=1}^m a_{211} - \mu^1 a'_{213}; A_{222} = \sum_{j=1}^m a_{222} - \mu^1 \frac{(a'_{223})^2}{a''_{123}}; A_{244} = \sum_{j=1}^m a_{244} - \mu^1 \frac{a'_{234} a'_{434}}{a''_{134}}; \\ A_{212} &= \sum_{j=1}^m a_{212} - \mu^1 \left( a'_{213} + \frac{(a'_{223})^2}{a''_{123}} \right); A_{214} = \sum_{j=1}^m a_{214} - \mu^1 \left( a'_{213} + \frac{a'_{234} a'_{434}}{a''_{134}} \right); \\ A_{224} &= \sum_{j=1}^m a_{224} - \mu^1 \left( \frac{(a'_{223})^2}{a''_{123}} + \frac{a'_{234} a'_{434}}{a''_{134}} \right); \end{aligned} \right\} (2.31)$$

$$\left. \begin{aligned} A_{411} &= \sum_{j=1}^m a_{411} - \mu^1 a'_{413}; A_{422} = \sum_{j=1}^m a_{422} - \mu^1 \frac{(a'_{423})^2}{a'_{123}}; A_{444} = \sum_{j=1}^m a_{444} - \mu^1 \frac{(a'_{434})^2}{a'_{134}}; \\ A_{412} &= \sum_{j=1}^m a_{412} - \mu^1 \left( a'_{413} + \frac{(a'_{423})^2}{a'_{123}} \right); A_{414} = \sum_{j=1}^m a_{414} - \mu^1 \left( a'_{413} + \frac{(a'_{434})^2}{a'_{134}} \right); \\ A_{424} &= \sum_{j=1}^m a_{424} - \mu^1 \left( \frac{(a'_{423})^2}{a'_{123}} + \frac{(a'_{434})^2}{a'_{134}} \right); \end{aligned} \right\} (2.32)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a'_{113} &= a_{113} - \mu^1 a_{133}; a'_{123} = a_{123} - \mu^1 a_{233}; a'_{134} = a_{134} - \mu^1 a_{233}; a'_{213} = a_{213} - \mu^1 a_{233}; \\ a'_{223} &= a_{223} - \mu^1 a_{233}; a'_{234} = a_{234} - \mu^1 a_{233}; a'_{434} = a_{434} - \mu^1 a_{433}; a'_{413} = a_{413} - \mu^1 a_{433}; \\ a'_{423} &= a_{423} - \mu^1 a_{433}, \end{aligned} \right\} (2.33)$$

а также

$$a''_{123} = a_{123} - \mu^1 a_{133}; \quad a''_{134} = a_{134} - \mu^1 a_{133}. \quad (2.34)$$

В свою очередь формулы (2.32-2.33) с учетом (2.19) примут вид:

$$\left. \begin{aligned}
 A_{411} &= - \sum_{j=1}^m Rctg\beta(a_{111} - \mu^1 a'_{113}); \\
 A_{422} &= - \sum_{j=1}^m Rctg\beta(a_{122} - \mu^1 a'_{123}); \\
 A_{444} &= - \sum_{j=1}^m Rctg\beta(a_{144} - \mu^1 a'_{134}); \\
 A_{412} &= - \sum_{j=1}^m Rctg\beta(a_{112} - \mu^1 (a'_{113} + a'_{123})); \\
 A_{414} &= - \sum_{j=1}^m Rctg\beta(a_{114} - \mu^1 (a'_{113} + a'_{134})); \\
 A_{424} &= - \sum_{j=1}^m Rctg\beta(a_{124} - \mu^1 (a'_{123} + a'_{134})).
 \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

Полученные уравнения (2.28) представляют нелинейные уравнения статики стального подъемного каната двойной свивки с учетом волнистости, учитывающие изменения угла свивки прядей на момент окончания процесса деформации каната. Вывод данных уравнений и был целью данной главы.

Решение системы нелинейных уравнений (2.16) или (2.28) относительно неизвестных величин дополнительных деформаций каната  $\Delta\varepsilon$ ,  $\Delta\theta$  и  $\frac{1}{\rho}$  при заданных значениях основных деформаций каната  $\varepsilon$  и  $\theta$ , определяемых [9] и [39, 42], будем проводить методом последовательных приближений на ПК IBM PC с использованием программы MathCAD [24] по разработанному и представленному на рисунке 2.1 алгоритму. В качестве нулевого приближения искомых функций примем величины дополнительных деформаций, определенные на основании решения уравнений [86].

Зависимости для вычисления I-ых приближений дополнительных деформаций каната имеют согласно (2.16) следующий вид:

$$\Delta\varepsilon^I = \frac{(M_z + P_x R_B^H) - \left[ \frac{m}{2} A_{14} \Delta\varepsilon^0 + \frac{m}{2} A_{24} \Delta\theta^0 + \frac{m}{2} A_{44} \left(\frac{1}{\rho}\right)^0 + \frac{m}{2} A_{422} (\Delta\theta^0)^2 + \frac{m}{2} A_{424} \Delta\theta^0 \left(\frac{1}{\rho}\right)^0 + \frac{m}{2} A_{444} \left(\frac{1}{\rho}\right)^0 \right]}{\frac{m}{2} A_{411} \Delta\varepsilon^0 + \frac{m}{2} A_{412} \Delta\theta^0 + \frac{m}{2} A_{414} \left(\frac{1}{\rho}\right)^0}; \quad (2.36)$$

$$\Delta\theta^I = \frac{(M_z + P_x R_B^H) - \left[ \frac{m}{2} A_{14} \Delta\varepsilon^0 + \frac{m}{2} A_{24} \Delta\theta^0 + \frac{m}{2} A_{44} \left(\frac{1}{\rho}\right)^0 + \frac{m}{2} A_{411} (\Delta\varepsilon^0)^2 + \frac{m}{2} A_{414} \Delta\varepsilon^0 \left(\frac{1}{\rho}\right)^0 + \frac{m}{2} A_{444} \left(\frac{1}{\rho}\right)^0 \right]}{\frac{m}{2} A_{412} \Delta\varepsilon^0 + \frac{m}{2} A_{422} \Delta\theta^0 + \frac{m}{2} A_{424} \left(\frac{1}{\rho}\right)^0}; \quad (2.37)$$

$$\frac{1^I}{\rho} = \frac{(M_z + P_x R_B^H) - \left[ \frac{m}{2} A_{14} \Delta \varepsilon^0 + \frac{m}{2} A_{24} \Delta \theta^0 + \frac{m}{2} A_{44} \left( \frac{1}{\rho} \right)^0 + \frac{m}{2} A_{411} (\Delta \varepsilon^0)^2 + \frac{m}{2} A_{412} \Delta \varepsilon^0 \Delta \theta^0 + \frac{m}{2} A_{422} (\Delta \theta^0)^2 \right]}{\frac{m}{2} A_{414} \Delta \varepsilon^0 + \frac{m}{2} A_{424} \Delta \theta^0 + \frac{m}{2} A_{444} \left( \frac{1}{\rho} \right)^0}, \quad (2.38)$$

причем  $M_z = \frac{1}{\rho} g_0 m$  согласно [86], а также подставляя в уравнения (2.36-2.38) внешнюю нагрузку  $P_x$  из системы уравнений (2.15), получим:

$$\Delta \varepsilon^I = \frac{(mA\varepsilon + mC\theta + mA_{11}\varepsilon^2 + mA_{12}\varepsilon\theta + mA_{22}\theta^2)R_B^H - \left[ \frac{m}{2} A_{14} \Delta \varepsilon^0 + \frac{m}{2} A_{24} \Delta \theta^0 + \frac{m}{2} A_{44} \left( \frac{1}{\rho} \right)^0 + \frac{m}{2} A_{422} (\Delta \theta^0)^2 + \frac{m}{2} A_{424} \Delta \theta^0 \left( \frac{1}{\rho} \right)^0 + \frac{m}{2} A_{444} \left( \frac{1}{\rho} \right)^0 \right]}{\frac{m}{2} A_{411} \Delta \varepsilon^0 + \frac{m}{2} A_{412} \Delta \theta^0 + \frac{m}{2} A_{414} \left( \frac{1}{\rho} \right)^0}; \quad (2.39)$$

$$\Delta \theta^I = \frac{(mA\varepsilon + mC\theta + mA_{11}\varepsilon^2 + mA_{12}\varepsilon\theta + mA_{22}\theta^2)R_B^H - \left[ \frac{m}{2} A_{14} \Delta \varepsilon^0 + \frac{m}{2} A_{24} \Delta \theta^0 + \frac{m}{2} A_{44} \left( \frac{1}{\rho} \right)^0 + \frac{m}{2} A_{411} (\Delta \varepsilon^0)^2 + \frac{m}{2} A_{414} \Delta \varepsilon^0 \left( \frac{1}{\rho} \right)^0 + \frac{m}{2} A_{444} \left( \frac{1}{\rho} \right)^0 \right]}{\frac{m}{2} A_{412} \Delta \varepsilon^0 + \frac{m}{2} A_{422} \Delta \theta^0 + \frac{m}{2} A_{424} \left( \frac{1}{\rho} \right)^0}; \quad (2.40)$$

$$\frac{1^I}{\rho} = \frac{(mA\varepsilon + mC\theta + mA_{11}\varepsilon^2 + mA_{12}\varepsilon\theta + mA_{22}\theta^2)R_B^H - \left[ \frac{m}{2} A_{14} \Delta \varepsilon^0 + \frac{m}{2} A_{24} \Delta \theta^0 + \frac{m}{2} A_{44} \left( \frac{1}{\rho} \right)^0 + \frac{m}{2} A_{411} (\Delta \varepsilon^0)^2 + \frac{m}{2} A_{412} \Delta \varepsilon^0 \Delta \theta^0 + \frac{m}{2} A_{422} (\Delta \theta^0)^2 \right]}{\frac{m}{2} A_{414} \Delta \varepsilon^0 + \frac{m}{2} A_{424} \Delta \theta^0 + \frac{m}{2} A_{444} \left( \frac{1}{\rho} \right)^0}, \quad (2.41)$$

где  $\Delta \varepsilon^0$ ,  $\Delta \theta^0$  и  $\left( \frac{1}{\rho} \right)^0$  – нулевые приближения дополнительных осевой, крутильной и изгибной деформаций.

## 2.2. Алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния канатов с учетом волнистости

На рисунке 2.1 приведена схема алгоритма расчета напряженно-деформированного состояния каната двойной свивки с волнистости, построенного с помощью полученных нелинейных уравнений.

Для работы программы производится ввод необходимых исходных данных. Исходными данными являются: конструкция каната; коэффициенты жесткости  $A$ ,  $C$ ; коэффициенты жесткости  $A_{11}$ ,  $A_{12}$ ,  $A_{22}$ ; нулевые приближения дополнительных

осевой, крутильной и изгибной деформаций  $\Delta\varepsilon^0$ ,  $\Delta\theta^0$  и  $(\frac{1}{\rho})^0$ ; радиус волнистости каната  $R_B^H$ , мм; диаметр каната  $D_K$ , м; радиус каната  $R_K$ , м; натяжение каната  $P_x$ , Н; число винтовых элементов в каждом слое каната  $m$ ; модуль упругости I рода  $E, \frac{H}{M^2}$ ; коэффициент Пуассона  $\mu$ ; модуль упругости II рода  $G, \frac{H}{M^2}$ ; запас прочности  $z$ ; угол свивки проволок сердечника  $\alpha_1$ , рад; угол свивки проволок пряди сердечника  $\alpha_2$ , рад; угол свивки проволок внешних прядей каната  $\alpha_3$ , рад; угол свивки каната  $\beta$ , рад; предел текучести  $\sigma_T, \frac{H}{M^2}$ ; допуск на диаметр проволок  $\Delta\delta$ , м; разбег технологического натяжения проволоки  $\Delta T, \frac{H}{M^2}$ .

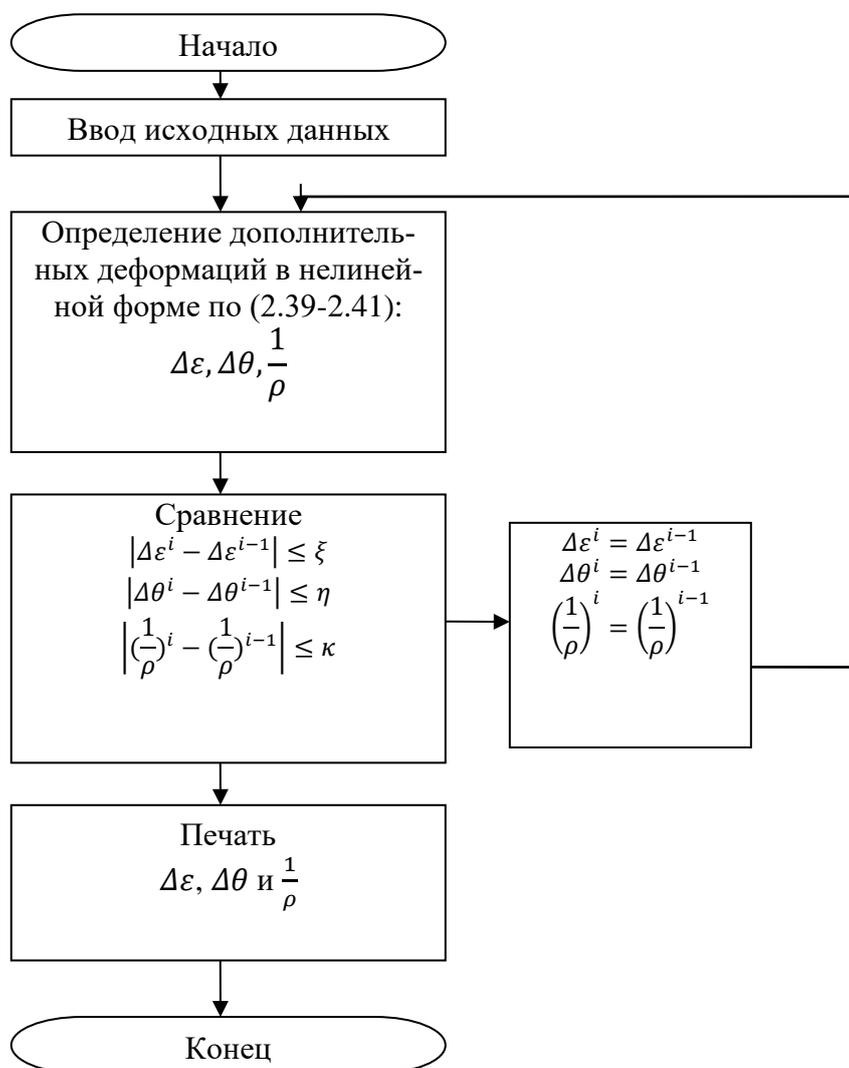


Рисунок 2.1 – Общий алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния канатов с учетом волнистости полученный с помощью нелинейных уравнений

Расчет напряженно-деформированного состояния каната двойной свивки с учетом волнистости с помощью полученных нелинейных уравнений проводится в следующей последовательности:

1. Ввод исходных данных.
2. Определяются дополнительные деформации: продольные  $\Delta\varepsilon$ , крутильные  $\Delta\theta$  и изгибные  $\frac{1}{\rho}$  из выражения (2.39-2.41).

3. Сравнение  $|\Delta\varepsilon^i - \Delta\varepsilon^{i-1}| \leq \xi$ ,  $|\Delta\theta^i - \Delta\theta^{i-1}| \leq \eta$ ,  $\left|\left(\frac{1}{\rho}\right)^i - \left(\frac{1}{\rho}\right)^{i-1}\right| \leq \kappa$ , если удовлетворяет требованиям то на печать, если  $\Delta\varepsilon^i = \Delta\varepsilon^{i-1}$ ,  $\Delta\theta^i = \Delta\theta^{i-1}$ ,  $\left(\frac{1}{\rho}\right)^i = \left(\frac{1}{\rho}\right)^{i-1}$ , то возврат.

### 2.3. Нелинейные уравнения статики с учетом волнистости для канатов спиральной свивки

Уравнения, отражающие связь величин внешних усилий, приложенных к спиральному канату с учетом волнистости, с его деформациями имеют вид [89, 48]:

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta P_{xi} &= (a_{11}\Delta\varepsilon + a_{12}\Delta\theta + a_{14}\frac{1}{\rho} + a_{111}\Delta\varepsilon^2 + a_{112}\Delta\varepsilon\Delta\theta + a_{122}\Delta\theta^2 + a_{114}\Delta\varepsilon\frac{1}{\rho} + \\
 &+ a_{124}\Delta\theta\frac{1}{\rho} + a_{144}\left(\frac{1}{\rho}\right)^2) \cos^2 \varphi_i; \\
 \Delta M_{xi} &= (a_{12}\Delta\varepsilon + a_{22}\Delta\theta + a_{24}\frac{1}{\rho} + a_{211}\Delta\varepsilon^2 + a_{212}\Delta\varepsilon\Delta\theta + a_{222}\Delta\theta^2 + a_{214}\Delta\varepsilon\frac{1}{\rho} + \\
 &+ a_{224}\Delta\theta\frac{1}{\rho} + a_{244}\left(\frac{1}{\rho}\right)^2) \cos^2 \varphi_i; \\
 M_z + P_x R_g^n &= a_{14}\Delta\varepsilon \cos^2 \varphi + a_{24}\Delta\theta \cos^2 \varphi + a_{44}\frac{1}{\rho} \cos^2 \varphi + a_{411}\Delta\varepsilon^2 \cos^2 \varphi + \\
 &+ a_{412}\Delta\varepsilon\Delta\theta \cos^2 \varphi + a_{422}\Delta\theta^2 \cos^2 \varphi + a_{414}\Delta\varepsilon\frac{1}{\rho} \cos^2 \varphi + a_{424}\Delta\theta\frac{1}{\rho} \cos^2 \varphi + \\
 &+ a_{444}\left(\frac{1}{\rho}\right)^2 \cos^2 \varphi.
 \end{aligned} \right\} (2.42)$$

где

$$a_{11}, a_{12}, a_{14}, a_{111}, a_{112}, a_{122}, a_{114}, a_{124}, a_{144}, a_{22}, a_{24}, a_{211}, a_{212}, a_{222}, a_{214}, a_{224}, a_{244}, \\ a_{14}, a_{44}, a_{411}, a_{412}, a_{422}, a_{414}, a_{424}, a_{444}$$

– агрегатные коэффициенты жесткости с учетом волнистости для спирального каната [48].

По аналогии с (2.29–2.32) можно получить выражения:

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= \sum_{j=1}^m a'_{11} - \mu_1 a'_{13}; a_{12} = \sum_{j=1}^m a'_{12} - \mu_1 a'_{23}; a_{14} = \sum_{j=1}^m a'_{14} - \mu_1 a'_{34}; \\ a_{22} &= \sum_{j=1}^m a'_{22} - \mu_1 \frac{(a'_{23})^2}{a'_{13}}; a_{24} = \sum_{j=1}^m a'_{24} - \mu_1 \frac{a'_{34} a'_{23}}{a'_{13}}; a_{44} = \sum_{j=1}^m a'_{44} - \mu_1 \frac{a'_{34}}{a'_{13}}. \end{aligned} \right\} (2.43)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{111} &= \sum_{j=1}^m a'_{111} - \mu^1 a''_{113}; a_{122} = \sum_{j=1}^m a'_{122} - \mu^1 a''_{123}; a_{144} = \sum_{j=1}^m a'_{144} - \mu^1 a''_{134}; \\ a_{112} &= \sum_{j=1}^m a'_{112} - \mu^1 (a''_{113} + a''_{123}); a_{114} = \sum_{j=1}^m a'_{114} - \mu^1 (a''_{113} + a''_{134}); a_{124} = \sum_{j=1}^m a'_{124} - \mu^1 (a''_{123} + a''_{134}); \end{aligned} \right\} (2.44)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{211} &= \sum_{j=1}^m a'_{211} - \mu^1 a''_{213}; a_{222} = \sum_{j=1}^m a'_{222} - \mu^1 \frac{(a''_{223})^2}{a'''_{123}}; a_{244} = \sum_{j=1}^m a'_{244} - \mu^1 \frac{a''_{234} a''_{434}}{a'''_{134}}; \\ a_{212} &= \sum_{j=1}^m a'_{212} - \mu^1 \left( a''_{213} + \frac{(a''_{223})^2}{a'''_{123}} \right); a_{214} = \sum_{j=1}^m a'_{214} - \mu^1 \left( a''_{213} + \frac{a''_{234} a''_{434}}{a'''_{134}} \right); \\ a_{224} &= \sum_{j=1}^m a'_{224} - \mu^1 \left( \frac{(a''_{223})^2}{a'''_{123}} + \frac{a''_{234} a''_{434}}{a'''_{134}} \right); \end{aligned} \right\} (2.45)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{411} &= \sum_{j=1}^m a'_{411} - \mu^1 a''_{413}; a_{422} = \sum_{j=1}^m a'_{422} - \mu^1 \frac{(a''_{423})^2}{a'''_{123}}; a_{444} = \sum_{j=1}^m a'_{444} - \mu^1 \frac{(a''_{434})^2}{a'''_{134}}; \\ a_{412} &= \sum_{j=1}^m a'_{412} - \mu^1 \left( a''_{413} + \frac{(a''_{423})^2}{a'''_{123}} \right); a_{414} = \sum_{j=1}^m a'_{414} - \mu^1 \left( a''_{413} + \frac{(a''_{434})^2}{a'''_{134}} \right); \\ a_{424} &= \sum_{j=1}^m a'_{424} - \mu^1 \left( \frac{(a''_{423})^2}{a'''_{123}} + \frac{(a''_{434})^2}{a'''_{134}} \right). \end{aligned} \right\} (2.46)$$

причем

$$\left. \begin{aligned} a''_{113} &= a'_{113} - \mu^1 a'_{133}; a''_{123} = a'_{123} - \mu^1 a'_{233}; a''_{134} = a'_{134} - \mu^1 a'_{233}; a''_{213} = a'_{213} - \mu^1 a'_{233}; \\ a''_{223} &= a'_{223} - \mu^1 a'_{233}; a''_{234} = a'_{234} - \mu^1 a'_{233}; a''_{434} = a'_{434} - \mu^1 a'_{433}; a''_{413} = a'_{413} - \mu^1 a'_{433}; \\ a''_{423} &= a'_{423} - \mu^1 a'_{433}. \end{aligned} \right\} (2.47)$$

а также

$$a'''_{123} = a'_{123} - \mu^1 a'_{133}; \quad a'''_{134} = a'_{134} - \mu^1 a'_{133}, \quad (2.48)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a'_{111} &= Ef \cos^3 \alpha \sin^2 \alpha - \frac{3GI_p \sin^2 \alpha + EI(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)}{R^2} \cos^3 \alpha \sin^4 \alpha; \\ a'_{112} &= -EfR \sin \alpha \cos^2 \alpha \cos 2\alpha - \frac{3GI_p \cos^2 \alpha \cos 2\alpha - EI(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)(1 + \cos^2 \alpha)}{R} \cos^2 \alpha \sin^3 \alpha; \\ a'_{122} &= -EfR^2 \cos^3 \alpha \sin^2 \alpha + [3GI_p \cos^4 \alpha - EI(1 + \cos^2 \alpha)(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)] \cos^3 \alpha \sin^2 \alpha; \\ a'_{114} &= \frac{3GI_p \sin^2 \alpha (1 + \mu) + EI(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)}{R} \sin^2 \alpha \cos^3 \alpha (1 + \sin^2 \alpha); \\ a'_{113} &= -Ef \cos \alpha \sin^2 \alpha \cos 2\alpha + 2 \frac{GI_p \sin^2 \alpha + EI(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)}{R^2} \sin^4 \alpha \cos^3 \alpha; \\ a'_{123} &= -2EfR \cos^2 \alpha \sin^3 \alpha + \frac{3GI_p \cos^2 \alpha \cos 2\alpha - EI(1 + 2 \cos^2 \alpha)(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)}{R} \cos^2 \alpha \sin^3 \alpha; \\ a'_{133} &= -Ef \cos \alpha \sin^4 \alpha - \frac{3GI_p \sin^2 \alpha + EI(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)}{R^2} \cos^3 \alpha \sin^4 \alpha; \\ a'_{124} &= -EfR^2 \sin \alpha \cos^2 \alpha (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) - 3GI_p \sin^3 \alpha \cos^4 \alpha (1 - \cos^2 \alpha) (1 + \mu) - \\ &\quad - EI \sin \alpha \cos^2 \alpha (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) (2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) (1 + \cos^2 \alpha); \\ a'_{134} &= -EfR \sin^2 \alpha \cos \alpha (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) - \frac{3GI_p \sin^2 \alpha \frac{g_0}{H} + EI(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)}{R} \sin^2 \alpha \cos^3 \alpha (1 + \sin^2 \alpha); \\ a'_{144} &= -EfR^2 \sin^2 \alpha \cos^3 \alpha - [3GI_p \sin^2 \alpha (1 + \mu) + EI(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)] \sin^2 \alpha \cos^3 \alpha; \end{aligned} \right\} (2.49)$$

$$\begin{aligned}
a'_{211} &= -EfR \cos^4 \alpha \sin \alpha + \frac{3GI_p \sin^2 \alpha + EI(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)}{R} \sin^3 \alpha \cos^4 \alpha; \\
a'_{212} &= EfR^2 \cos^3 \alpha \cos 2\alpha + \left[ 3GI_p \cos^2 \alpha \cos 2\alpha - EI(1 + 2 \cos^2 \alpha)(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \right] \cos^3 \alpha \sin^2 \alpha; \\
a'_{222} &= EfR^3 \cos^4 \alpha \sin \alpha - R \left[ 3GI_p \cos^4 \alpha - EI(1 + \cos^2 \alpha)(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \right] \sin \alpha \cos^4 \alpha; \\
a'_{213} &= EfR \cos^2 \alpha \sin \alpha \cos 2\alpha - 2 \frac{GI_p \sin^2 \alpha + EI(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)}{R} \cos^4 \alpha \sin^3 \alpha; \\
a'_{223} &= 2EfR^2 \cos^3 \alpha \sin^2 \alpha - \left[ \frac{3GI_p \cos^2 \alpha \cos 2\alpha - EI(1 + 2 \cos^2 \alpha)(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)}{-EI(1 + 2 \cos^2 \alpha)(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)} \right] \cos^3 \alpha \sin^2 \alpha; \\
a'_{233} &= EfR \cos^2 \alpha \sin^3 \alpha + \frac{3GI_p \sin^2 \alpha + EI(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)}{R} \cos^4 \alpha \sin^3 \alpha; \\
a'_{214} &= - \left[ 3GI_p \sin^2 \alpha (1 + \mu) + EI(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \right] \sin \alpha \cos^4 \alpha (1 + \sin^2 \alpha); \\
a'_{224} &= EfR^3 \cos^3 \alpha (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) + \\
&+ \left[ 3GI_p \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha (1 - \cos^2 \alpha) (1 + \mu) + EI(\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha)(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)(1 + \cos^2 \alpha) \right] R \cos^3 \alpha; \\
a'_{234} &= EfR^2 \sin \alpha \cos^2 \alpha (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) + \left[ \frac{3GI_p \sin^2 \alpha \frac{g_0}{H} + EI(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)}{+EI(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)} \right] \sin \alpha \cos^4 \alpha (1 + \sin^2 \alpha); \\
a'_{244} &= -EfR^3 \sin^3 \alpha \cos^2 \alpha + \left[ 3GI_p \sin^2 \alpha (1 + \mu) + EI(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \right] R \sin \alpha \cos^4 \alpha.
\end{aligned} \tag{2.50}$$

$$\begin{aligned}
a'_{411} &= EfR \cos^3 \alpha \sin^2 \alpha + \frac{3GI_p \sin^2 \alpha (1 - \sin^2 \alpha) + EI \cos 2\alpha (2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)}{R} \cos^3 \alpha \sin^2 \alpha; \\
a'_{412} &= -EfR^2 \sin \alpha \cos^2 \alpha \cos 2\alpha + \\
&+ \left[ 3GI_p (1 - \sin^2 \alpha) \cos^2 \alpha - EI(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)(1 + \cos^2 \alpha) \right] \cos^2 \alpha \sin \alpha \cos 2\alpha; \\
a'_{422} &= -EfR^3 \cos^3 \alpha \sin^2 \alpha - \left[ 3GI_p \cos^4 \alpha (1 - \sin^2 \alpha) - EI(1 + \cos^2 \alpha)(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \cos 2\alpha \right] R \cos^3 \alpha; \\
a'_{413} &= -EfR \cos \alpha \sin^2 \alpha \cos 2\alpha - 2 \frac{GI_p \sin^2 \alpha (1 - \sin^2 \alpha) + EI \cos 2\alpha (2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)}{R} \sin^2 \alpha \cos^3 \alpha; \\
a'_{423} &= -2EfR^2 \cos^2 \alpha \sin^3 \alpha + \left[ \frac{-3GI_p \cos^2 \alpha (1 - \sin^2 \alpha) + EI(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)(1 + 2 \cos^2 \alpha)}{+EI(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)(1 + 2 \cos^2 \alpha)} \right] \sin \alpha \cos^2 \alpha \cos 2\alpha; \\
a'_{433} &= -EfR \cos \alpha \sin^4 \alpha + \frac{3GI_p \sin^2 \alpha (1 - \sin^2 \alpha) + EI \cos 2\alpha (2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)}{R} \cos^3 \alpha \sin^2 \alpha; \\
a'_{414} &= - \left[ 3GI_p (1 + \mu) (1 - \sin^2 \alpha) \cos^2 \alpha + EI(1 - 2 \cos^2 \alpha)(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \right] (1 + \sin^2 \alpha) \sin^2 \alpha \cos \alpha; \\
a'_{424} &= -EfR^3 \sin \alpha \cos^2 \alpha (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) + 3GI_p R \sin \alpha \cos^4 \alpha (1 - \cos^2 \alpha) (1 + \mu) (1 - \sin^2 \alpha) + \\
&+ EIR \sin \alpha \cos^2 \alpha \left[ 1 - (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha)(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)(1 + \cos^2 \alpha) \right]; \\
a'_{434} &= -EfR^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) + \left[ \frac{3GI_p \frac{g_0}{H} (1 - \sin^2 \alpha) \cos^2 \alpha + EI(1 - 2 \cos^2 \alpha)(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)}{+EI(1 - 2 \cos^2 \alpha)(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)} \right] (1 + \sin^2 \alpha) \sin^2 \alpha \cos \alpha; \\
a'_{444} &= -EfR^3 \sin^2 \alpha \cos^3 \alpha + \left[ 3GI_p \sin^2 \alpha (1 + \mu) (1 - \sin^2 \alpha) \cos^2 \alpha - EI(1 + 2 \cos^2 \alpha)(2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \right] R \sin^2 \alpha \cos \alpha.
\end{aligned} \tag{2.51}$$

Уравнения (2.49-2.51) можно получить на основании зависимостей (2.17–2.18) и (2.20), делая в них замену, отражающих параметры пряди, на соответствующие значения, относящиеся к проволокам,  $\beta = \alpha$ ,  $c_0 = 0$ ,  $a_0 = Ef$ ,  $b_0 = GI_p$ ,  $g_0 = EI$ .

Для большинства спиральных канатов и прядей при расчете, коэффициент поперечного сужения  $\mu$  принимают равным нулю, тогда зависимости (2.43–2.46) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= \sum_{i=1}^n a'_{11}; a_{12} = \sum_{i=1}^n a'_{12}; a_{14} = \sum_{i=1}^n a'_{14}; \\ a_{22} &= \sum_{i=1}^n a'_{22}; a_{24} = \sum_{i=1}^n a'_{24}; a_{44} = \sum_{i=1}^n a'_{44}. \end{aligned} \right\} \quad (2.52)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{111} &= \sum_{i=1}^n a'_{111}; a_{122} = \sum_{i=1}^n a'_{122}; a_{144} = \sum_{i=1}^n a'_{144}; \\ a_{112} &= \sum_{i=1}^n a'_{112}; a_{114} = \sum_{i=1}^n a'_{114}; a_{124} = \sum_{i=1}^n a'_{124}; \end{aligned} \right\} \quad (2.53)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{211} &= \sum_{i=1}^n a'_{211}; a_{222} = \sum_{i=1}^n a'_{222}; a_{244} = \sum_{i=1}^n a'_{244}; \\ a_{212} &= \sum_{i=1}^n a'_{212}; a_{214} = \sum_{i=1}^n a'_{214}; a_{224} = \sum_{i=1}^n a'_{224}; \end{aligned} \right\} \quad (2.54)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{411} &= \sum_{i=1}^n a'_{411}; a_{422} = \sum_{i=1}^n a'_{422}; a_{444} = \sum_{i=1}^n a'_{444}; \\ a_{412} &= \sum_{i=1}^n a'_{412}; a_{414} = \sum_{i=1}^n a'_{414}; a_{424} = \sum_{i=1}^n a'_{424}. \end{aligned} \right\} \quad (2.55)$$

При вычислении коэффициентов жесткости с учетом волнистости согласно выражениям (2.17, 2.18), (2.20) и (2.49–2.51) необходимо учитывать значения знаков направления углов свивки. За положительное направление у канатов двойной свивки принято считать направление свивки прядей в канат, а у спиральных канатов – направление свивки проволок наружного слоя. Для канатов односторонней свивки знак положителен (+), для крестовой знак отрицателен (-).

#### 2.4. Нелинейные уравнения статики стального каната с учетом волнистости полученные методом конечных приращений

При рассмотрении грузоподъемного каната положение оси винтового элемента [9] после окончания действия деформаций, характеризуется параметрами:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\beta} &= \beta + \Delta\beta; \\ \tilde{R} &= R + \Delta R; \\ \tilde{S} &= S + \Delta S. \end{aligned} \right\} \quad (2.56)$$

Деформации кручения, кривизны и изгиба с учетом (2.56), а также с учетом уравнения кинематической аналогии для реального каната примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\tau} = \Delta\omega_t &= \Delta\beta \frac{\cos 2\beta}{R_k} - \Delta R \frac{\sin 2\beta}{2R_k^2} + \frac{\Delta S}{S} \frac{\sin 2\beta}{2R_k} + \left( \Delta\beta \frac{\cos 2\beta}{\rho} - \Delta R \frac{\sin 2\beta}{2\rho^2} + \frac{\Delta S}{S} \frac{\sin 2\beta}{2\rho} \right) \cos \varphi; \\ \tilde{b} = \Delta\omega_b &= \Delta\beta \frac{\sin 2\beta}{R_k} - \Delta R \frac{\sin^2 \beta}{R_k^2} + \frac{\Delta S}{S} \frac{\sin^2 \beta}{R_k} + \left( -\Delta\beta \frac{\cos 2\beta}{\rho} + \Delta R \frac{\cos^2 \beta}{\rho^2} + \frac{\Delta S}{S} \frac{\cos^2 \beta}{\rho} \right) \cos \varphi; \\ \tilde{n} = \Delta\omega_n &= -\Delta\beta \frac{\sin \beta}{\rho} \sin \varphi - \Delta R \frac{\cos \beta}{\rho^2} \sin \varphi + \frac{\Delta S}{S} \frac{\cos \beta}{\rho} \sin \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (2.57)$$

где  $\frac{1}{\rho}$  – кривизна [9] винтовой линии  $S$ ;  $\frac{\Delta S}{S} = \varepsilon_{пр}$  – влияние относительной деформации винтовой оси на изменение величин кривизны, кручения и изгиба.

В результате подстановки (2.4) в уравнения равновесия внутренних силовых факторов, возникающих в винтовом элементе при действии на канат внешних нагрузок (2.7), получим уравнение равновесия внутренних силовых факторов с учетом различия длин его винтовых элементов расположенных в одном слое:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sin^2 \tilde{\beta}}{R} \Delta P_t - \frac{\sin \tilde{\beta} \cos \tilde{\beta}}{R} \Delta P_b &= \Delta f_n; \\ \frac{\sin^2 \tilde{\beta}}{R} \Delta L_t - \frac{\sin \tilde{\beta} \cos \tilde{\beta}}{R} \Delta L_b &= \Delta P_b \end{aligned} \right\} \quad (2.58)$$

Уравнения, отражающие физические свойства винтового элемента с учетом различия геометрических параметров и механических свойств прядей имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_t &= a_0 \varepsilon_s + c_0 \tilde{\tau}; \\ \Delta L_t &= c_0 \varepsilon_s + b_0 \tilde{\tau}; \\ \Delta L_b &= g_0 \tilde{b}, \\ \Delta L_n &= g_0 \tilde{n}, \end{aligned} \right\} \quad (2.59)$$

С целью определения неизвестных значений силовых факторов  $\Delta P_t, \Delta P_b, \Delta L_t, \Delta L_b, \Delta L_n$  подставим в уравнения (2.58, 2.59) значения (2.57) и определим усилия  $\Delta P_{xi}, \Delta M_{xi}$  и  $M_Z + P_x R_B$  по ранее полученным зависимостям:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{xi} &= (\Delta P_t \cos \tilde{\beta} + \Delta P_b \sin \tilde{\beta}) \cos \varphi; \\ \Delta M_{xi} &= (\Delta L_t \cos \tilde{\beta} + \Delta L_b \sin \tilde{\beta} + R_k (\Delta P_t \sin \tilde{\beta} - \Delta P_b \cos \tilde{\beta})) \cos \varphi; \\ M_Z + P_x R_B &= \Delta L_b \cos \tilde{\beta} \cos \varphi - \Delta L_t \sin \tilde{\beta} \cos \varphi - \Delta L_n \sin \varphi + \\ &+ R_k (\Delta P_b \sin \tilde{\beta} + \Delta P_t \cos \tilde{\beta}) \cos \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (2.60)$$

Значение поперечной деформации  $\varepsilon_r$ , будем рассчитывать по общеизвестной формуле:

$$\varepsilon_r = -k_n \Delta f_n. \quad (2.61)$$

В результате математических операций уравнения статики примет вид [49]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_x &= mL\varepsilon_{np} + mN\Delta\beta + mI\Delta R + mB\varepsilon_{np} \cos\varphi + mC\Delta\beta \cos\varphi + mD\Delta R \cos\varphi; \\ \Delta M_x &= P\varepsilon_{np} + G\Delta\beta + K\Delta R + E\varepsilon_{np} \cos\varphi + F\Delta\beta \cos\varphi + H\Delta R \cos\varphi; \\ M_z + P_x R_x^n &= \frac{m}{2} A\varepsilon_{np} + \frac{m}{2} M\Delta\beta + \frac{m}{2} N\Delta R + \frac{m}{2} S\varepsilon_{np} + \frac{m}{2} Q\Delta\beta + \frac{m}{2} W\Delta R. \end{aligned} \right\} \quad (2.62)$$

где

$$\left. \begin{aligned} L &= \sum_{i=1}^m \left\{ a_0 \cos \tilde{\beta} + \frac{c_0}{R_k} \left( \frac{\sin 2\beta \cos \tilde{\beta}}{2} + \sin^3 \tilde{\beta} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{b_0 \sin 2\beta \sin^3 \tilde{\beta} - g_0 \sin^2 \beta \sin 2\tilde{\beta} \sin \tilde{\beta}}{R_k^2} \right\}; \\ N &= \sum_{i=1}^m \left[ \frac{c_0}{R} \cos 2\beta \cos \tilde{\beta} + \frac{b_0 \cos 2\beta \sin^3 \tilde{\beta} - g_0 \sin 2\beta \sin^2 \tilde{\beta} \cos \tilde{\beta}}{R_k^2} \right]; \\ I &= \sum_{i=1}^m \left[ -\frac{c_0}{2R_k^2} \sin 2\beta \cos \tilde{\beta} + \frac{g_0 \sin \tilde{\beta} \sin^2 \beta \sin 2\tilde{\beta} - b_0 \sin 2\beta \sin^3 \tilde{\beta}}{R_k^3} \right]; \\ B &= \sum_{i=1}^m \left[ \frac{c_0}{2\rho} \sin 2\beta \cos \tilde{\beta} + \frac{b_0}{2\rho} \frac{\sin^3 \tilde{\beta} \sin 2\beta}{R_k} - \frac{g_0}{\rho} \frac{\sin^2 \tilde{\beta} \cos \tilde{\beta}}{R_k} \cos^2 \beta \right]; \\ C &= \sum_{i=1}^m \left[ \frac{c_0}{\rho} \cos \tilde{\beta} \cos 2\beta + \frac{b_0}{\rho} \frac{\sin^3 \tilde{\beta} \cos 2\beta}{R_k} + \frac{g_0}{\rho} \frac{\sin^2 \tilde{\beta} \cos \tilde{\beta}}{R_k} \cos 2\beta \right]; \\ D &= \sum_{i=1}^m \left[ -\frac{c_0}{2\rho^2} \cos \tilde{\beta} \sin 2\beta - \frac{b_0}{2\rho^2} \frac{\sin^3 \tilde{\beta} \sin 2\beta}{R_k} - \frac{g_0}{\rho^2} \frac{\sin^2 \tilde{\beta} \cos \tilde{\beta}}{R_k} \cos^2 \beta \right]; \end{aligned} \right\} \quad (2.63)$$

$$\begin{aligned}
P &= \sum_{i=1}^m \left\{ \begin{aligned} &a_0 R_k \sin \tilde{\beta} + c_0 \left[ \cos \tilde{\beta} (1 - \sin^2 \tilde{\beta}) + \frac{\sin 2\beta \sin \tilde{\beta}}{2} \right] + \\ &+ \frac{b_0 \sin \beta \cos \tilde{\beta} \cos \beta (1 - \sin^2 \tilde{\beta}) + g_0 \sin^2 \beta \sin \tilde{\beta} (1 + \cos^2 \tilde{\beta})}{R_k} \end{aligned} \right\}; \\
G &= \sum_{i=1}^m \left[ \begin{aligned} &c_0 \cos 2\beta \sin \tilde{\beta} + \frac{b_0 \cos 2\beta \cos \tilde{\beta} (1 - \sin^2 \tilde{\beta})}{R_k} + \\ &+ \frac{g_0 \sin 2\beta \sin \tilde{\beta} (1 + \cos^2 \tilde{\beta})}{R_k} \end{aligned} \right]; \\
K &= \sum_{i=1}^m \left[ \begin{aligned} &-\frac{c_0}{2R_k} \sin 2\beta \sin \tilde{\beta} - \frac{b_0 \sin \beta \cos \beta \cos \tilde{\beta} (1 - \sin^2 \tilde{\beta})}{R_k^2} - \\ &-\frac{g_0 \sin^2 \beta \sin \tilde{\beta} (1 + \cos^2 \tilde{\beta})}{R_k^2} \end{aligned} \right]; \\
E &= \sum_{i=1}^m \left[ \begin{aligned} &\frac{c_0}{2\rho} R_k \sin \tilde{\beta} \sin 2\beta + \frac{b_0}{2\rho} \cos \tilde{\beta} \sin 2\beta (1 - \sin^2 \tilde{\beta}) + \\ &+ \frac{g_0}{\rho} \sin \tilde{\beta} \cos^2 \beta (1 + \cos^2 \tilde{\beta}) \end{aligned} \right]; \\
F &= \sum_{i=1}^m \left[ \begin{aligned} &\frac{c_0}{\rho} R_k \sin \tilde{\beta} \cos 2\beta + \frac{b_0}{\rho} \cos \tilde{\beta} \cos 2\beta (1 - \sin^2 \tilde{\beta}) - \\ &-\frac{g_0}{\rho} \sin \tilde{\beta} \cos 2\beta (1 + \cos^2 \tilde{\beta}) \end{aligned} \right]; \\
H &= \sum_{i=1}^m \left[ \begin{aligned} &-\frac{c_0}{2\rho^2} R_k \sin \tilde{\beta} \sin 2\beta - \frac{b_0}{2\rho^2} \cos \tilde{\beta} \sin 2\beta (1 - \sin^2 \tilde{\beta}) + \\ &+ \frac{g_0}{\rho^2} \sin \tilde{\beta} \cos^2 \beta (1 + \cos^2 \tilde{\beta}) \end{aligned} \right];
\end{aligned} \tag{2.64}$$

$$\begin{aligned}
A &= \sum_{i=1}^m \left\{ \begin{aligned} &a_0 R \cos \tilde{\beta} - c_0 \left[ \sin \tilde{\beta} - \left( \frac{\sin 2\beta \cos \tilde{\beta}}{2} + \sin^3 \tilde{\beta} \right) \right] - \\ &-\frac{b_0 \sin \beta \cos \beta \sin \tilde{\beta} (1 - \sin^2 \tilde{\beta})}{R_k} + \frac{g_0 \sin^2 \beta \cos \tilde{\beta} (1 - \sin^2 \tilde{\beta})}{R_k} \end{aligned} \right\}; \\
M &= \sum_{i=1}^m \left[ \begin{aligned} &c_0 \cos 2\beta \cos \tilde{\beta} - \frac{b_0 \cos 2\beta \sin \tilde{\beta} (1 - \sin^2 \tilde{\beta})}{R_k} + \\ &+ \frac{g_0 \sin 2\beta \cos \tilde{\beta} (1 - \sin^2 \tilde{\beta})}{R_k} \end{aligned} \right];
\end{aligned} \tag{2.65}$$

$$\begin{aligned}
N &= \sum_{i=1}^m \left[ \begin{aligned} &-\frac{c_0}{2R_k} \sin 2\beta \cos \tilde{\beta} + \frac{b_0 \sin \beta \cos \beta \sin \tilde{\beta} (1 - \sin^2 \tilde{\beta})}{R_k^2} - \\ &-\frac{g_0 \sin^2 \beta \cos \tilde{\beta} (1 - \sin^2 \tilde{\beta})}{R_k^2} \end{aligned} \right]; \\
S &= \sum_{i=1}^m \left[ \begin{aligned} &\frac{c_0}{2\rho} R_k \cos \tilde{\beta} \sin 2\beta - \frac{b_0}{2\rho} \sin \tilde{\beta} \sin 2\beta (1 - \sin^2 \tilde{\beta}) - \\ &-\frac{g_0}{\rho} \cos \beta [1 - \cos \tilde{\beta} \cos \beta (1 - \sin^2 \tilde{\beta})] \end{aligned} \right]; \\
Q &= \sum_{i=1}^m \left[ \begin{aligned} &\frac{c_0}{\rho} R_k \cos \tilde{\beta} \cos 2\beta - \frac{b_0}{\rho} \cos 2\beta \sin \tilde{\beta} (1 - \sin^2 \tilde{\beta}) + \\ &+\frac{g_0}{\rho} [\sin \beta - \cos \tilde{\beta} \cos 2\beta (1 - \sin^2 \tilde{\beta})] \end{aligned} \right]; \\
W &= \sum_{i=1}^m \left[ \begin{aligned} &-\frac{c_0}{2\rho^2} R_k \cos \tilde{\beta} \sin 2\beta + \frac{b_0}{2\rho^2} \sin \tilde{\beta} \sin 2\beta (1 - \sin^2 \tilde{\beta}) + \\ &+\frac{g_0}{\rho^2} \cos \beta [1 + \cos \tilde{\beta} \cos \beta (1 - \sin^2 \tilde{\beta})] \end{aligned} \right].
\end{aligned} \tag{2.66}$$

Система уравнений (2.62) является неопределенной относительно неизвестных  $\varepsilon_{np}, \Delta\beta, \Delta R$ . Для решения уравнения (2.62) воспользуемся 1-м уравнением (2.7), с учетом (2.60). После преобразований уравнение примет вид:

$$\frac{\Delta R}{Rk_n} = k' \varepsilon_{np} + l' \Delta\beta + z' \Delta R + t' \varepsilon_{np} \cos \varphi + v' \Delta\beta \cos \varphi + x' \Delta R \cos \varphi, \tag{2.67}$$

где

$$\left. \begin{aligned} k' &= \frac{a_0}{R_k} \sin^2 \tilde{\beta} - \frac{c_0}{2R_k^2} (\sin 2\beta \sin^2 \tilde{\beta} - \sin 2\tilde{\beta} \sin^2 \beta) - \\ &\quad - \frac{b_0 \sin 2\beta \sin 2\tilde{\beta} - g_0 \sin^2 2\beta \sin^2 \tilde{\beta}}{4R_k^3}; \\ l' &= \frac{c_0}{2R_k^2} \cos 2\beta \sin^2 \tilde{\beta} - \frac{b_0 \cos 2\beta \sin 2\beta \sin^2 \tilde{\beta} - g_0 \sin 2\beta \sin^2 2\beta / 2}{2R_k^3}; \\ z' &= \frac{c_0}{2R_k^3} \sin 2\beta \sin^2 \tilde{\beta} - \frac{b_0 \sin 2\beta \sin 2\tilde{\beta} \sin \tilde{\beta} - g_0 \sin^2 2\tilde{\beta} \sin^2 \beta}{4R_k^4}; \end{aligned} \right\} \tag{2.68}$$

$$\left. \begin{aligned} t' &= \frac{c_0}{2\rho} \frac{\sin^2 \tilde{\beta} \cos^2 \tilde{\beta}}{R_k} - \frac{b_0}{2\rho} \frac{\sin^3 \tilde{\beta} \cos \tilde{\beta}}{R_k^2} \sin 2\beta + \frac{g_0}{\rho} \frac{\sin^2 \tilde{\beta} \cos^2 \tilde{\beta}}{R_k^2} \cos^2 \beta; \\ v' &= \frac{c_0}{\rho} \frac{\sin^2 \tilde{\beta} \cos 2\beta}{R_k} - \frac{b_0}{\rho} \frac{\sin^3 \tilde{\beta} \cos \tilde{\beta}}{R_k^2} \cos 2\beta - \frac{g_0}{\rho} \frac{\sin^2 \tilde{\beta} \cos^2 \tilde{\beta}}{R_k^2}; \\ x' &= -\frac{c_0}{2\rho^2} \frac{\sin^2 \tilde{\beta} \sin 2\beta}{R_k} + \frac{b_0}{2\rho^2} \frac{\sin^3 \tilde{\beta} \cos \tilde{\beta}}{R_k^2} \sin 2\beta + \frac{g_0}{\rho^2} \frac{\sin^2 \tilde{\beta} \cos^2 \tilde{\beta}}{R_k^2} \cos^2 \beta. \end{aligned} \right\} \quad (2.69)$$

Анализируя проделанную работу, можно уверенно сказать, что с помощью метода конечных приращений получены уравнения статики (2.16) и (2.62) для подъемного каната, с учетом волнистости [49], однако уравнения (2.16) являются значительно удобней для практического использования и подлежат экспериментальной проверке. С помощью полученных уравнений статики решение задач по определению напряженно-деформированного состояния канатов с учетом волнистости, испытывающих при эксплуатации кручение и изгиб, сопровождающееся значительным изменением углов свивки, значительно упростилось.

