

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ
КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»

Подразделение Отдел магистратуры
Направление подготовки 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии
и системы связи

ВКР выполнена на кафедре Линий связи и измерений в технике связи

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

Исследование распределений избыточной длины оптического
волокна в кабелях модульной конструкции

Утверждаю	<u>зав.кафедрой</u>	<u>д.т.н., проф.</u>			<u>В.А. Бурдин</u>
	Должность	Уч.степень, звание	Подпись	Дата	Инициалы Фамилия
Руководитель	<u>доцент</u>	<u>к.т.н.</u>			<u>Т.Г. Никулина</u>
Н. контролер	<u>доцент</u>	<u>к.т.н.</u>			<u>К.А.Яблочкин</u>
Разработал	<u>ИКТМ-91</u>				<u>Р.Х. Галямова</u>
	Группа		Подпись	Дата	Инициалы Фамилия

Наличие электронной версии ВКР с % оригинальности

Должность	Подпись	Дата	Инициалы Фамилия
-----------	---------	------	------------------

Содержание

Реферат.....	3
Введение	4
1 Обзор исследований избыточной длины ОВ в кабелях модульной конструкции.....	7
1.1 Общие положения.....	7
1.2 Контроль избыточной длины волокна при производстве ОК заводом-изготовителем.....	9
1.3 Обзор результатов исследований избыточной длины ОВ.....	13
1.4 Методы измерений распределений избыточной длины волокна в модульной трубке.....	16
1.5 Выводы.....	19
2 Исследование радиусов изгибов оптического волокна в физической модели оптического модуля кабеля.....	20
2.1 Общие положения	20
2.2 Физическая модель	20
2.3 Методика проведения эксперимента.....	22
2.4 Протоколы измерений шага геликоида.....	25
2.5 Протоколы измерений шага геликоида при постоянных параметрах трубки.....	31
2.6 Формулы для анализа результатов эксперимента.....	34
2.7 Обработка результатов	35
2.8 Анализ результатов	39
3 Исследование распределения радиусов изгибов ОВ в кабеле ВОЛС, находящейся в эксплуатации.....	49
3.1 Общие положения.....	49
3.2 Описание трассы.....	49
3.3 Метод исследования распределений радиусов изгибов ОВ на основе обработки рефлектограмм OTDR.....	52
3.4 Алгоритм обработки рефлектограмм.....	54
3.5 Результаты обработки.....	58
Заключение	67
Список использованных источников.....	70

**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ
КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»

РЕФЕРАТ

Название	Исследование распределений избыточной длины
	оптического волокна в кабелях модульной
	конструкции
Автор	Галлямова Регина Халиловна
Руководитель ВКР	Доцент кафедры ЛС и ИТС, к.т.н.
	Никулина Татьяна Геннадьевна
Ключевые слова	Оптическое волокно, оптический кабель, кривизна,
	радиус изгиба, избыточная длина, избыточность
	волокна, оптический рефлектометр, длина волны,
	неравномерное распределение волокна, шаг геликоиды
Дата публикации	2021 г.
Библиографическое описание	Галлямова, Р.Х. Исследование распределений
	избыточной длины оптического волокна в кабелях
	модульной конструкции [Текст]: магистерская
	диссертация / Р.Х. Галлямова. Поволжский
	государственный университет телекоммуникаций и
	информатики (ПГУТИ). Отдел магистратуры. Кафедра
	линий связи и измерений в технике связи (ЛС и ИТС):
науч. рук. Т.Г. Никулина – Самара. 2021. – 74 с.	
Аннотация	Работа посвящена экспериментальному исследованию
	радиусов изгиба оптического волокна в физической
	модели оптического модуля кабеля. Исследуется шаг
	скрутки оптического волокна и радиус его изгиба.
	Показано, что радиусы изгиба меняются по длине
	оптического волокна. Получены численные оценки
	радиусов изгиба. Также в работе рассмотрены вопросы
	обработки и анализа рефлектограмм OTDR для оценки
распределений избыточной длины оптического	
волокна в кабеле на линии.	

Руководитель ВКР

Подпись

Дата

Т.Г. Никулина

Инициалы Фамилия

Введение

В оптических кабелях (ОК) модульной конструкции оптическое волокно (ОВ) прокладывают с некоторой избыточностью [1]. Делается это для предотвращения разрыва волокна при механических воздействиях на кабель, как при его изготовлении, так и при монтаже и последующей эксплуатации. Избыточная длина (ИД) приводит к тому, что оптическое волокно в модуле кабеля многократно изгибается. Данные изгибы носят случайный характер. В идеальной модели ОК оптическое волокно равномерно распределено по всей длине модуля, то есть радиусы изгибов волокна равны между собой. В такой модели нагрузки на оптические волокна будут минимальными. В действительности же избыточная длина распределена случайным образом, что приводит к снижению качества кабеля за счёт подверженности к локальному увеличению механического напряжения в волокне и к росту затухания на изгибах. Помимо этого, избыточная длина ОВ в кабеле является обобщенным критерием оценки качества кабеля. Поэтому исследование распределения избыточности волокна вдоль модуля на сегодняшний день является актуальной задачей.