## 2.5. Напряжения в проволоках каната двойной свивки с учетом волнистости в нелинейной форме

Нормальные напряжения [9] в поперечном сечении проволоки от ее осевого растяжения имеют вид:

$$\sigma = \frac{P_t}{F} = E(\varepsilon_{\text{пр}} \cos^2 \alpha + r \tilde{\tau}_{\text{пр}} \sin \alpha \cos \alpha). \quad (2.70)$$

Отличие вывода нелинейного уравнения напряжения будет заключаться в том, что в основу будут заложены нелинейные уравнения, построенные на основе (2.70), но учитывающие изменение углов свивки винтовых элементов за период деформаций (2.4) и зависимостях (1.29–1.33) учитывающих различия геометрических параметров и механических свойств прядей [86].

С учетом принятого допущения (2.4) получим уравнение нормального напряжения в поперечном сечении проволоки каната двойной свивки от ее осевого растяжения с учетом волнистости.

$$\begin{aligned}
\sigma = E \cos^2 \alpha & \left\{ \varepsilon \left[ \cos^2 \beta - \mu \sin^2 \beta + \frac{r}{R} \operatorname{tg} \alpha (1 - \mu) \sin^3 \beta \cos \beta \right] + \right. \\
& \left. + \theta R \left[ \sin \beta \cos \beta - \mu \frac{A_{23}}{A_{13} R} \sin^2 \beta + \frac{r}{R} \operatorname{tg} \alpha \left( \cos^4 \beta - \frac{\sin^3 \beta \cos \beta}{R} \mu \frac{A_{23}}{A_{13}} \right) \right] \right\} + \\
& + E \cos^2 \alpha \cos \varphi \left\{ \Delta \varepsilon \left[ \cos^2 \beta - \mu_1 \sin^2 \beta + \frac{r}{R} \operatorname{tg} \alpha (1 - \mu_1) \sin^3 \beta \cos \beta \right] + \right. \\
& \left. + \Delta \theta R \left[ \sin \beta \cos \beta - \mu_1 \frac{A_{23}}{A_{13} R} \sin^2 \beta + \frac{r}{R} \operatorname{tg} \alpha \left( \cos^4 \beta - \frac{\sin^3 \beta \cos \beta}{R} \mu_1 \frac{A_{23}}{A_{13}} \right) \right] \right\} + \\
& \left. + \frac{R}{\rho} \left[ \left( \cos^2 \beta - \mu_1 \frac{A_{34}}{A_{13} R} \sin^2 \beta \right) \right] \right\} + \\
& + E \cos^2 \alpha \left\{ \varepsilon^2 \left[ \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 - \right. \right. \\
& \left. \left. - \left( 2 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} \right) \mu^1 \right] - \right. \\
& \left. - \theta^2 R^2 \left[ \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 - \right. \right. \\
& \left. \left. - \mu^1 (-\sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R})) \right] + \right. \\
& \left. + \varepsilon \theta R \left[ -\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 - \right. \right. \\
& \left. \left. - \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. \right. \\
& \left. \left. + \left( -\sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} \right) \right) \right] \right\} + \\
& + E \cos^2 \alpha \cos^2 \varphi \left\{ \Delta \varepsilon^2 \left[ \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 - \right. \right. \\
& \left. \left. - \left( 2 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} \right) \mu^1 \right] - \right. \\
& \left. - \Delta \theta^2 R^2 \left[ \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 - \right. \right. \\
& \left. \left. - \mu^1 (-\sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R})) \right] \right\} +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +\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( \begin{aligned} & \left( -2\frac{\sin^5\beta\cos\beta}{R} - \mu^1\frac{\sin^5\beta\cos\beta}{R} \right) + \\ & + \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\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( \begin{aligned} & \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) \end{aligned} \right) \end{aligned} \right] + \\
& +\Delta\theta\frac{1}{\rho} R \left[ \begin{aligned} & -R\sin\beta\cos\beta\cos 2\beta - \mu^1 \left( \begin{aligned} & \left( R\sin\beta\cos\beta\cos 2\beta - \mu^1\sin^2\beta\cos^2\beta \right) - \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( \begin{aligned} & \left( -\sin^2\beta\cos^2\beta\cos 2\beta - \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) \end{aligned} \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( \begin{aligned} & \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) \end{aligned} \right) \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (2.71)
\end{aligned}$$

Нормальные напряжения в поперечном сечении проволоки каната двойной свивки в общем виде от ее осевого растяжения с учетом волнистости при нелинейных зависимостях:

$$\sigma = \sigma_{p,l} + \Delta\sigma_{p,l} + \sigma_{p,n} + \Delta\sigma_{p,n}, \quad (2.72)$$

где  $\sigma_{p,l}$  – напряжение растяжения в проволоке от действия натяжения и кручения, вызванное действием растягивающей силы и определяемое по формулам [9];  $\Delta\sigma_{p,l}$  – дополнительные напряжения растяжения в проволоке стального каната, имеющего изменение геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, полученные с помощью линейной теории расчета канатов [86];  $\sigma_{p,n}$  – напряжение растяжения в проволоке от действия натяжения и кручения, вызванное действием растягивающей силы и определяемое по формулам [13, 15];  $\Delta\sigma_{p,n}$  – допол-

нительные напряжения растяжения в проволоке стального каната, имеющего изменение геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, полученные с помощью нелинейных уравнений статики (2.15–2.16).

Изгиб и кручение канатов на блоках и шкивах и связанные с ним напряжения в проволоках являются, одним из решающих факторов в разрушении канатов. При построении нелинейной теории расчета подъемных канатов мы не имеем право, пренебречь напряжениями изгиба и кручения, которые имеют вид:

– нормальные напряжения [9] изгиба:

$$\sigma_{\text{из}} = E \frac{\delta}{2} \left[ \tilde{\tau}_{\text{пр}} (1 + \cos^2 \alpha) \sin \alpha \cos \alpha - \varepsilon_{\text{пр}} \frac{\sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{r_{\text{к}}} \right], \quad (2.73)$$

где  $E$  – модуль нормальной упругости;  $\delta$  – диаметр круглой проволоки.

– касательные напряжения [9] от кручения:

$$\sigma_{\text{кр.}} = G \frac{\delta}{2} \left( \tilde{\tau}_{\text{пр}} \cos^4 \alpha + \varepsilon_{\text{пр}} \frac{\sin^3 \alpha \cos \alpha}{r_{\text{к}}} \right), \quad (2.74)$$

где  $G$  – модуль сдвига.

Вывод нелинейного уравнения нормального напряжения изгиба и касательного от кручения с учетом волнистости при нелинейных зависимостях будет основываться на ранее полученных выражениях (1.29–1.33) [50]. После несложных математических операций с помощью подстановки в зависимости (2.73) и (2.74) уравнения деформаций винтовой оси, имеющей неодинаковые геометрические параметры и механические свойства винтовых элементов, а также (2.25), выражения примут вид [88, 89]:

$$\begin{aligned}
\sigma_{u_3} = E \frac{\delta}{2} \sin \alpha \cos \alpha & \left\{ \frac{\varepsilon}{R_k} \left[ (1 + \cos^2 \alpha - \mu) \sin^3 \beta \cos \beta - \frac{R_k}{r_k} \sin \alpha \cos \alpha (\cos^2 \beta - \mu \sin^2 \beta) \right] + \right. \\
& \left. + \theta \left[ (1 + \cos^2 \alpha) \cos^4 \beta - \mu \frac{A_{23}}{A_{13}} \frac{\sin^3 \beta \cos \beta}{R_k} \right] \sin \alpha \cos \alpha - \right. \\
& \left. - \frac{R_k}{r_k} \left( \sin \beta \cos \beta - \frac{\sin^2 \beta \cos \beta}{R_k} \mu \frac{A_{23}}{A_{13}} \right) \right\} + \\
+ E \frac{\delta}{2} \sin \alpha \cos \alpha \cos \varphi & \left\{ + \Delta \theta \left[ \frac{\Delta \varepsilon}{R_k} \left[ (1 + \cos^2 \alpha (1 - \mu_1) \sin^3 \beta \cos \beta - \frac{R_k}{r_k} \sin \alpha \cos \alpha (\cos^2 \beta - \mu_1 \sin^2 \beta) \right] + \right. \right. \\
& \left. \left[ (1 + \cos^2 \alpha) \cos^4 \beta - \mu_1 \frac{A_{23}}{A_{13}} \frac{\sin^3 \beta \cos \beta}{R_k} \right] \sin \alpha \cos \alpha - \right. \\
& \left. - \frac{R_k}{r_k} \left( \sin \beta \cos \beta - \frac{\sin^2 \beta \cos \beta}{R_k} \mu_1 \frac{A_{23}}{A_{13}} \right) \right] - \right\} + \\
& - \frac{1}{\rho} \left[ \left( (1 + \cos^2 \alpha) \sin \beta \cos \beta \frac{g_0}{H} - \frac{\sin^3 \beta \cos \beta}{R_k} \mu_1 \frac{A_{34}}{A_{13}} \right) \sin \alpha \cos \alpha - \right. \\
& \left. - \frac{R_k}{r_k} \left( \cos^2 \beta - \mu_1 \frac{A_{34}}{A_{13}} \frac{\sin^2 \beta}{R_k} \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \right) \right] \\
+ E \frac{\delta}{2} \sin \alpha \cos \alpha & \left\{ + \theta^2 \left[ \frac{\varepsilon^2}{R_k} - \frac{R_k}{r_k} \sin \alpha \cos \alpha \left( \begin{array}{l} \sin^2 \beta \cos^2 \beta - \\ - \mu^1 (-2 \sin^2 \beta \cos^2 \beta - \\ - \sin^2 \beta \cos^2 \beta \mu^1) \end{array} \right) \right] + \right. \\
& \left. - (1 + \cos^2 \alpha) R_k \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_k} \right) - \right. \\
& \left. \frac{R_k}{r_k} \sin \alpha \cos \alpha \left( -R_k \sin^2 \beta \cos^2 \beta - \mu^1 (\sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta) \right) \right] + \\
& + \varepsilon \theta \left[ (1 + \cos^2 \alpha) \sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu^1 \left( \begin{array}{l} \left( -2 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R_k} - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R_k} \right) + \\ \left( -\sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R_k} \right) \end{array} \right) \right] - \\
& - \frac{R_k}{r_k} \sin \alpha \cos \alpha \left( -\sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \mu^1 \left( \begin{array}{l} (-2 \sin^2 \beta \cos^2 \beta - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta) + \\ + (\sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \\ - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta) \end{array} \right) \right) \right] \right\} +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left. \begin{aligned}
& \left[ \frac{\Delta \varepsilon^2}{R_k} \left( (1 + \cos^2 \alpha) \sin^5 \beta \cos \beta - \mu^1 (-2 \sin^5 \beta \cos \beta - \mu^1 \sin^5 \beta \cos \beta) - \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{R_k}{r_k} \sin \alpha \cos \alpha \begin{pmatrix} \sin^2 \beta \cos^2 \beta - \\ -\mu^1 (-2 \sin^2 \beta \cos^2 \beta - \\ -\sin^2 \beta \cos^2 \beta \mu^1) \end{pmatrix} \right) \right] + \\
& + \Delta \theta^2 \left[ \begin{aligned}
& - (1 + \cos^2 \alpha) R_k \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_k} \right) - \\
& \left. \frac{R_k}{r_k} \sin \alpha \cos \alpha \left( -R_k \sin^2 \beta \cos^2 \beta - \mu^1 (\sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta) \right) \right] + \\
& + \left( \frac{1}{\rho} \right)^2 \left[ \begin{aligned}
& (1 + \cos^2 \alpha) \frac{g_0}{H} R_k \sin^3 \beta \cos \beta - \mu^1 \left( \sin^3 \beta \cos \beta \left( \sin^2 \beta + \frac{g_0}{H} \right) - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta}{R_k} \right) - \\
& \left. - \frac{R_k}{r_k} \sin \alpha \cos \alpha \left( -\sin^2 \beta \cos^2 \beta - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta \right) \right] + \\
& + E \frac{\delta}{2} \sin \alpha \cos \alpha \cos^2 \phi + \Delta \varepsilon \Delta \theta \left[ \begin{aligned}
& (1 + \cos^2 \alpha) \sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu^1 \left( \begin{pmatrix} -2 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R_k} - \\ -\mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R_k} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \\ -\mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R_k} \end{pmatrix} \right) - \\
& \left. - \frac{R_k}{r_k} \sin \alpha \cos \alpha \left( -\sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \mu^1 \left( \begin{pmatrix} -2 \sin^2 \beta \cos^2 \beta - \\ -\mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \\ -\mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta \end{pmatrix} \right) \right) \right] + \\
& + \Delta \varepsilon \frac{1}{\rho} \left[ \begin{aligned}
& - (1 + \cos^2 \alpha) \sin^3 \beta \cos \beta \left( \sin^2 \beta + \frac{g_0}{H} \right) - \mu^1 \left( \begin{pmatrix} -2 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R_k} - \\ -\mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R_k} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sin^3 \beta \cos \beta \left( \sin^2 \beta + \frac{g_0}{H} \right) - \\ -\mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R_k} \end{pmatrix} \right) \right] + \\
& + \Delta \theta \frac{1}{\rho} \left[ \begin{aligned}
& - R_k (1 + \cos^2 \alpha) \sin^2 \beta \cos^2 \beta \left( \cos^2 \beta - \frac{g_0}{H} \right) - \mu^1 \left( \begin{pmatrix} (\sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \\ -\mu^1 \sin^2 \cos^2 \beta) + \\ \sin^3 \beta \cos \beta \left( \sin^2 \beta + \frac{g_0}{H} \right) - \\ -\mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R_k} \end{pmatrix} \right) - \\
& \left. - \frac{R_k^2}{r_k} \sin \alpha \cos \alpha \begin{pmatrix} -\sin \beta \cos \beta (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta) - \\ -\mu^1 (\sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \mu^1 \sin^2 \cos^2 \beta) \end{pmatrix} \right]
\end{aligned} \right\} \quad (2.75)
\end{aligned}
\end{aligned}$$

В результате подстановки (1.29–1.33) в уравнения (2.74) для нахождения касательного напряжения от кручения, получим касательные напряжения от кручения с учетом волнистости при нелинейных зависимостях [50]:

$$\begin{aligned}
\sigma_{kp} = G \frac{\delta}{2} \cos^4 \alpha & \left\{ \begin{aligned}
& \frac{\varepsilon}{R_k} \left[ (1 - \mu) \sin^3 \beta \cos \beta + \frac{R_k}{r_k} \sin^3 \alpha \cos \alpha (\cos^2 \beta - \mu \sin^2 \beta) \right] + \\
& + \theta \left[ \cos^4 \beta - \mu \frac{\sin^3 \beta \cos \beta}{R_k} \frac{A_{23}}{A_{13}} + tg^3 \alpha \frac{R_k}{r_k} \sin \beta \cos \beta - \mu \frac{A_{23}}{A_{13}} \frac{\sin^2 \beta}{R_k} \right] + \\
& + \frac{\Delta \varepsilon}{R_k} \cos \varphi \left[ (1 - \mu_1) \sin^3 \beta \cos \beta + \frac{R_k}{r_k} \sin^3 \alpha \cos \alpha (\cos^2 \beta - \mu_1 \sin^2 \beta) \right] + \\
& + \Delta \theta \cos \varphi \left[ \cos^4 \beta - \mu_1 \frac{\sin^3 \beta \cos \beta}{R_k} \frac{A_{23}}{A_{13}} + tg^3 \alpha \frac{R_k}{r_k} \sin \beta \cos \beta - \right. \\
& \left. - \mu_1 \frac{A_{23}}{A_{13}} \frac{\sin^2 \beta}{R_k} \right] - \\
& - \frac{1}{\rho} \cos \varphi \left[ \sin \beta \cos \beta \frac{g_0}{H} - \frac{\sin^3 \beta \cos \beta}{R_k} \mu_1 \frac{A_{34}}{A_{13}} + \right. \\
& \left. + tg^3 \alpha \frac{R_k}{r_k} \left( \cos^2 \beta - \mu_1 \frac{A_{34}}{A_{13}} \frac{\sin^2 \beta}{R_k} \right) \right] + \\
& + \frac{\varepsilon^2}{R_k} \left[ \sin^5 \beta \cos \beta - \mu^1 (2 \sin^5 \beta \cos \beta - \mu^1 \sin^5 \beta \cos \beta) + \right. \\
& \left. + \frac{R_k}{r_k} \sin^3 \alpha \cos \alpha (\sin^2 \beta \cos^2 \beta - \mu^1 (-2 \sin^2 \beta \cos^2 \beta - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta)) \right] + \\
& + \theta^2 \left[ -R_k \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_k} \right) + \right. \\
& \left. + \frac{R_k^2}{r_k} \sin^3 \alpha \cos \alpha \left( -\sin^2 \beta \cos^2 \beta - \mu^1 \left( \sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \right) \right) \right. \\
& \left. - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta \right] + \\
& + \varepsilon \theta \left[ \sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu^1 \left( \left( -2 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R_k} - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R_k} \right) + \right. \right. \\
& \left. \left. + \left( -\sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R_k} \right) \right) \right] + \\
& + \frac{R_k}{r_k} \sin^3 \alpha \cos \alpha \left( -\sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \mu^1 \left( \left( -2 \sin^2 \beta \cos^2 \beta - \right) \right. \right. \\
& \left. \left. - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta \right) + \left( \sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \right) \right. \\
& \left. \left. - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta \right) \right] +
\end{aligned}
\right\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\Delta \varepsilon^2}{R_k} \cos^2 \phi \left[ \sin^5 \beta \cos \beta - \mu^1 (2 \sin^5 \beta \cos \beta - \mu^1 \sin^5 \beta \cos \beta) + \right. \\
& \quad \left. + \frac{R_k}{r_k} \sin^3 \alpha \cos \alpha (\sin^2 \beta \cos^2 \beta - \mu^1 (-2 \sin^2 \beta \cos^2 \beta - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta)) \right] + \\
& + \Delta \theta^2 \cos^2 \phi \left[ -R_k \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_k} \right) + \right. \\
& \quad \left. + \frac{R_k^2}{r_k} \sin^3 \alpha \cos \alpha \left( -\sin^2 \beta \cos^2 \beta - \mu^1 (\sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta) \right) \right] + \\
& + \left( \frac{1}{\rho} \right)^2 \cos^2 \phi \left[ \frac{g_0}{H} R_k \sin^3 \beta \cos \beta - \mu^1 \left( \sin^3 \beta \cos \beta \left( \sin^2 \beta + \frac{g_0}{H} \right) - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R_k} \right) + \right. \\
& \quad \left. + \frac{R_k^2}{r_k} \sin^3 \alpha \cos \alpha \left( -\sin^2 \beta \cos^2 \beta - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta \right) \right] + \\
& + \Delta \varepsilon \Delta \theta \cos^2 \phi \left[ \sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu^1 \left( \left( -2 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R_k} - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R_k} \right) + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \left( -\sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R_k} \right) \right) \right] + \\
& \quad + \frac{R_k}{r_k} \sin^3 \alpha \cos \alpha \left( -\sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \mu^1 \left( \left( -2 \sin^2 \beta \cos^2 \beta - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta \right) + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \left( \sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta \right) \right) \right) \right] + \\
& + \Delta \varepsilon \frac{1}{\rho} \cos^2 \phi \left[ \sin^3 \beta \cos \beta \left( \sin^2 \beta + \frac{g_0}{H} \right) - \mu^1 \left( \left( -2 \sin^2 \beta \cos^2 \beta - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta \right) + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \left( \sin^3 \beta \cos \beta \left( \sin^2 \beta + \frac{g_0}{H} \right) - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta \right) \right) \right] + \\
& + \Delta \theta \frac{1}{\rho} \cos^2 \phi \left[ -R_k \sin^2 \beta \cos^2 \beta \left( \cos^2 \beta - \frac{g_0}{H} \right) - \mu^1 \left( \left( -\sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R_k} \right) + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \left( \sin^3 \beta \cos \beta \left( \sin^2 \beta + \frac{g_0}{H} \right) - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R_k} \right) \right) \right] + \\
& \quad \left. + \frac{R_k^2}{r_k} \sin^3 \alpha \cos \alpha \left( -\sin \beta \cos \beta (\sin^2 \beta + \cos^2 \beta) - \mu^1 (\sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \mu^1 \sin^2 \beta \cos^2 \beta) \right) \right]
\end{aligned} \tag{2.76}$$

Нормальные напряжения изгиба и касательные напряжения от кручения в общем виде с учетом волнистости будут иметь вид:

$$\sigma_{\text{из}} = \sigma_{\text{из.л}} + \Delta \sigma_{\text{из.л}} + \sigma_{\text{из.н}} + \Delta \sigma_{\text{из.н}}; \tag{2.77}$$

$$\sigma_{\text{кр}} = \sigma_{\text{кр.л}} + \Delta \sigma_{\text{кр.л}} + \sigma_{\text{кр.н}} + \Delta \sigma_{\text{кр.н}}, \tag{2.78}$$

где  $\sigma_{\text{из.л}}$  ( $\sigma_{\text{кр.л}}$ ) – напряжение изгиба (касательные от кручения) в проволоке, вызванное действием растягивающей силы и определяемое по формулам [9];  $\Delta \sigma_{\text{из.л}}$

$(\Delta\sigma_{кр.л})$  – дополнительные напряжения изгиба (касательные от кручения) стального каната, с учетом волнистости, полученные с помощью линейной теории расчета канатов [86];  $\sigma_{из.н}$  ( $\sigma_{кр.н}$ ) – напряжение изгиба (касательные от кручения) в проволоке, вызванное действием растягивающей силы и определяемое по формулам [13, 15];  $\Delta\sigma_{из.н}$  ( $\Delta\sigma_{кр.н}$ ) – дополнительные напряжения изгиба (касательные от кручения) стального подъемного каната, с учетом волнистости, полученные с помощью нелинейных уравнений (2.15–2.16).

Анализируя проделанную работу, можно уверенно сказать, что полученные уравнения (2.76–2.78) нормального напряжения изгиба и касательного от кручения [50], с учетом волнистости, являются положительным результатом для более точного инженерного расчета.

## 2.6. Параметры, определяющие различия геометрических и механических свойств винтовых элементов в канате при нелинейных зависимостях

Известно, что уравнение, определяющее параметры волнистости в канате, имеет вид в линейной постановке [86]:

$$R_B = \frac{\frac{1}{\rho_0} + \frac{\Delta_3 P_x R_{B0}}{\Delta}}{\left(\frac{1}{\rho_0} + \frac{\Delta_3 P_x R_{B0}}{\Delta}\right)^2 + \left(\frac{\sin\beta \cos\beta}{R_k} \pm \theta + \frac{\Delta_2 P_x R_{B0}}{\Delta}\right)^2}, \quad (2.79)$$

где  $\rho_0$  – начальная кривизна оси каната;  $\theta$  – суммарное значение кручения каната от действия эксплуатационных факторов;  $R_{B0}$  – радиус волнистости, появляющийся при изготовлении каната.

Определим из 3-го уравнения (2.16) изменение геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов каната в нелинейной постановке, подставив усилие  $P_x$  из (2.15) в (2.16), причем  $M_z = \frac{1}{\rho} g_0 m$ , которое имеет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\rho} g_0 m + \left( mA\varepsilon + mC\theta + md\varepsilon_r + mA_{11}\varepsilon^2 + mA_{12}\varepsilon\theta + mA_{22}\theta^2 + mA_{13}\varepsilon\varepsilon_r + mA_{23}\theta\varepsilon_r + mA_{33}\varepsilon_r^2 \right) \cdot R_\varepsilon = \\ & = \frac{m}{2} A_{14}\Delta\varepsilon + \frac{m}{2} A_{24}\Delta\theta + \frac{m}{2} A_{34}\Delta\varepsilon_r + \frac{m}{2} A_{44} \frac{1}{\rho} + \frac{m}{2} A_{411}\Delta\varepsilon^2 + \frac{m}{2} A_{412}\Delta\varepsilon\Delta\theta + \frac{m}{2} A_{422}\Delta\theta^2 + \frac{m}{2} A_{413}\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon_r + \\ & + \frac{m}{2} A_{423}\Delta\theta\Delta\varepsilon_r + \frac{m}{2} A_{433}\Delta\varepsilon_r^2 + \frac{m}{2} A_{414}\Delta\varepsilon \frac{1}{\rho} + \frac{m}{2} A_{424}\Delta\theta \frac{1}{\rho} + \frac{m}{2} A_{434}\Delta\varepsilon_r \frac{1}{\rho} + \frac{m}{2} A_{444} \left( \frac{1}{\rho} \right)^2. \end{aligned} \quad (2.80)$$

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

$$R_B^H = \frac{\frac{1}{2} \left( A_{14} \Delta \varepsilon + A_{24} \Delta \theta + (A_{44} - m g_0) \frac{1}{\rho} + A_{411} \Delta \varepsilon^2 + A_{412} \Delta \varepsilon \Delta \theta + A_{422} \Delta \theta^2 + A_{414} \Delta \varepsilon \frac{1}{\rho} + A_{424} \Delta \theta \frac{1}{\rho} + A_{444} \left( \frac{1}{\rho} \right)^2 \right)}{A \varepsilon + C \theta + A_{11} \varepsilon^2 + A_{12} \varepsilon \theta + A_{22} \theta^2}. \quad (2.81)$$

Изгибающий момент с учетом (2.4) можно представить:

$$M_z = \sum_{i=1}^n \sqrt{(0.5 \sigma_T \delta^2 \Delta \delta)^2 + (0.17 \delta^3 \Delta \sigma_T)^2 + (\Delta T R_k \cos \tilde{\alpha})^2}. \quad (2.82)$$

Как известно, угол волнистости, согласно [91], равен:

$$\gamma = \frac{2\pi R_B}{H_k}, \quad (2.83)$$

где  $H_k$  – шаг свивки наружного слоя каната.

С учетом изменение геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, подставив уравнение (2.81) в (2.83) получим выражение угла волнистости в нелинейной форме:

$$\gamma^H = \frac{2\pi \left( \frac{1}{2} \left( A_{14} \Delta \varepsilon + A_{24} \Delta \theta + (A_{44} - m g_0) \frac{1}{\rho} + A_{411} \Delta \varepsilon^2 + A_{412} \Delta \varepsilon \Delta \theta + A_{422} \Delta \theta^2 + A_{414} \Delta \varepsilon \frac{1}{\rho} + A_{424} \Delta \theta \frac{1}{\rho} + A_{444} \left( \frac{1}{\rho} \right)^2 \right) \right)}{H_k}. \quad (2.84)$$

Полученные выражения позволяют определить допустимые значения волнистости и угла волнистости стального подъемного каната в зависимости от его кручения, изгиба и предела прочности материала канатной проволоки, с помощью полученных нелинейных уравнений статики (2.15–2.16).

## Выводы по главе

1. Разработана нелинейная теория расчета подъемных канатов с учетом волнистости, применительно к канатам двойной и спиральной свивки.
2. Получены нелинейные уравнения, отражающие связь дополнительного усилия и моментов с дополнительными деформациями каната.

3. Выведены агрегатные коэффициенты жесткости в нелинейной форме с учетом волнистости.

4. Разработан алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния подъемного каната на основе полученных нелинейных уравнений статики с учетом волнистости.

5. Получены нелинейные уравнения статики подъемного каната с учетом волнистости методом конечных приращений.

6. Получено уравнение радиуса волнистости при нелинейных зависимостях.

### **3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЪЕМНЫХ КАНАТОВ С УЧЕТОМ ВОЛНИСТОСТИ ПРИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАВИСИМОСТЯХ**

Для практических целей полезно установить факторы, влияющие на изменение геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов каната.

Теоретическое исследование проведено на ПК IBM PC с использованием программы MathCAD [24] по разработанному и представленному ниже алгоритму.

#### **3.1. Конструктивные факторы, влияющие на изменение геометрических параметров и механических свойств прядей каната двойной свивки в нелинейной постановке**

##### **3.1.1. Влияние угла свивки слоя прядей на напряженно-деформированное состояние стального подъемного каната при его растяжении с учетом волнистости, рассмотренное на основе нелинейных уравнений статики**

Для исследования был принят стальной канат  $d_k=41$  мм ГОСТ 3077-80, маркировочной группы 1670 МПа (170 кгс/мм<sup>2</sup>) и запасом прочности для грузовых подъемных установок  $z=2$ . Суммарное разрывное усилие всех проволок составило:

$$P_{\text{сум}} = 1405000\text{Н} = 1,4 \cdot 10^6\text{Н}.$$

Для исследования были приняты изменения углов свивки прядей в пределах  $\tilde{\beta} = 12 \div 22^\circ$ .

Теоретическое исследование, проведено с помощью нелинейных уравнений статики на ПК IBM PC с использованием программы MathCAD [24] по разработанному и представленному на рисунке 3.1 алгоритму.

Результаты расчета представлены на рисунках 3.2–3.7.

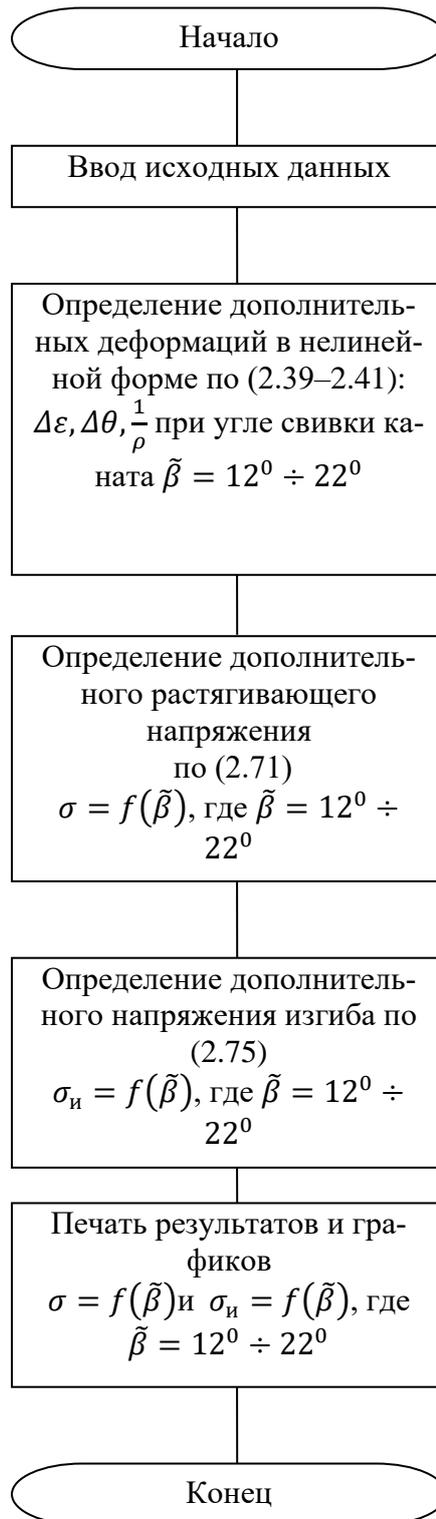


Рисунок 3.1 – Схема подпрограммы по исследованию влияния угла свивки слоя прядей на НДС стального подъемного каната при его растяжении с учетом волнистости, с помощью нелинейной теории расчета канатов

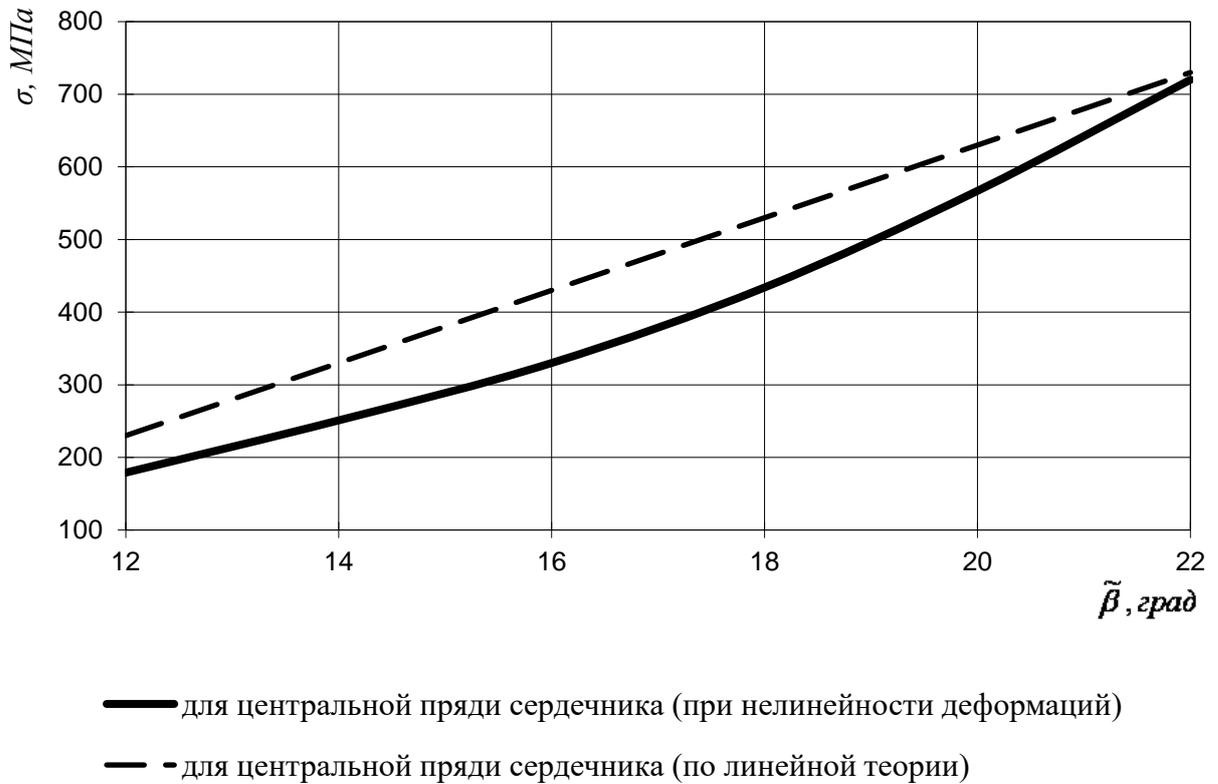


Рисунок 3.2 – Влияние угла свивки прядей на растягивающие напряжения для центральной пряди сердечника стального подъемного каната ГОСТ 3077-80

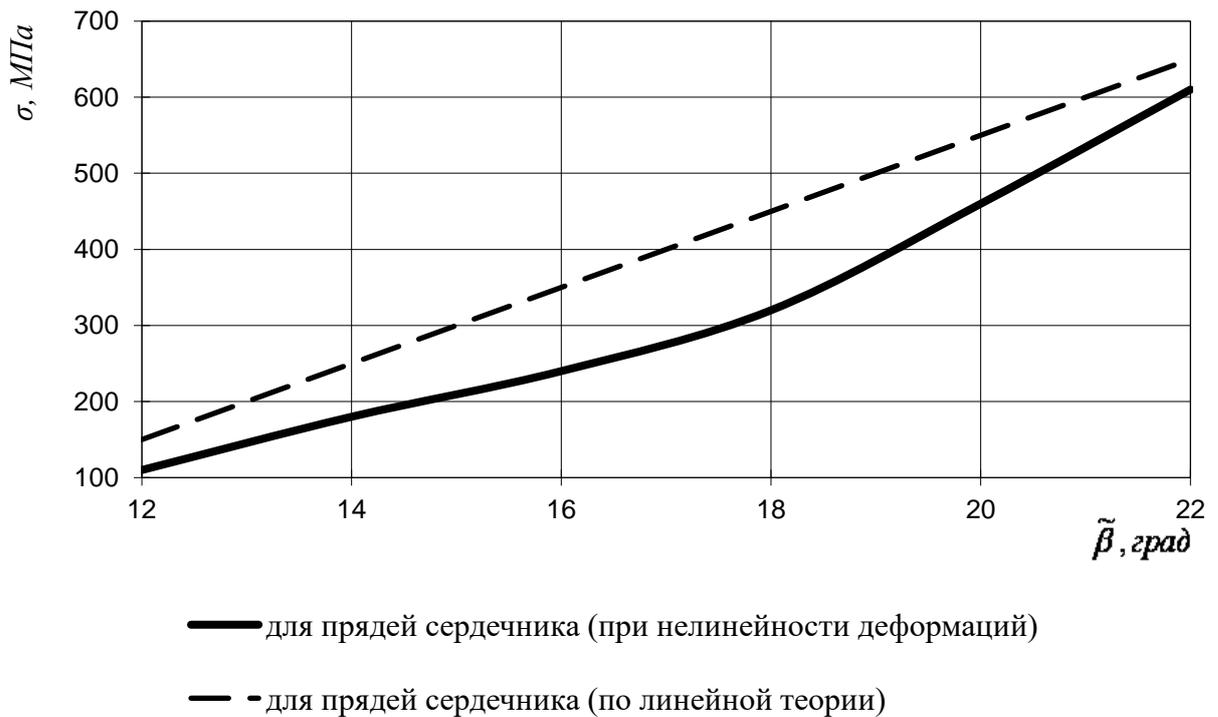


Рисунок 3.3 – Влияние угла свивки прядей на растягивающие напряжения для центральной пряди сердечника стального подъемного каната ГОСТ 3077-80

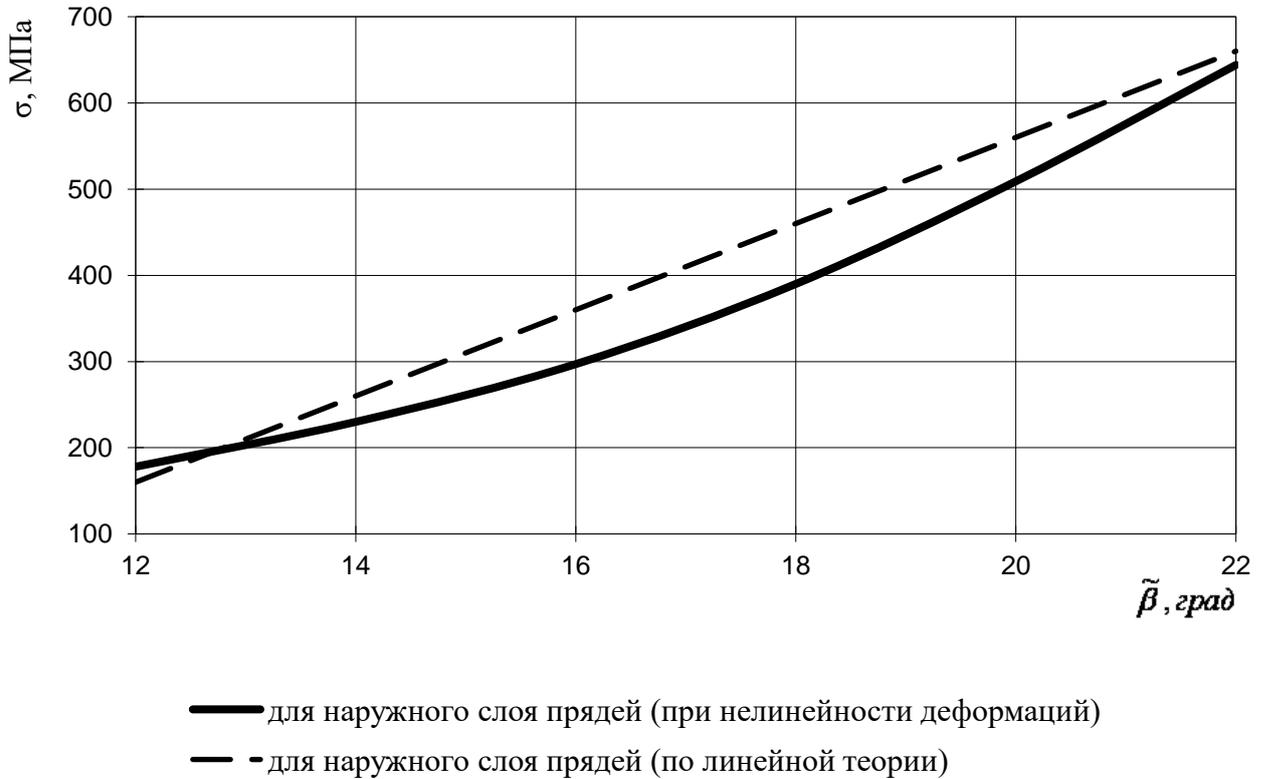


Рисунок 3.4 – Влияние угла свивки прядей на растягивающие напряжения в наружном слое прядей стального подъемного каната ГОСТ 3077-80

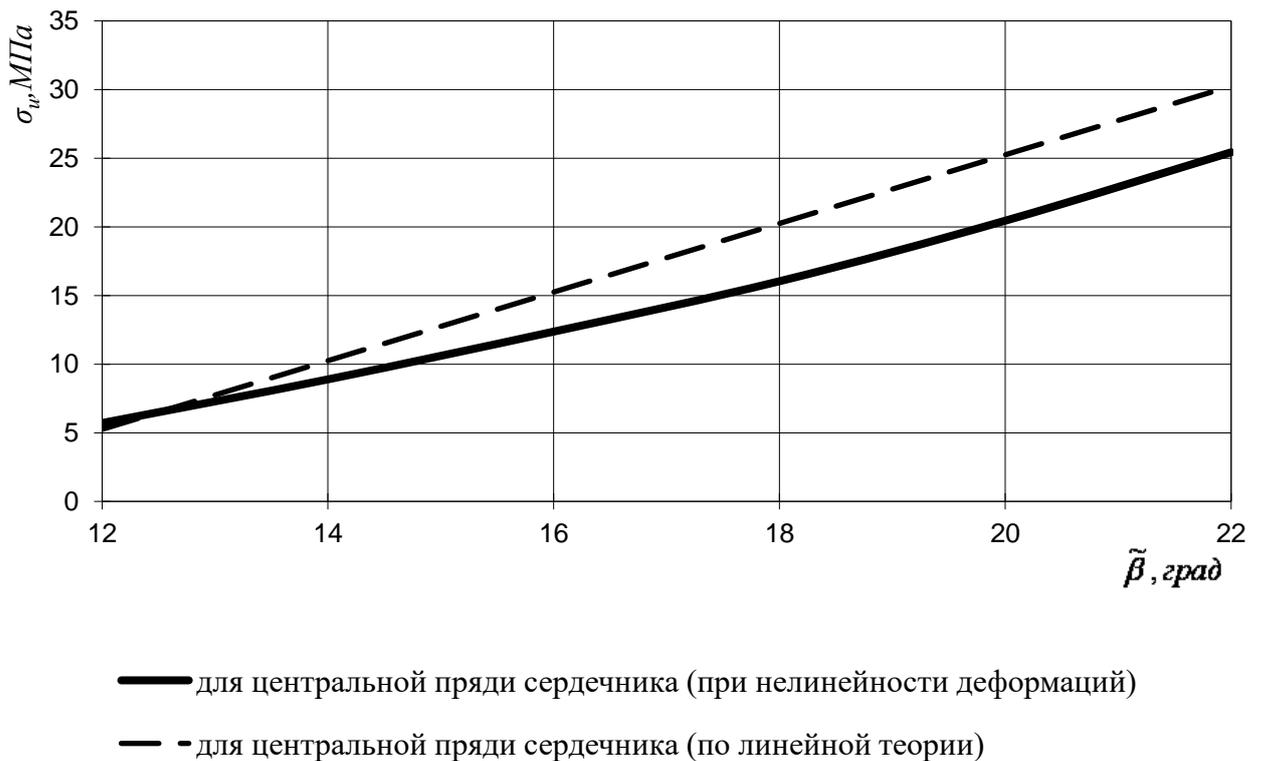


Рисунок 3.5 -Влияние угла свивки прядей на величину изгибных напряжений центральной пряди сердечника стального подъемного каната ГОСТ 3077-80

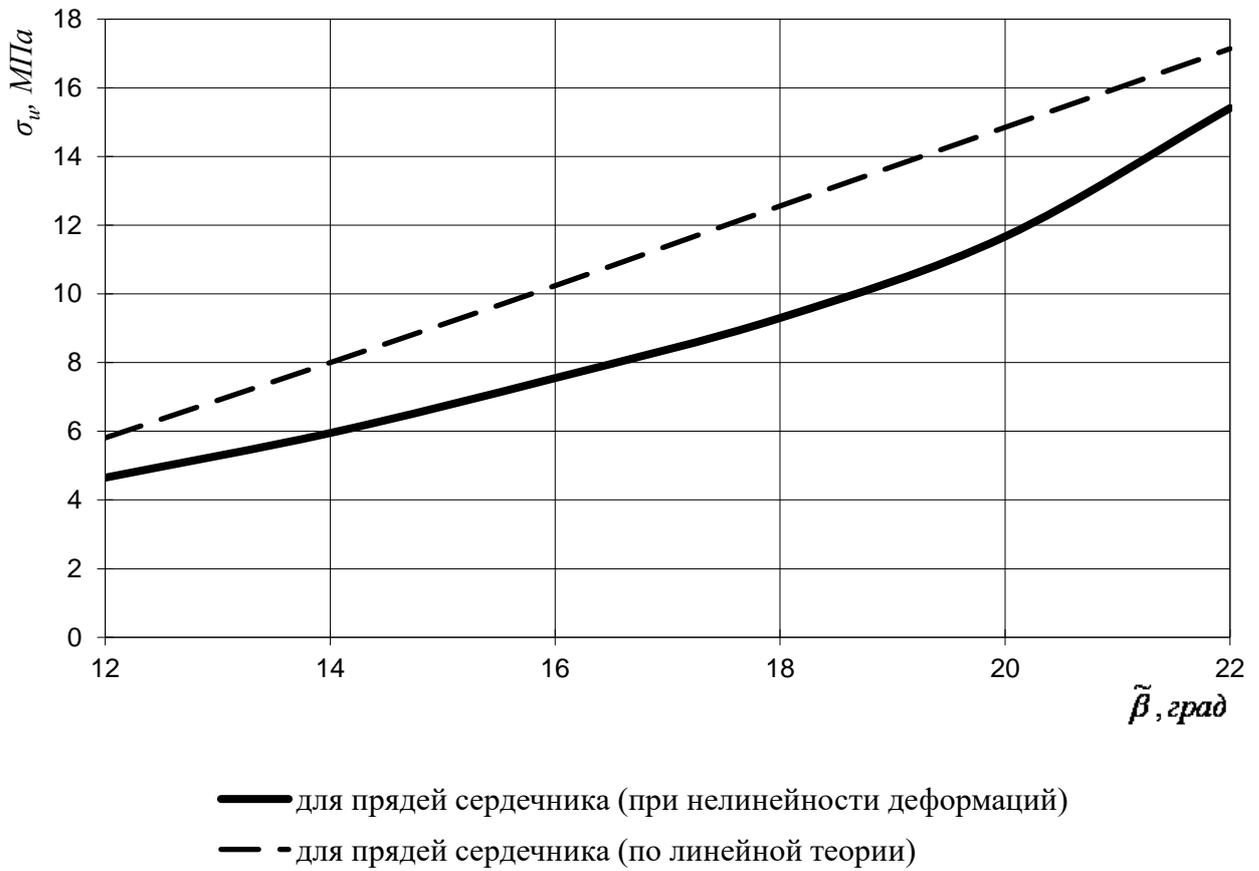


Рисунок 3.6 – Влияние угла свивки прядей на величину изгибных напряжений для прядей сердечника стального подъемного каната ГОСТ 3077-80

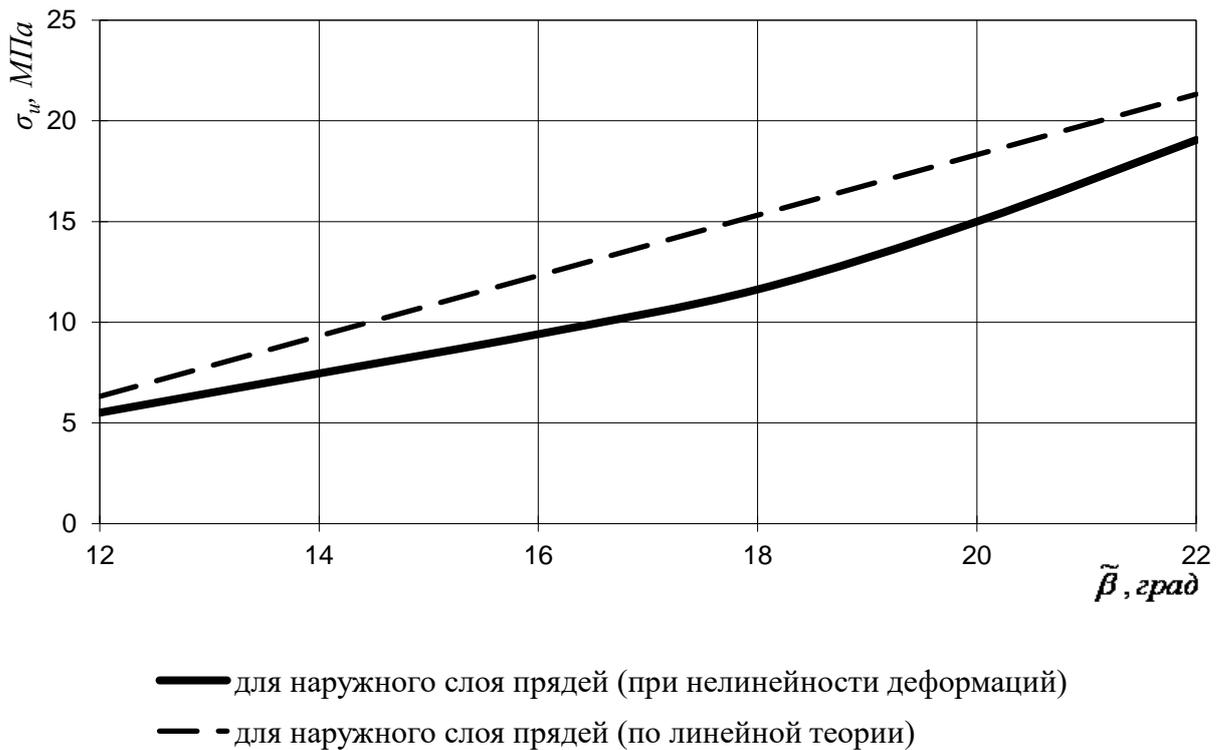


Рисунок 3.7 – Влияние угла свивки прядей на величину изгибных напряжений наружного слоя прядей стального подъемного каната ГОСТ 3077-80

Из анализа проведенных теоретических опытов и полученных выражений (2.71) и (2.75), имеющих неодинаковые геометрические параметры и механические свойства винтовых элементов и растянутого концевой нагрузкой ( $z=2$ ), напряжения кручения являются величинами малого порядка в сравнении с растягивающими и изгибающими [50, 75, 76], поэтому напряжения кручения рассмотрены не будут.

Как видно из графиков, линейная теория расчета при малых запасах прочности ( $z=2$ ) показывает завышенные значения величин дополнительных напряжений по сравнению с расчетом с помощью нелинейных уравнений статики, при идентичных исходных данных.

Из анализа приведенных данных, величина растягивающих и изгибающих напряжений для центральной пряди сердечника наибольшая, чем для наружного слоя прядей и наименьшая у прядей сердечника, что и подтверждает ранее проделанные эксперименты [75, 76].

Из зависимостей, представленных на рисунках 3.2–3.7, видно, что напряжения растяжения на порядок выше напряжений изгиба, возникающих в центральной пряди сердечника стального подъемного каната ГОСТ 3077-80 при его растяжении и с учетом изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

### **3.1.2. Влияние угла свивки слоя прядей на напряженно-деформированное состояние каната с учетом волнистости, рассмотренное на основе нелинейных уравнений статики**

Для проведения исследования был принят канат двойной свивки ГОСТ 3077-80 диаметром 41 мм, у которого внешний слой прядей направлен в одну сторону, а остальные – в противоположную. Возможные значения угла свивки прядей в канат в пределах  $0,1 - 0,38$  рад., при натяжении каната соответствующему запасу прочности  $z=4$ . Теоретическое исследование проведено с помощью нелинейных уравнений полученных во II главе работы на ПК IBM PC с использованием программы MathCAD [24] по разработанному и представленному на рисунке 3.8 алгоритму. Результаты расчета деформаций представлены на рисунках 3.9–3.11. На рисунке

3.12 показаны зависимости дополнительных напряжений [50] от радиуса волнистости в проволоках центральной пряди, прядях сердечника и наружного слоя прядей для канатов с различным направлением свивки проволок. Очевидно, что у канатов с противоположным направлением слоев прядей и сердечника дополнительные напряжения в проволоках центральной пряди меньше по сравнению с проволоками каната односторонней свивки при одном и том же значении радиуса волнистости. Естественно, долговечность таких канатов будет значительно выше, чем у канатов односторонней свивки.

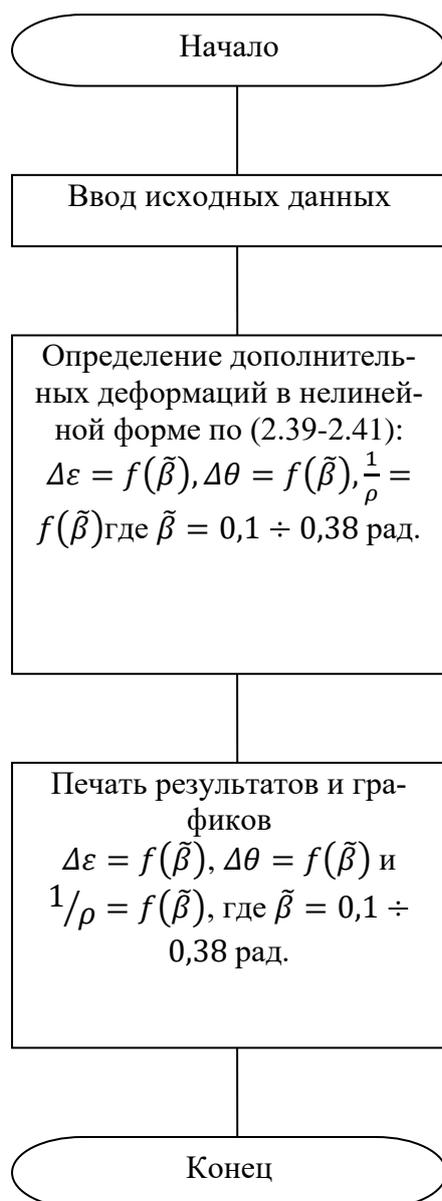


Рисунок 3.8 – Схема подпрограммы по исследованию влияния угла свивки слоя прядей на НДС стального подъемного каната с учетом волнистости, с помощью нелинейной теории расчета канатов

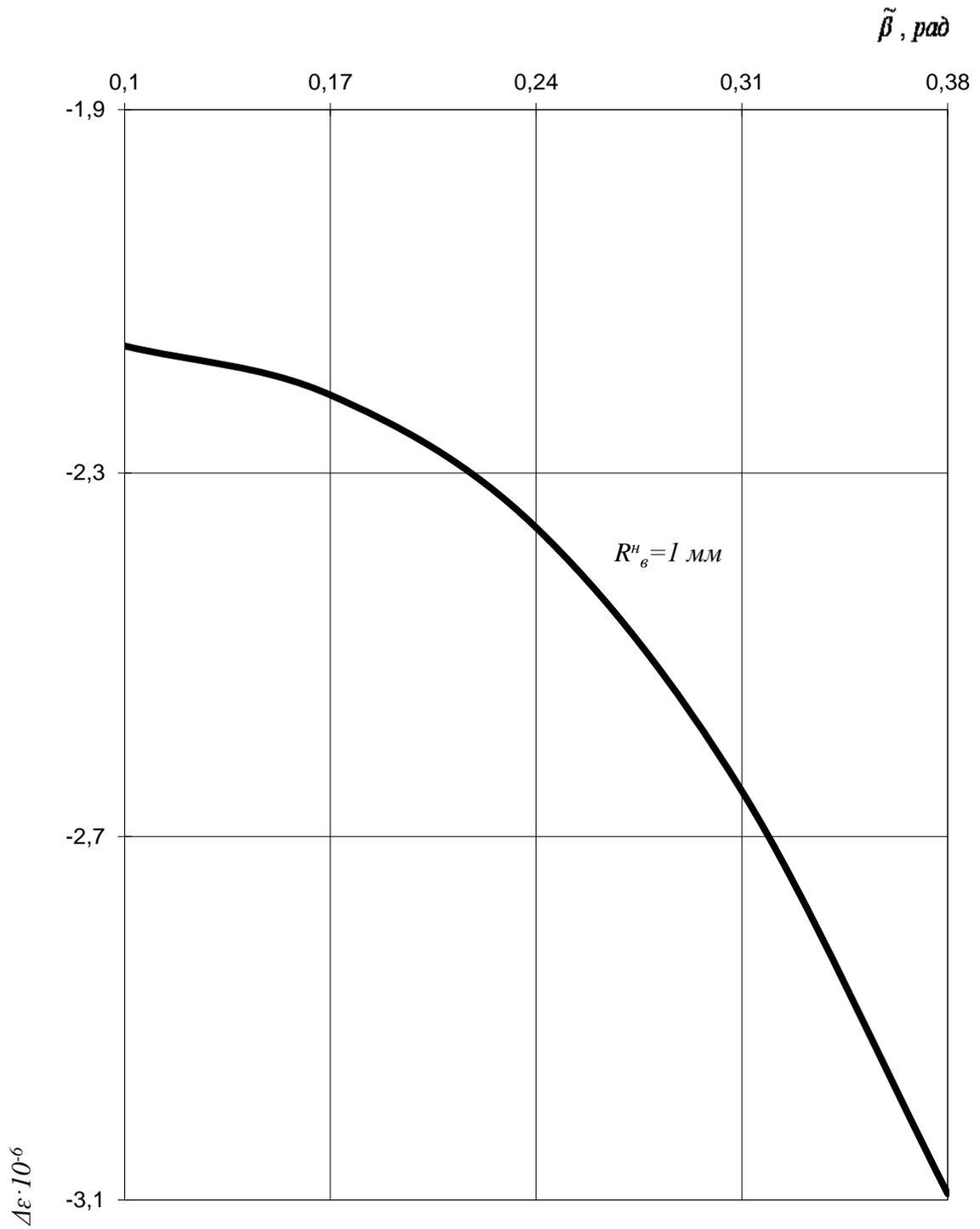


Рисунок 3.9 – Влияние угла свивки подъемного каната, имеющего различия геометрических параметров и механических свойств прядей на деформацию растяжения

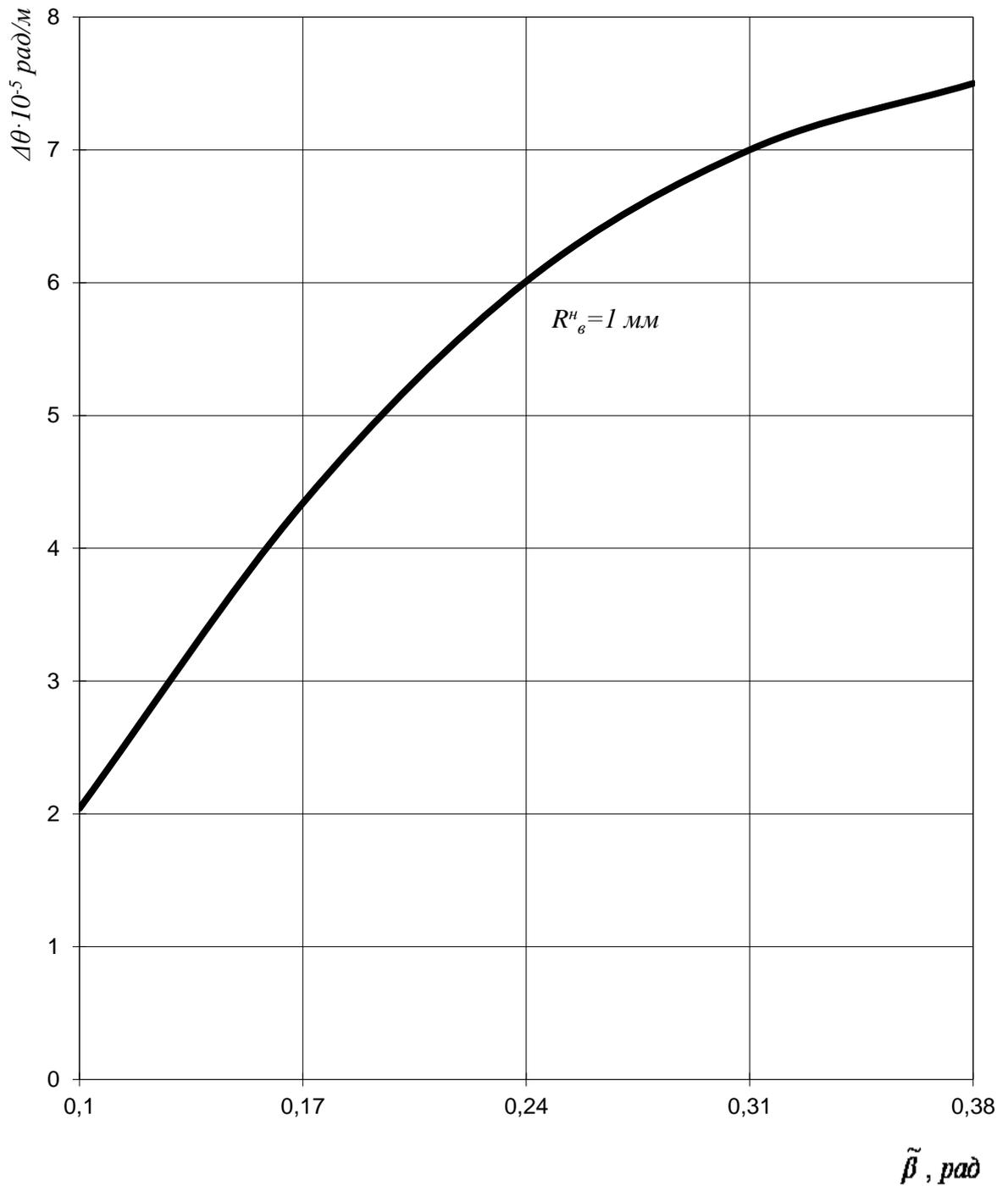


Рисунок 3.10 – Влияние угла свивки подъемного каната, имеющего различия геометрических параметров и механических свойств прядей на деформацию кручения

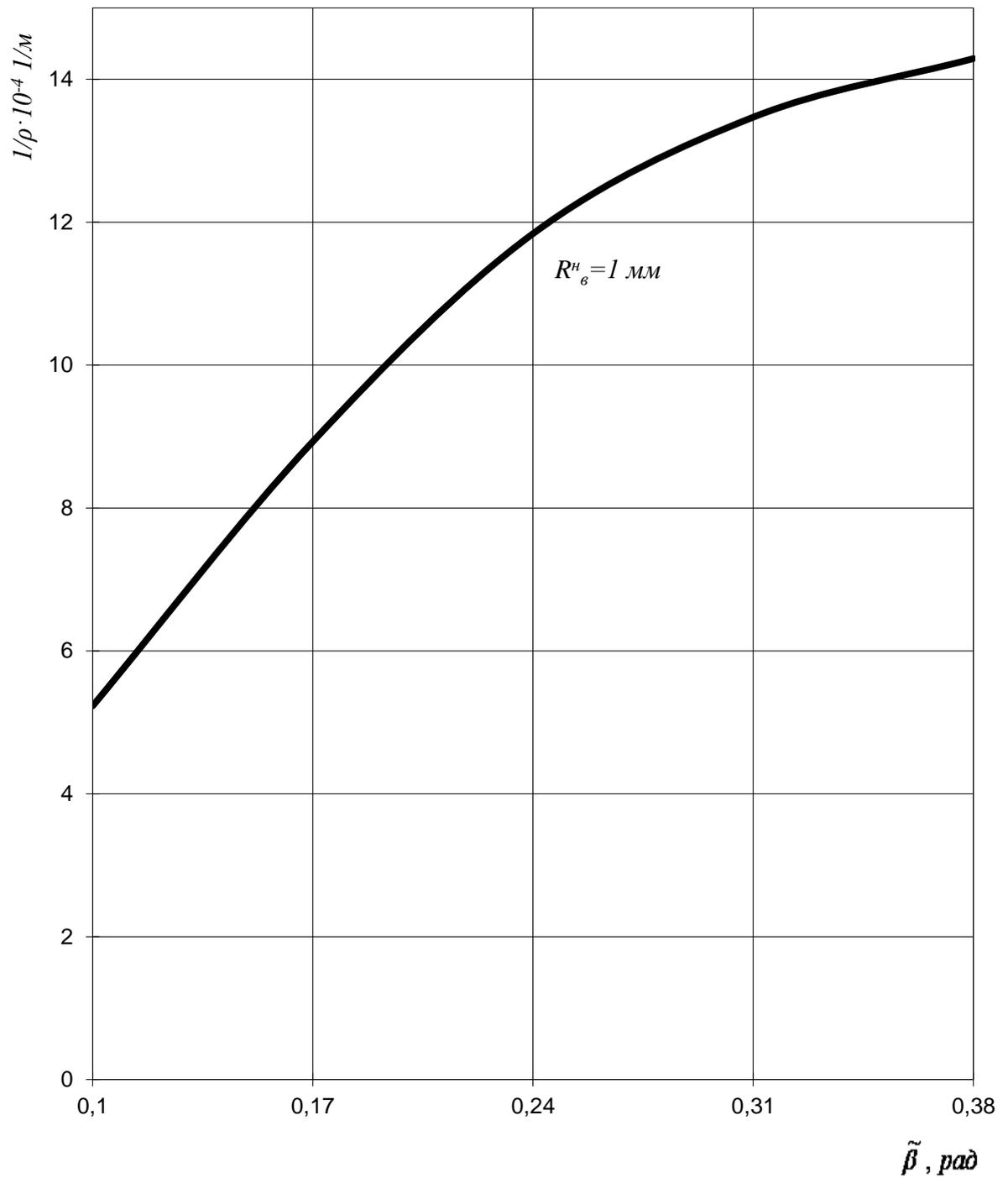
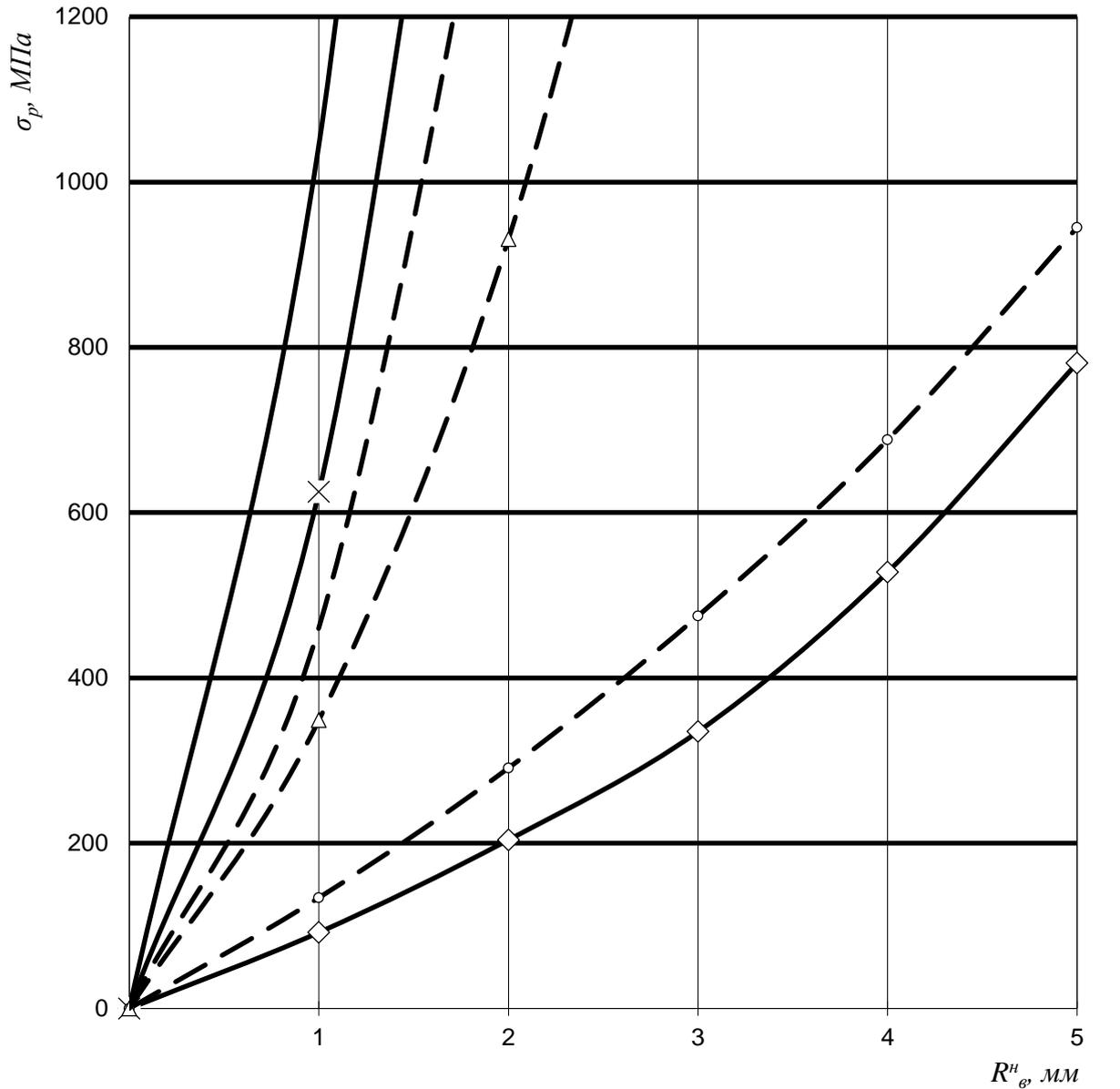


Рисунок 3.11 – Влияние угла свивки подъемного каната, имеющего различия геометрических параметров и механических свойств прядей на деформацию изгиба



- ◇— наружный слой прядей (канат односторонней свивки)
- ×— пряди сердечника (канат односторонней свивки)
- — центральная прядь (канат односторонней свивки)
- наружный слой прядей (с противоположным направлением слоев прядей каната и сердечника)
- △— пряди сердечника (с противоположным направлением слоев прядей каната и сердечника)
- — центральная прядь (с противоположным направлением слоев прядей каната и сердечника)

Рисунок 3.12 – Влияние направлений свивки слоев прядей каната двойной свивки на величину дополнительных растягивающих напряжений

### 3.2. Исследование эксплуатационных факторов на напряженно-деформированное состояние каната двойной свивки в нелинейной постановке

#### 3.2.1. Влияние натяжения каната двойной свивки на его напряженно-деформированное состояние с учетом волнистости при нелинейных зависимостях

Согласно требованиям Ростехнадзора [30, 56, 57], величина допускаемого натяжения стального каната зависит от его назначения. Минимальный запас прочности стального каната не должен быть меньше 2 для грузовых и 4 для людских подъемных установок [85].

Для определения влияния натяжения каната двойной свивки на его напряженно-деформированное состояние с учетом волнистости воспользуемся выражениям (2.71).

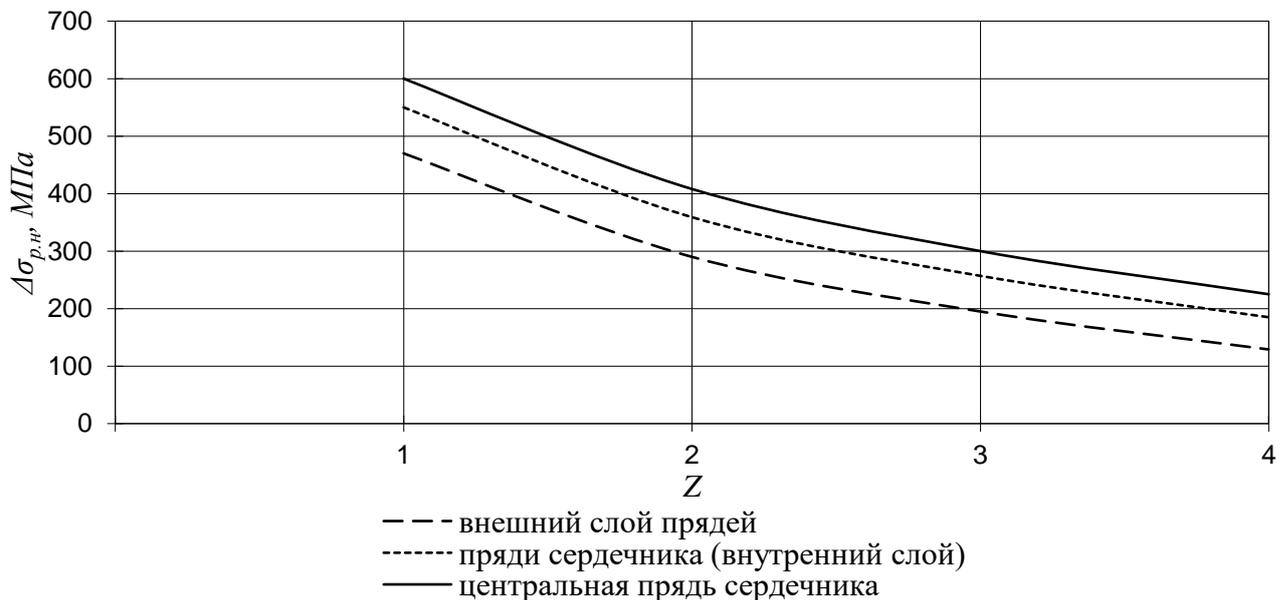


Рисунок 3.13 – Влияние натяжения каната двойной свивки на величину дополнительных напряжений растяжения с учетом различия геометрических параметров и механических свойств прядей

Результаты расчетов представлены на рисунке 3.13. Как видно из рисунка 3.13, при увеличении растягивающей нагрузки с учетом волнистости (уменьшении запаса прочности) увеличиваются дополнительные напряжения растяжения  $\Delta\sigma$ .

Так при возрастании натяжения стального подъемного каната (уменьшении запаса прочности с 4 до 1) увеличиваются дополнительные напряжения – в 3 раза и более.

Одним из наиболее значимых показателей при расчете стальных подъемных канатов являются дополнительные напряжения, возникающие в канатах, имеющих различные геометрические параметры и механические свойства винтовых элементов, при этом они достигают или превышают растягивающие напряжения от рабочего натяжения [50].

### 3.2.2. Влияние запаса прочности наиболее нагруженной пряди каната двойной свивки на изменение геометрических параметров и механических свойств прядей, рассмотренное на основе нелинейных уравнений статики

При эксплуатации подъемных канатов в них обнаруживаются изменение геометрических параметров и механических свойств прядей (проволок), при этом ось каната принимает форму пространственной винтовой линии.

Запишем условия прочности каната с учетом волнистости при действии нагрузки [86]:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{p,l} + \Delta\sigma_{p,l} \leq \frac{\sigma_B}{z}, \quad (3.1)$$

где  $\sigma_{p,l}$  – напряжение растяжения в проволоке от действия натяжения и кручения, вызванное действием растягивающей силы и определяемое по формулам [9];  $\Delta\sigma_{p,l}$  – дополнительные напряжения растяжения в проволоке стального каната, имеющего изменение геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, полученные с помощью линейной теории расчета канатов [86];  $\sigma_B$  – предел прочности канатной проволоки;  $z$  – коэффициент запаса прочности.

Запас прочности и допустимая величина радиуса волнистости для каната двойной свивки, согласно исследованиям [85, 86], определяется по формулам:

$$z = \frac{\sigma_B}{\sigma_{p,l} + P_x \left\{ E \cos^2 \alpha \cos \beta \left[ \frac{\Delta_1}{\Delta} (\cos^2 \beta - \mu \sin^2 \beta) + \frac{r_k}{R_k} t g \alpha (1 + \mu) \frac{\sin^3 \beta \cos \beta}{R_k} \right] + \frac{\Delta_2}{\Delta} R_k \left[ \sin \beta \cos \beta + \frac{r_k}{R_k} t g \alpha \left( \cos^4 \beta - \frac{\sin^3 \beta \cos \beta}{R_k} \right) \right] + \frac{\Delta_3}{\Delta} R_k \cos^2 \beta \right\}}; \quad (3.2)$$

$$R_B \leq \frac{\frac{\sigma_B}{z} - \sigma_{p.l}}{P_x \left\{ E \cos^2 \alpha \cos \beta \left[ \frac{\Delta_1}{\Delta} (\cos^2 \beta - \mu \sin^2 \beta) + \frac{r_k}{R_k} \operatorname{tg} \alpha (1 + \mu) \frac{\sin^3 \beta \cos \beta}{R_k} \right] + \right.} \quad (3.3)$$

$$\left. + \frac{\Delta_2}{\Delta} R_k \left[ \sin \beta \cos \beta + \frac{r_k}{R_k} \operatorname{tg} \alpha \left( \cos^4 \beta - \frac{\sin^3 \beta \cos \beta}{R_k} \right) \right] + \frac{\Delta_3}{\Delta} R_k \cos^2 \beta \right\}}$$

В связи с тем, что в данной работе учитывается изменение углов свивки винтовых элементов каната за период его деформации, то условия прочности подъемного каната с учетом волнистости при нелинейных зависимостях (2.26, 2.71-2.72) приобретет вид:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{p.l} + \Delta \sigma_{p.l} + \sigma_{p.n} + \Delta \sigma_{p.n} \leq \frac{\sigma_B}{z}, \quad (3.4)$$

где  $\sigma_{p.n}$  – напряжение растяжения в проволоке от действия натяжения и кручения, вызванное действием растягивающей силы и определяемое по формулам [13, 15];  $\Delta \sigma_{p.n}$  – дополнительные напряжения растяжения в проволоке стального каната, имеющего изменение геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, полученные с помощью нелинейных уравнений (2.15-2.16).

Запас прочности для каната двойной свивки в общем виде определяется:

$$z = \frac{\sigma_B}{\sigma} \quad \text{или} \quad z = \frac{\sigma_B}{\sigma_{p.l} + \Delta \sigma_{p.l} + \sigma_{p.n} + \Delta \sigma_{p.n}}. \quad (3.5)$$

Подставляя в (3.4-3.5) выражение (2.71-2.72) и решая относительно радиуса волнистости  $R_B^H$ , получим запас прочности и допустимое значение радиуса волнистости в нелинейной форме для каната двойной свивки:

$$\begin{aligned}
& \sigma_{p,a} + \Delta\sigma_{p,a} + \sigma_{p,\mu} + E \cdot \cos^2 \alpha \cos^2 \varphi \cdot \left. \begin{aligned}
& \left[ \Delta\epsilon^2 \left[ \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 - \right. \right. \\
& \left. \left. - \left( 2 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} \right) \mu^1 \right] - \right. \\
& - \Delta\theta^2 R^2 \left[ \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 - \right. \\
& \left. - \mu^1 \left( -\sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} \right) \right] + \\
& + \Delta\epsilon \Delta\theta R \left[ -\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 - \right. \\
& \left. - \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. + \left( -\sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} \right) \right) \right] + \\
& + \Delta\epsilon \frac{1}{\rho} \left[ 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) - \right. \\
& \left. - \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] + \\
& + \Delta\theta \frac{1}{\rho} R \left[ -R \sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \mu^1 ((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. \\
& \left. + \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. \right. \\
& \left. \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] + \\
& \left. + \left( \frac{1}{\rho} \right)^2 R \left[ \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] \right\} \quad (3.6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& R^u_{\sigma} \leq \frac{\sigma_a - \sigma_{p,a} - \sigma_{p,\mu}}{z} \cdot \left. \begin{aligned}
& E \cos^2 \alpha \cos \varphi \cdot \left[ \Delta\epsilon (\cos^2 \beta - \mu_1 \sin^2 \beta) + \frac{r_k}{R_k} \cos \alpha (1 - \mu_1) \sin^3 \beta \cos \beta \right] + \\
& + \Delta\theta R_k \left[ \sin \beta \cos \beta + \frac{r_k}{R_k} \operatorname{tg} \alpha \left( \cos^4 \beta - \frac{\sin^4 \beta \cos \beta}{R_k} \mu_1 \right) + \frac{R_k}{\rho} \cos^2 \beta \right] + \\
& + E \cdot \cos^2 \alpha \cos^2 \varphi \cdot \left. \begin{aligned}
& \left[ \Delta\epsilon^2 \left[ \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 - \right. \right. \\
& \left. \left. - \left( 2 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} \right) \mu^1 \right] - \right. \\
& - \Delta\theta^2 R^2 \left[ \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 - \right. \\
& \left. - \mu^1 \left( -\sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} \right) \right] + \\
& + \Delta\epsilon \Delta\theta R \left[ -\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 - \right. \\
& \left. - \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. + \left( -\sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} \right) \right) \right] + \\
& + \Delta\epsilon \frac{1}{\rho} \left[ 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) - \right. \\
& \left. - \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] + \\
& + \Delta\theta \frac{1}{\rho} R \left[ -R \sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \mu^1 ((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. \\
& \left. + \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. \right. \\
& \left. \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] + \\
& \left. + \left( \frac{1}{\rho} \right)^2 R \left[ \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] \right\} \quad (3.7)
\end{aligned}$$

Для проведения исследования влияния запаса прочности наиболее нагруженной пряди на изменения его геометрических параметров и механических свойств прядей был выбран канат двойной свивки ГОСТ 7669 – 80 диаметром 42 мм.

Теоретическое исследование проведено с помощью нелинейных уравнений на ПК IBM PC с использованием программы MathCAD [24] по разработанному и представленному на рисунке 3.14 алгоритму.