Целью работы является исследование распределения избыточной длины оптического волокна кабеля модульной конструкции.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- Выполнить физическое моделирование расположения ОВ в оптическом модуле.
- Выполнить исследование распределения радиусов изгиба волокна в физической модели модуля.
- Выполнить исследование распределения радиусов изгиба волокна в кабеле по рефлектограммам реальной трассы.

Объектом исследования выступает оптический модуль кабеля модульной конструкции с оптическим волокном с избыточной длиной.

Предметом исследования является распределение избыточной длины оптического волокна в кабеле модульной конструкции.

Основными источниками информации для написания работы послужили научные труды следующих авторов: Бурдина В.А., Барышников Е.Н., Длюстрова О.В и других.

Методы исследования: для решения задачи исследования равномерности распределения избыточной длины ОВ в кабеле применялось физическое моделирование, эксперимент и анализ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования распределения избыточной длины ОВ в физической модели оптического модуля.
2. Результаты исследования распределения избыточной длины ОВ кабеля ВОЛС находящейся в эксплуатации.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в следующем: на основании анализа результатов исследования распределения избыточной длины ОВ в физической модели оптического модуля показано, что распределение избыточной длины ОВ по длине модуля носит неравномерный характер.

Теоретическая значимость и прикладная ценность полученных результатов:

Показано, что распределение избыточной длины волокна в модуле носит неравномерный характер, вследствие чего на некоторых участках ОВ наблюдался радиус изгиба волокна менее 25 мм.

Получены оценки значений радиусов изгибов ОВ для модулей с диаметров 3 и 2 мм.

Получены оценки распределений избыточной длины оптического волокна кабеля, проложенного в грунт на линии протяженностью 94 км.

Результаты исследований могут быть использованы заводами-производителями ОК.

Цель и задачи написания работы определили ее структуру, которая

состоит из введения, 3 глав и заключения.

Во введении обосновывается актуальность работы, цель, задачи, объект и предмет исследования.

Первая глава раскрывает основные понятия касающиеся области исследований, такие как избыточная длина ОВ, ее контроль и измерение на производстве, а также ее влияния на качество оптического кабеля. В главе выполнен обзор результатов исследований по тематике диссертации, выполненных другими авторами и обзор существующих на сегодняшний день методов измерений распределений избыточной длины волокна в модульной трубке.

Вторая глава посвящена исследованию шага геликоида ОВ и радиусов изгибов ОВ в физической модели оптического модуля. В качестве оптических модулей выступали трубки разных длин и диаметров.

В третьей главе выполнено исследование распределения радиусов изгибов ОВ в кабеле ВОЛС, находящейся в эксплуатации. Описан метод анализа, алгоритм обработки рефлектограмм и получены результаты.

В заключении представлены основные выводы и результаты по проделанной работе.

1 Обзор исследований избыточной длины ОВ в кабелях модульной конструкции

1.1 Общие положения

На сегодняшний день высокоскоростные линии связи строятся с применением оптических кабелей модульной конструкции. С целью предотвращения разрыва оптические волокна в кабеле укладывают с запасом, то есть с определенной избыточностью. Избыточная длина (ИД) оптического волокна (ОВ) является одним из важнейших параметров, влияющих на срок службы кабеля, так как она снижает нагрузку на ОВ при воздействии растягивающих усилий на кабель. С другой стороны, из-за избыточности волокна в модуле кабеля многократно изгибаются, что в свою очередь, приводит к дополнительному затуханию (кабельным потерям) и механическим напряжениям на изгибах оптического волокна [1-4].

Обычно полагают, что ОВ располагаются по траектории, напоминающей геликоиду (рис.1.1) [1-2].