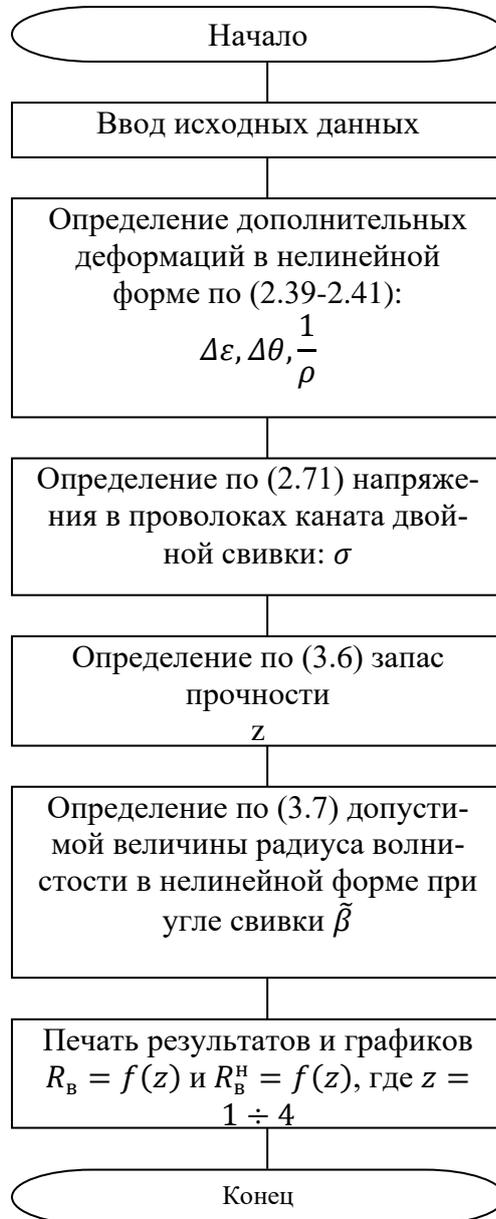


Рисунок 3.14 – Схема подпрограммы по исследованию влияния запаса прочности наиболее нагруженной пряди подъемного каната на изменения геометрических параметров и механических свойств прядей, с помощью нелинейной теории расчета канатов

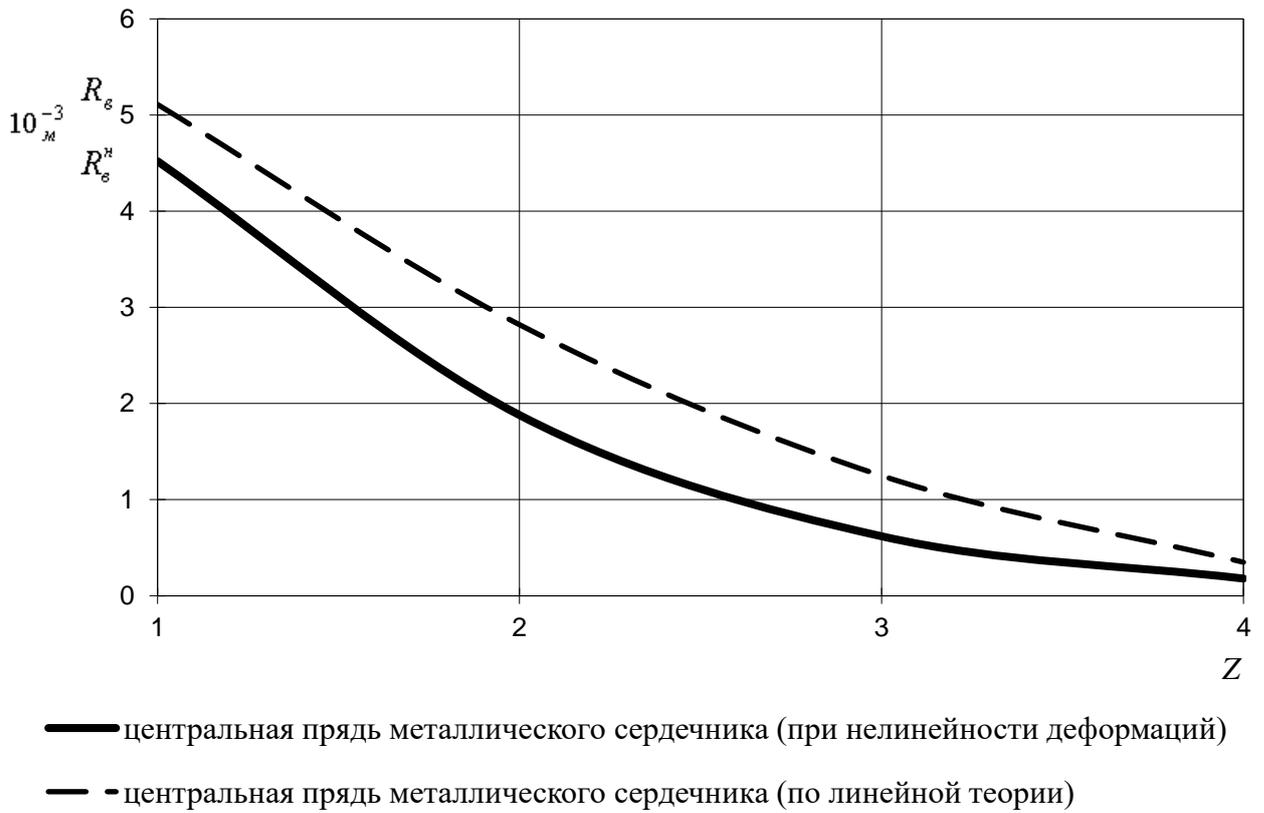


Рисунок 3.15 – Влияние запаса прочности центральной пряди металлического сердечника на изменения его геометрических параметров и механических свойств прядей

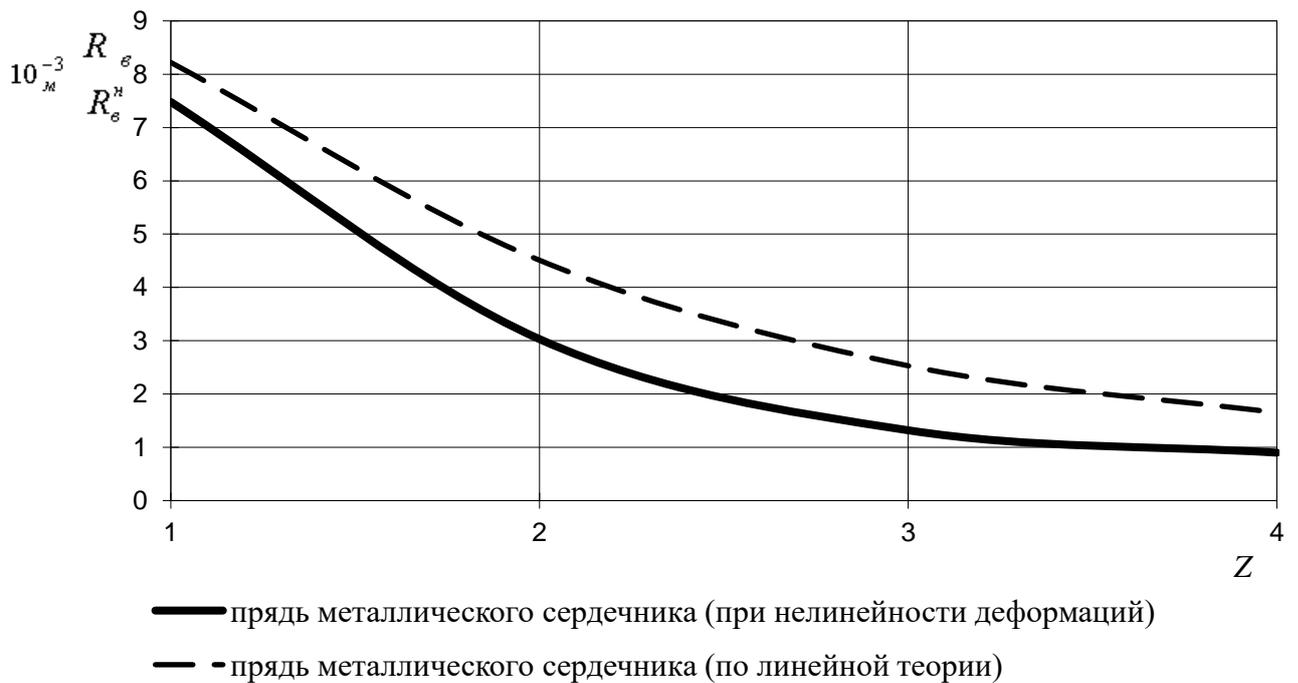


Рисунок 3.16 – Влияние запаса прочности пряди металлического сердечника на изменения его геометрических параметров и механических свойств прядей

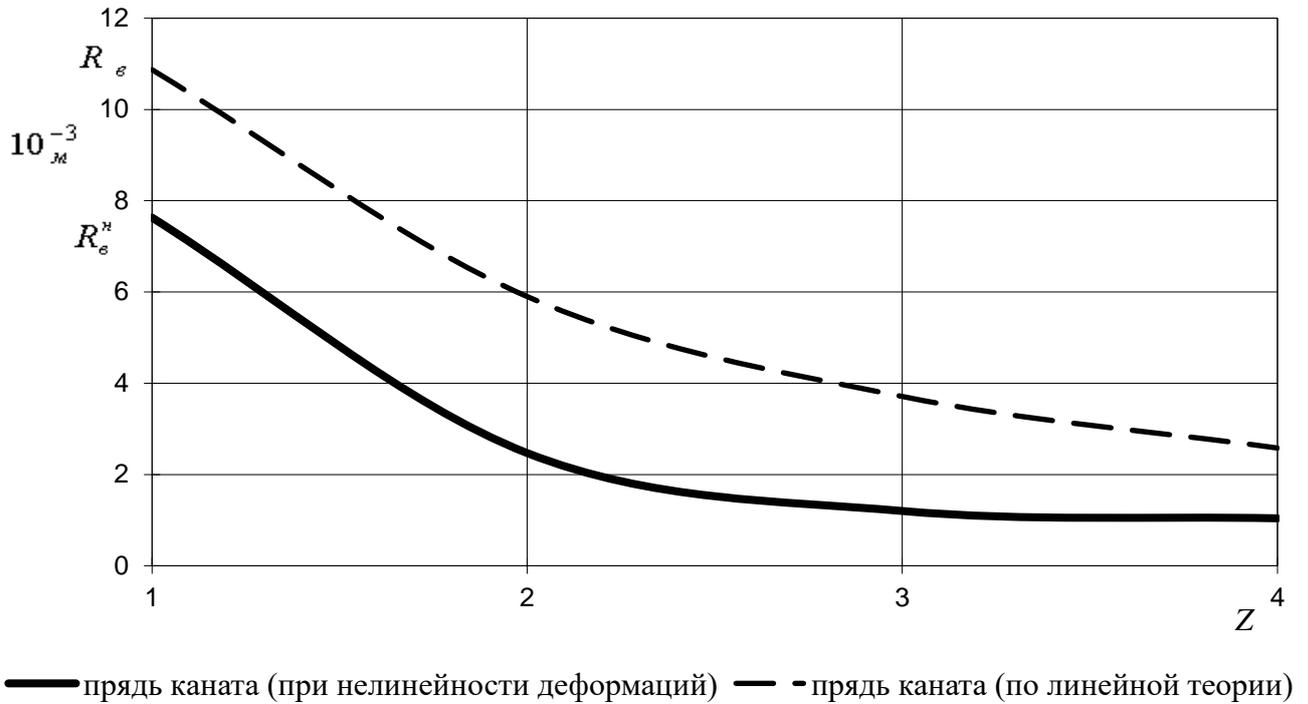


Рисунок 3.17 – Влияние запаса прочности пряди каната на изменения геометрических параметров и механических свойств прядей

Судя по рисункам 3.15–3.17 линейная теория расчета при малых запасах прочности (2–3) и идентичных характеристиках каната показывает завышенные значения радиуса волнистости с учетом изменения геометрических параметров и механических свойств прядей по сравнению с нелинейной теорией расчета, наиболее остро это проявляется во внешнем слое прядей каната. Вследствие неодинаковой нагруженности слоев каната двойной свивки при одном запасе прочности наименьшее изменение геометрических параметров и механических свойств прядей соответствует центральной пряди сердечника и максимальное – пряди каната, что соответствует проведенным ранее теоретическим и экспериментальным исследованиям [85].

На основании полученных выражений (3.6), нами были проведены теоретические исследования влияния радиуса волнистости подъемного каната на его запас прочности.

Для исследований был выбран канат двойной свивки ГОСТ 3077 – 80 диаметром 41 мм с длиной 1500 метров.

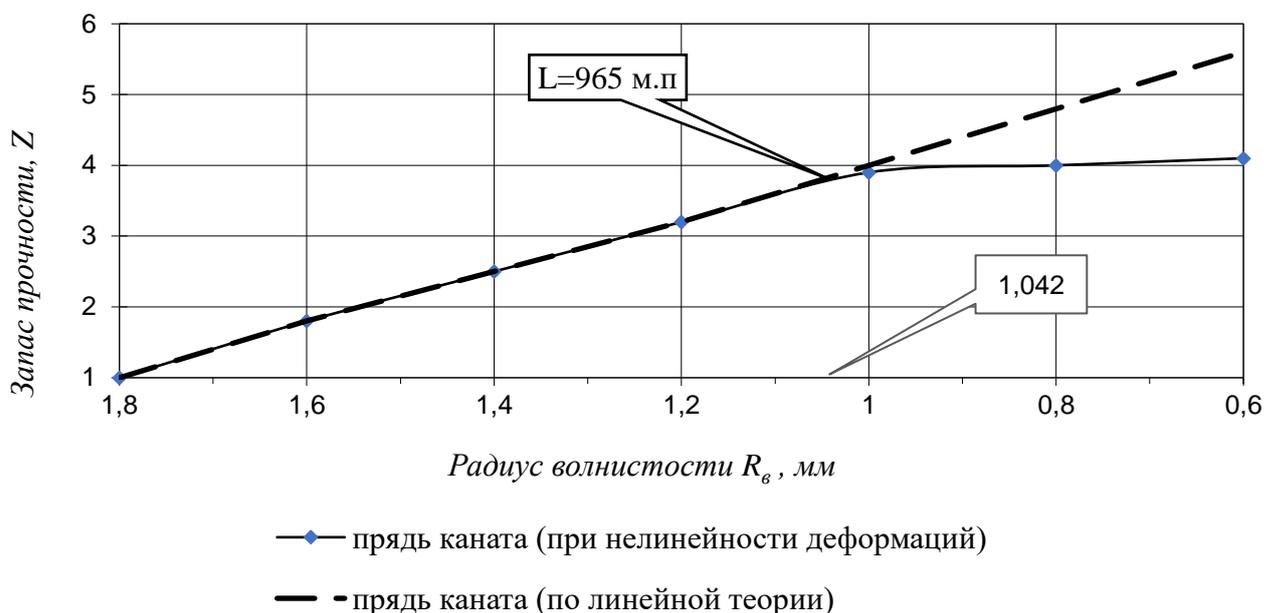


Рисунок 3.18 – Влияние радиуса волнистости на запас прочности каната двойной свивки ГОСТ 3077 – 80 диаметром 41 мм с длиной 1500 метров

В результате сравнения с данными (рис. 3.18) полученными нами при расчете подъемного каната диаметром 41 мм с аналогичными исходными данными, полученными с помощью линейных уравнений, можно сделать вывод, что с увеличением радиуса волнистости запас прочности каната снижается. Причем показатели запаса прочности, рассчитанные с помощью выражения (3.6-3.7) в 2 раза выше показателей, полученных с аналогичными исходными данными по линейной теории расчета подъемного каната.

### 3.3. Исследование технологических факторов на напряженно-деформированное состояние каната двойной свивки в нелинейной постановке

#### 3.3.1. Влияние предела прочности материала каната двойной свивки на изменение его геометрических параметров и механических свойств прядей, рассмотренное на основе нелинейных уравнений статики

Для исследования был принят канат двойной свивки ГОСТ 3077-80 диаметром 41 мм. Предел прочности  $\sigma_B = 1670$  МПа, разбег предела прочности 380 МПа [6], разбег предела текучести  $\Delta\sigma_T = 0,85 \cdot \Delta\sigma_B = 0,85 \cdot 380 = 323$  МПа.

С учетом выражения (2.81), было проведено теоретическое исследование, результаты этого исследования представлены на рисунке 3.19.

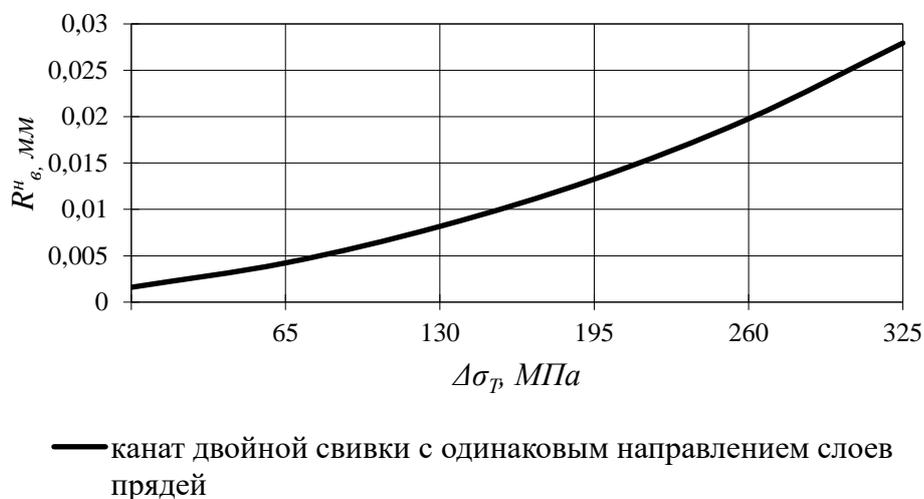


Рисунок 3.19 – Влияние разбега предела прочности материала на радиус волнистости в нелинейной постановке каната двойной свивки ГОСТ 3077-80

На рисунке 3.19 представлена зависимость радиуса волнистости в нелинейной постановке от величины разбега предела текучести материала, каната двойной свивки ГОСТ 3077 – 80.

Как видно из показаний на графике, с увеличением предела прочности материала на 325 МПа увеличивается и радиус волнистости  $R_B^H$  до 0,028 мм (все слои прядей направлены в одну сторону).

### **3.3.2. Влияние допуска на диаметр проволок в прядях каната двойной свивки ГОСТ 7669 -80 на изменение его геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, рассмотренное на основе нелинейных уравнений статики**

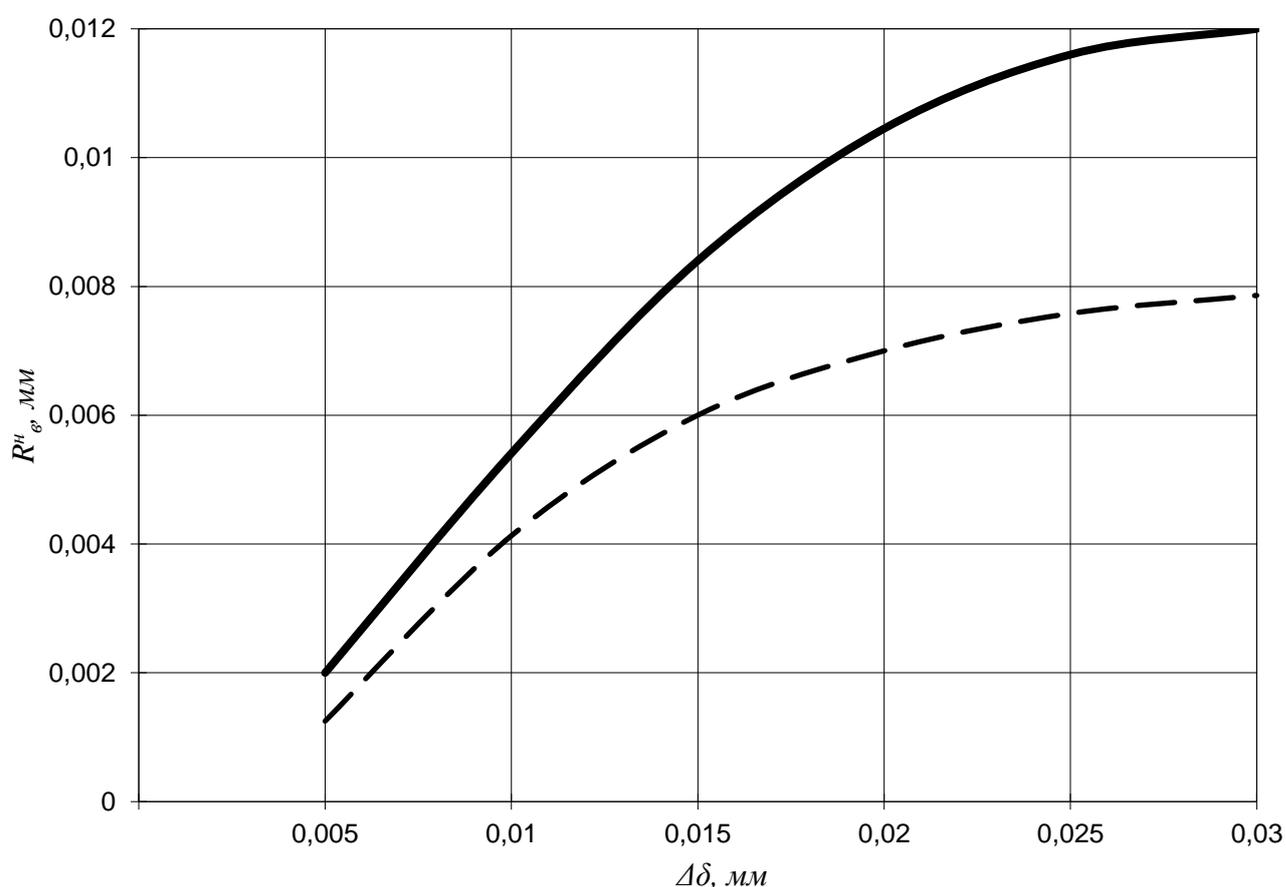
Для проведения исследования был выбран канат двойной свивки ГОСТ 7669 – 80 диаметром 42 мм. Предел прочности  $\sigma_B = 1670$  МПа. Суммарное разрывное

усилие всех проволок в канате  $P_{\text{сум}}=1405000$  Н.

Допуск на диаметр проволок при значении диаметра 1–3 мм равен 0,03 мм [6].

Результаты расчетов, полученные с помощью уравнений (2.81–2.82) представлены на рисунке 3.20.

Анализируя проведенные исследования, можно уверенно сказать, что допуск на диаметр проволок в пряди незначительно влияет на изменение его геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, что также согласуется с результатами исследований, проведенными с помощью линейной теории [87].



— канат двойной свивки с одинаковым направлением слоев прядей

- - наружный слой прядей направлен в одну сторону, а остальные - в противоположную

Рисунок 3.20 – Влияние допуска на диаметр проволок в прядях каната двойной свивки ГОСТ 7669 – 80 на изменения его геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов

### 3.3.3. Влияние технологического натяжения на образование в канате изменений геометрических параметров и механических свойств прядей, рассмотренное на основе нелинейных уравнений статики

Для исследования был принят канат двойной свивки ГОСТ 3077 – 80 диаметром 41 мм. Величина технологического натяжения, выраженная через напряжения  $\sigma_H$  менялась в пределах от 0 до 350 МПа, изменение технологического натяжения – в пределах 0 – 180 МПа [60, 61].

На рисунках 3.21 и 3.22, соответственно, представлены зависимости радиуса волнистости  $R_B^H$  и угла волнистости  $\gamma^H$  в нелинейной постановке от технологического натяжения  $\sigma_H$  (при различных значениях неравномерности технологического натяжения  $\Delta\sigma_H$ ).

Как видно из рисунков 3.21 и 3.22 подъемные канаты, изготовленные с одинаковым направлением слоев прядей уменьшают показатели радиуса волнистости и угла волнистости (в нелинейной постановке) примерно 10–20 %.

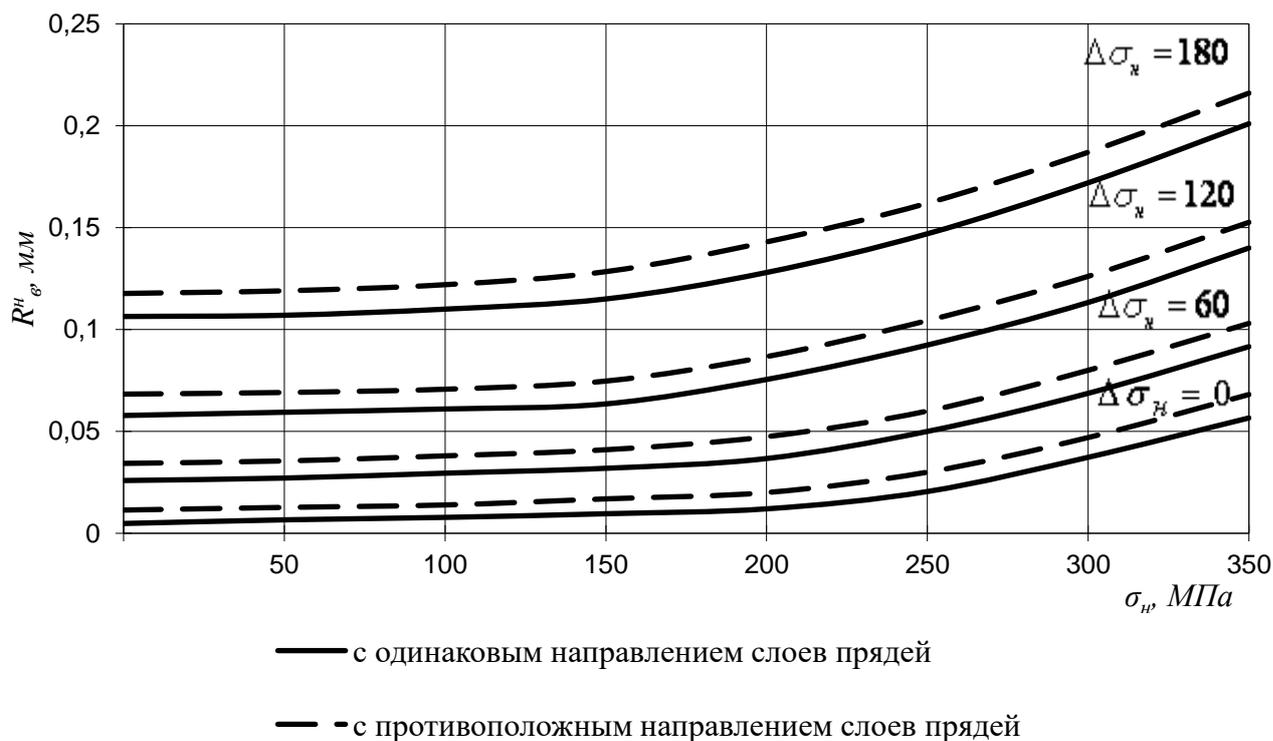


Рисунок 3.21 – Влияние технологического натяжения на радиус волнистости (в нелинейной постановке), при различных значениях неравномерности технологического натяжения прядей

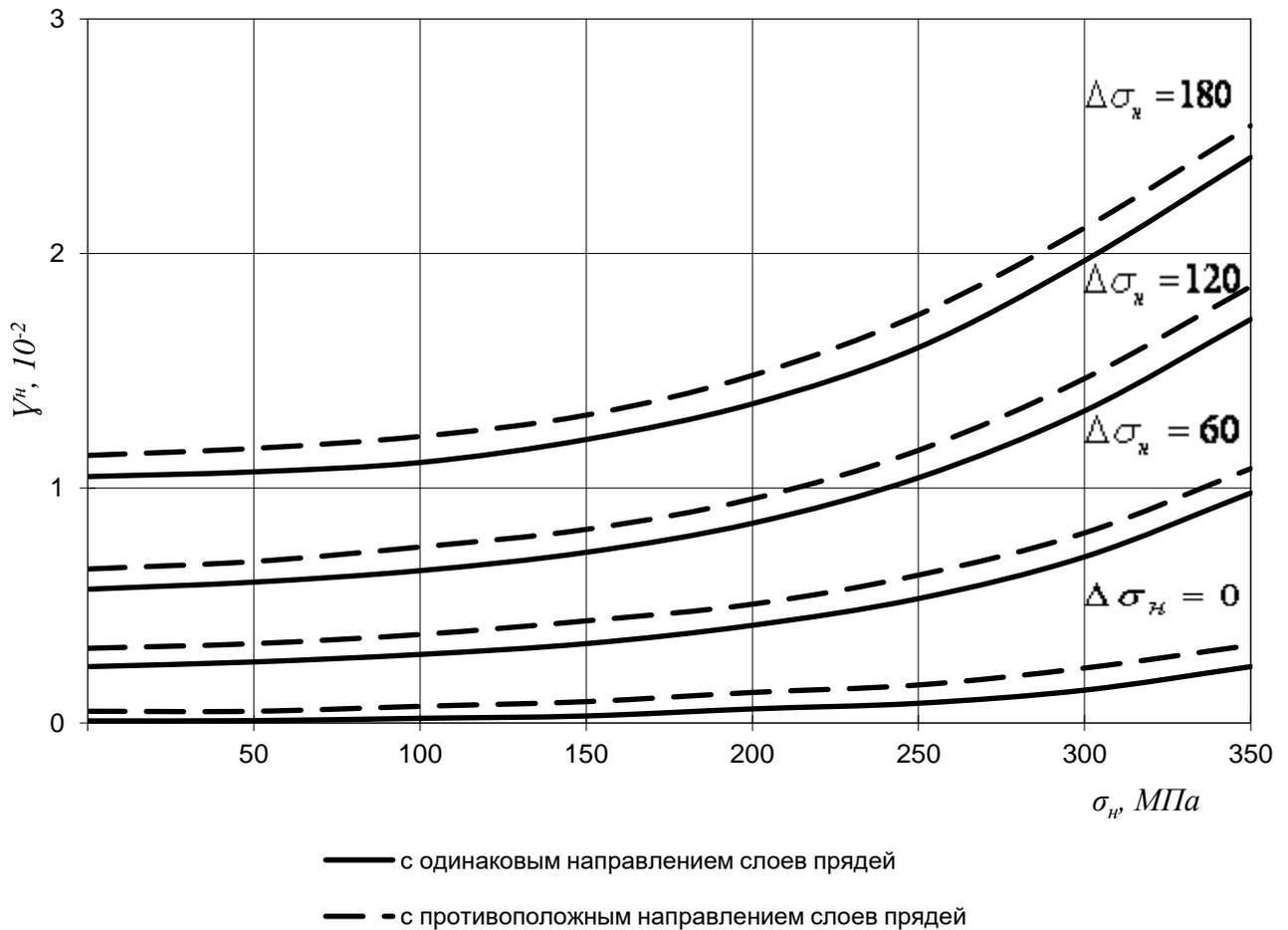


Рисунок 3.22 – Зависимость угла волнистости (в нелинейной постановке) от технологического натяжения, при различных значениях неравномерности технологического натяжения прядей

### 3.3.4. Определение неравномерности длин прядей с помощью нелинейных уравнений статики при изготовлении каната двойной свивки

Для выявления неравномерности длин прядей каната двойной свивки воспользуемся полученной в [77] зависимостью:

$$\Delta\varepsilon_s = \left( \Delta\varepsilon \cos^2 \beta + \Delta\theta R_k \sin \beta \cos \beta + \frac{R_k}{\rho} \cos^2 \beta \right) \cos \varphi + \Delta\varepsilon_r \sin^2 \beta. \quad (3.8)$$

Для каната двойной свивки с металлическим сердечником поперечная деформация  $\varepsilon_r$  равна нулю.

Максимальная величина относительной деформации  $\Delta\varepsilon_s$  в нелинейной форме с учетом (2.4) составит:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_s = & -2\Delta\varepsilon^2 \sin^2\beta \cos^2\beta + \Delta\theta^2 R_k^2 \cos^2\beta \cos 2\beta + 2\left(\frac{R_k}{\rho}\right)^2 \sin^2\beta \cos^2\beta + \\ & + \Delta\varepsilon \Delta\theta R_k \sin\beta \cos\beta (2\cos^2\beta - \cos 2\beta) + \Delta\theta \frac{R_k^2}{\rho} \sin\beta \cos\beta (\cos 2\beta + 2\cos^2\beta) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Неравномерность длин прядей согласно [77,86], определяется по формуле:

$$\Delta l_{\max} = l \cdot \Delta\varepsilon_s \cdot M_z, \quad (3.10)$$

где  $l$  – длина пряди, укладываемая в канат при его свивки; где  $\Delta l$  – максимальное изменение длины пряди.

Подставляя в (3.10) зависимость (3.9), получим:

$$\begin{aligned} \Delta l_{\max}^H = & l \cdot \\ & \left( \begin{aligned} & -2\Delta\varepsilon^2 \sin^2\beta \cos^2\beta + \Delta\theta^2 R_k^2 \cos^2\beta \cos 2\beta + 2\left(\frac{R_k}{\rho}\right)^2 \sin^2\beta \cos^2\beta + \\ & + \Delta\varepsilon \Delta\theta R_k \sin\beta \cos\beta (2\cos^2\beta - \cos 2\beta) + \Delta\theta \frac{R_k^2}{\rho} \sin\beta \cos\beta (\cos 2\beta + 2\cos^2\beta) \end{aligned} \right) \\ & \cdot M_z \end{aligned} \quad (3.11)$$

Для исследования был принят канат двойной свивки ГОСТ 3077-80 диаметром 41 мм. Величины дополнительных деформаций  $\Delta\varepsilon, \Delta\theta, \frac{1}{\rho}$  определены по общему алгоритму расчета напряженно-деформированного состояния канатов с учетом волнистости с помощью нелинейных уравнений представленному на рисунке 2.1. Предел прочности канатной проволоки  $\sigma_B = 1670$  МПа. Допуск на изготовление проволок при значениях диаметров проволоки 1–3 мм равен 0,03 мм, разбег предела прочности 380 МПа. Изменение технологического натяжения, выраженное через растягивающее напряжение, равно 180 МПа [60, 61].

Теоретическое исследование по определению влияния конструктивных и технологических параметров каната двойной свивки на его качество проведены с помощью нелинейных уравнений статики на ПК IBM PC с использованием программы MathCAD по разработанному и представленному на рисунке 3.23 алгоритму.

Результаты исследования (3.11) представлены на рисунках 3.24–3.25.

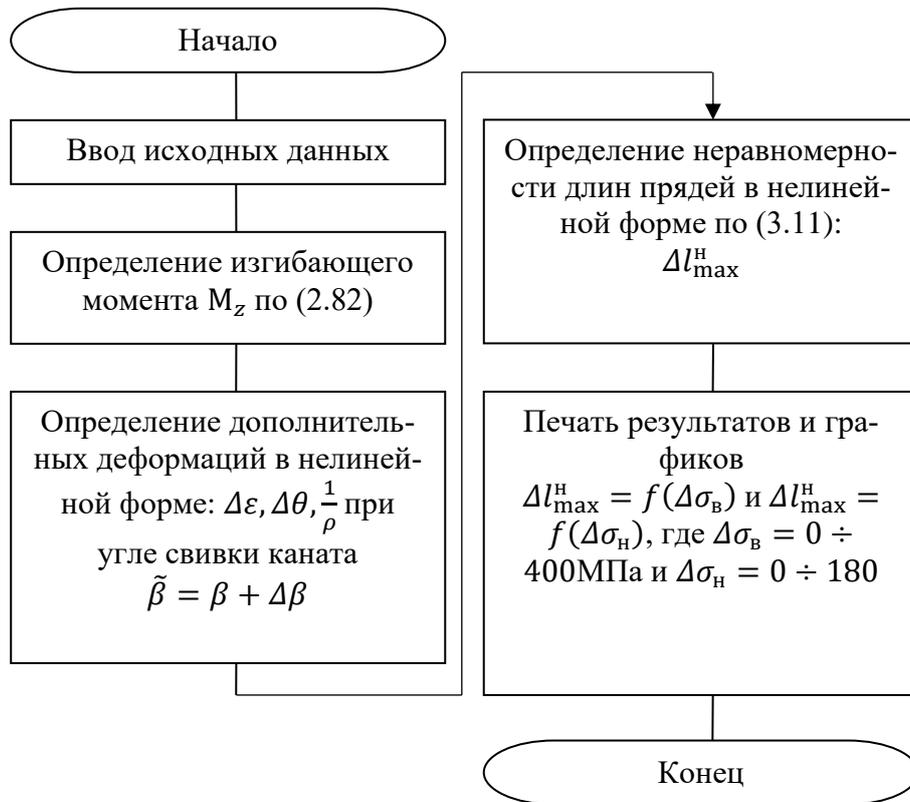


Рисунок 3.23 – Схема подпрограммы по определению влияния конструктивных и технологических параметров каната двойной свивки на его качество

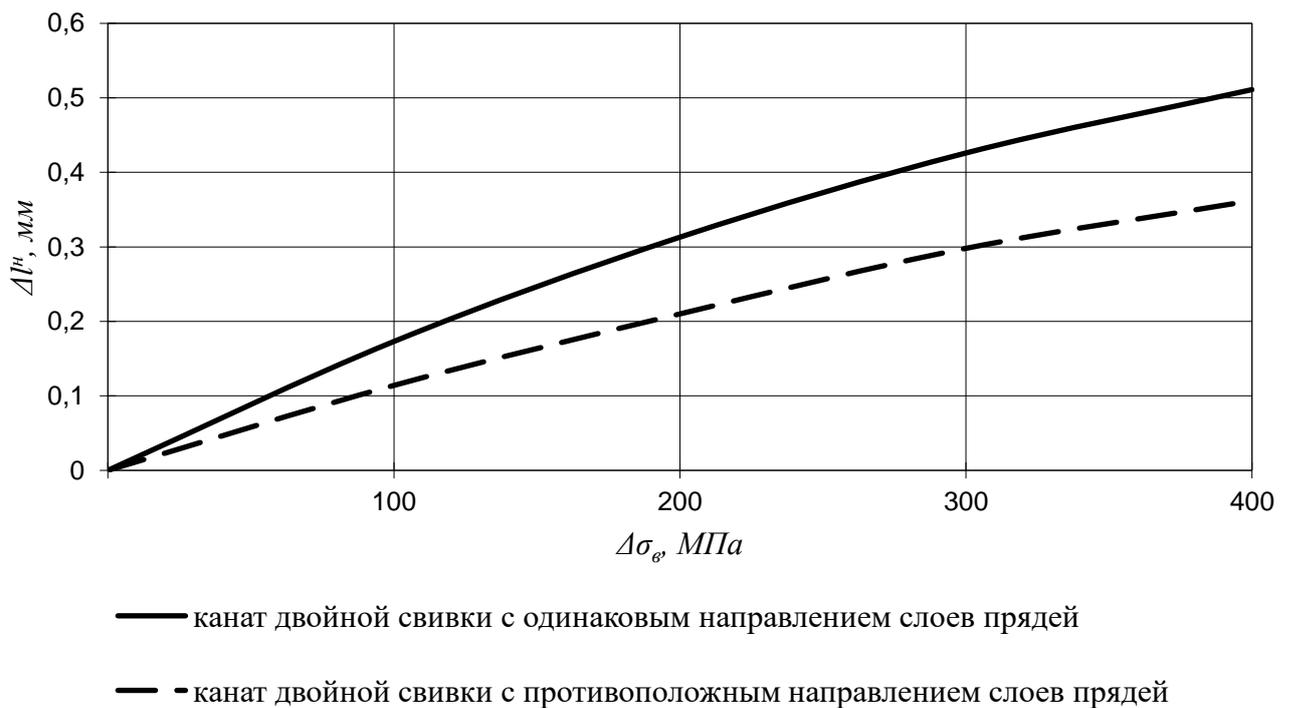


Рисунок 3.24 – Влияние конструктивных и технологических параметров каната двойной свивки на его качество

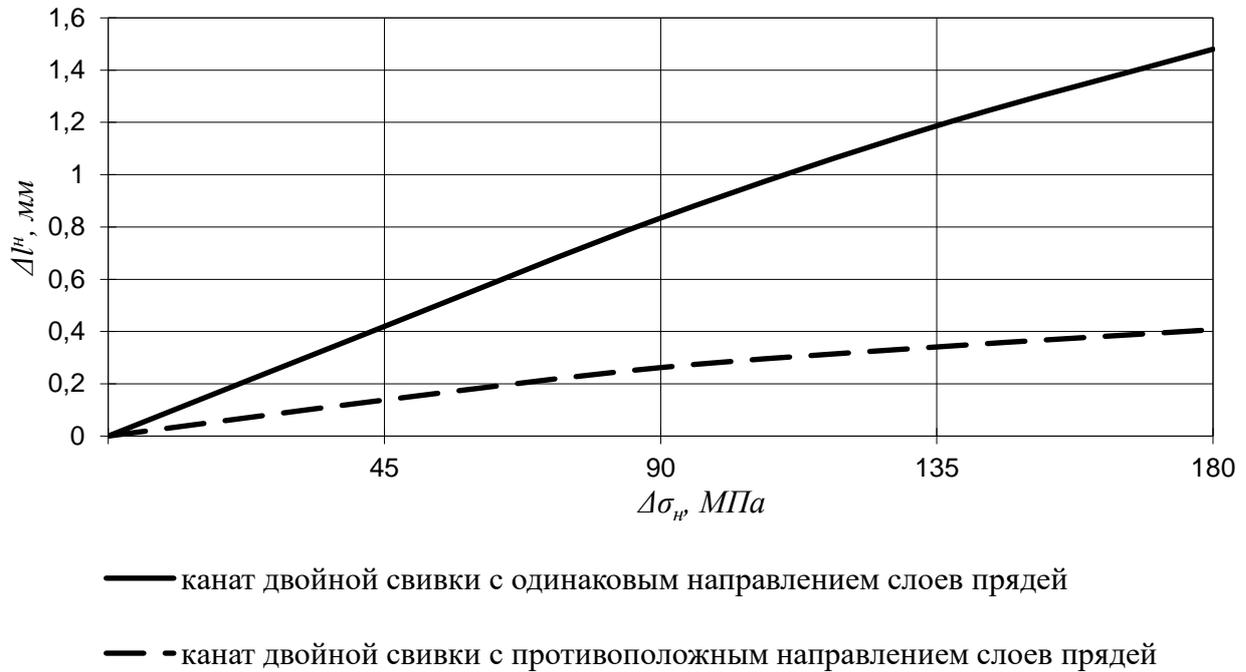


Рисунок 3.25 – Влияние конструктивных и технологических параметров каната двойной свивки на его качество

После проведенных исследований, можно сделать вывод, что наиболее существенными факторами, влияющими на неодинаковость длин прядей, являются неравномерность технологического натяжения и разбег предела прочности, причем как видно из графиков 3.24, 3.25 при определении влияния конструктивных и технологических параметров каната двойной свивки на его качество проявляется нелинейность. Также существенное влияние оказывает направление свивки прядей. Для канатов двойной свивки, у которых наружный слой пряди направлен в противоположную сторону свивки подъемного каната, величина неравномерности длин прядей и радиуса волнистости уменьшаются в 2 раза по сравнению с канатом двойной свивки с одинаковым направлением слоев прядей.

### 3.3.5. Влияние неравномерности технологического натяжения проволок в прядях двухслойного каната при нелинейных зависимостях

Для данного исследования был принят канат двойной свивки ГОСТ 7669 – 80 диаметром 42 мм. Предел прочности канатной проволоки  $\sigma_b = 1670 \text{ МПа}$ , суммарное разрывное усилие всех проволок в канате  $P_{\text{сум}} = 1405000 \text{ Н}$ .

Наибольшее изменения технологического натяжения, выраженное через растягивающее напряжение, равно 150 МПа согласно [60].

На рисунке 3.26 представлена зависимость радиуса волнистости (в нелинейной постановке) от неравномерности технологического натяжения, для каната двойной свивки ГОСТ 7669 – 80.

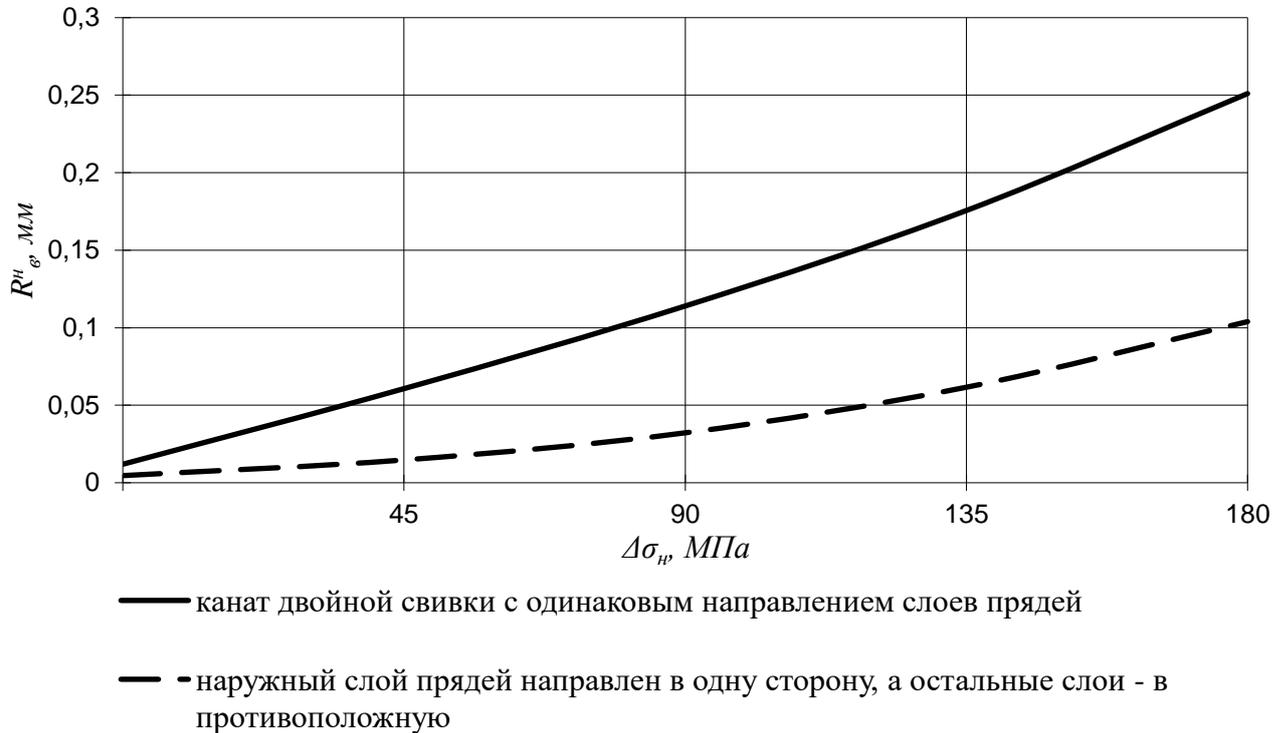


Рисунок 3.26 – Влияние неравномерности технологического натяжения на волнистость каната двойной свивки ГОСТ 7669-80

Как видно из рисунка 3.26, радиус волнистости (в нелинейной постановке) каната двойной свивки с одинаковым направлением прядей в 2–2,5 раза больше по сравнению с канатом двойной свивки у которого наружная прядь направлена в одну сторону, а остальные в – противоположную при одном и том же значении неравномерности технологического натяжения. Исследование показало, что наиболее существенным фактором, влияющим на появление изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов в стальном подъемном канате, является неравномерность технологического натяжения винтовых элементов, что и подтверждает ранее сделанные выводы [62].

При свивке каната, вследствие неравномерности технологических натяжений прядей происходит укладка их в канат с различными длинами прядей в одном слое.

Прядь, имеющая большое натяжение, укладывается в канат с минимальной длиной и наоборот, прядь, имеющая минимальное натяжение, укладывается в канат с максимальной длиной. Прядь, имеющая большую длину в сравнении с другими, при действии растягивающей нагрузки получает меньшие деформации и наоборот. Поэтому в таком канате происходит образование дефекта – волнистость. Как было показано ранее, факторами, способствующими появлению в канате изменений геометрических параметров и механических свойств прядей, являются технологическое натяжение, свивочные напряжения и механические свойства прядей. Таким образом, данное исследование подтверждает высокую значимость по выявлению в канате изменений геометрических параметров и механических свойств прядей, образующихся в результате неравномерности технологического натяжения прядей.

В соответствии с этим был разработан способ свивки двухслойного каната [46, 100], который направлен на повышение качества двухслойного каната за счет того, что способ свивки двухслойного каната включающий операции свивки первого слоя прядей, и второго слоя прядей вокруг сердечника, причем при выполнении операции свивки первого слоя прядей измеряют натяжения каждой пряди первого слоя и определяют радиальное и угловое смещение равнодействующей относительно продольной оси каната и величину изгибающего момента, причем перед свивкой второго слоя прядей каната задают натяжения каждой пряди и изгибающий момент равный по величине изгибающему моменту первого слоя прядей и противоположный по направлению. Радиальное и угловое смещение равнодействующей и величину изгибающего момента определяют по формулам (рисунок 3.27):

$$e_{x_c} = \frac{P_{1пр}e_{x1} + P_{2пр}e_{x2} + P_{3пр}e_{x3} + P_{4пр}e_{x4} + P_{5пр}e_{x5} + P_{6пр}e_{x6}}{\Sigma P_{inn}}; \quad (3.12)$$

$$e_{y_c} = \frac{P_{1пр}e_{y1} + P_{2пр}e_{y2} + P_{3пр}e_{y3} + P_{4пр}e_{y4} + P_{5пр}e_{y5} + P_{6пр}e_{y6}}{\Sigma P_{inn}}; \quad (3.13)$$

$$e_i = \sqrt{e_{x_c}^2 + e_{y_c}^2}; \quad (3.14)$$

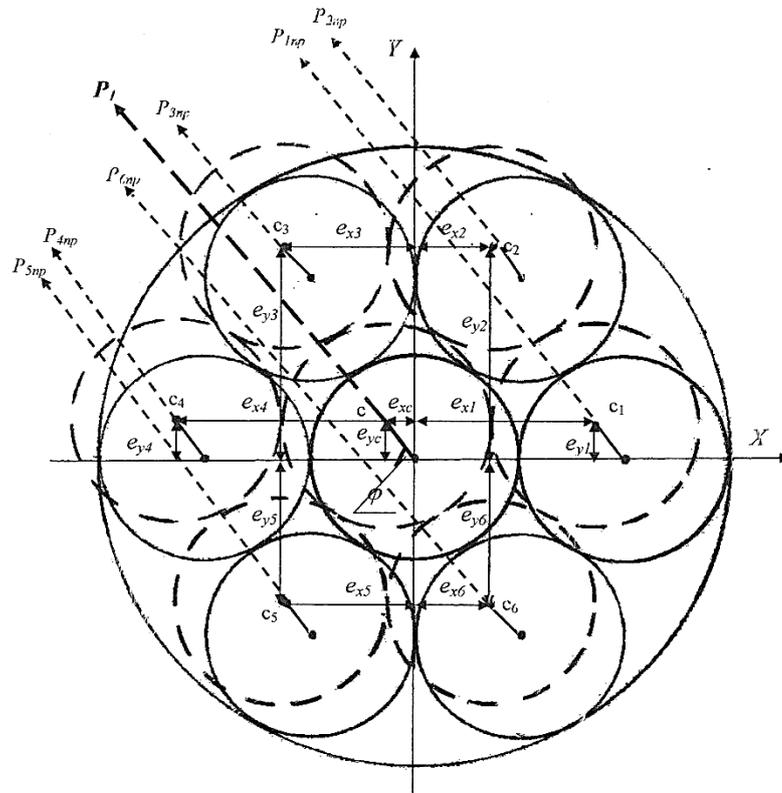


Рисунок 3.27 – Смещение равнодействующей первого слоя относительно продольной оси канала

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{e_{xc}}{e_{yc}}; \quad (3.15)$$

$$M_{1.\text{изг.}} = \sum P_{inn} \cdot e_i; \quad (3.16)$$

$$M_{\text{изг.}} = \sum P_{inn} \cdot \sqrt{e_{xc}^2 + e_{yc}^2}, \quad (3.17)$$

где  $e_{xc}, e_{yc}$  – смещение равнодействующей относительно оси  $X$  и  $Y$ ;  $e_{xi}, e_{yi}$  – координаты прядей каната относительно оси  $X$  и  $Y$ ;  $P_{inn}$  – натяжение  $i$  пряди первого слоя каната;  $\varphi$  – полярный угол (угловое смещение);  $e_i$  – смещение равнодействующей прядей  $i$ -го слоя;  $\sum P_{inn}$  – суммарное значение равнодействующей натяжения прядей  $i$ -го слоя.

Отличительными признаками способа свивки двухслойного каната является то, что перед свивкой второго слоя каната задают натяжения каждой пряди и изгибающий момент равный по величине изгибающему моменту первого слоя прядей и противоположный по направлению.

Способ свивки двухслойного каната позволит улучшить качество многослойных подъемных канатов, а также предотвратить возникновения неравномерности геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов в канате.

### **3.4. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния подъемного каната с возникшими в нем изменениями геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов**

#### **3.4.1. Цель экспериментальных исследований**

Ранее, было показано, что при нагружении каната с учетом изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов осевой растягивающей нагрузкой пряди (проволоки) слоев, взаимодействуют друг с другом, получают упругую деформацию, в связи с чем в канате возникает волнистость.

Цель экспериментальных исследований – подтвердить правильность полученных теоретических результатов расчета подъемных канатов с помощью нелинейных уравнений статики.

#### **3.4.2. Задачи экспериментальных исследований**

Как ранее отмечалось, что эксплуатация подъемных канатов в условиях, обуславливающих их кручение, вызывает явление геометрической нелинейности, которое экспериментальным путем подтверждено в работах [98] на примерах свободного растяжения канатов.

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

В связи с этим основными задачами экспериментальных исследований являются:

1. Изготовить образцы стальных канатов, соответствующих конструкциям, применяемым в настоящее время, а также сконструировать и изготовить образцы канатов, с учетом возникших изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

2. Определить деформации в канате при различном натяжении винтовых элементов.

3. Определить дополнительные деформации в элементах изготовленных образцов канатов, с учетом волнистости при различных уровнях нагружения.

4. Выбрать наиболее простой и надежный метод исследования напряжений, учитывающий изменение геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

5. Выявить причину возникновения нелинейности в подъемных канатах.

### **3.4.3. Промышленные и экспериментальные установки для изготовления и исследования, опытных образцов канатов**

До настоящего времени практически все стальные подъемные канаты диаметром 40–70 мм [6], изготавливают на канатовьющих машинах корзиночно-роторного типа. Для изучения влияния конструктивных, эксплуатационных и технологических факторов на распределения нагрузки в элементах каната испытываемые образцы необходимо изготавливать на таких же установках.

Применяемое в канатном производстве оборудование, как известно [9, 25, 60, 22], оказывает на винтовые элементы каната существенные изменения:

- неравномерность натяжения элементов, свиваемых в канат;
- различие геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов;
- высокие динамические нагрузки, нарушающие качество и параметры свивки каната.

Для изготовления опытных образцов стальных канатов с постоянным и различным натяжением винтовых элементов на кафедре АиТТК Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-

Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», нами было использовано устройство [34, 37, 62], состоящее из станины 1, на которой установлены направляющие блоки 2 и патрон 3, который по средствам кинематической передачи через редуктор 4 связан с электродвигателем 5, а также через открытую зубчатую передачу 6 и ходовой винт 7 – с подвижной рамой 8 (рисунок 3.28). На подвижной раме расположены распределительный шаблон 9 и обжимные плашки 10, вращающиеся в подшипниковых опорах. Натяжение винтовых элементов задавалось с помощью эталонных грузов 11 массой до 7 кг. Измерения длин винтовых элементов при свивке каната производилось с помощью линеек 12, закрепленных на станине 1. Свивка каната производилась путем совмещения вращательного движения патрона 3 и поступательного перемещения подвижной рамы 8. С помощью счетчика фиксировалось число оборотов патрона 3.

Для уменьшения сил сопротивления перемещению винтовых элементов через распределительный шаблон 9 его направляющие втулки изготовлены из антифрикционного материала масленита. Поэтому технологическое натяжение винтовых элементов практически равно весу эталонных грузов.

Общий вид канатовьюющей машины представлен на рисунках 3.29 и 3.30.

На данной машине можно изготавливать канаты одинарной и двойной свивки, длиной 0,7 м, диаметром до 7 мм.

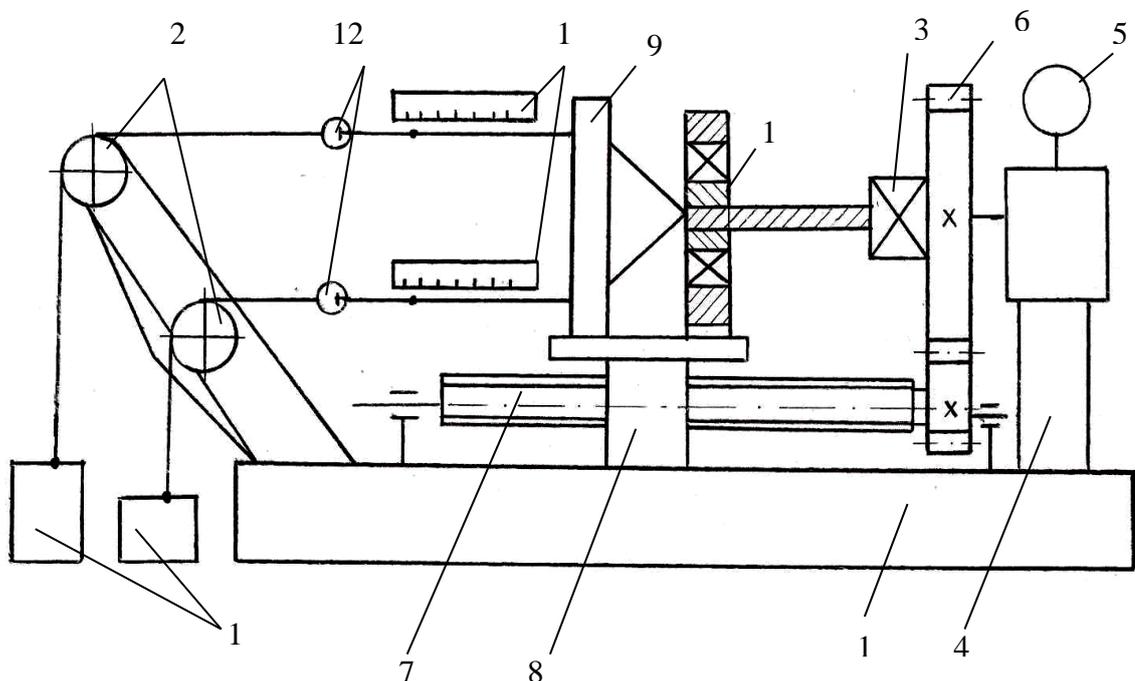


Рисунок 3.28 – Кинематическая схема канатовьюющей машины

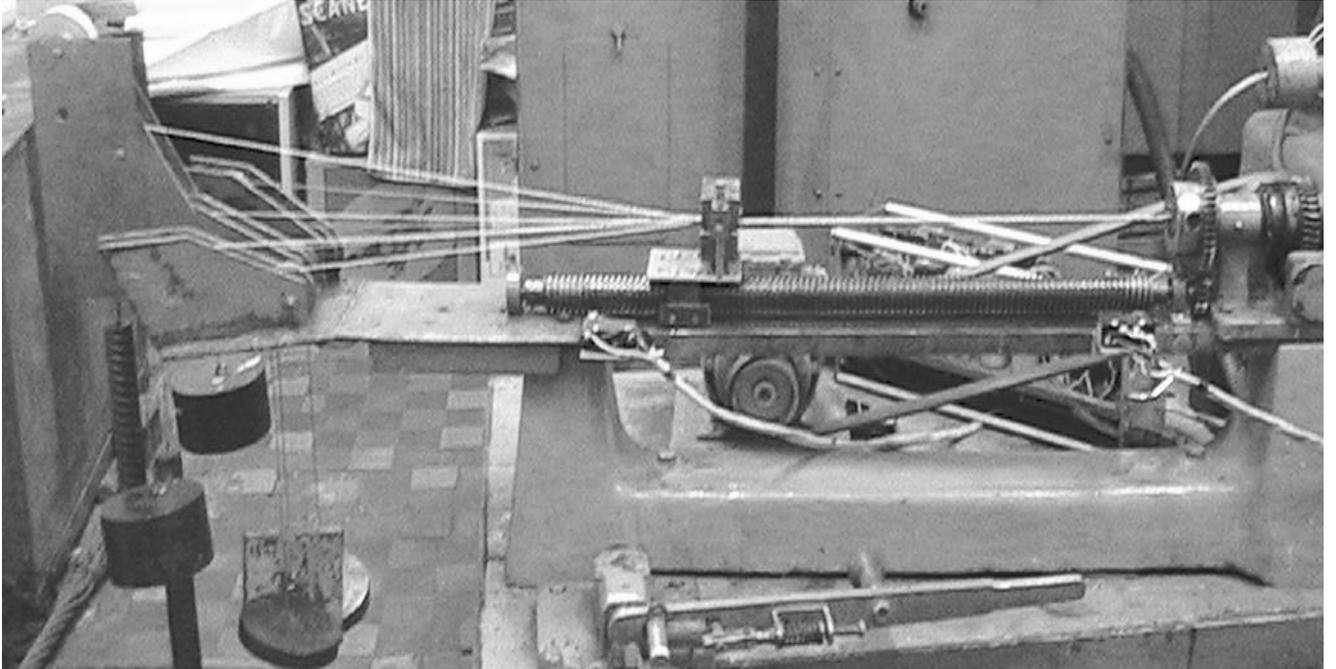


Рисунок – 3.29 - Общий вид канатовьющей машины

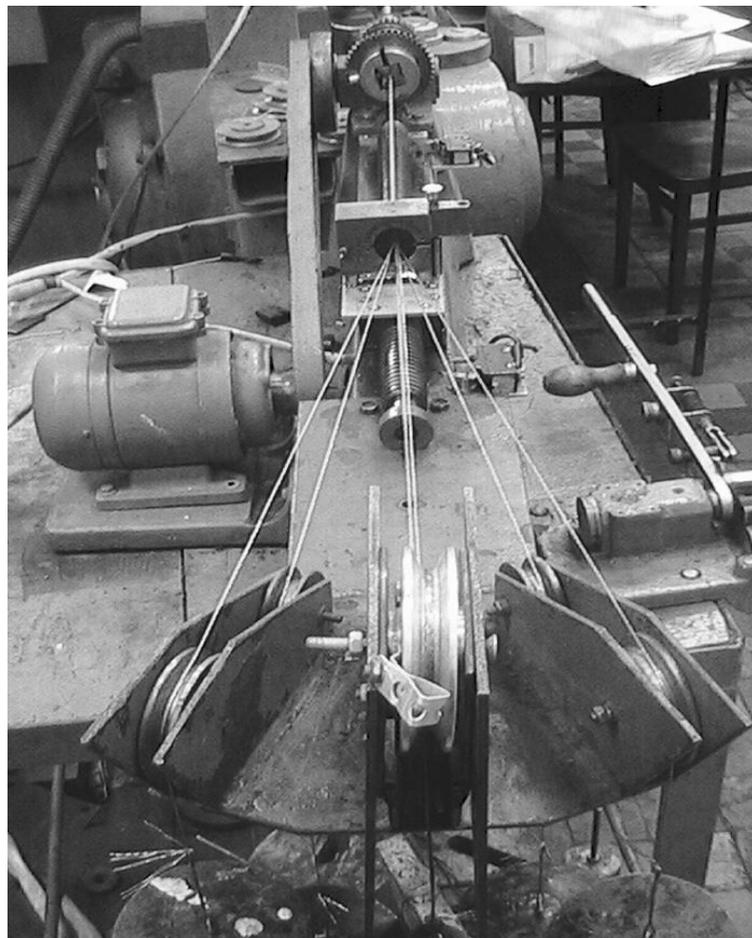


Рисунок 3.30 – Канатовьющая машина

### 3.4.4. Существующие методы экспериментального определения деформаций в подъемном канате

Основным экспериментом, который может подтвердить правильность теоретических выводов проведенных во II главе в отношении 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.

Л.И. Шигариной был предложен метод по измерению перемещения подъемного каната: продольные, угловые и радиальные, возникшие при его нагружении [98]. При известных значениях перемещений с помощью полученных автором формул можно перейти к соответствующим значениям деформаций.

Использование при эксперименте прибора для замера деформаций выполнено технически грамотно, но имеет некоторые недостатки. К наиболее значимым недостаткам можно отнести то, что в качестве регистрирующего устройства используется часовой индикатор, который не дает требуемой точности измерения деформаций. А также эксперимент проводился без учета возможных образований изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов подъемного каната.

Представляет интерес эксперимент [95], проведенный в лаборатории сопротивления материалов Дальрыбвтуза, который заключается в следующем, испытывались образцы стальных канатов с органическими сердечниками рабочей длиной 1 м., диаметром 16,0; 17,5; 19,5; 21,0; 24,0; 27,0 мм по ГОСТ 3070 – 88. Испытания проводились с помощью специального прибора, позволяющего проводить два варианта испытаний: при неподвижном и вращающемся верхнем конце образца. Все испытания проводились до натяжения  $2/3$  разрывного. При каждом варианте испытания образцы подвергались пятикратному нагружению с последующей разгрузкой

и при каждом испытании составлялись таблицы отмеченных параметров. Запись проводилась с интервалом 4,9 кН до натяжения 19,6 кН и с интервалом 9,8 кН до максимального.

При обработке методики проведения эксперимента было обнаружено, что характеристики, полученные при четвертом, пятом и последующем циклах нагружения, совпадают, т. е. канат начинает работать в области упругих деформаций. Поэтому характеристики образцов снимались при пятом цикле нагружения.

К недостаткам этого метода относятся: громоздкость и трудоемкость эксперимента, а также не учет образования изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов подъемного каната, и проведения эксперимента над стальными канатами с органическими сердечниками.

Особый интерес представляют исследования напряженно-деформированного состояния подъемных канатов с образовавшейся в них волнистостью, проведенные А.Б. Гуревичем [20, 90], во время проведения эксперимента были изготовлены образцы канатов с различным значением радиуса волнистости. Но автором не было проведено исследований подъемных канатов без учета образования волнистости, а также не сделано сравнительного анализа и соответствующих выводов.

### **3.4.5. Объект исследования**

Как ранее было доказано [60, 62], 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. волнистость. Согласно «Правилам устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов» запрещается навешивать и эксплуатировать подъемные краны с волнистостью [54]; кроме того, до 2003 года не было предусмотрено количественное ограничение радиуса волнистости, при котором возможна дальнейшая эксплуатация таких кранов.

Анализ международного стандарта ИСО 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.

Основными этапами проведения подготовительных работ перед экспериментом 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. При проведении теоретических выводов было предложено 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 были изготовлены из металлической проволоки 8 образцов. 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 (рисунок 3.31) и (рисунок 3.33), так и с равномерным натяжением проволок (рисунок 3.32) и (рисунок 3.34). Аналогичным образом были изготовлены и канаты двойной свивки (рисунки 3.35, 3.37) и (рисунки 3.36, 3.38).

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

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

Пряди 1,3 каната двойной свивки диаметром 3,4 мм подвергались натяжению 10 Н, пряди 2,6 имели натяжение 20 Н, к пряди 4 прикладывалось натяжение 35 Н, к пряди 5 натяжение 12,5 Н, к сердечнику 5 Н.

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

Один образец спирального каната диаметром 2,4 мм был изготовлен с радиусом волнистости  $R_g = 0,24$  мм, а другой 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  $R_g = 0,69$  и  $R_g = 0,58$ .

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

Пряди канат двойной свивки диаметром 3,4 мм подвергались натяжению 5 Н, а пряди канат двойной свивки диаметром 4 мм натяжению 10 Н.

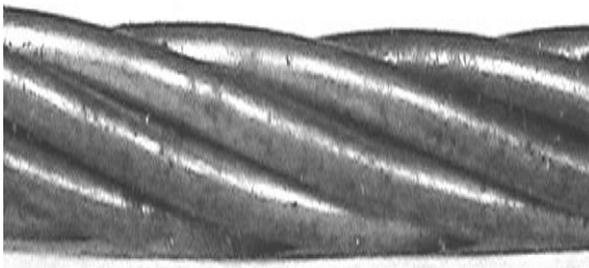


Рисунок 3.31 – Образец № 1 спиральной свивки диаметром 2,4 мм изготовленный с неравномерным натяжением проволок

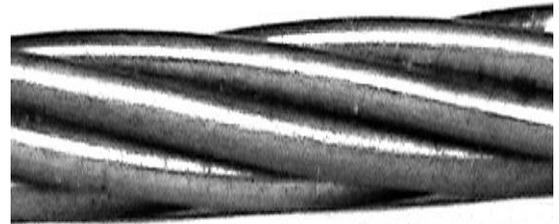


Рисунок 3.32 – Образец № 2 спиральной свивки диаметром 2,4 мм изготовленный с равномерным натяжением проволок

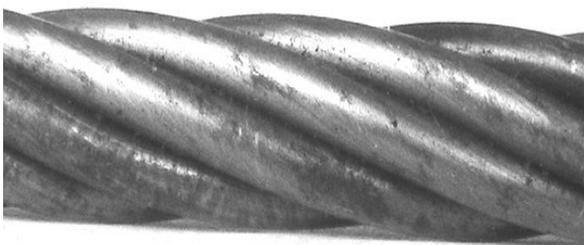


Рисунок 3.33 – Образец № 3 спиральной свивки диаметром 5 мм изготовленный с неравномерным натяжением проволок

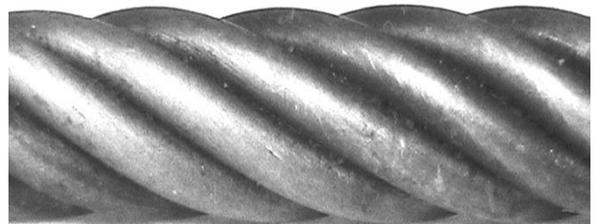


Рисунок 3.34 – Образец № 4 спиральной свивки диаметром 5 мм изготовленный с равномерным натяжением проволок

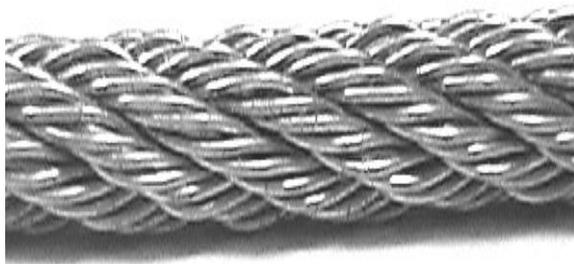


Рисунок 3.35 – Образец № 1 каната двойной свивки диаметром 3,4 мм изготовленный с неравномерным натяжением



Рисунок 3.36 – Образец № 2 каната двойной свивки диаметром 3,4 мм изготовленный с равномерным натяжением прядей

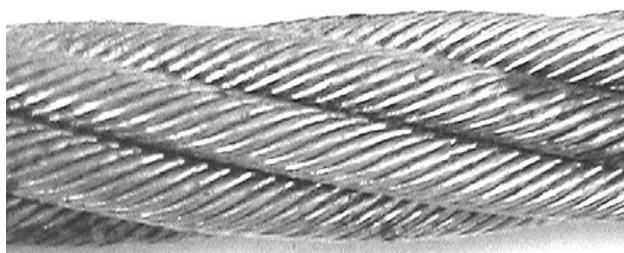


Рисунок 3.37 – Образец № 3 каната двойной свивки диаметром 4 мм изготовленный с неравномерным натяжением прядей прядей

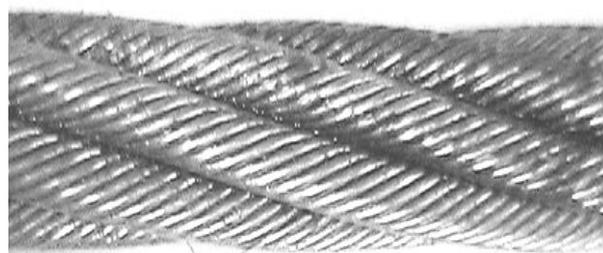


Рисунок 3.38 – Образец № 4 каната двойной свивки диаметром 4 мм изготовленный с равномерным натяжением прядей

В таблице 3.1 представлены основные параметры свивки образцов спиральных канатов.

В таблице 3.2 представлены параметры свивки каната двойной свивки.

Таблица 3.1 – Параметры свивки экспериментальных образцов спиральных канатов

№ 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 3.2 – Параметры свивки экспериментальных образцов каната двойной свивки

№ каната	№1	№2	№3	№4
Конструкция каната	$6 \times 9(1+6) + 1 \times 7(1+6)$	$6 \times 9(1+6) + 1 \times 7(1+6)$	$6 \times 19(1+6+12) + 1 \times 7(1+6)$	$6 \times 19(1+6+12) + 1 \times 7(1+6)$
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	-

Все образцы подъемных канатов изготовлены на действующем оборудовании (рисунки 3.29, 3.30) в лаборатории канатов кафедры АиТТК Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова». 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 [62, 99].

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 залиты баббитом.

### 3.4.6. Экспериментальная установка и измерительная аппаратура

Для проведения эксперимента необходимым условием было создание устройства, которое могло бы производить замер деформаций растяжения и кручения с достаточной точностью в условиях лаборатории с применением разрывной машины УММ-5.

Ввиду отсутствия устройства для исследования напряженно-деформированного состояния подъемных канатов с образовавшимися в них изменениями геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов совместно с доктором техн. наук Хальфиным М.Н. в лаборатории канатов кафедры АиТТК Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» было сконструировано и изготовлено специальное устройство, предназначенное для замера продольной и крутильной деформации подъемных канатов на базе 5-тонной разрывной машине УММ-5, содержащее устройство для замера деформаций и регистрирующую аппаратуру.

Разрывная машина УММ-5 прошла комплекс испытаний, в результате чего получено свидетельство о поверке № 00020342. Свидетельство выдано ФГУ «Ростовский ЦСМ».

Принцип действия устройства состоит в замере деформаций растяжения и кручения на участке каната, изготовленного как с учетом изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, так и без учета изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

Общий вид и конструкция экспериментальной установки представлены на рисунках 3.39 и 3.40. Она смонтирована на базе разрывной машины УММ-5, причем концы образцов каната заливаются баббитом и крепятся в специальную разъемную втулку (рисунок 3.41). Втулки устанавливаются в подшипники и фиксируются, подшипник в свою очередь размещается в захватах машины (рисунок 3.42). С помощью подшипников модель каната осуществляет круговые движения вокруг своей оси, что возможно для замера деформации кручения.

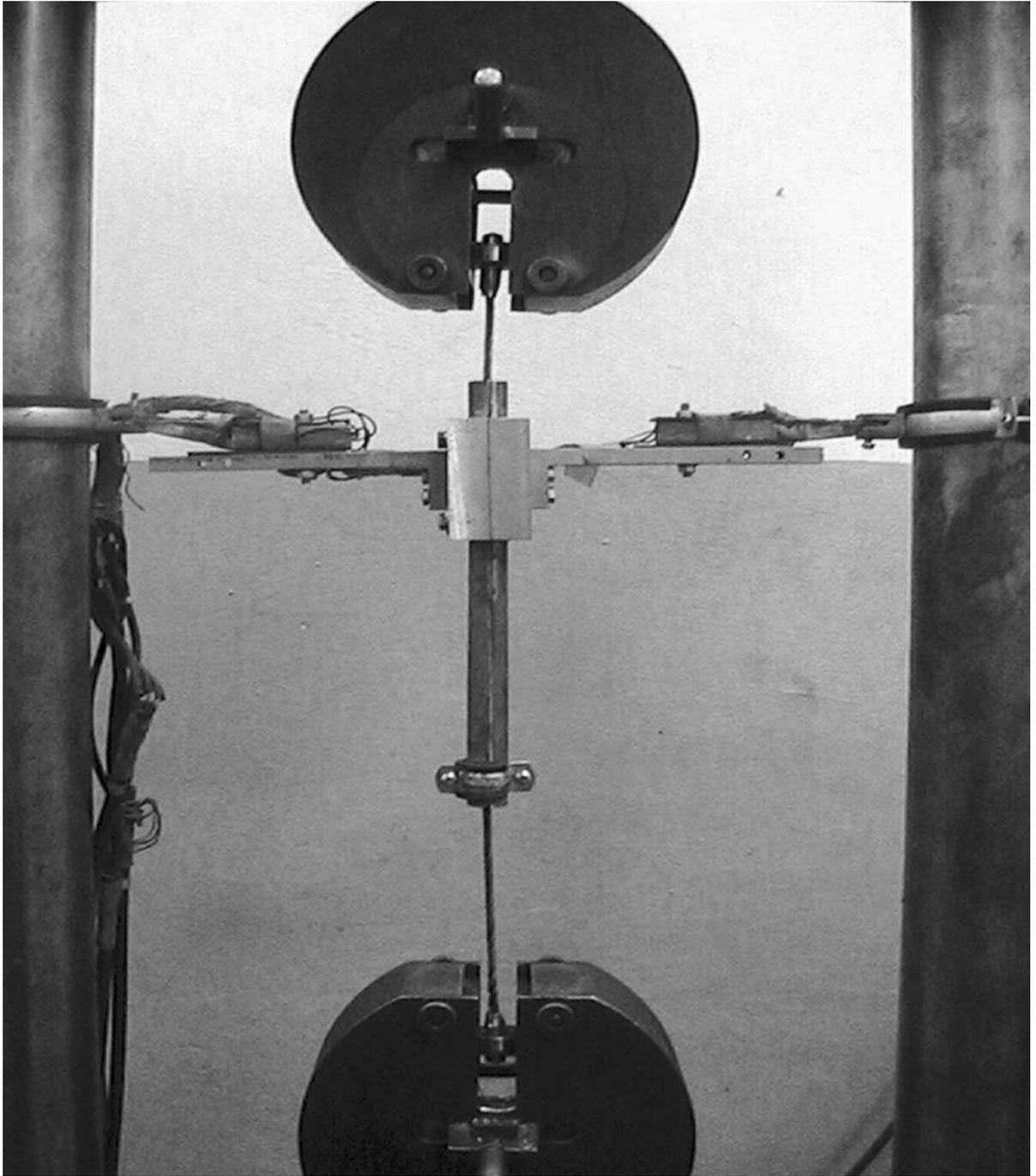


Рисунок 3.39 – Общий вид экспериментальной установки для измерения деформаций растяжения и кручения на участке каната

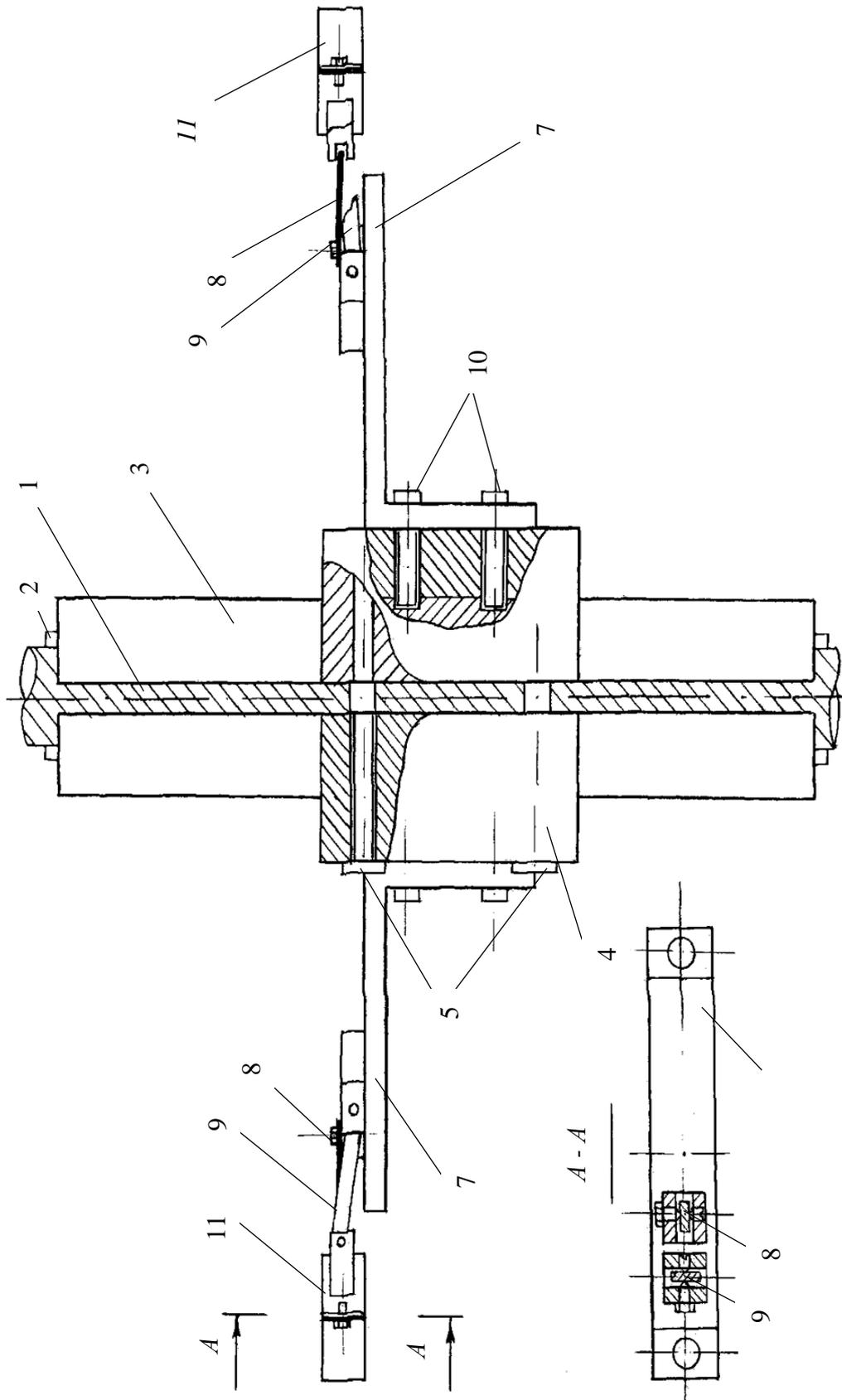


Рисунок 3.40 – Конструкция устройства для замера деформаций растяжения и кручения

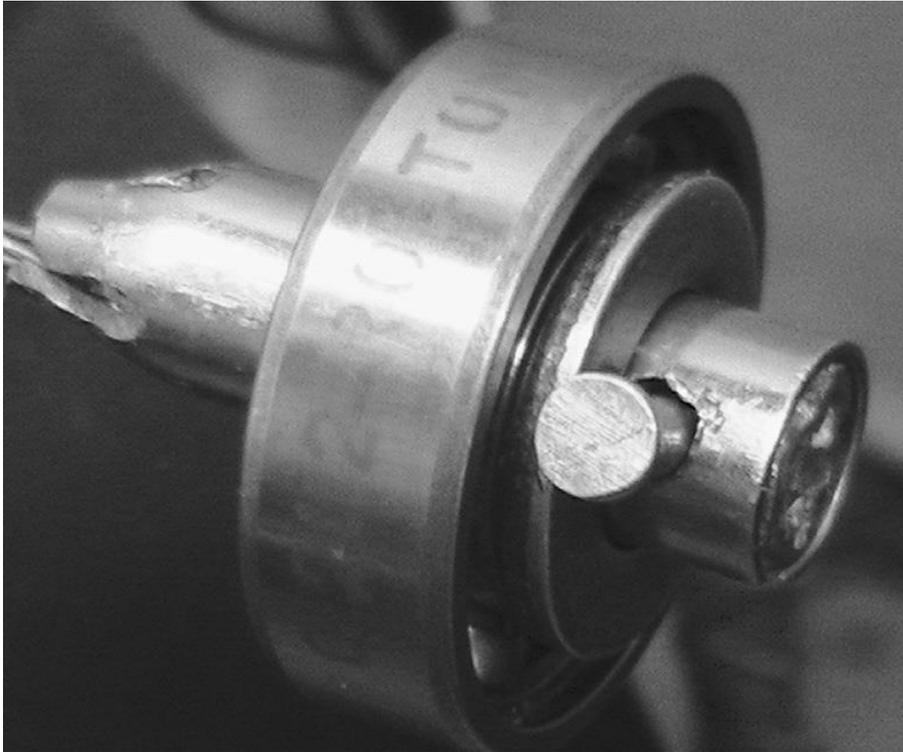


Рисунок 3.41 – Втулка для заделки концов каната

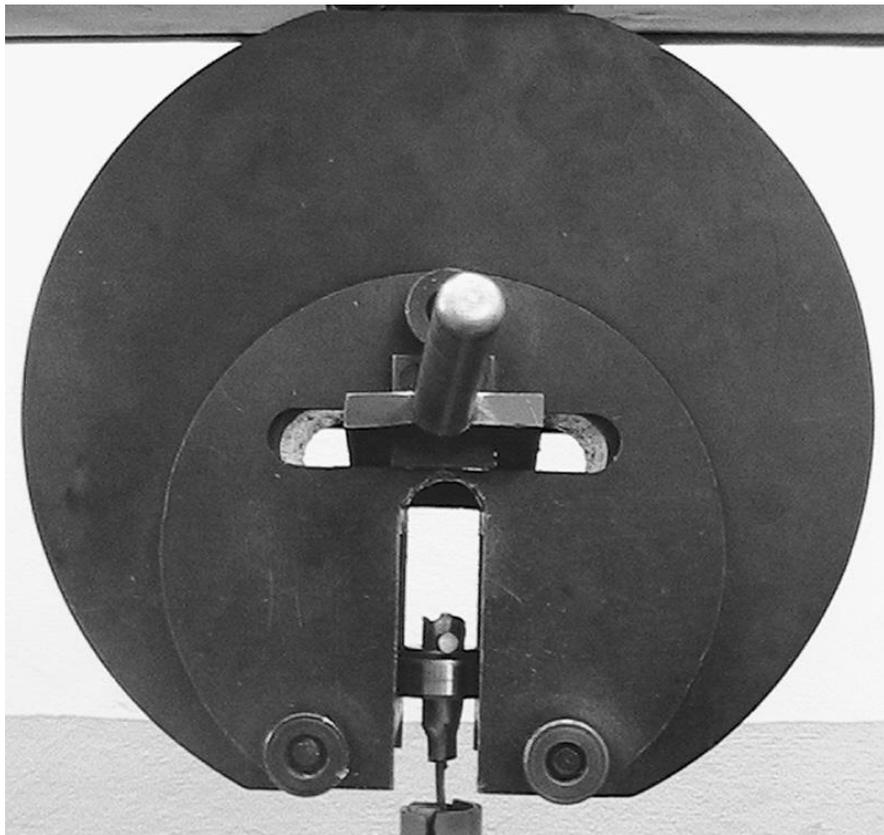


Рисунок 3.42 – Крепление втулки на разрывной машине УММ-5

Установка позволяет проводить испытания канатов при любом из основных случаев внешнего нагружения канатов – «чистое растяжение», когда поворот концов каната исключен, при отсутствии подшипников, «свободно подвешенный груз», «чистое кручение» и «свободное кручение» [1, 2, 9, 27, 72].

При исследовании деформаций (рисунок 3.40) образец каната 1 зажимают разъемной трубой 3, внутри которой установлены вкладыши 2 соответствующие диаметру исследуемого каната. Обтяжка разъемной трубы производится разъемным зажимом 4, путем завинчивания четырех болтов 5.

При приложении соответствующей нагрузки к образцу каната участок 6 укорачивается и удлиняется, в результате чего происходит поворот, обеспечивающий беспрепятственное кручение образца каната за счет установленных подшипников на концах.

Для жесткого соединения разъемной трубы 2 и зажима 4, а также кронштейнов 7, на которых установлены упругие линейки растяжения 8 и линейки кручения 9, используются по два болта 10 на каждом кронштейне 7.

Так как между стойками разрывной машины УММ-5 жестко установлены специальные зажимы в виде хомутов 11, которые предназначены для зажима упругих линеек, то при повороте модели каната происходит фиксирование деформации кручения за счет установленных на них тензисторов.

Сигнал от тензисторов, установленных на упругих линейках 8 и 9 поступает на усилитель и к регистрирующему устройству.

Основной задачей измерительной аппаратуры является простота и надежность, тем временем обеспечивающая точность и достоверность результатов.

В качестве измерительной аппаратуры использовался усилитель 8АНЧ-7М и ПК с платой АЦП 1-154. Схема подключения измерительной аппаратуры представлена на рисунке 3.43.

В качестве тензисторов применялись фольговые тензорезисторы с электрическим сопротивлением  $200 \pm 0,35\%$  Ом длиной 30 мм и шириной 5 мм. К каждому каналу было присоединено по 1 активному  $R_1$  и 1 компенсационному  $R_2$  тензорезистору (рисунок 3.43).

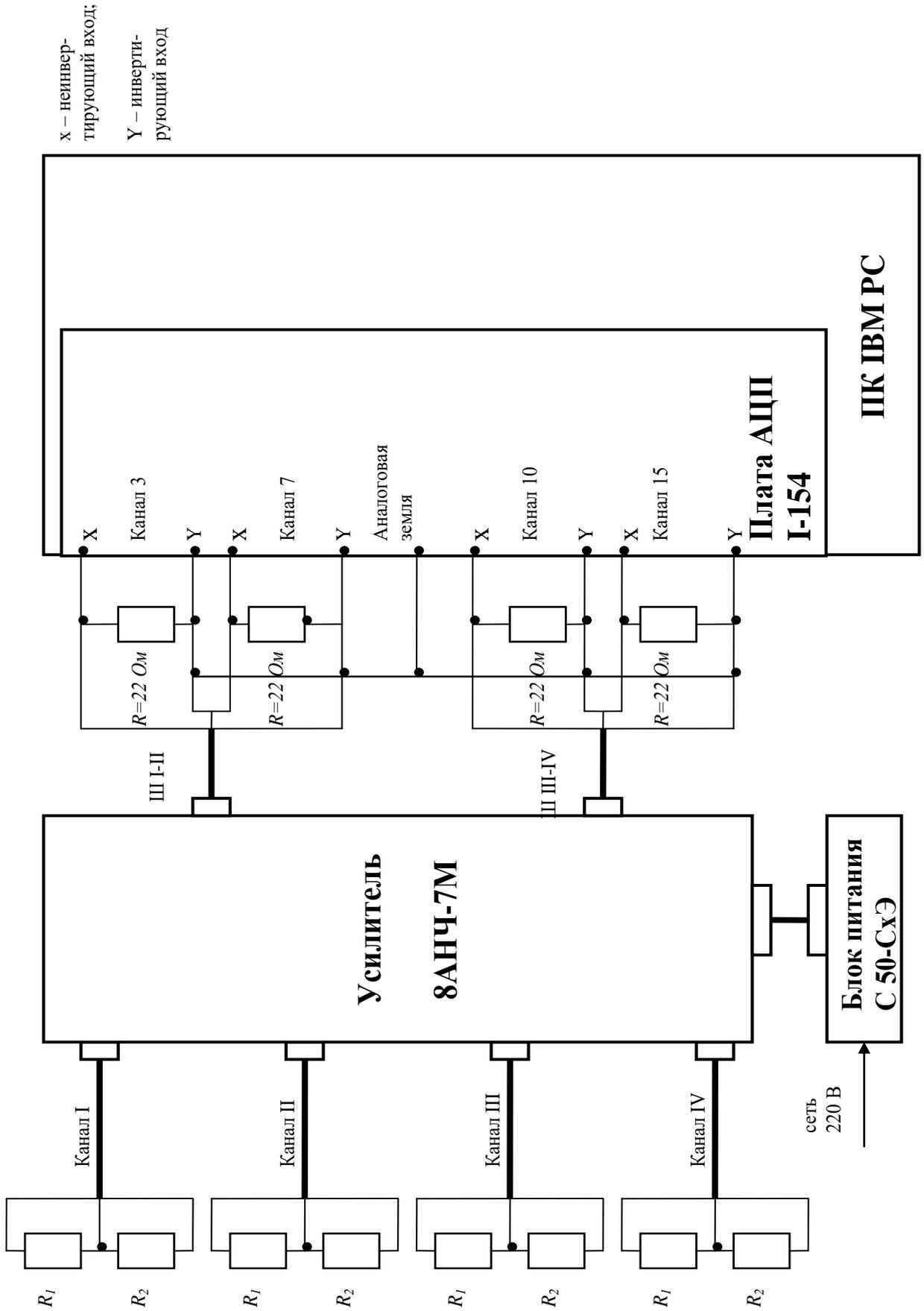


Рисунок 3.43 – Схема подключения измерительной аппаратуры

Для усиления электрического сигнала применялся усилитель 8АНЧ-7М с 8 канальным входом из которых были использованы 4 канала [73], I и III служили для регистрации показаний по удлинению каната, а II и IV для угла поворота каната. Техническая характеристика усилителя 8АНЧ-7М представлена в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Технические данные усилителя 8АНЧ-7М

Напряжение сети питания, В	220±10%
Потребляемая мощность, Вт	275
Время прогрева, минут	20
Число одновременно исследуемых процессов	1-8
Измеряемые деформации ( при одном активном датчике ) <ul style="list-style-type: none"> <li>• на 1-м поддиапазоне, отн.ед.</li> <li>• на 2-м поддиапазоне, отн.ед.</li> <li>• на 3-м поддиапазоне, отн.ед.</li> </ul>	до $0,5 \times 10^{-3}$ до $1,25 \times 10^{-3}$ до $5 \times 10^{-3}$
Выходной ток каждого канала, ма	не менее 30

Для регистрации электрического сигнала от усилителя применялся ПК IBM PC с установленной платой АЦП 1-154, предназначенной для ввода и вывода аналоговой и цифровой информации на персональный IBM. Техническая характеристика АЦП платы 1-154 представлена в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Параметры АЦП 1-154

Количество каналов	<ul style="list-style-type: none"> <li>• дифференциальных 16</li> <li>• с общей землёй 32</li> </ul>
Разрядность	12 бит
Время преобразования	1.7 мкс
Входное сопротивление	2 МОм
Диапазон входного сигнала	±5.12В, ±2.56В, ±1.024В
Максимальная частота преобразования	70 кГц
Защита входов	<ul style="list-style-type: none"> <li>• при включенном питании компьютера входы защищены на ±20 В</li> <li>• при выключенном питании входы защищены на ±10 В</li> </ul>

Окончание таблицы 3.4

Интегральная нелинейность преобразования	$\pm 0.8$ МЗР, макс. $\pm 1.2$ МЗР
Дифференциальная нелинейность преобразования	$\pm 0.5$ МЗР, макс. $\pm 0.75$
Отсутствие пропуска кодов	гарантировано 12 бит
Время установления аналогового тракта при максимальном перепаде напряжения (временные параметры приведены для точности установления аналогового тракта до 1 МЗР)	4 мкс
Межканальное прохождение	<ul style="list-style-type: none"> <li>• На полосе 10 кГц меньше 0.5 МЗР</li> <li>• На полосе 50 кГц 1 МЗР</li> </ul>
Смещение нуля	$\pm 0.5$ МЗР, макс. 1 МЗР
Полоса пропускания сигнала	не более 250 кГц

Устройство для замера деформаций растяжения и кручения (рисунки 3.39-3.40) было испытано в лаборатории канатов кафедры АиГТК Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» с канатами спиральной свивки диаметром 2,4 мм и 5 мм, а также канатами двойной свивки диаметром 3,4 мм и 4 мм, как с учетом изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, так и без учета изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

### **3.4.7. Подготовка устройства к работе для измерения деформаций растяжения и кручения подъемного каната с учетом волнистости**

При проведении эксперимента в лабораторных условиях должны соблюдаться требования техники безопасности при работе персонала с данным оборудованием.