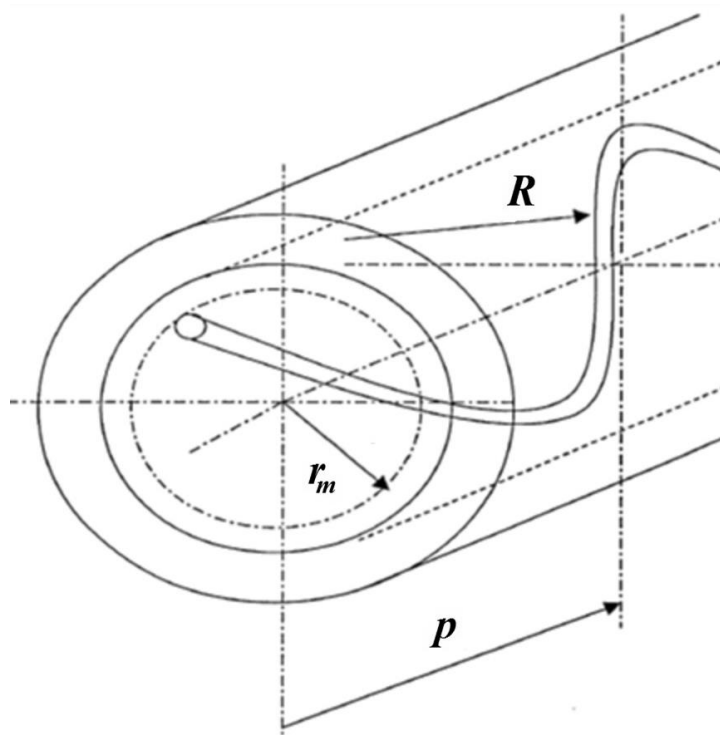


Рис. 1.1 – Расположение ОВ в модульной трубке: R – радиус изгиба ОВ, p – шаг скрутки, r_m – внутренний радиус модуля

При небольшой избыточности длины и равномерном распределении радиусов изгиба нагрузки на оптические волокна будут минимальными. Но распределение избыточности волокна по длине модуля может быть неравномерно, то есть радиусы изгиба ОВ в модулях могут быть распределены вдоль длины ОК случайным образом. В этом случае, при неравномерном распределении ИД вдоль кабеля будет снижаться стойкость к внешним воздействиям всей строительной длины ОК. Это особенно касается подвесных ОК, которые по сравнению с кабелями, укладываемыми в грунт, подвержены повышенным механическим нагрузкам и более экстремальным, чем подземные ОК, климатическим воздействиям, таким как ветер, гололед, температурные изменения, вибрация и другое.

Резкие температурные перепады могут привести к так называемому эффекту «выдавливания» оптических волокон из подвесного кабеля в муфты [5-6]. Связано это с тем, что температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) материалов модульных трубок и оптических волокон существенно отличаются, а именно: ТКЛР для кварцевого стекла составляет около $5,5 \cdot 10^{-7}$ 1/К, для материалов модульных трубок в пределах от $6,5 \cdot 10^{-5}$ 1/К до $1,5 \cdot 10^{-4}$ 1/К. При положительной температуре радиусы изгибов распределены определенным образом. Затем при понижении температуры до низких отрицательных значений из-за разницы ТКЛР модульная трубка уменьшается, а кварц остается неизменным, поэтому ОВ внутри модуля вынужденно сжимается, за счёт чего распределение радиусов изгиба становится еще более неравномерным. При наступлении высоких положительных температур модуль снова увеличивается, и ранее сжатое волокно выстреливает, то есть из модуля кабеля вместе с гидрофобом в муфту выходит до 50 мм волокна. Данный процесс приводит к увеличению механических напряжений на изгибах ОВ и к повышенным затуханиям. На фото ниже представлено выдавливание волокна в кассете муфты.