#### **I. Подготовка разрывной машины УММ-5 к работе:**

1. Распаковать машину, протереть и очистить от густой смазки.
2. Перед включением мотора машины следует отключить суппорт и проверить правильность направления вращения ходового винта.
3. Произвести смазку редуктора.
4. Включить машину в сеть переменного тока посредством рубильника.

II. Подготовка прибора для измерения деформаций растяжения  
и кручения к работе:

1. Вынуть прибор из упаковочного ящика.
2. Подготовить к работе и проверить работоспособность аппаратуры, предназначенной для замера, регистрации деформаций, а также для питания аппаратуры:
  - а) Подготовка тензоусилителя 8АНЧ-7М.
  - б) Подготовка ПК IBM PC.
  - в) Проверка блока питания тензоусилителя 8АНЧ-7М.
3. Подобрать вкладыши, соответствующие диаметру каната, предназначенные для зажима образца каната разъемной трубой.
4. Установить образец каната с подшипниками на концах в зажимы разрывной машины УММ-5.
5. Подготовка рабочего места для проведения эксперимента.
6. Произвести осмотр целостности и работоспособности прибора для замера деформаций.
7. Произвести осмотр целостности тензоусилителя, шлейфов и блока питания.
8. Проверить готовность прибора для замера деформаций, тензоусилителя, ПК IBM PC и блока питания.

III. Порядок монтажа оборудования на разрывную машину УММ-5  
и эксплуатация прибора:

1. Закрепить прибор на опытном образце каната.
2. Закрепить на устройстве линейки растяжения и кручения.
3. Закрепить на линейках растяжения и кручения тензодатчики.
4. Произвести сбор электрической схемы, представленной на рисунке 3.42.
5. Произвести подключение электрической схемы к сети переменного тока.
6. Произвести настройку тензоусилителя с установкой нулевого значения и регистрирующего устройства.
7. Произвести настройку прибора.

8. Произвести тестирование АЦП платы 1-154.
9. Произвести цикл «нагрузка-разгрузка» образца каната с помощью разрывной машины УММ-5 с записью показаний деформаций растяжения и кручения.
10. Отключить питание электроприборов и разрывной машины УММ-5.

#### **3.4.8. Методика проведения экспериментальных исследований**

Для совпадения экспериментальных данных с теоретическими необходимо соблюдать определенные условия эксперимента, по возможности совпадающими с условиями эксплуатации канатов.

Замер деформаций растяжения и кручения производился на разрывной машине УММ-5 с помощью специально изготовленного устройства (рисунок 3.39). Экспериментальные исследования производились в лаборатории канатов кафедры АиТТК Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» на образцах с различным натяжением и с равномерным натяжением винтовых элементов, изготовленных на канатовьюющей машине (рисунок 3.28).

Испытывались образцы рабочей длиной 0,55 м, спиральной свивки диаметром 2,4 мм и 5 мм, а также канаты двойной свивки диаметром 3,4 и 4 мм.

Изготовленное устройство для замера деформаций позволяет проводить два варианта испытаний при неподвижных и вращающихся концах каната.

Устройство навешивалось на экспериментальный образец и закреплялось на разрывной машине УММ-5. Натяжение образца определялось по динамометру входящему в комплект машины УММ-5, удлинение и угол поворота каната по средствам изгиба упругих линеек, на которых установлены тензорезисторы.

Все испытания проводились до натяжения, соответствующего 0,6 разрывного усилия каната [85]. При каждом варианте испытания образцы подвергались нагружению с последующей разгрузкой и при каждом испытании составлялись таблицы отмеченных параметров.

Перед проведением эксперимента необходимо было получить тарифовочные графики зависимости  $\varepsilon_r$  каната от нагрузки  $P_i$ , действующей на этот канат. Тарифовка экспериментальных образцов проводилась на той же измерительной аппаратуре, что и при исследовании канатов [45].

Сейчас широко используется разработанная М.Ф. Глушко и М.А. Букштейном теория расчета механических характеристик каната в зависимости от натяжения в нем  $P$ . В теории проф. М.Ф. Глушко принято допущение. Пряди или проволоки, расположенные в одном слое прямого каната, имеют одинаковые геометрические параметры и механические свойства. В действительности вследствие различия геометрических параметров и механических свойств перемещения винтовых элементов, находящихся в одном слое, неодинаковы. Винтовой элемент, имеющий большую длину в сравнении с другими, при действии растягивающей нагрузки, получает меньшие деформации и наоборот.

Кроме того, в литературе отсутствуют данные по определению удлинения каната от натяжения для случая, когда в канате имеются различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, а также когда он может свободно раскручиваться.

Таким образом, основные положения данной методики, по существу, сводятся к следующему:

1. Для всех исследуемых образцов канатов определить разрывные нагрузки.
2. Исследовать канаты с различным натяжением винтовых элементов и с равномерным натяжением.
3. Определить зависимости  $\varepsilon_r(P_i)$  и  $\theta(P_i)$ , для канатов, как с различным натяжением винтовых элементов, так и с равномерным натяжением.
4. Провести тарифовку исследуемых образцов.

### **3.4.9. Результаты экспериментальных исследований по нагружению канатов с учетом волнистости**

Экспериментальные исследования с применением сконструированного устройства и методики проведения исследований проводились в лаборатории канатов кафедры АиТТК Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» на образцах с различным натяжением и с равномерным натяжением винтовых элементов.

Устройство крепилось на экспериментальном образце каната, в свою очередь образец устанавливался в зажимы разрывной машины УММ-5. Аппаратура устанавливалась на расстоянии 2 м в специально отведенное место.

Для подтверждения нашей методики в целом и проверки достоверности результатов, полученных на экспериментальных образцах, изготовленных с учетом различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, необходимо было вначале получить тарировочные графики канатов с равномерным натяжением винтовых элементов (рисунки 3.44–3.51).

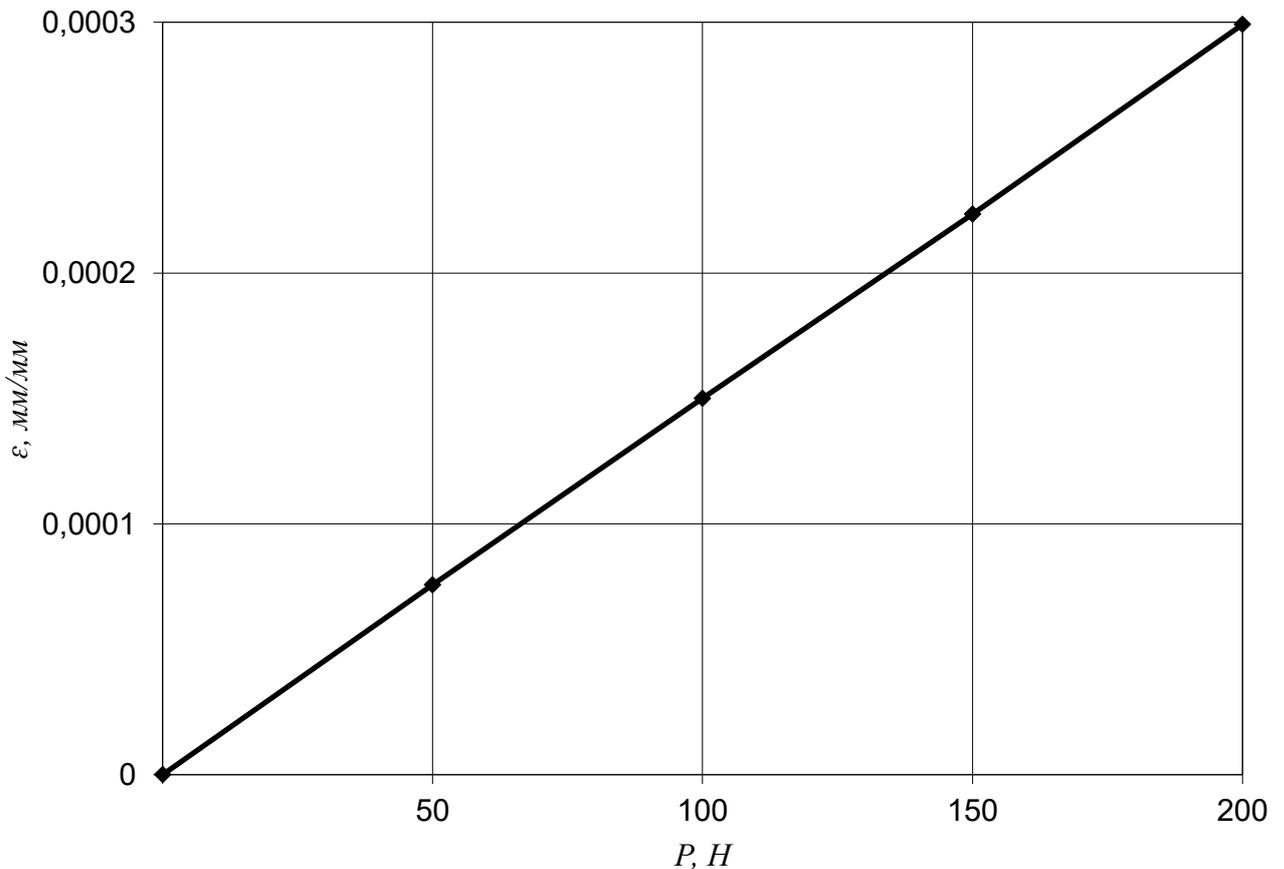


Рисунок 3.44 – Тарировочный график при растяжении спирального каната диаметром 2,4 мм с равномерным натяжением проволок

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. Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 3.5. В таблице 3.5 занесены средние значения удлинение и угла поворота, а также деформаций растяжение и кручение соответственно при определенном натяжении.

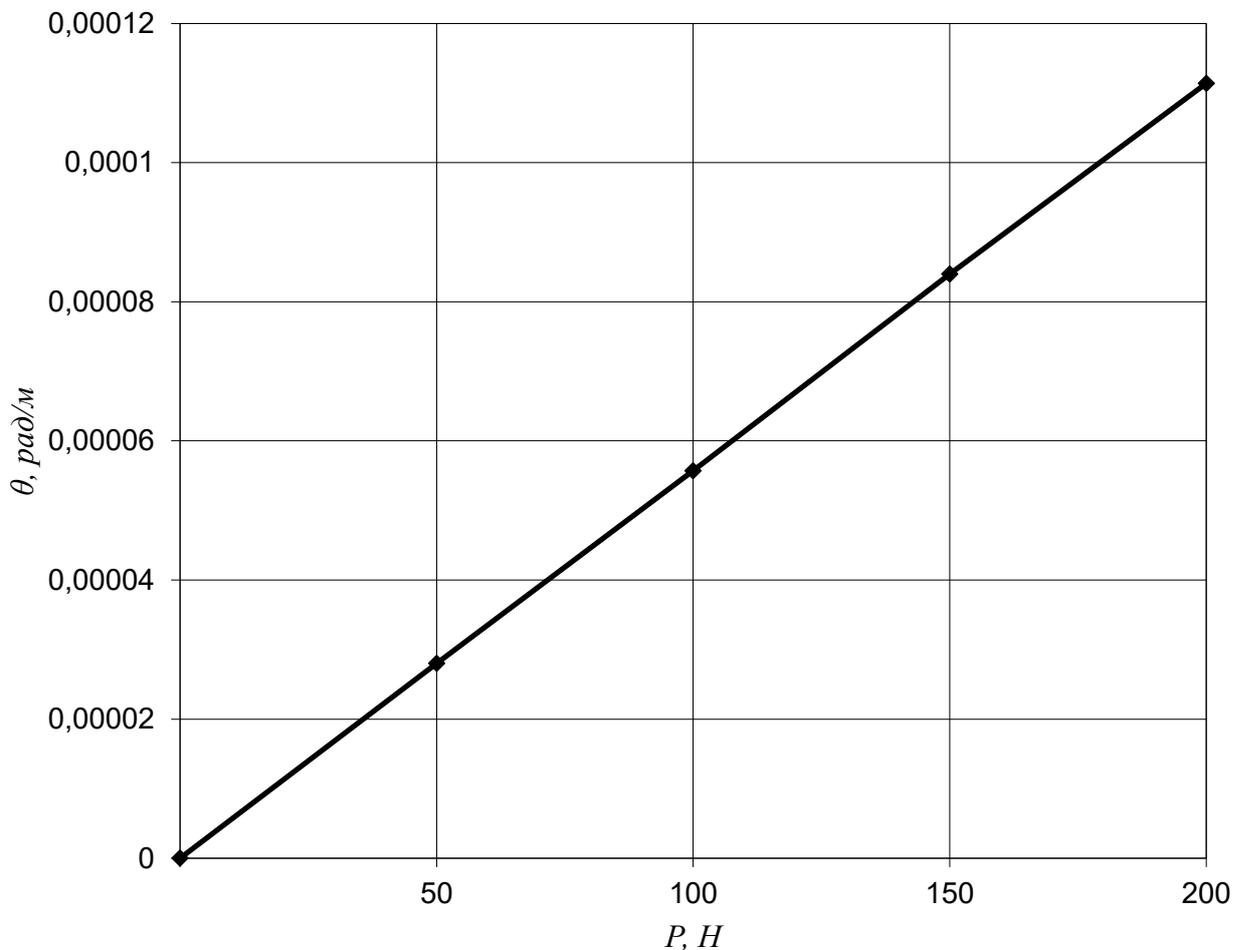


Рисунок 3.45 – Тарировочный график при кручении спирального каната диаметром 2,4 мм с равномерным натяжением проволок

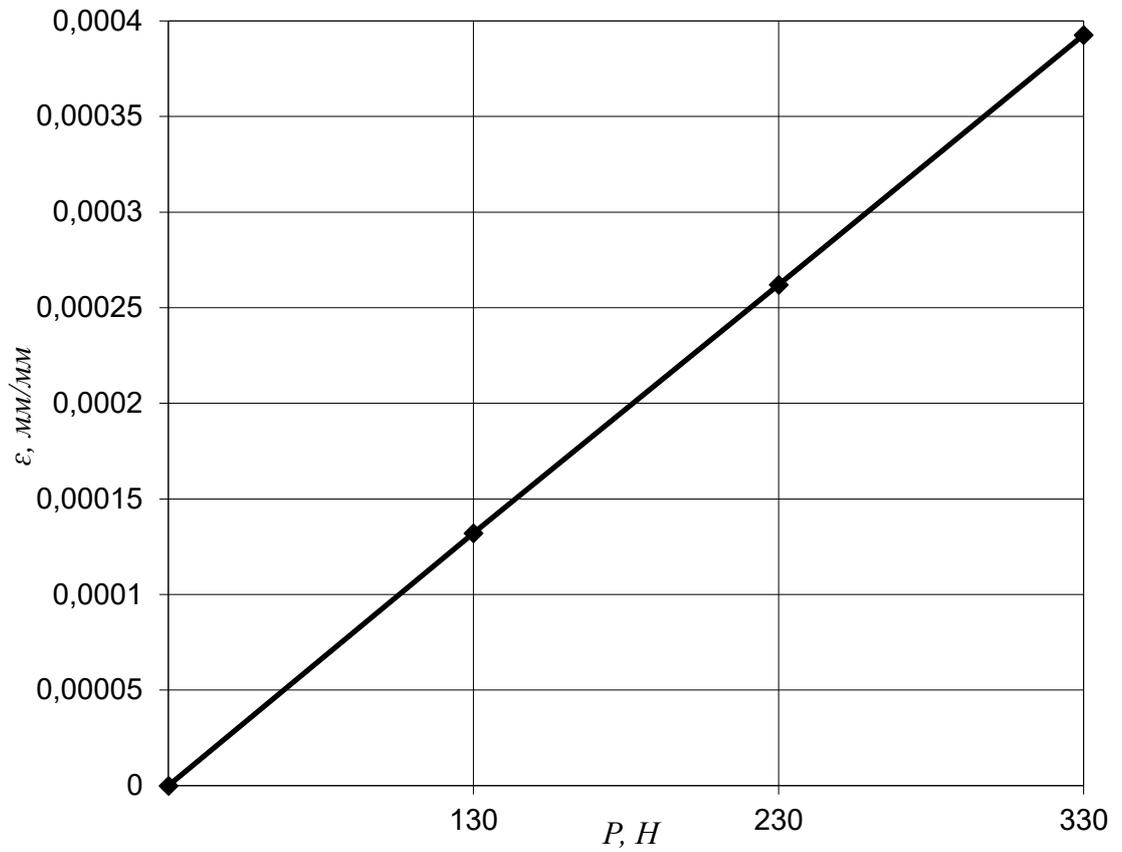


Рисунок 3.46 -Тарировочный график при растяжении спирального каната диаметром 5 мм с равномерным натяжением проволок

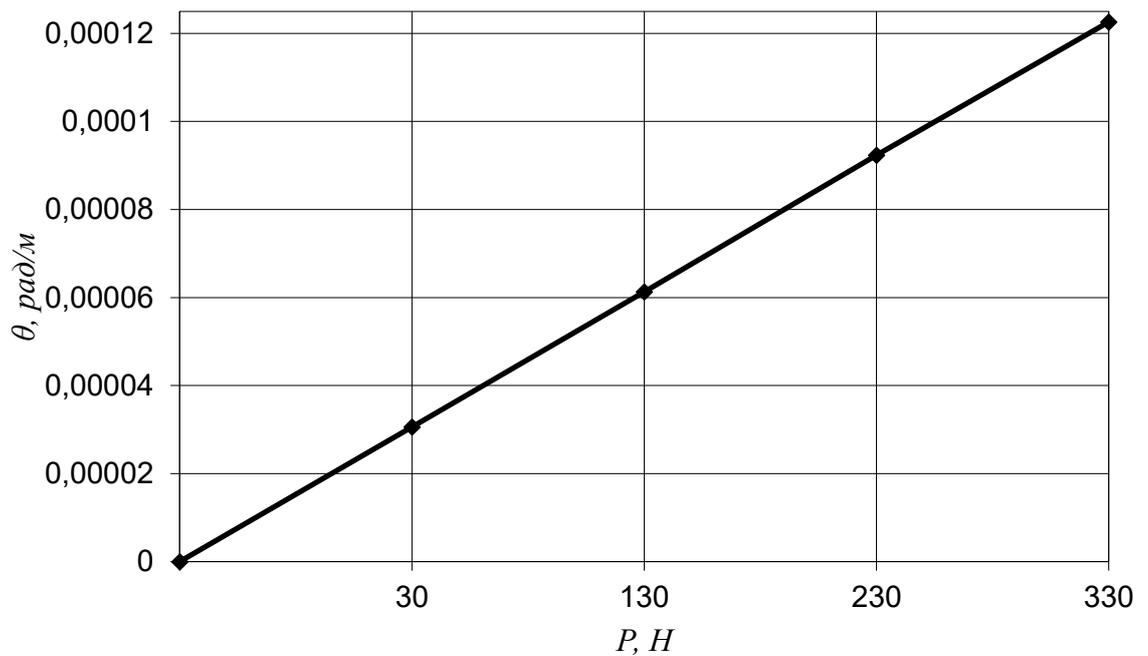


Рисунок 3.47 – Тарировочный график при кручении спирального каната диаметром 5 мм с равномерным натяжением проволок

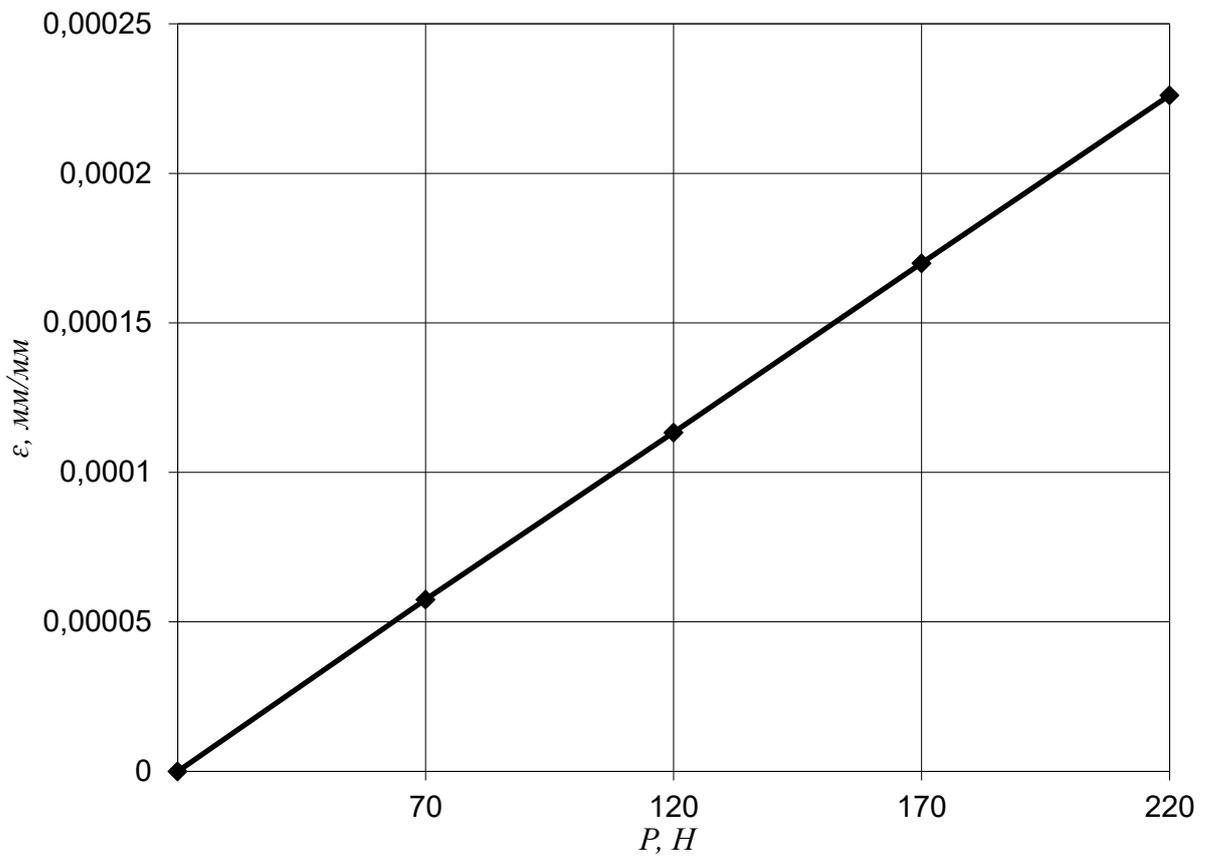


Рисунок 3.48 – Тарировочный график при растяжении каната двойной свивки диаметром 3,4 мм с равномерным натяжением прядей

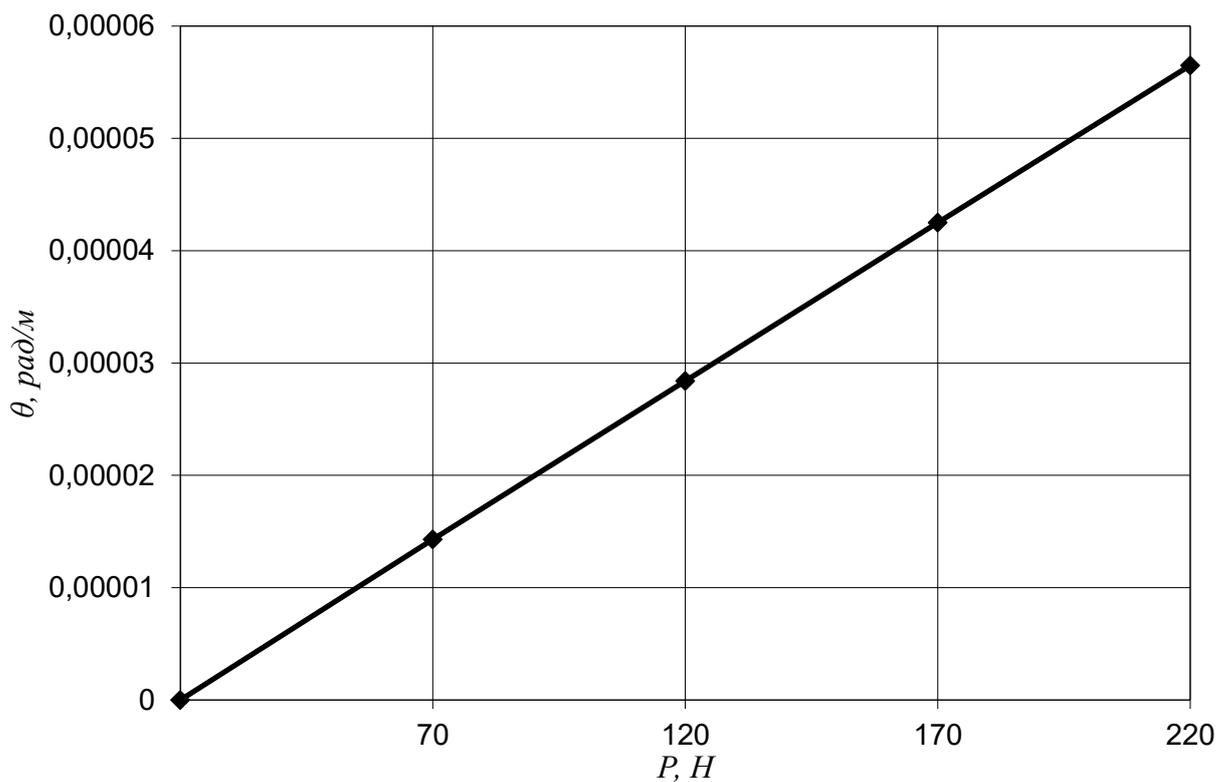


Рисунок 3.49 - Тарировочный график при кручении каната двойной свивки диаметром 3,4 мм с равномерным натяжением прядей

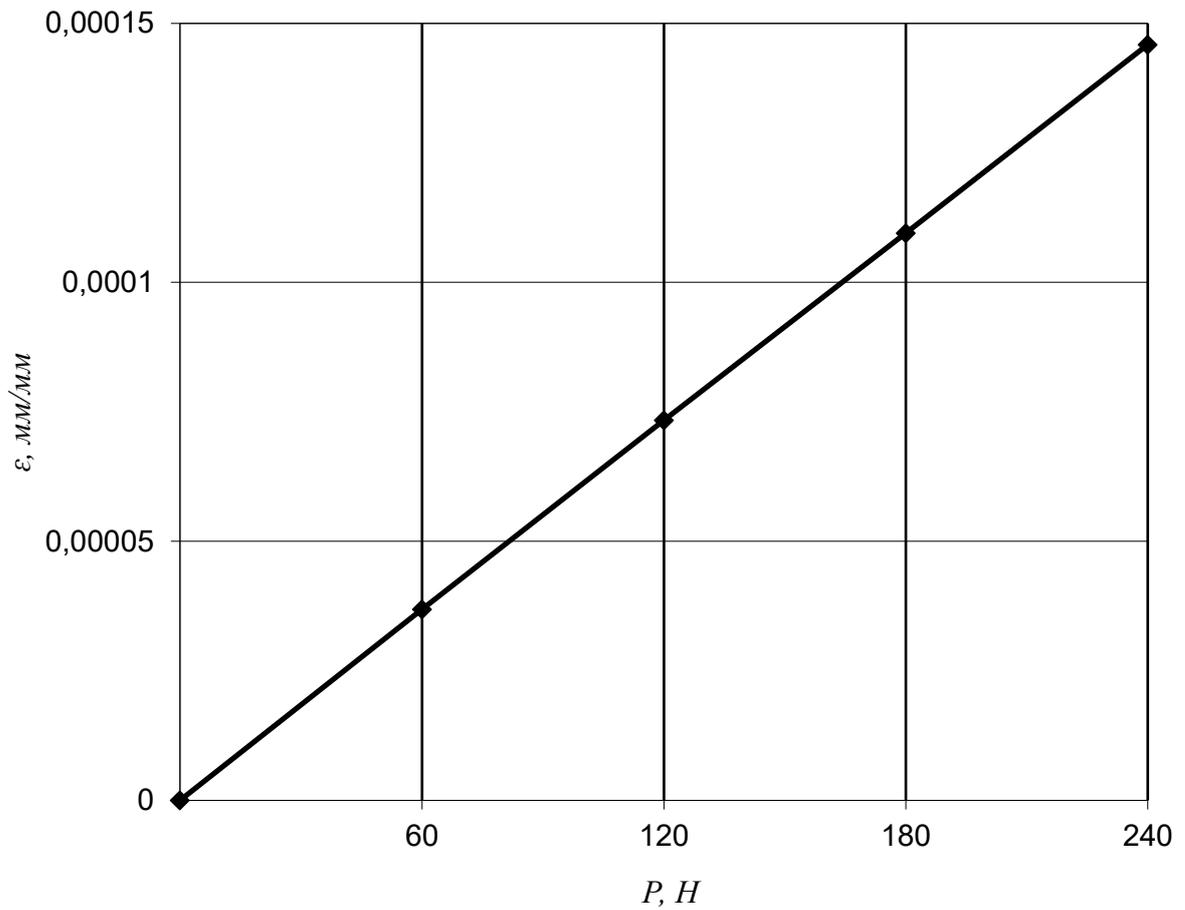


Рисунок 3.50 - Тарировочный график при растяжении каната двойной свивки диаметром 4 мм с равномерным натяжением прядей

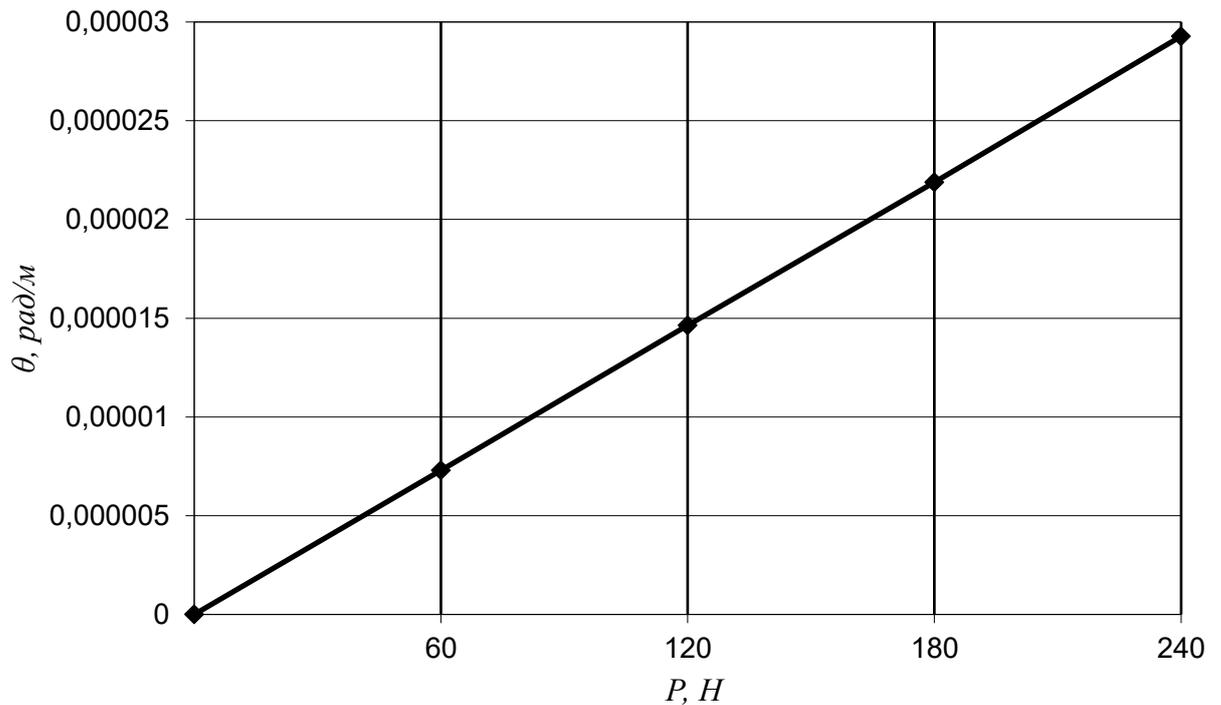


Рисунок 3.51 - Тарировочный график при кручении каната двойной свивки диаметром 4 мм с равномерным натяжением прядей

Таблица 3.5 – Экспериментальные значения удлинения и угла поворота канатов

№ п/п	Конструкция каната	Диаметр каната, мм	$R_g$ , мм	Удлинение, мм	Угол поворота, град
				при 1000 Н	при 1000 Н
1	1+6	2,4	0,24	0,6	0,0037
2	1+6	5	0,58	0,85	0,012
3	6×9(1+6)+ +1×7(1+6)	3,4	0,691	0,55	0,008
4	6×9(1+6)+ +1×7(1+6)	4	0,58	0,41	0,0078

После сопоставления с длиной образца получим значения деформаций растяжение и кручение, которые представлены в таблице 3.6.

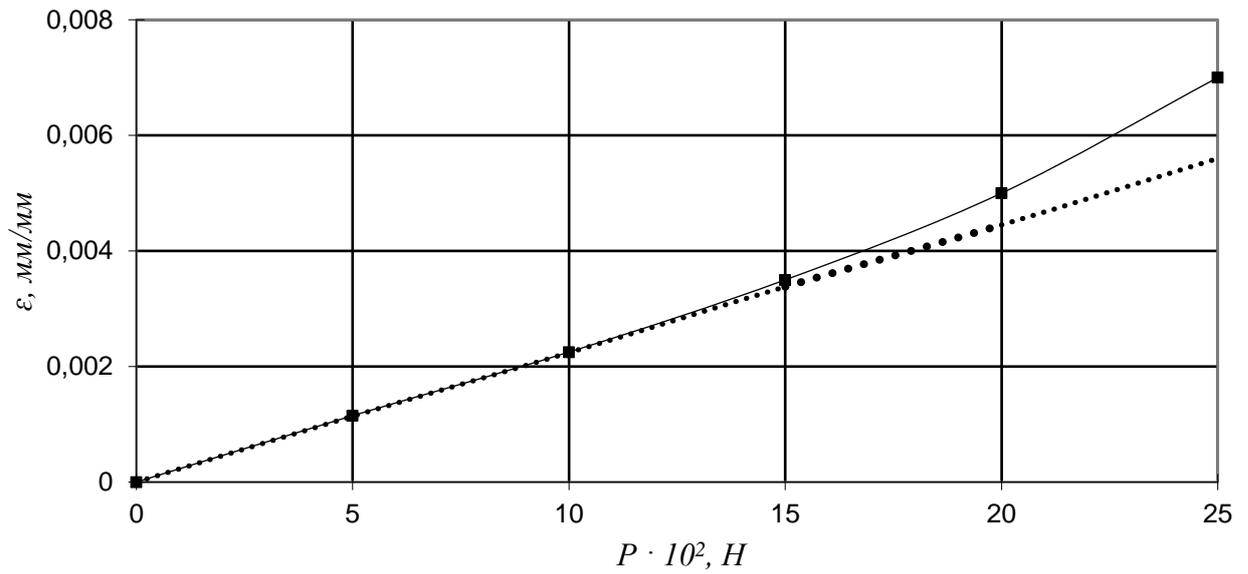
Таблица 3.6 – Экспериментальные значения деформаций растяжение и кручение

№ п/п	Конструкция каната	Диаметр каната, мм	$R_g$ , мм	Удлинение, $\varepsilon$ , мм/мм	Кручение, $\theta$ , 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
0,0075	0,001479	15000				
3	6×9(1+6)+ +1×7(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.	6×9(1+6)+ +1×7(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

Рассмотрим влияние натяжения на деформации растяжение и кручение стальных канатов с равномерным натяжением винтовых элементов, а также канатов с учетом изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

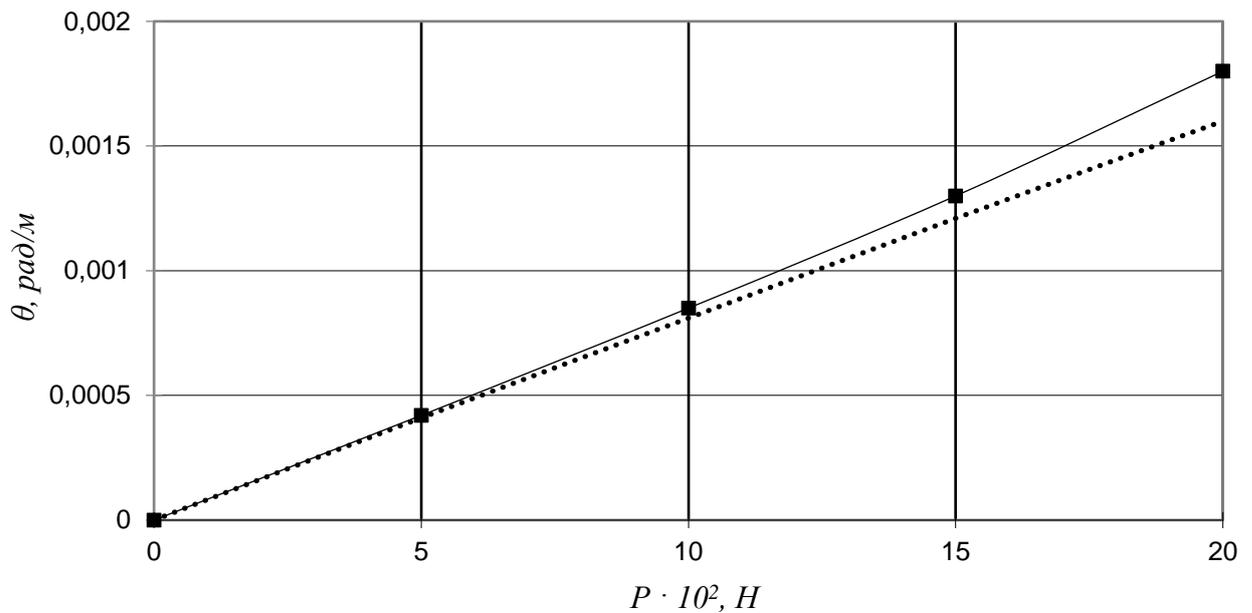
На рисунках 3.52–3.59 представлены зависимости  $\varepsilon(P_i)$  и  $\theta(P_i)$  для канатов, изготовленных как с равномерным натяжением винтовых элементов, так и с учетом неравномерности геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

В результате анализа рисунков 3.52–3.59 можно сделать вывод, 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 1,3 и 1,33 раза больше, а кручения в 1,38 и 2 раза, в среднем, относительно каната с одинаковыми геометрическими параметрами и механическими свойствами проволок. Для канатов двойной свивки диаметром 3,4 и 4 мм деформации растяжения больше в 1,6 и 1,44 раза, а кручение в 1,4 и 1,2 раза соответственно, в среднем. Отсюда можно сделать вывод, что при исследовании напряженно-деформированного состояния канатов деформации растяжения и кручения при приложении нагрузки к канату, изготовленному с учетом различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов (волнистости) в среднем 1,5 раза больше деформаций, чем у канатов с одинаковыми геометрическими параметрами и механическими свойствами винтовых элементов.



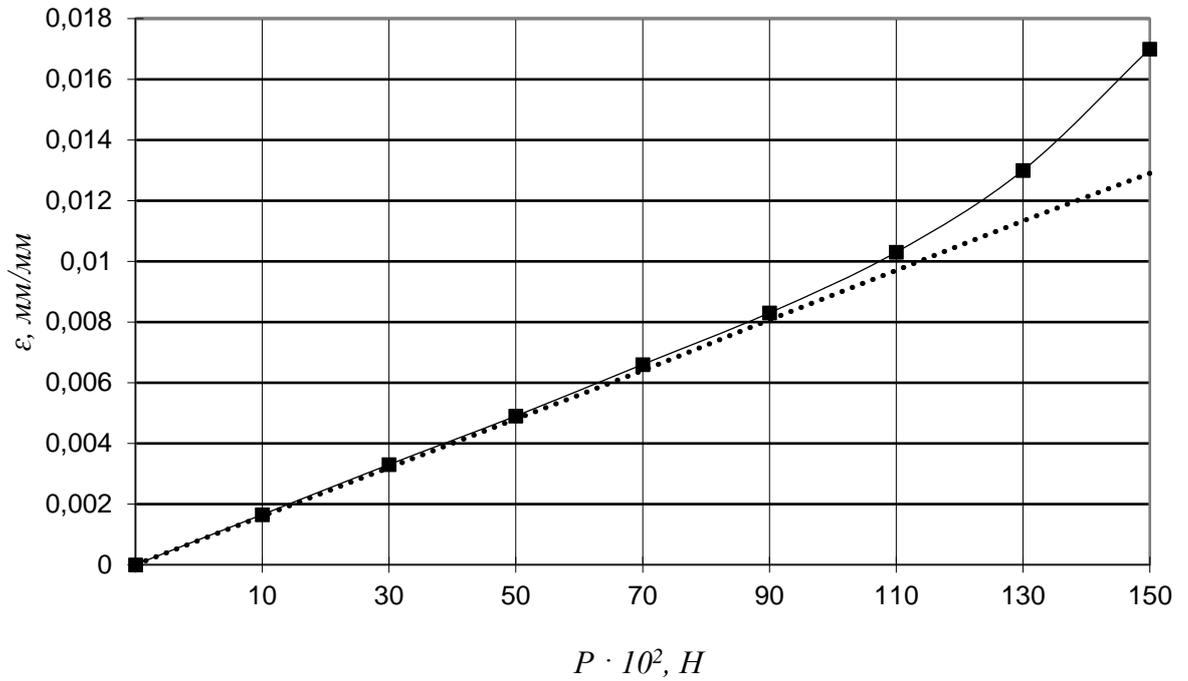
- с учетом неравномерности геометрических параметров и механических свойств проволок однопрядного каната
- ..... с равномерным натяжением проволок однопрядного каната

Рисунок 3.52 – Влияние натяжения на деформацию растяжения для канатов диаметром 2,4 мм



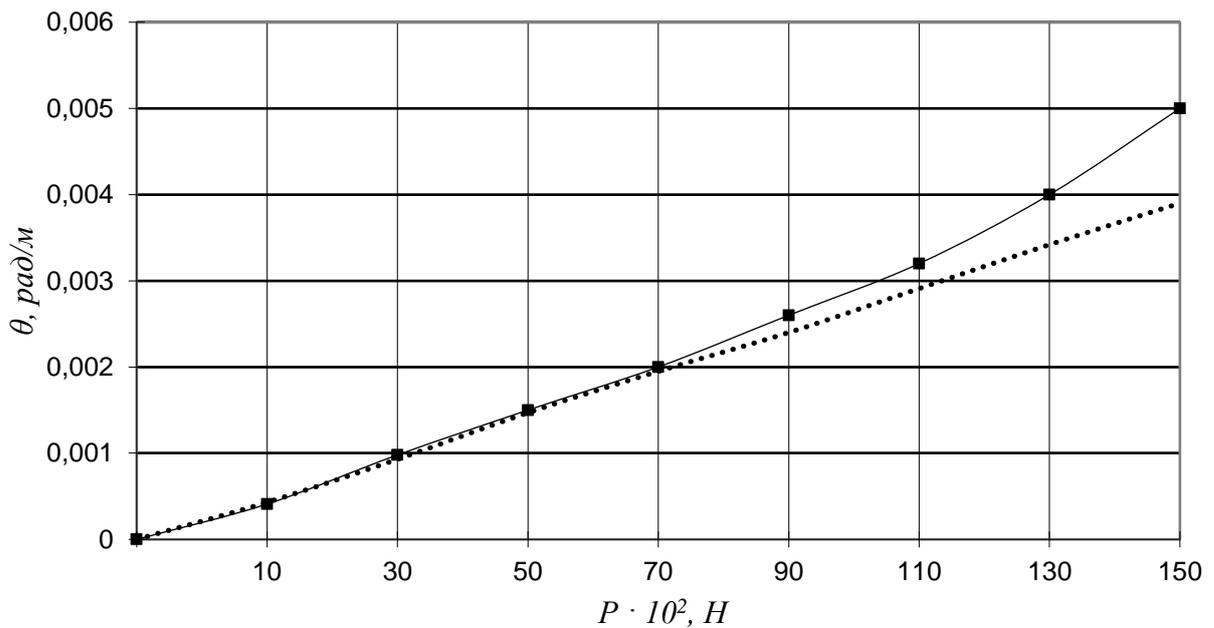
- с учетом неравномерности геометрических параметров и механических свойств проволок однопрядного каната
- ..... с равномерным натяжением проволок однопрядного каната

Рисунок 3.53 – Влияние натяжения на деформацию кручения для канатов диаметром 2,4 мм



- с учетом неравномерности геометрических параметров и механических свойств проволок однопрядного каната
- ..... с равномерным натяжением проволок однопрядного каната

Рисунок 3.54 – Влияние натяжения на деформацию растяжения для канатов диаметром 5 мм



- с учетом неравномерности геометрических параметров и механических свойств проволок однопрядного каната
- ..... с равномерным натяжением проволок однопрядного каната

Рисунок 3.55 – Влияние натяжения на деформацию кручения для канатов диаметром 5 мм

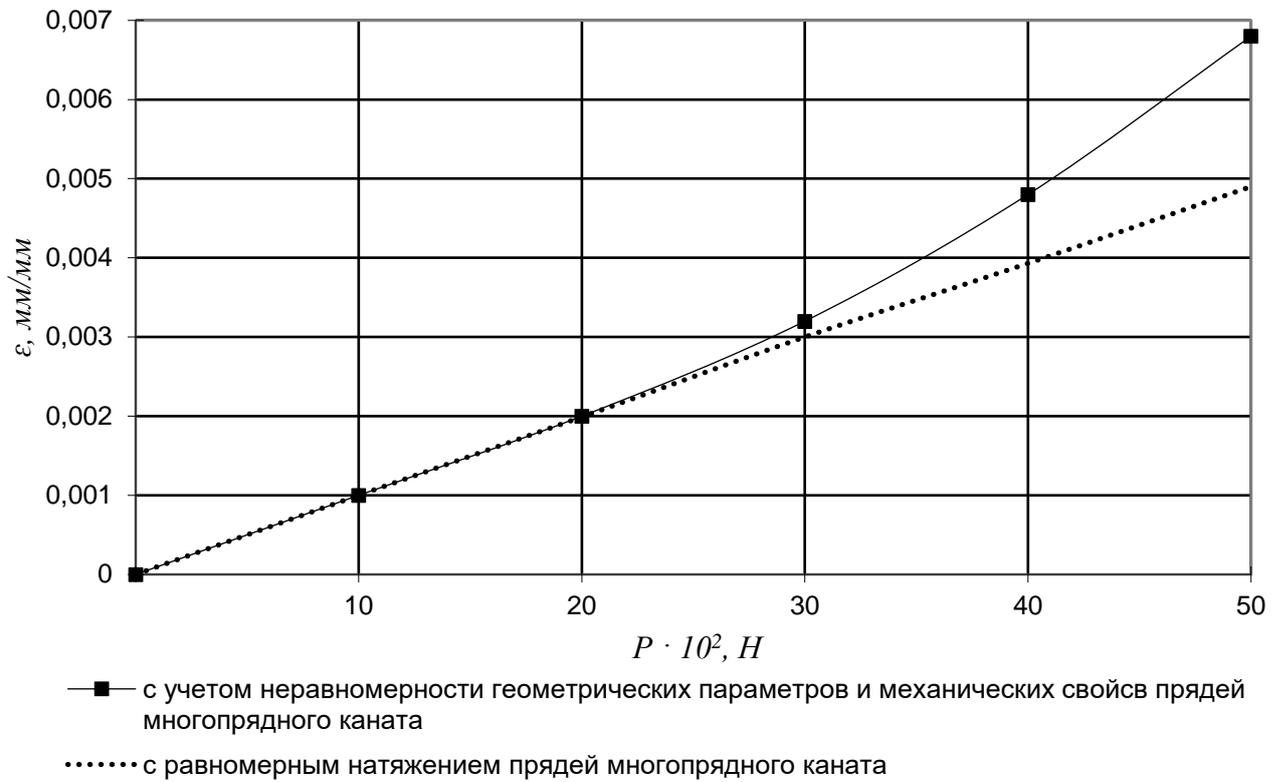


Рисунок 3.56 – Влияние натяжения на деформацию растяжения для канатов диаметром 3,4 мм

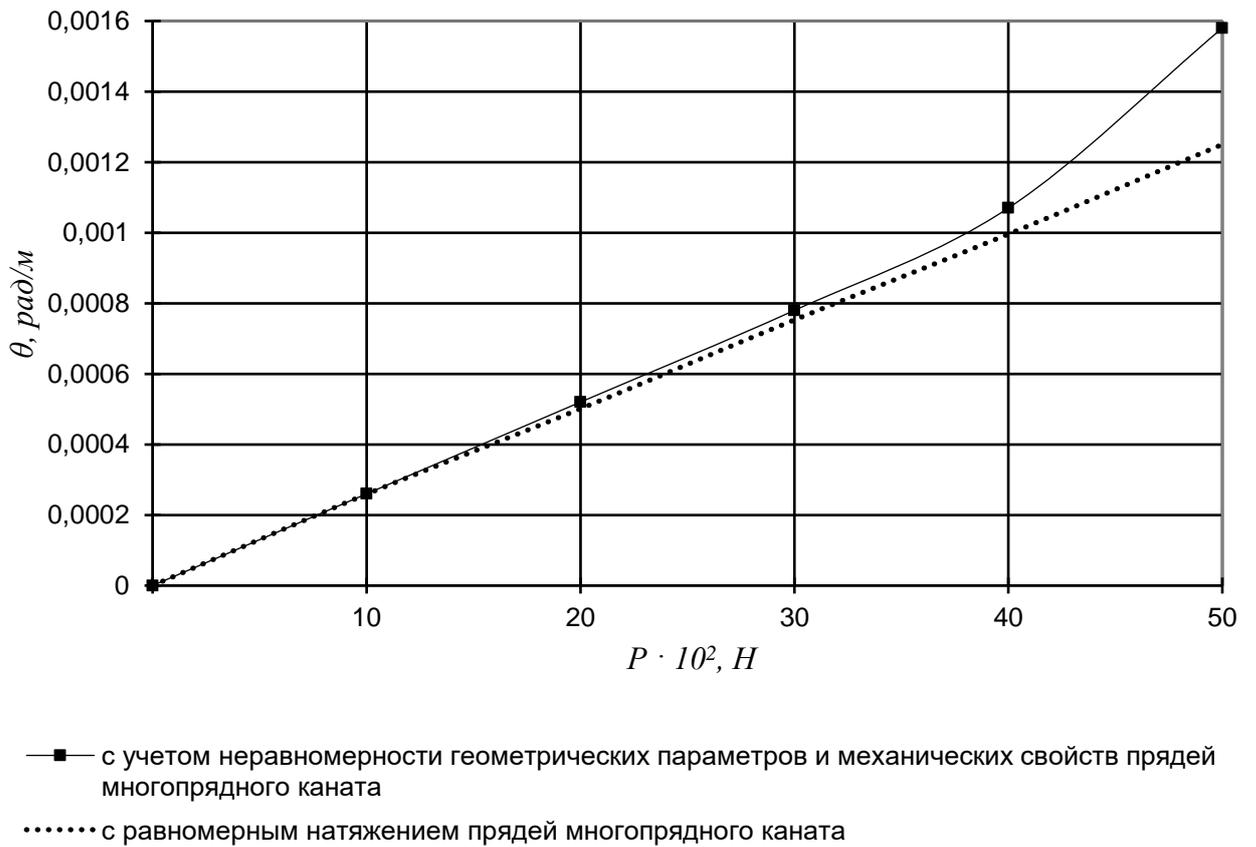


Рисунок 3.57 – Влияние натяжения на деформацию кручения для канатов диаметром 3,4 мм

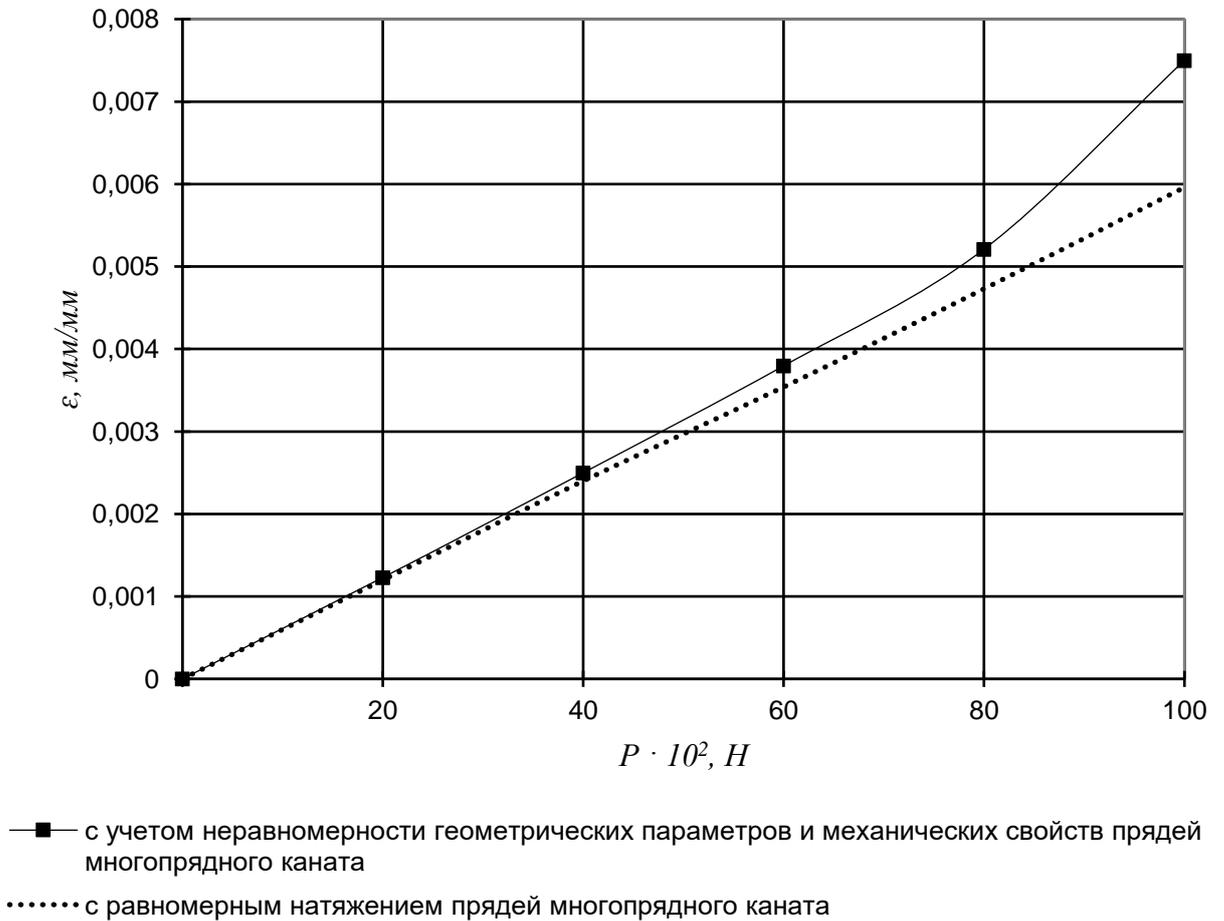


Рисунок 3.58 – Влияние натяжения на деформацию растяжения для канатов диаметром 4 мм

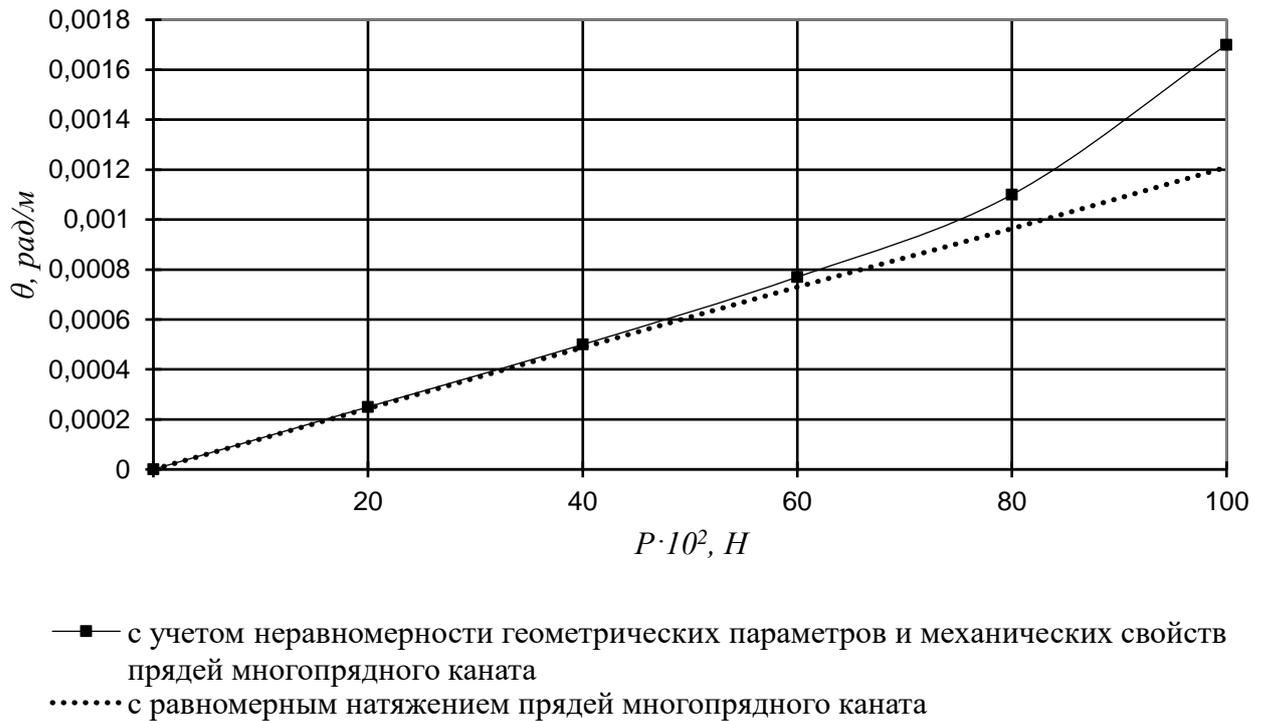


Рисунок 3.59 – Влияние натяжения на деформацию кручения для канатов диаметром 4 мм

Для более углубленного изучения механических характеристик подъемных канатов с помощью нелинейной статики рассмотрим влияние деформаций растяжение и кручение на дополнительные напряжения растяжения, которые представлены на рисунках 3.60, 3.61.

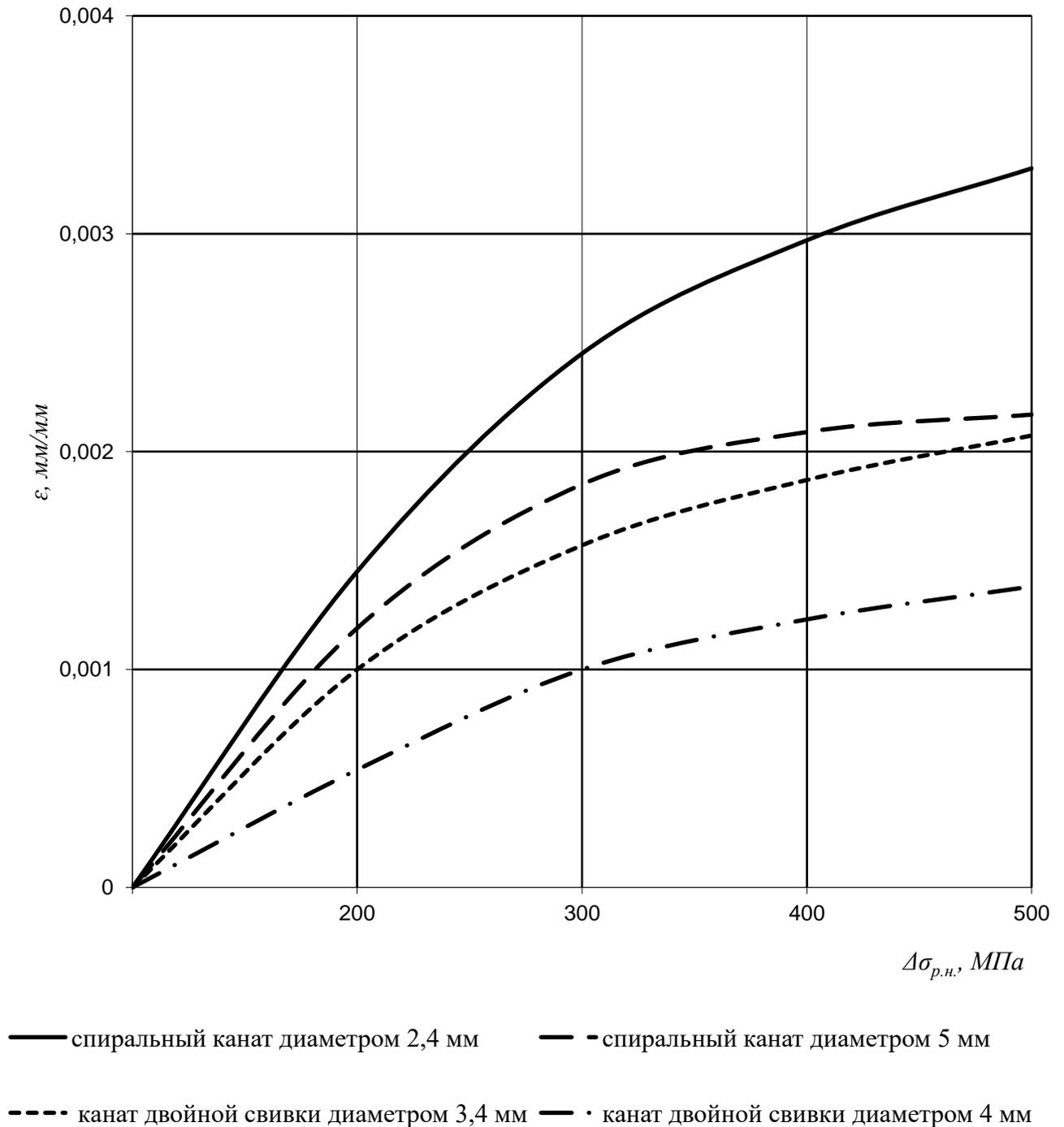


Рисунок 3.60 – Влияние деформации растяжение на дополнительные напряжения растяжение с учетом образовавшихся в канате изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов

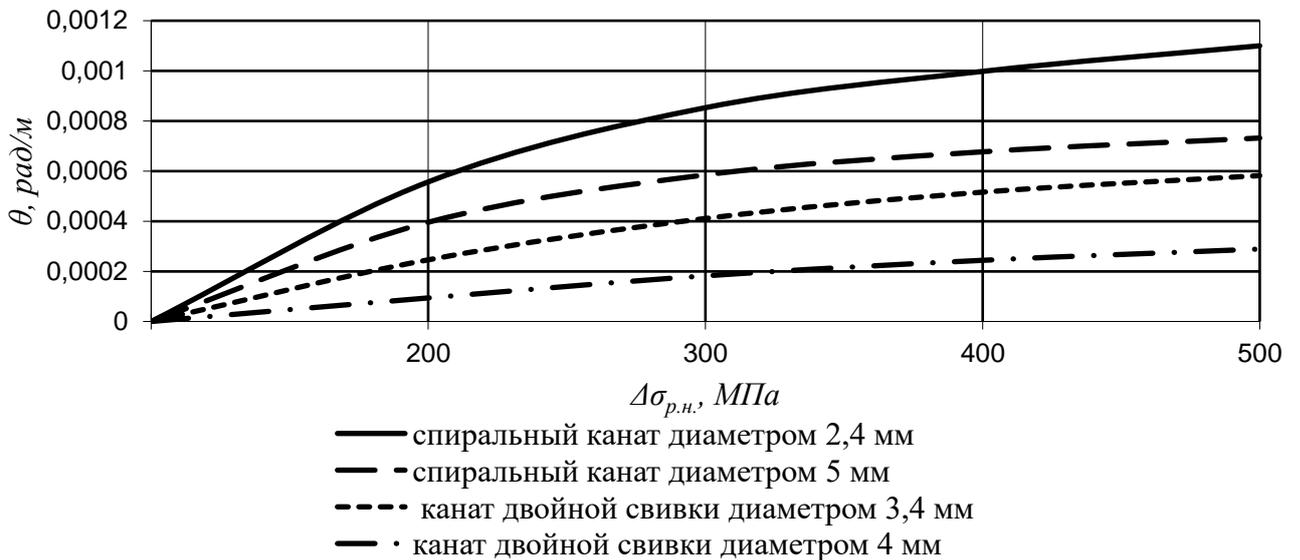


Рисунок 3.61 – Влияние деформации кручение на дополнительные напряжения растяжение с учетом образовавшихся в канате изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов

На основании анализа результатов эксперимента можно сделать вывод, что при растяжении образцов стальных канатов с учетом различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов проявляется нелинейность деформаций. Наиболее остро нелинейность проявляется при значении дополнительных напряжений растяжения равном  $\Delta\sigma_{p.n.} = 200$  МПа, причем происходит изменение угла свивки для каната диаметром 2,4 мм за период деформации  $\Delta\alpha = 0,0083$  рад, для каната диаметром 5 мм  $\Delta\alpha = 0,0054$  рад а для канатов двойной свивки диаметром 3,4 мм  $\Delta\alpha = 0,0031$  рад и диаметром 4 мм  $\Delta\alpha = 0,0024$  рад (рисунки 3.60, 3.61). Т.е. при нагружении стального каната в области действия упругих деформаций происходит изменение угла свивки винтовых элементов каната, что и доказывається проведенными во II главе теоретическими выводами, а также правильность проведения эксперимента ранее сделанными выводами [44, 49, 98].

Поэтому для изготовления качественного подъемного каната его необходимо изготавливать с одинаковыми геометрическими параметрами и механическими свойствами винтовых элементов. На наш взгляд, изменения геометрических пара-

метров и механических свойств винтовых элементов возникающие, как в результате эксплуатации, так и при изготовлении каната, являются показателями качества каната.

### **3.4.10. Влияние неравномерности технологического натяжения на прочность каната двойной свивки**

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 каната с различной неравномерностью технологического натяжения прядей, причем концы образцов каната заливаются баббитом и крепятся в специальную разъемную втулку (рисунок 3.41). Втулки устанавливаются в подшипники и фиксируются. С помощью подшипников образец каната осуществляет круговые движения вокруг своей оси.

Так, прядям 2,3 каната двойной свивки диаметром 4 мм (рисунок 3.62) прикладывалось натяжение 15 Н, пряди 4,5 имели натяжение 10 Н, а прядь 1 натяжение 10 Н, к пряди 6 и сердечнику прикладывалось натяжение 35 Н. Пряди 1,3 каната двойной свивки диаметром 3,4 мм (рисунок 3.63) подвергались натяжению 20 Н, пряди 2,6 имели натяжение 35 Н, к пряди 4 прикладывалось натяжение 10 Н, к пряди 5 натяжение 15 Н, к сердечнику 5 Н.

Испытания образцов канатов на разрыв проводилось на разрывной машине УММ-5. 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 стального каната зависела от неравномерности технологического натяжения, наибольшая неравномерность натяжения соответствовала наименьшей прочности каната (рисунок 3.64). Уменьшение прочности стального каната составило 20 %.

Образцы канатов двойной свивки, изготовленные с одинаковым натяжением прядей, разрушались практически одновременно.

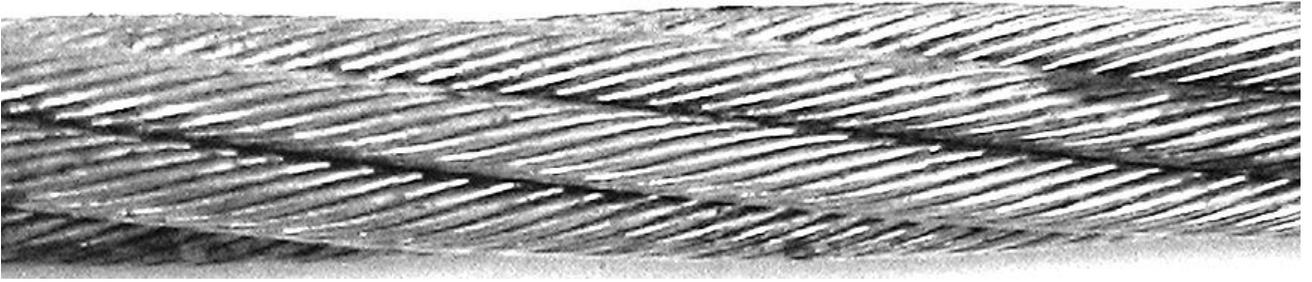


Рисунок 3.62 – Образец № 1 каната двойной свивки диаметром 4 мм, изготовленный с различным натяжением прядей

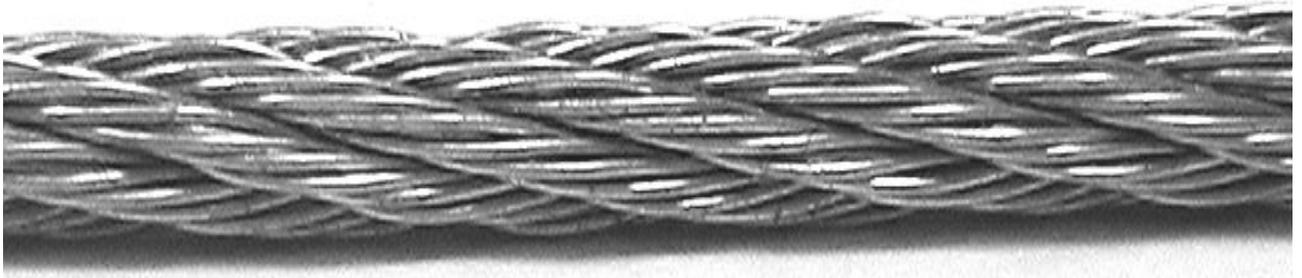


Рисунок 3.63 – Образец № 2 каната двойной свивки диаметром 3,4 мм, изготовленный с различным натяжением прядей

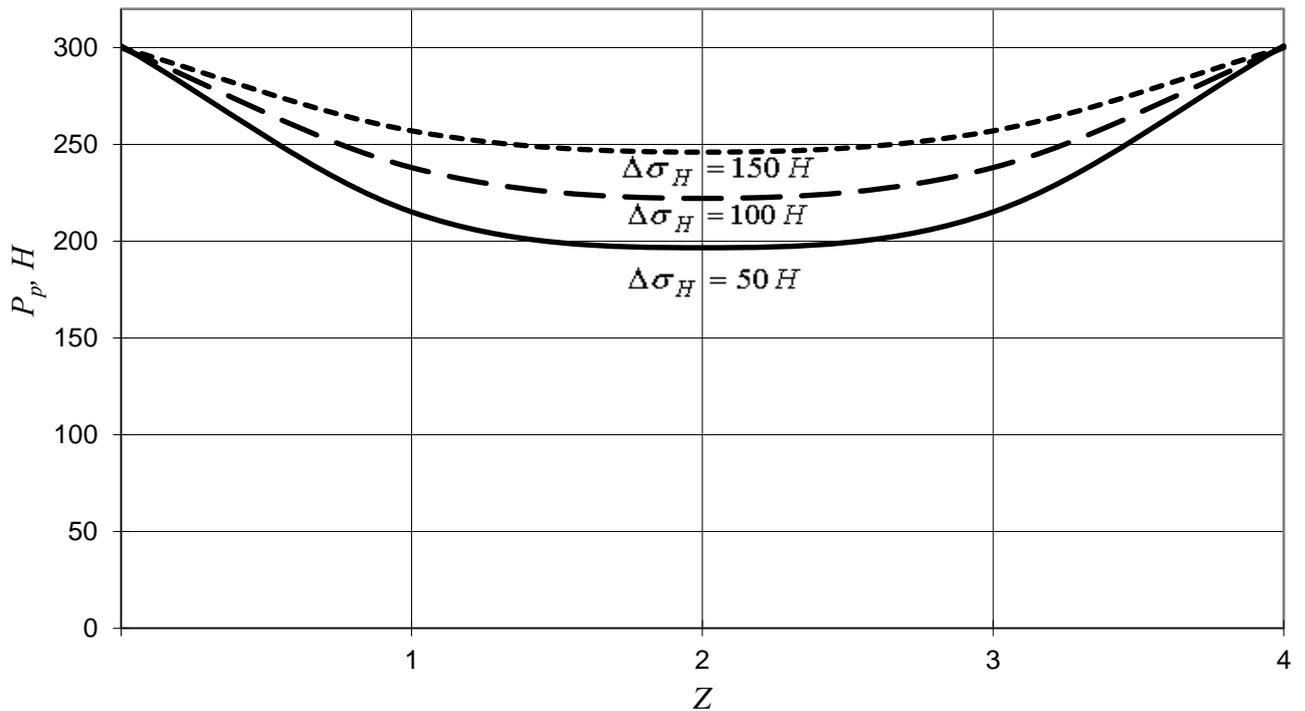


Рисунок 3.64 – Влияние неравномерности технологического натяжения на прочность стального каната

### 3.4.11. Сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований

Для анализа расчетных и экспериментальных значений деформаций нами были использованы данные параметров свивки экспериментальных образцов стальных канатов, приведенных в таблице 3.6.

Дополнительные данные использовались согласно ГОСТ на конструкции канатов соответствующих диаметров.

Для определения деформаций растяжение и кручение воспользуемся уравнениями, полученными во II главе.

С помощью полученных нелинейных уравнений статики каната с учетом волнистости (2.16) мы определим деформации (2.39-2.41).

Учитывая, что угол свивки является переменным  $\tilde{\alpha}(\tilde{\beta})$ , то необходимым условием в расчете деформаций является учет данного условия, которое определяется формулой, полученной во II главе:

$$\tilde{\beta} = \beta + \Delta\beta, \quad (3.18)$$

где  $\tilde{\beta}$  – значение угла свивки, соответствующее моменту окончания деформации;  $\beta$  – начальное значение угла свивки;  $\Delta\beta$  – изменение угла свивки пряди за период деформации.

Расчетное значение величины  $R_B^H$  определяем по формуле (2.81).

Значение  $\Delta\varepsilon$ ,  $\Delta\theta$ ,  $\frac{1}{\rho}$ , вычисленные по формулам (2.39-2.41), а также экспериментальные значения приведены в таблице 3.6.

Расчет деформаций производится с использованием IBM PC, алгоритм вычисления деформаций в нелинейной форме с учетом различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов представлен на рисунке 2.1.

Расчетные значения деформаций определялись при натяжении 1000 Н, для всех видов свивки.

Таблица 3.7 – Анализ опытных и расчетных данных стального каната

№ п/п	Конструкция каната	Диаметр каната, мм	$R_g$ , мм	Удлинение, $\varepsilon$ , мм/мм		Кручение, $\theta$ , рад/м		Кривизна, $\frac{1}{\rho}$ , 1/м	Изменение угла свивки каната, $\Delta\alpha(\Delta\beta)$ , рад	
				расч.	эксп.	расч.	эксп.		расч.	эксп.
1.	1+6	2,4	0,24	0,0012	0,00145	0,000542	0,000557	0,085	0,008	0,0083
2.	1+6	5	0,58	0,0010	0,00119	0,000393	0,000396	0,06	0,0052	0,0054
3.	6×9(1+6)+ +1×7(1+6)	3,4	0,691	0,00098	0,001	0,000238	0,000246	0,052	0,003	0,0031
4.	6×9(1+6)+ +1×7(1+6)	4	0,58	0,0011	0,00123	0,000240	0,000244	0,048	0,0023	0,0024

Как видно из таблицы 3.7 наблюдается хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных для стальных подъемных канатов.

Расчет канатов при нелинейности деформаций дает расхождение с экспериментальными данными 5–8 % (таблица 3.7), которое является допустимым в инженерных расчетах.

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.

### Выводы по главе

1. Исследовано влияние с помощью нелинейных уравнений статики конструктивных, эксплуатационных и технологических факторов на напряженно-деформированное состояние каната с учетом изменение геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

2. Установлено, что основным фактором, влияющим на образования изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов в канате, является неравномерность технологического натяжения.

3. Исследовано влияние угла свивки на напряженно-деформированное состояние каната с учетом волнистости в нелинейной форме. Проведен анализ запаса

прочности на дополнительные напряжения при линейной теории расчета и нелинейной с учетом волнистости.

4. Установлено, что наиболее значимым показателем при расчете стальных подъемных канатов являются дополнительные напряжения с учетом волнистости. Поэтому при расчете канатов для грузовых и людских установок необходимо учитывать эти напряжения.

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

6. Исследовано влияние нагруженности проволок при растяжении каната с учетом волнистости. Установлено, что наиболее нагруженными при растяжении каната являются проволоки сердечника.

7. Получены нелинейные уравнения, позволяющие выявить максимальное изменение длины пряди в канате двойной свивки. Установлено, что наиболее существенными факторами, влияющими на неодинаковость длин прядей, являются неравномерность технологического натяжения и разбег предела прочности.

8. Получен способ свивки двухслойного каната, позволяющий повысить качество каната, а также предотвратить возникновение изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

9. Изготовлены и апробированы стальные канаты с учетом неравномерности геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, а также канаты с равномерным натяжением винтовых элементов.

10. Разработана и изготовлена конструкция устройства для замера деформаций растяжения и кручения стального каната с учетом неравномерности геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

11. Экспериментально доказано, что линейной теорией можно пользоваться для приблизительного определения деформации растяжения, для случая, когда концы каната жестко заделаны (кручение отсутствует) и нельзя для определения деформаций, когда присутствует кручение концов каната.

12. После проведения исследований установлено, что у канатов, изготовленных с учетом различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов деформации растяжения и кручения выше в среднем в 1,5 раза относительно канатов с одинаковыми геометрическими параметрами и механическими свойствами винтовых элементов, причем происходит изменение угла свивки.

13. Анализ результатов испытаний при свободном растяжении опытных образцов канатов, изготовленных с учетом различия 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.

14. Экспериментально доказано, что неравномерность технологического натяжения влияет на образование изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов в канате.

15. Подтверждено, что неравномерность технологического натяжения винтовых элементов соответствует неравномерности длин винтовых элементов.

16. Сравнение экспериментальных и теоретических деформаций каната показали хорошее совпадение опыта и расчета.

#### **4. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМОГО ЗНАЧЕНИЯ РАДИУСА ВОЛНИСТОСТИ ДЛЯ ПОДЪЕМНЫХ КАНАТОВ ПРИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАВИСИМОСТЯХ**

Как было показано нами ранее, при эксплуатации подъемных канатов в них появляется волнистость в результате различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, при которой ось каната принимает форму пространственной винтовой линии. При этом необходимо знать допустимое значение радиуса волнистости, при котором возможна дальнейшая эксплуатация каната.

В работах проф. Хальфина М.Н. [78, 86] было получено выражение допустимого значения радиуса волнистости на основе линейной теории расчета подъемных канатов. Так же была сделана попытка определения количественного значения радиуса волнистости, составляющее 1,08 мм, которое включено в редакцию «Правилами устройства безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов» [54] и «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» [55]. Ниже мы попытаемся получить выражение допустимого радиуса волнистости для подъемного каната с помощью нелинейных зависимостей.

##### **4.1. Определение допустимого значения радиуса волнистости при нелинейных зависимостях**

Допустимое значение радиуса волнистости при линейной теории определяется из условия прочности подъемного каната, полученного в работе [86]

$$\sigma_{\max} = \sigma_{p,l} + \Delta\sigma_{p,l} \leq \frac{\sigma_B}{Z}, \quad (4.1)$$

где  $\sigma_{p,l}$  – напряжение растяжения в проволоке от действия натяжения и кручения, вызванное действием растягивающей силы и определяемое по формулам [9];  $\Delta\sigma_{p,l}$  – дополнительные напряжения растяжения в проволоке стального каната, имеющего изменение геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, полученные с помощью линейной теории расчета канатов [86];  $\sigma_B$  – предел

прочности канатной проволоки;  $z$  – коэффициент запаса прочности.

Допустимая величина радиуса волнистости для каната двойной свивки, согласно исследованиям [85, 86], определяется по формуле:

$$R_B \leq \frac{\frac{\sigma_B}{z} - \sigma_{p.l}}{P_x \left\{ E \cos^2 \alpha \cos \beta \left[ \frac{\Delta_1}{\Delta} (\cos^2 \beta - \mu \sin^2 \beta) + \frac{r_k}{R_k} \operatorname{tg} \alpha (1 + \mu) \frac{\sin^3 \beta \cos \beta}{R_k} \right] + \right.} \quad (4.2)$$

$$\left. + \frac{\Delta_2}{\Delta} R_k \left[ \sin \beta \cos \beta + \frac{r_k}{R_k} \operatorname{tg} \alpha \left( \cos^4 \beta - \frac{\sin^3 \beta \cos \beta}{R_k} \right) \right] + \frac{\Delta_3}{\Delta} R_k \cos^2 \beta \right\}}$$

В связи с тем, что в данной работе учитывается изменение углов свивки винтовых элементов каната за период его деформации, то условия прочности каната с учетом изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов с помощью нелинейных уравнений (2.26, 2.71–2.72) приобретет вид:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{p.l} + \Delta \sigma_{p.l} + \sigma_{p.n} + \Delta \sigma_{p.n} \leq \frac{\sigma_B}{z}, \quad (4.3)$$

где  $\sigma_{p.n}$  – напряжение растяжения в проволоке от действия натяжения и кручения, вызванное действием растягивающей силы и определяемое по формулам [13, 15];  $\Delta \sigma_{p.n}$  – дополнительные напряжения растяжения в проволоке стального подъемного каната, имеющего изменения геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, полученные с помощью нелинейных уравнений (2.15, 2.16).

Допустимая величина радиуса волнистости при нелинейных зависимостях для каната двойной свивки определяется:

$$\begin{aligned}
& \frac{R''_e}{R_K} \leq \frac{\sigma_e - \sigma_{p,n} - \sigma_{p,u}}{z} \\
& \left. \begin{aligned}
& E \cos^2 \alpha \cos \varphi \left[ \Delta \varepsilon (\cos^2 \beta - \mu^1 \sin^2 \beta) + \frac{r_k}{R_k} \cos \alpha (1 - \mu^1) \sin^3 \beta \cos \beta \right] + \\
& + \Delta \theta R_k \left[ \sin \beta \cos \beta + \frac{r_k}{R_k} \operatorname{tg} \alpha \left( \cos^4 \beta - \frac{\sin^4 \beta \cos \beta}{R_k} \mu^1 \right) + \frac{R_k}{\rho} \cos^2 \beta \right] + \\
& \left. \begin{aligned}
& \Delta \varepsilon^2 \left[ \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 - \right. \\
& \left. - \left( 2 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} \right) \mu^1 \right] - \\
& - \Delta \theta^2 R^2 \left[ \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 - \right. \\
& \left. - \mu^1 (-\sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R})) \right] + \\
& + \Delta \varepsilon \Delta \theta R \left[ -\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 - \right. \\
& \left. - \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. + \left( -\sin^2 \beta \cos^2 \beta \cos 2\beta - \mu^1 \frac{\sin^5 \beta \cos \beta}{R} \right) \right) \right] + \\
& + E \cos^2 \alpha \cos^2 \varphi \left[ \right. \\
& + \Delta \varepsilon \frac{1}{\rho} \left[ 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) - \right. \\
& \left. - \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] + \\
& + \Delta \theta \frac{1}{\rho} R \left[ -R \sin \beta \cos \beta \cos 2\beta - \mu^1 (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. \\
& \left. + \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. \right. \\
& \left. \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] + \\
& + \left( \frac{1}{\rho} \right)^2 R \left[ \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] \\
& \left. \right] + \left. \right\} \quad (4.4)
\end{aligned}
\end{aligned}$$

А также из 3-го уравнения (2.16) можно определить допустимое значение радиуса волнистости с учетом нелинейности, подставив усилие  $P_x$  из (2.15) в (2.16),

причем  $M_z = \frac{1}{\rho} g_0 m$ , которое будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{\rho} g_0 m + (mA\varepsilon + mC\theta + md\varepsilon_r + mA_{11}\varepsilon^2 + mA_{12}\varepsilon\theta + mA_{22}\theta^2 + mA_{13}\varepsilon\varepsilon_r + mA_{23}\theta\varepsilon_r + mA_{33}\varepsilon_r^2) \cdot R_e = \\
& = \frac{m}{2} A_{14} \Delta \varepsilon + \frac{m}{2} A_{24} \Delta \theta + \frac{m}{2} A_{34} \Delta \varepsilon_r + \frac{m}{2} A_{44} \frac{1}{\rho} + \frac{m}{2} A_{411} \Delta \varepsilon^2 + \frac{m}{2} A_{412} \Delta \varepsilon \Delta \theta + \frac{m}{2} A_{422} \Delta \theta^2 + \frac{m}{2} A_{413} \Delta \varepsilon \Delta \varepsilon_r + \\
& + \frac{m}{2} A_{423} \Delta \theta \Delta \varepsilon_r + \frac{m}{2} A_{433} \Delta \varepsilon_r^2 + \frac{m}{2} A_{414} \Delta \varepsilon \frac{1}{\rho} + \frac{m}{2} A_{424} \Delta \theta \frac{1}{\rho} + \frac{m}{2} A_{434} \Delta \varepsilon_r \frac{1}{\rho} + \frac{m}{2} A_{444} \left( \frac{1}{\rho} \right)^2. \quad (4.5)
\end{aligned}$$

Примем  $\varepsilon_r = 0$ , тогда после математических преобразований получим уравнение, допустимого значения радиуса волнистости при нелинейности деформаций:

$$\begin{aligned}
& \frac{d_B}{d_K} \leq 1 + \frac{R_B^H}{R_K} \leq 1 + \frac{\frac{1}{2} \left( A_{14} \Delta \varepsilon + A_{24} \Delta \theta + (A_{44} - m g_0) \frac{1}{\rho} + A_{411} \Delta \varepsilon^2 + A_{412} \Delta \varepsilon \Delta \theta + A_{422} \Delta \theta^2 + \right. \\
& \left. + A_{414} \Delta \varepsilon \frac{1}{\rho} + A_{424} \Delta \theta \frac{1}{\rho} + A_{444} \left( \frac{1}{\rho} \right)^2 \right)}{R_K (A\varepsilon + C\theta + A_{11}\varepsilon^2 + A_{12}\varepsilon\theta + A_{22}\theta^2)}, \quad (4.6)
\end{aligned}$$

где  $d_B$  – диаметр спирали волнистости;  $d_K$  – диаметр стального каната.

#### **4.2. Алгоритм расчета допустимого значения радиуса волнистости для подъемного каната при нелинейных зависимостях**

Исследования по определению допустимого значения радиуса волнистости проведено на ПК IBM PC с использованием программы MathCAD [24] по разработанному и представленному на рисунке 4.1 алгоритму.

##### **Исходные данные к расчету подъемного каната:**

Конструкция каната –  $6 \times 19(1 + 9 + 9) + 1$  о.с

Диаметр проволок –  $S_i$ .

Диаметр слоя проволок –  $d_i$ .

Площадь поперечного сечения проволоки –  $F$ .

Диаметр слоя прядей –  $D$ .

Шаг свивки слоя проволок –  $h_i$ .

Шаг свивки слоя прядей –  $H$ .

Угол свивки слоев проволок –  $\alpha$ .

Угол свивки слоев прядей –  $\beta$ .

Радиус свивки проволок –  $r_i$ .

Радиус свивки прядей –  $R_i$ .

Натяжение стального каната –  $N$ .

Временное сопротивление (маркировочная группа).

Количество прядей в каждом слое:

центральная прядь (круглая);

первый слой (круглая);

второй слой (круглая).

Модуль упругости I рода –  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа.

Модуль упругости II рода –  $G = 0,8 \cdot 10^5$  МПа.

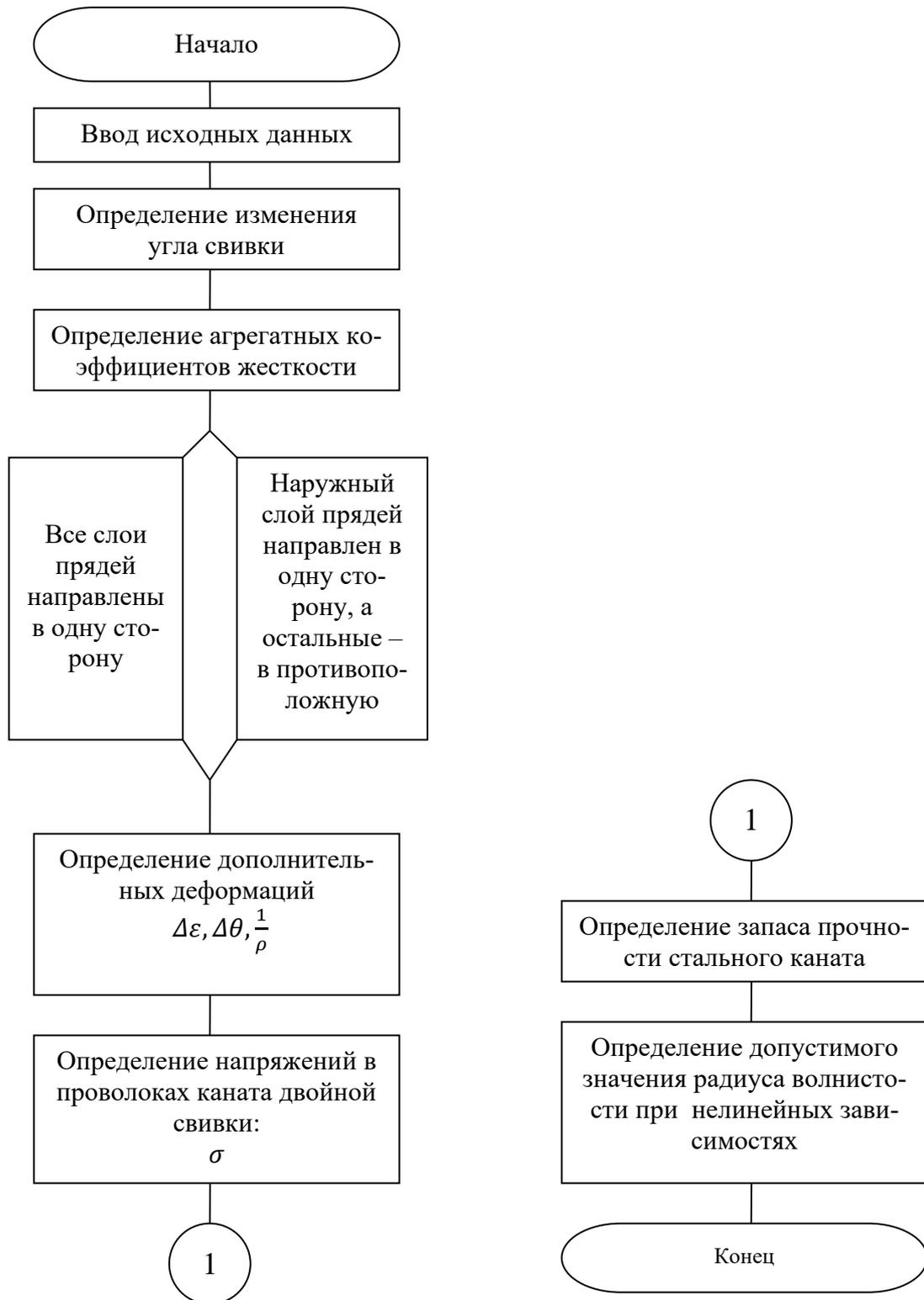


Рисунок 4.1 – Схема алгоритма по определению допустимого значения радиуса волнистости при нелинейных зависимостях

## Определение параметров свивки подъемного каната

Определение параметров свивки подъемного каната с учетом различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов для расчета допустимого значения радиуса волнистости при нелинейных зависимостях производится в следующей последовательности:

1. Определяются изменение угла свивки подъемного каната с учетом неравномерности геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов  $\tilde{\beta} = \beta + \Delta\beta$  с учетом (2.10);

2. Определяются агрегатные коэффициенты жесткости  $A, B, C, d, e, A_{11}(\varepsilon^2), A_{12}(\varepsilon\theta), A_{22}(\theta^2), A_{13}(\varepsilon\varepsilon_r), A_{23}(\theta\varepsilon_r), A_{33}(\varepsilon_r^2), C_{11}(\varepsilon^2), C_{12}(\varepsilon\theta), C_{22}(\theta^2), C_{13}(\varepsilon\varepsilon_r), C_{23}(\theta\varepsilon_r), C_{33}(\varepsilon_r^2), A_{14}, A_{24}, A_{34}, A_{44}, A_{44_1}, A_{44_2}, A_{111}, A_{112}, A_{122}, A_{113}, A_{123}, A_{133}, A_{114}, A_{124}, A_{134}, A_{144}, A_{211}, A_{212}, A_{222}, A_{213}, A_{223}, A_{233}, A_{214}, A_{224}, A_{234}, A_{244}, A_{411}, A_{412}, A_{422}, A_{413}, A_{423}, A_{433}, A_{414}, A_{424}, A_{434}, A_{444}$  для двух вариантов свивки каната:

- все слои прядей направлены в одну сторону;
- наружный слой прядей направлен в одну сторону, а остальные – в противоположную.

3. Определяются дополнительные деформации: продольные, крутильные и изгибные (2.39–2.41), основные деформации растяжения и кручения.

4. Определяются нормальные напряжения в поперечном сечении проволоки каната двойной свивки с учетом волнистости при нелинейных зависимостях (2.71–2.72).

5. Определяются запас прочности подъемного каната с учетом волнистости при нелинейных зависимостях (3.7), меняя  $\sigma_b$  для круглых проволок в пределах от 160 до 200 МПа.

6. Определяются допустимое значение радиуса волнистости для подъемного каната с помощью нелинейности уравнений (4.6).

**Примеры расчета допустимого значения радиуса волнистости подъемного каната при нелинейных зависимостях**

При известных конструкциях канатов, его натяжении можно определить допустимое значение радиуса волнистости в нелинейной форме.

Для проведения исследований по определению допустимого значения радиуса волнистости полученного в нелинейной форме нами были использованы канаты: 14 –Г-І-Л-О-Р-1770 ГОСТ 3077-80, 16,5– Г-І-Л-О-Р-1770 ГОСТ 3077-80, 20,5– Г-І-Л-О-Р-1770 ГОСТ 3077-80, 30,5– Г-І-Л-О-Р-1770 ГОСТ 3077-80, 35– Г-І-Л-О-Р-1670 ГОСТ 3077-80.

**Исходные данные к расчету допустимого значения радиуса волнистости при нелинейных зависимостях**

Конструкция каната –  $6 \times 19(1 + 9 + 9) + 1$  о. с.

Диаметр каната – 14 мм, 16,5 мм, 20,5 мм, 30,5 мм, 35 мм.

Маркировочная группа –  $1770 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$ ,  $1670 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$ .

Модуль упругости I рода –  $E = 2,1 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$ .

Расчет допустимого значения радиуса волнистости проведено на ПК IBM PC с использованием программы MathCAD [24] по разработанному и представленному на рисунке. 4.1 алгоритму.

В таблице 4.1 представлены расчетные допустимые значения радиуса волнистости, полученные на основе (4.4 или 4.6).

Таблица 4.1 – Допустимые значения радиуса волнистости подъемных канатов при нелинейных зависимостях

Конструкция каната	Диаметр каната, мм	Маркировочная группа, $\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$	Допустимое значение радиуса волнистости
$6 \times 19(1 + 9 + 9) + 1$ о.с.	14	1770	1,052
$6 \times 19(1 + 9 + 9) + 1$ о.с.	16,5	1770	1,046

$6 \times 19(1+9+9)+10.c$	20,5	1770	1,043
$6 \times 19(1+9+9)+10.c$	30,5	1770	1,042
$6 \times 19(1+9+9)+10.c$	35	1670	1,042

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» [54].

Как было показано ранее, при эксплуатации стальных канатов в них появляются изменение геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, но с помощью полученных нами теоретических и экспериментальных исследований выведено значение допустимого радиуса волнистости подъемного каната при нелинейных зависимостях, составляющее 1,04–1,05. При достижении отношения диаметра спирали волнистости  $d_b$  к диаметру каната  $d_k$  равного 1,04 нами рекомендуется прекращение дальнейшей эксплуатации стальных канатов с целью повышения безопасности.

Сравнение допустимых значений радиуса волнистости, полученных при нелинейной теории расчета канатов с рекомендованными в литературе линейными значениями радиуса волнистости, показывает, что нелинейная теория дает более точные значения и на 30 % меньше при идентичных исходных данных.

Целью методики является, исходя из конструкции подъемного каната, растягивающей нагрузки и запаса прочности повышение безопасности эксплуатации подъемного каната путем определения с помощью нелинейных уравнений статики допустимого значения радиуса волнистости в канате с учетом образовавшихся в нем изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

Подготовленная методика по определению допустимого значения радиуса

волнистости для подъемных канатов при нелинейных зависимостях была использована в строительной компании ООО «Вест-Компани» на горнодобывающем предприятии ООО «Южной угольной компанией», а также в учебном процессе на кафедре АиГТК Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» и получила положительное одобрение (приложение 1).

#### **4.3. Методика оценки влияния волнистости на прочность и долговечность стальных канатов ПТМ**

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. В результате полученных во 2 главе нелинейных уравнений (2.15-2.16, 2.42) была подготовлена методика расчета напряженно-деформированного состояния подъемного каната учитывающая его волнистость, описанная в 3 главе. Полученные нелинейные уравнения, позволяют выявить максимальное изменение длины пряди в канате двойной свивки, рассмотреть влияние волнистости на его прочность. Подтверждено, что с увеличением волнистости в подъемном канате прочность каната снижается в 2 и более раз. Установлено, что наиболее значимым показателем при расчете стальных подъемных канатов являются дополнительные напряжения с учетом волнистости. Поэтому при расчете канатов для грузовых и людских установок необходимо учитывать эти напряжения. Сделанные ранее выводы говорят о том, что волнистость существенно влияет на прочность подъемного каната, которая отражается на его долговечности. Не учет влияния волнистости при эксплуатации подъемного каната оказывает существенное значение на безопасность ПТМ.

## Алгоритм оценки влияния волнистости на прочность и долговечность стальных канатов ПТМ

Исследования по оценки влияния волнистости на прочность и долговечность стальных канатов ПТМ проведено на ПК IBM PC с использованием программы MathCAD [24] по разработанному и представленному на рисунке 4.2 алгоритму.

### Исходные данные к расчету подъемного каната:

Конструкция каната –  $6 \times 19(1 + 9 + 9) + 1$  о.с

Диаметр проволок –  $S_i$ .

Диаметр слоя проволок –  $d_i$ .

Площадь поперечного сечения проволоки –  $F$ .

Диаметр слоя прядей –  $D$ .

Шаг свивки слоя проволок –  $h_i$ .

Шаг свивки слоя прядей –  $H$ .

Угол свивки слоев проволок –  $\alpha$ .

Угол свивки слоев прядей –  $\beta$ .

Радиус свивки проволок –  $r_i$ .

Радиус свивки прядей –  $R_i$ .

Натяжение стального каната –  $N$ .

Временное сопротивление (маркировочная группа).

Количество прядей в каждом слое:

центральная прядь (круглая);

первый слой (круглая);

второй слой (круглая).

Модуль упругости I рода –  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа.

Модуль упругости II рода –  $G = 0,8 \cdot 10^5$  МПа.

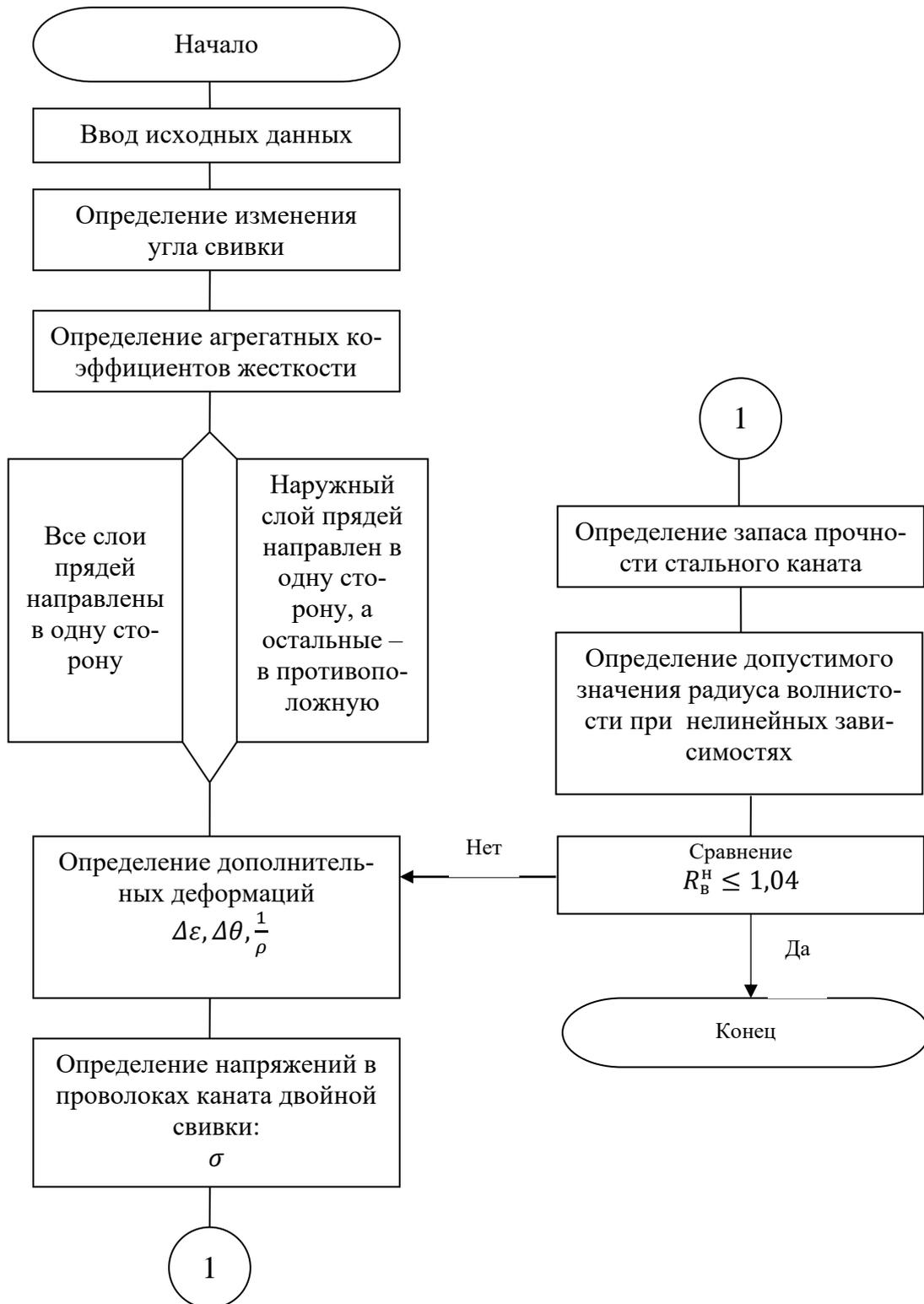


Рисунок 4.2 – Схема алгоритма по оценке влияния волнистости на прочность и долговечность стальных канатов ПТМ при нелинейных зависимостях

#### 4.4. Определение оптимального значения допустимого радиуса волнистости

В нашей стране до 2003 г., согласно Правилам безопасной эксплуатации подвесных канатных дорог [54], запрещалась эксплуатация подъемного каната при визуальном обнаружении неравномерности геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов в канате. При этом [54] количественное ограничение диаметра волнистости не было предусмотрено. В то же время Правилами безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения предусматривается эксплуатация при отношении диаметра спирали волнистости  $d_v$  к диаметру каната  $d_k$ , меньшем 1,08, что позволяет значительно повысить безопасность эксплуатации подъемных канатов с образовавшимися изменениями геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных выводов было определено допустимое значение радиуса волнистости, 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 канатов с целью повышения безопасности.

#### Выводы по главе

1. Получена методика определения допустимого значения радиуса волнистости подъемного каната при нелинейных зависимостях.
2. Разработан алгоритм расчета допустимого значения радиуса волнистости для подъемного каната при нелинейных зависимостях.
3. Анализ допустимых значений радиуса волнистости, полученных с помощью нелинейных уравнений статики с рекомендованными в литературе линейными значениями радиуса волнистости, показывает, что нелинейная теория дает более точные значения и на 25 % меньше при идентичных исходных данных. При

достижении допустимого значения радиуса волнистости равного 1,04 нами рекомендуется прекращение дальнейшей эксплуатации стальных канатов с целью повышения безопасности.

4. Получены рекомендации допустимого значения радиуса волнистости подъемного каната при нелинейных зависимостях, при которых запрещается дальнейшая эксплуатация с целью повышения безопасности эксплуатации подъемных канатов.

5. Полученная методика по определению допустимого значения радиуса волнистости при нелинейных зависимостях на 25 % эффективнее расчетов, проведенных с помощью линейной теории расчета подъемных канатов.

## 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 методику расчета, обеспечить обоснованный выбор 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 превышают 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. Определено значение допустимого радиуса волнистости подъемного каната при нелинейных зависимостях, составляющее 1,04–1,05. При достижении отношения диаметра спирали волнистости  $d_s$  к

диаметру каната  $d_k$  равного 1,04 рекомендуется прекращение дальнейшей эксплуатации подъемных канатов с целью повышения безопасности.

Разработаны:

- методика определения напряжения растяжения и кручения с учетом волнистости при нелинейных зависимостях.
- методика определения допустимого значения радиуса волнистости при нелинейных зависимостях.

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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабенко А.Ф. Распределение концевой свободно подвешенной нагрузки между проволоками спирального каната / А.Ф. Бабенко // Науч. записки Одесского политех. ин-та. – 1960. – Т. 27. – С. 16–20.
2. Белалов Х.Н., Клековкина Н.А., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Полякова М.А. Стальная проволока. Монография. - Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2011. - 689 с.
3. Белый В.Д. Влияние геометрии закрытых подъемных канатов на появление структурных дефектов / В.Д. Белый, А.П. Ветров, Л.Ф. Кононенко // Стальные канаты. – Киев, 1971. – Вып. 9. – С. 150–154.
4. Бородина Е.Н., Шубин И.Г., Румянцев М.И. Комплексный показатель качества для оценки сквозной технологии производства метизных изделий // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 71-й межрегиональной научно-технической конференции под ред. В.М. Колокольцева. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. - Т. 1. - С. -329 - 335.
5. Бережинский В.И. Канаты шахтных подъемных установок: монография / В.И. Бережинский, А.Н. Шатило. - М.: Университетская книга, 2015. - 232 с.
6. Букштейн М.А. Производство и использование стальных канатов / М.А. Букштейн. – М. : Металлургия, 1973. – 360 с.
7. Ветров А.П. Определение причин появления дефектов в закрытых канатах / А.П. Ветров, Л.Ф. Кононенко // Стальные канаты. – Киев: Техника, 1971. – Вып.8. – С. 54–59.
8. Глушко М.Ф. Исследование деформаций и напряжений в спиральных канатах с учетом действительных условий контакта проволок / М.Ф. Глушко // Изв. вузов. Горный журн. – 1961. – № 11. – С. 103–118.
9. Глушко М.Ф. Стальные подъемные канаты / М.Ф. Глушко. – Киев : Техника, 1966. – 327 с.

10. Глушко М.Ф. Напряжения в проволочных канатах двойной свивки при изгибе / М.Ф. Глушко // Изв. вузов. Горный журн. – 1959. – № 6. – С. 90–97.
11. Глушко М.Ф. О выборе конструкций подъемных канатов для глубоких шахт / М.Ф. Глушко // Многоканатный подъем. – М., 1958. – С. 114–122.
12. Глушко М.Ф. Напряжения при изгибе трехграннопрядного каната на шкиве / М.Ф. Глушко, Ю.Е. Почтовенко, В.Ф. Волоконский // Изв. вузов «Горный журнал». – 1980. – №2. – С. 85–89.
13. Глушко М.Ф. Расчет прямого каната с учетом нелинейности деформаций / М.Ф. Глушко, В.А. Малиновский, Л.И. Шигарина // Прочность и долговечность стальных канатов. – 1981 – С. 31–37. – Деп. в ЦНТБЧМ.
14. Нелинейные уравнения равновесия прямого каната / М.Ф. Глушко [и др.] // Прикладная механика. – 1979. – №12. – С. 127–129.
15. Расчет напряжений в шахтных подъемных канатах / М.Ф. Глушко [и др.] // Известия вузов «Горный журнал». – 1982. – №9. – С. 95–98.
16. Аналитический расчет геометрических параметров каната / М.Ф. Глушко [и др.] // Стальные канаты : науч. тр. – Киев : Техника, 1971. – Вып. 8. – С. 3–13.
17. Глушко М.Ф. Геометрические уравнения деформаций каната в нелинейной форме // М.Ф. Глушко, А.А. Чиж, Л.И. Шигарина // Прочность и долговечность стальных канатов. – Одесса, 1977. – С. 38–43. – Деп. в ЦНИИЧермет 28.05.81; №1215.
18. Гончаренко Н.К. Экспериментальное определение конструктивного коэффициента каната / Н.К. Гончаренко // Многоканатный подъем. – М., 1958. – С. 110–117.
19. Гончаренко Н.К. Исследование рационального режима предварительной обтяжки канатов / Н.К. Гончаренко, А.П. Ветров // Стальные канаты. – Киев : Техника, 1964. – Вып. 1. – С. 61–64.
20. Гуревич А.Б. Повышение технического ресурса шахтных канатов с металлическим сердечником и методы оценки их надежности / А.Б.Гуревич : автореф. дис.... канд. техн. наук. – Орджоникидзе, 1988. –16 с.

21. Динник А.Н. О динамических напряжениях в канатах подъемника Кепе при посадке клетки на кулаки / А.Н. Динник // Южный инженер. – 1917. – № 2–3.
22. Егоров В.Д. Производство канатной проволоки и стальных канатов в ЧССР / В.Д. Егоров, Б.А. Игметов : обзор // ЦНИИЧермет. – М., 1977. – 16 с.
23. Каландадзе В.А. Новый магнитный дефектоскоп стальных канатов / В.А. Каландадзе, А.З. Картвелишвили, К.Л. Стефаниди // Стальные канаты. – Киев, 1973. – Вып.10. – С. 164.
24. Кирьянов Д.В. Самоучитель MathCAD 11 / Д.В. Кирьянов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2014. – 535 с., ISBN 978-5-9775-1977-9.
25. Козлов В.Т. К вопросу упругой отдачи стальных канатов / В.Т. Козлов // Стальные канаты. – Киев, 1964. – Вып. 1. – С. 144–151.
26. Козлов В.Т. Исследование свивочных напряжений и внутренних силовых факторов в канатах закрытой конструкции / В.Т. Козлов, П.М. Калиниченко // Стальные канаты. – Киев : Техника, 1968. – Вып. 5. – С. 110–115.
27. Козлов В.Т., Киршанков А.Т. Экспериментальное исследование распределения усилий и моментов в элементах необтянутых и обтянутых канатов / В.Т. Козлов, А.Т. Киршанков // Стальные канаты: сб. тр. – Киев: Техника, 1968. – Вып.5. – С. 174–178.
28. Колчин А.М. Стальные канаты / А.М. Колчин. – М., 1950. – 104 с.
29. Кононенко Л.Ф. Исследование основных дефектов подъемных канатов закрытой конструкции и разработка мероприятий по их устранению : автореф. дис.... канд. техн. наук / Л.Ф. Кононенко– Хабаровск, 1971. – 20 с.
30. Короткий А.А. Исследование стойкости шахтных подъемных канатов с металлическим сердечником и разработка мероприятий по ее увеличению: автореф. дис.... канд. техн. наук / А.А. Короткий ; НПИ. – Новочеркасск, 1984. – 17 с.
31. Короткий А.А. Методологические основы оценки, прогнозирования и управления промышленной безопасностью подъемных сооружений: автореф. дис.... д-ра. техн. наук / А.А. Короткий. – Новочеркасск, 1997. – 36 с.
32. Короткий А.А. Способ браковки рудничих подъемных канатов / А.А. Короткий, М.Н. Хальфин // Изв. Северный Кавказ научного центра высш. школы техн. науки. – Ростов н/Д., 1984. – Деп. в ВИНИТИ 25.12.84 ; № 8250–

- 84.
33. Кускильдин Р.Б. Снижение динамических нагрузок на канат при осуществлении предохранительного торможения на шахтных подъемных установках / Кускильдин Р.Б., Левачёва Д.В., Шишебарова И.А., Энглин В.Л. //Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация: материалы I международной научно-практической конференции. - 2018. - С. 135-143.
34. Ксюнин Г.П. Определение параметров свивки длин элементов в канате с неравномерным технологическим натяжением / Г.П. Ксюнин, В.А. Рыжиков, М.Н. Хальфин; Новочерк. политехн. ин-т. – Новочеркасск. – 1986. – 9 с. – Деп. в ЦНИИЧермет 23.05.86 ; №3034-ЧМ.
35. Ксюнин Г.П. Стойкость шахтных подъемных канатов с органическим и металлическим сердечником / Г.П. Ксюнин, М.Н. Хальфин, А.А. Короткий // Подъемно-транспортное оборудование. – Киев, 1984. – Вып.15. – С. 44–51.
36. Ксюнин Г.П. Влияние неравномерности технологического натяжения в элементах каната на его прочность / Г.П. Ксюнин, М.Н. Хальфин, В.А. Рыжиков // Известия СКНЦ ВШ. – 1984. – №1. – С. 59–61.
37. Ксюнин Г.П., Хальфин М.Н., Рыжиков В.А. Влияние равномерности технологического натяжения на прочность / Г.П. Ксюнин, М.Н. Хальфин, В.А. Рыжиков // Известия СКНЦ ВШ. – 1984. – №1. – С. 12–19.
38. Малиновский В.А. Изгибная жесткость и потери на внутреннее трение в стальных канатах / В.А. Малиновский // Вестн. машиностроение. – 1984. – № 6. – С. 36–40.
39. Малиновский В.А. Расчет прямого каната с учетом нелинейности деформаций / В.А. Малиновский, Л.И. Шигарина // Прочность и долговечность стальных канатов; Одесск. высш. инж. мор. уч-ще. – Одесса, 1977. – С. 31–37. – Деп. ЦНИИЧермет 28.05.81 ; № 1214.
40. Малиновский В.А. Стальные канаты: аналитический справочник / В.А. Малиновский. - Одесса: Астропринт, 2016. - 252 с.
41. Найдено И.С. Шахтные многоканатные подъемные установки // И.С. Найдено, В.Д. Белый. – М.: Недра, 1979. – 392 с.
42. Нелинейные уравнения равновесия прямого каната / М.Ф. Глушко [и др.]

// Прикладная механика. – 1979. – №12. – С. 127–129.

43. Нестеров А. П. Оптимизация режимных и грузовых параметров шахтного подъемника // Подъемно-транспортное оборудование: респ. межвед. науч. - техн. сб. - К., 1990. - Вып. 21. - С. 26-28.
44. Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости / В.В. Новожилов. – М-Л., Гостехиздат, 1948. – 211 с.
45. Номерованный Б.С. Методика проведения испытаний методом прямого электротензометрирования / Б.С. Номерованный // Стальные канат : сб. тр. – Киев : Техника, 1970. – Вып. 7. – С. 128–136.
46. Поляков С.В. Способ повышения качества многослойного каната / С.В. Поляков // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. техн. науки. – 2007. – № 1. – С. 75–77.
47. Поляков С.В. Вывод параметров стального каната, влияющих на безопасность эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Горный журнал, ISSN 0536-1028, DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-118-123, 2019, № 6, - С. 118-123.
48. Поляков С. В. Новый способ определения радиуса волнистости канатов с помощью нелинейных уравнений//Известия УГГУ. 2019. Вып. 4(56), DOI 10.21440/2307-2091-2019-4- С. 111-123.
49. 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. : Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. – Вып. 6. – С. 83–88.
50. Поляков С.В. Пушкарев А.Е. Методика определения допустимого значения радиуса волнистости для подъемных канатов при нелинейных зависимостях// Машиностроение и инженерное образование. ISSN 1815-1051, 2019. № 2 . С. 10-13
51. Поляков С.В. Исследование подъемного каната с возникшими изменениями геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-257-264, 2019, № 2, - С. 257-264.
52. 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. ISSN

1815-1051, 2019. № 3 - С. 11-17

53. Пономарев С.Д. Основы современных методов расчета на прочность в машиностроении / С.Д. Пономарев [и др.]. – М. : Машгиз, 1950, 703 с.
54. Правила безопасности в угольных шахтах. – М. : ЗАО НТЦ ПБ, 2019. – 198 с.
55. Правила технической эксплуатации угольных и сланцевых шахт. – М.: Недра, 1976 (дата актуализации 01.01.2019 г.). – 303 с.
56. Правила устройства безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов. – М.: НПО. ОБТ, 2000 (действующая редакция – от 01.01.2018 г.). – 250 с.
57. Приказ Ростехнадзора от 12.11.2013 N 533 (действующая редакция от 01.01.2019) "Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения" (Зарегистрировано в Минюсте России 31.12.2013 N 30992) - 150 с.
58. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузовых подвесных канатных дорог. – М.: Недра, 1995. – 29 с. (действующая редакция от 01.01.2019).
59. Правила устройства и безопасной эксплуатации пассажирских подвесных и буксировочных канатных дорог. – М.: Недра, 1996. – 45 с. (действующая редакция от 01.10.2008)
60. РД 10-171-97. Инструкция по проведению дефектоскопии стальных канатов подвесных канатных дорог/ А.А. Короткий [и др.]. – М., 1997. – 17 с.
61. РД РОСЭК 012-97. Канаты стальные. Контроль и нормы браковки / А.А. Короткий [и др.]. – Новочеркасск, 1997. – 50 с. (действующая редакция от 01.01.2019).
62. Рыжиков В.А., Стрельцов С.В. Снижение динамических нагрузок при пуске в шахтном подъемном канате // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2014. - № 2. - С. 204-209.
63. Рыжиков В.А. Натяжные устройства канатовьющих машин / В.А. Рыжиков. – Новочеркасск: НГТУ, 1994. – 134 с.
64. Рыжиков В.А. Влияние неравномерности технологического натяжения на напряженно-деформированное состояние проволок в канате / В.А. Рыжиков,

- М.Н. Хальфин ; Новочерк. политехн. ин-т. – Новочеркасск. – 1986. – 9 с. – Деп. В ЦНИИЧермет 11.11.86. ; №3033-ЧМ.
65. Савин Г.Н. Скорость распределения упругих волн в стальных проволочных канатах / Г.Н. Савин, В.Н. Бессонов: докл. АН УССР. – 1951. – №1. – С. 34–42.
66. Савин Г.Н. Динамика нити переменной длины / Г.Н. Савин, О.А. Горошко. – Киев, 1962. – С. 273–280.
67. Савин Г.Н. Упругие параметры естественно закрученной нити переменной длины / Г.Н. Савин, О.А. Горошко: докл. АН УССР. – 1959. – № 8. – С. 523–530.
68. Савин Г.Н. Уравнения движения естественно закрученной нити переменной длины / Г.Н. Савин, О.А. Горошко: докл. АН УССР. – 1960. – № 6. – С. 726–729.
69. Савин Г.Н. Дифференциальные уравнения динамики нити переменной длины в случае физической и геометрической нелинейности / Г.Н. Савин, Я.Ф.Каюк. // Стальные канаты: сб. тр. – Киев : Техника, 1965. – Вып. 2. – С. 31–41.
70. Сергеев С.Т. Сальные канаты / С.Т. Сергеев. – Киев : Техника. – 1974. – 326 с.
71. Сергеев С.Т. Надежность и долговечность подъемных канатов / С.Т. Сергеев. – Киев, 1968. – 240 с.
72. Сергеев С.Т. Упрощенный метод определения максимальных усилий в элементах набегающего на блок каната / С.Т. Сергеев // Стальные канаты. – Киев, 1966– Вып.3. – С. 126–129.
73. Стрелков М.А, Зверев В.Ю., Трифанов Г.Д. Экспериментальные исследования влияния режима работы шахтных подъемных установок на динамические нагрузки в канате // Горное оборудование и электромеханика. - 2015. -№ 6. -С. 21-25.
74. Степанова Е.Н., Шубин И.Г., Румянцев М.И. Совершенствование методики оценки результативности системы менеджмента качества метизного производства // Управление большими системами: материалы VIII Всероссийской школы-семинара молодых ученых под ред. Д.А. Новикова. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск, гос. ун-та им. Г.И. Носова, 2011,- С. 346-349.

75. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 8АНЧ-7М. – 1970. – С. 32.
76. Хальфин М.Н. Влияние технологических факторов на параметры штопора в стальных канатах на этапе изготовления / М.Н. Хальфин ; Новочерк. политехн. ин-т. – Новочеркасск, 1988. – 7 с. – Деп. в ЦНИИЧермет 11.08.88 ; № 4677.
77. Хальфин М.Н. Изгибные напряжения в стальных канатах // Динамика и надежность погрузочных и грузоподъемных машин / М.Н. Хальфин. – Новочеркасск, 1982. – С. 106–116.
78. Хальфин М.Н. Определение напряжений, возникающих в проволоках при изгибе каната / М.Н. Хальфин // Подъемно-транспортное оборудование. – Киев, 1985. – Вып. 16. – С. 64–68.
79. Хальфин М.Н. Расчет норм браковки шахтных подъемных канатов, имеющих дефект штопор / М.Н. Хальфин // Динамические процессы в горных машинах и стационарных установках: тез. докл. 1-ой Всесоюзной конф. – Тбилиси, 1989. – С. 101–102.
80. 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.
81. Хальфин М.Н. Уравнения деформаций подъемного каната для глубоких шахт / М.Н. Хальфин; Новочерк. политехн. ин-т. – Новочеркасск. – 1987. – 7 с.– Деп. в ЦНИЭИУголь, 06.07.87. – №4221.
82. Хальфин М.Н. Уравнения статики каната двойной свивки для глубоких шахт / М.Н. Хальфин ; Новочерк. политехн. ин-т. – Новочеркасск. – 1987. – 6 с.– Деп. в ЦНИЭИУголь 03.12.87 ; №4351.
83. Хальфин М.Н. Уравнение статики каната для глубоких шахт / М.Н. Хальфин ; Новочерк. политехн. ин-т. – Новочеркасск, 1987. – 9 с. – Деп. в ЦНИЭИУголь, 03.12.87 ; №4267.
84. Хальфин М.Н. Уравнение динамики шахтного подъемного каната с учетом неодинаковости физико-механических свойств его винтовых элементов /

- М.Н. Хальфин // Очистные и проходческие машины и инструменты. – Новочеркасск, 1988. – С. 126–129.
85. Хальфин М.Н. Влияние технологических факторов на параметры штопора в стальных канатах на этапе изготовления / М.Н. Хальфин ; Новочерк. политехн. ин-т. – Новочеркасск, 1988. – 7 с. – Деп. в ЦНИИЧермет 11.08.88 ; №4677.
86. Хальфин М.Н. Методы повышения стойкости подъемных канатов и безопасной эксплуатации на глубоких шахтах: автореф. дис.... д-ра. техн. наук / М.Н. Хальфин; НПИ. – Новочеркасск, 1990. – 38 с.
87. Хальфин М.Н. К расчету запаса прочности шахтных подъемных канатов с металлическим сердечником, имеющих дефект штопор / М.Н. Хальфин // Изв. вузов. Горный журнал. – 1990. – №10. – С. 52–60.
88. 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.
89. Хальфин М.Н, Гуревич А.Б. О структурных дефектах подъемных канатов / М.Н. Хальфин, А.Б. Гуревич // Научна сессия ВМЕИ «Ленина», 89. Секция № 1. Машиностроение : Резюме доклады, 1989 г. – София, 1989. – С. 38.
90. Хальфин М.Н, Поляков С.В. Уравнение статики каната двойной свивки с учетом различия геометрических параметров и механических свойств проволок / М.Н. Хальфин, С.В. Поляков // Известия Тульского гос. ун-та. Сер. «Подъемно-транспортные машины и оборудование». – Тула, 2006. – Вып. 7 – С. 60–71.
91. Хальфин М.Н, Поляков С.В. Уравнение статики каната спиральной свивки с учетом различия геометрических параметров и механических свойств проволок / М.Н. Хальфин, С.В. Поляков // Известия Тульского гос. ун-та. Сер. «Подъемно-транспортные машины и оборудование». – Тула, 2006. – Вып. 7 – С. 72–80.
92. Хальфин М.Н. Исследование деформаций шахтных канатов в условиях эксплуатации / М.Н. Хальфин, А.Б. Гуревич, Б.Ф. Иванов // Новочерк. политехн. ин-т. – Новочеркасск, 1990. – 8 с. – Деп. в ЦНИЭИУголь, 19.03.90 ; № 50092.
93. Хальфин М.Н. Расчет и эксплуатация крановых канатов / М.Н. Хальфин,

- Б.Ф. Иванов, А.А. Короткий. – Новочеркасск : НГТУ, 1993. – 95 с.
94. Хальфин М.Н. Результаты исследования овалнопрядных канатов новой конструкции на свободное кручение / М.Н. Хальфин [и др.] ; Новочерк. политехн. ин-т. – Новочеркасск, 1986. – 7 с. – Деп. в ЦНИЭИУголь, 11.03.86 ; №3655-УП.
95. Хальфин М.Н. Исследование влияния технологических несовершенств на кручение несущих канатов / М.Н. Хальфин, Б.Ф. Иванов, Е.В. Сорокина // Сборник статей и сообщений Российской науч. практ. конф. по безопасности подъемных сооружений (г. Сочи, 1–8 октября, 1997 г.). – Новочеркасск, 1998. – С. 59–60.
96. Хальфин М.Н. Оценка качества стальных канатов и причин образования в них структурных дефектов / М.Н. Хальфин, Г.П. Ксюнин, А.Б. Гуревич; Новочерк. политехн. ин-т. – Новочеркасск, 1986. – 10 с. – Деп. в ЦНИИЧермет 11.10.86 ; № 3205 – ЧМ.
97. Чумаков А.С., Мереняшев М.И., Габрюк В.И. Механические характеристики стальных канатов / А.С. Чумаков, М.И. Мереняшев, В.И. Габрюк // Рыбное хозяйство, 1976. – № 1. – С. 44–46.
98. Шахназарян Э.А. Об уравнениях нелинейной теории расчета кабель-каната / Э.А. Шахназарян // Стальные канаты : сб. тр. – Киев : Техника, 1969. – Вып. 6. – С. 112–115.
99. Шахтный подъем: Научно-производственное издание / В.Р. Бежок, В.И. Дворников, И.Г. Манец, В.А. Пристром: общ. ред. Б.А. Грядущий, В.А. Кор-сун. 2-3 изд., перераб. и доп. - Киев: Альфа Реклама, 2017. - 600 с., 251 библиогр.
100. Шигарина Л.И. Экспериментальные исследования упругих характеристик канатов / Л.И. Шигарина // Прочность долговечность стальных канатов: сб. тр. – 1981. – С. 183–189. – Деп. в ЦНТБЧМ.
101. А.с. № 1017750А СССР, МКИ Д07В3/06. Канатовьющая машина / Г.П. Ксюнин, В.А. Рыжиков, А.Л. Свеколкин, М.Н. Хальфин; заявл. 10.07.81; опубл. 15.05.83, Бюл. № 18.
102. Пат. РФ № 2330137 Российская Федерация, МПК Д07В3/00. Способ свивки двухслойного каната / Хальфин М.Н., Поляков С.В. ; заявл. 14.08.2006; опубл.

27.07.2008, Бюл. № 21.

103. Bendorf H. Beitrage zur Theorie der Drahtseile, Z-ft des Osterreichischen Ingenier – und Architekten – vereins, 1904. – № 30.
104. Bridon. Mining. Specialist rope solutions for the world's most demanding applications [Текст]: каталог стальных канатов для угольной и горнодобывающей промышленности. - 2015. - Edition 7.
105. Townsend B. Control of catenary rope oscillation on a blair multi-rope winder by unbalancing the load sharing between the hoist ropes // HOIST & HAUL 2015. - 2015. - PP. 43-52.

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ  
№ 2330137

**СПОСОБ СВИВКИ ДВУХСЛОЙНОГО КАНАТА**

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный технический университет" (Новочеркасский политехнический институт) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2006129476

Приоритет изобретения 14 августа 2006 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 июля 2008 г.

Срок действия патента истекает 14 августа 2026 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU**<sup>(11)</sup> **2 330 137**<sup>(13)</sup> **С2**(51) МПК  
D07B 3/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ**(12) ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

(21), (22) Заявка: 2006129476/12, 14.08.2006

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
14.08.2006

(43) Дата публикации заявки: 20.02.2008

(45) Опубликовано: 27.07.2008 Бюл. № 21

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: КОРОЛЕВ В.Д. КАНАТНОЕ  
ПРОИЗВОДСТВО. - М.: МЕТАЛЛУРГИЯ, 1980,  
с.136-140. SU 846622 A1, 15.07.1981. SU  
1159967 A1, 07.06.1985. NO 930565 A,  
20.08.1993. US 5263309 A, 23.11.1993.

Адрес для переписки:

346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул.  
Просвещения, 132, ГОУ ВПО ЮРГТУ (НПИ), ОИС

(72) Автор(ы):

Хальфин Марат Нурмухамедович (RU),  
Поляков Сергей Владимирович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Южно-Российский государственный технический  
университет" (Новочеркасский политехнический  
институт) (RU)RU  
2 3 3 0 1 3 7  
С 2

(54) СПОСОБ СВИВКИ ДВУХСЛОЙНОГО КАНАТА

(57) Формула изобретения

1. Способ свивки двухслойного каната, включающий операции свивки первого слоя прядей, а затем второго слоя прядей вокруг сердечника, отличающийся тем, что при выполнении операции свивки первого слоя прядей измеряют натяжения каждой пряди первого слоя и определяют радиальное и угловое смещение равнодействующей натяжения относительно продольной оси каната и величину изгибающего момента, причем перед свивкой второго слоя прядей каната осуществляют натяжения каждой пряди так, чтобы изгибающий момент был равным по величине изгибающему моменту первого слоя прядей и противоположным по направлению.

2. Способ свивки по п.1, отличающийся тем, что радиальное и угловое смещение равнодействующей натяжения и величину изгибающего момента определяют по формулам

$$e_{xc} = \frac{P_{1пр} e_{x1} + P_{2пр} e_{x2} + P_{3пр} e_{x3} + P_{4пр} e_{x4} + P_{5пр} e_{x5} + P_{6пр} e_{x6}}{\sum P_{пр}};$$

$$e_{yc} = \frac{P_{1пр} e_{y1} + P_{2пр} e_{y2} + P_{3пр} e_{y3} + P_{4пр} e_{y4} + P_{5пр} e_{y5} + P_{6пр} e_{y6}}{\sum P_{пр}};$$

$$e_z = \sqrt{e_{xc}^2 + e_{yc}^2};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{e_{xc}}{e_{yc}};$$

$$M_{\text{изг.1}} = \sum P_{пр} \cdot e_i;$$

# ООО "ВЕСТ-КОМПАНИ"

192007, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д.33/1  
ИНН7811081758, КПП 783601001,  
р/с 40702810755230158684 в Центральном ОСБ № 1991/0243 Северо-Западного банка  
Сбербанка РФ СПб"  
БИК 044030653, корр/сч 30101810500000000653  
e-mail: west-company.ru

Исх. 137 от 11.09.2017

## СПРАВКА

### **о внедрении результатов исследования, полученных в диссертации С.В. Полякова "Методика оценки влияния волнистости на прочность и долговечность стальных канатов подъемно-транспортных машин"**

Рассмотренные на заседании ООО «Вест-Компани» результаты, полученные Поляковым Сергеем Владимировичем в рамках диссертационного исследования на тему "Методика оценки влияния волнистости на прочность и долговечность стальных канатов подъемно-транспортных машин" имеют реальное практическое значение для предприятия. Работа выполнялась с 2003 и была направлена на повышение безопасности эксплуатации подъемных канатов. К наиболее существенным результатам исследования относятся: 1. Получена методика определения допустимого значения радиуса волнистости подъемного каната при нелинейных зависимостях. 2. Получены рекомендации допустимого значения радиуса волнистости подъемного каната при нелинейных зависимостях, при которых запрещается дальнейшая эксплуатация подъемных канатов.

В соответствии с предложениями и рекомендациями С.В. Полякова проведена работа по предотвращению аварийных ситуаций в подъемно-транспортных машинах при использовании стального каната. В целом результаты исследования С.В. Полякова благоприятно отразились на технике безопасности предприятия. Разработанные С.В. Поляковым рекомендации приняты к внедрению на уровне службы по механизации ПТМ.

Генеральный директор



Бойцов С.А.