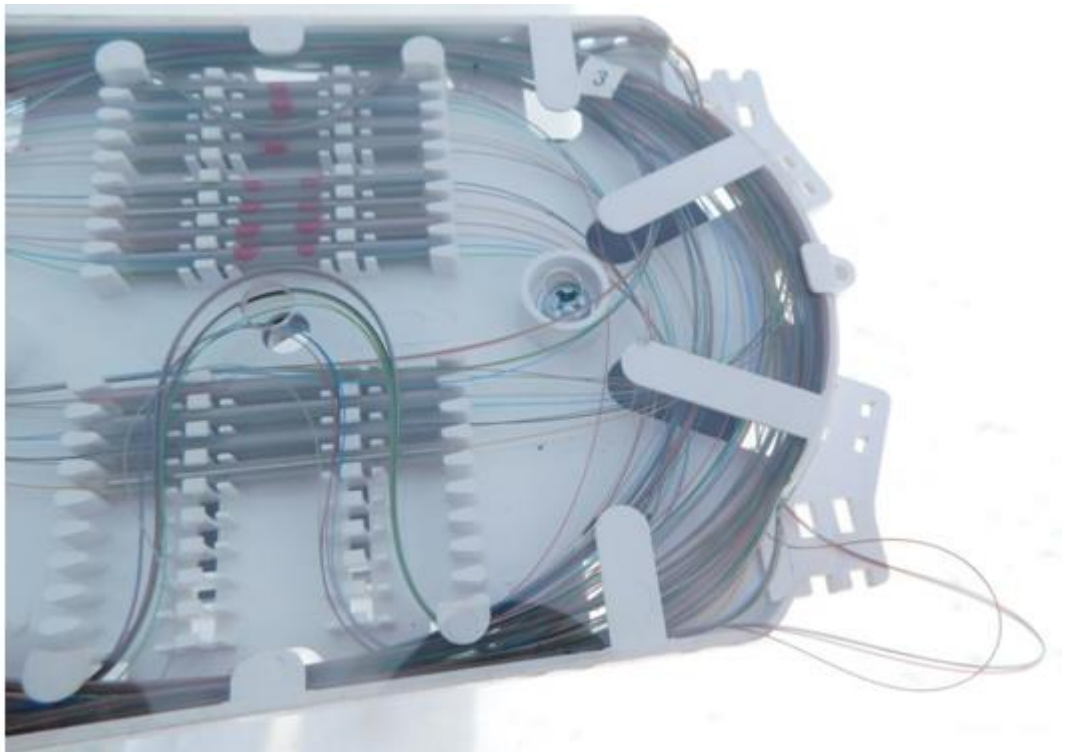


Рис. 1.2 – Выдавливание волокна в cassette муфты

Поэтому в процессе изготовления оптических модулей измеряют и контролируют избыточность ОВ.

1.2 Контроль избыточной длины волокна при производстве ОК заводом-изготовителем

Контроль избыточной длины волокна при производстве ОК заводом-изготовителем выполняют двукратно [7]:

1. На этапе изготовления оптического модуля.
2. После изготовления оптического модуля.

На этапе производства оптического модуля проводят измерение избыточности при экструзии модуля и ОВ. Рассмотрим производство оптического модуля (ОМ) на экструзионной линии OEL [7]. Экструзионная линия — это аппаратный комплекс, главным агрегатом которого является экструдер. Сначала на отдающее устройство устанавливается определенное количество катушек с оптическим волокном. Количество и расцветка волокон и модулей определяется конструкцией кабеля. Затем волокно

подается в головку экструдера, при этом строго контролируется натяжение. В загрузочный бункер экструдера засыпается полибутилентерефталат (ПБТ) в гранулах. ПБТ захватывается витками шнека и перемещается внутрь цилиндра экструдера, где под влиянием температуры и механического воздействия шнека материал разогревается, размягчается и перемещается к головке экструдера. Проходя через головку, полибутилентерефталат просачивается через кольцевой зазор между дорном и матрицей в виде трубки. Параллельно с этим в трубку из ПБТ поступает ОВ и заполняется гидрофобный компаунд. Для охлаждения трубка с ОВ сразу же поступает в ванну с водой, с заданной в технологической документации температурой. Далее модуль обдувается воздухом, чтобы убрать излишки влаги с его поверхности и наматывается на приемную катушку с диаметром щеки 800 мм.

Этот аппаратный комплекс оснащен компрессионной тягой, необходимой для обжатия модуля в процессе охлаждения в ванне, что обеспечивает получение трубки модуля без последующей усадки. Скорость производства ОМ составляет до 350 м/мин. При изготовлении модуля используются катушки повышенной емкости – до 60 км волокна на катушке. Это нужно для обеспечения безостановочной работы экструзионной линии.

На избыточность длины волокна в процессе производства оптического модуля влияют такие технологические факторы, как [1, 2, 4]:

- 1) параметры формования полимерной трубки: наружный и внутренний размеры оптического модуля, марка материала, температура переработки, отношение скорости изготовления оптического модуля к оборотам шнека экструдера;

- 2) параметры подачи гидрофобного заполнителя: марка гидрофобного заполнителя, температура переработки заполнителя, размеры вводящего инструмента;

3) параметры отдачи оптического волокна и приёма готового оптического модуля: натяжение оптического волокна на отдатчике, натяжение оптического модуля между кабестанами, натяжение оптического модуля при намотке на барабан, способ укладки оптического волокна.

4) параметры охлаждения оптического модуля: расстояние от торца матрицы до охлаждающей ванны, скорость изготовления оптического волокна, профиль температуры в охлаждающих ваннах.

Также значительно оказывают влияние время и способ хранения оптического модуля до формирования в сердечник ОК.

В процессе изготовления ОМ избыточную длину волокна контролируют при помощи измерительной системы, которой оснащены линии экструзии. Для оценки стабильности избыточности волокна в изготовленном модуле, анализа и выявления причин возможных несоответствий строят статистический график избыточной длины (рис 1.3) [7].

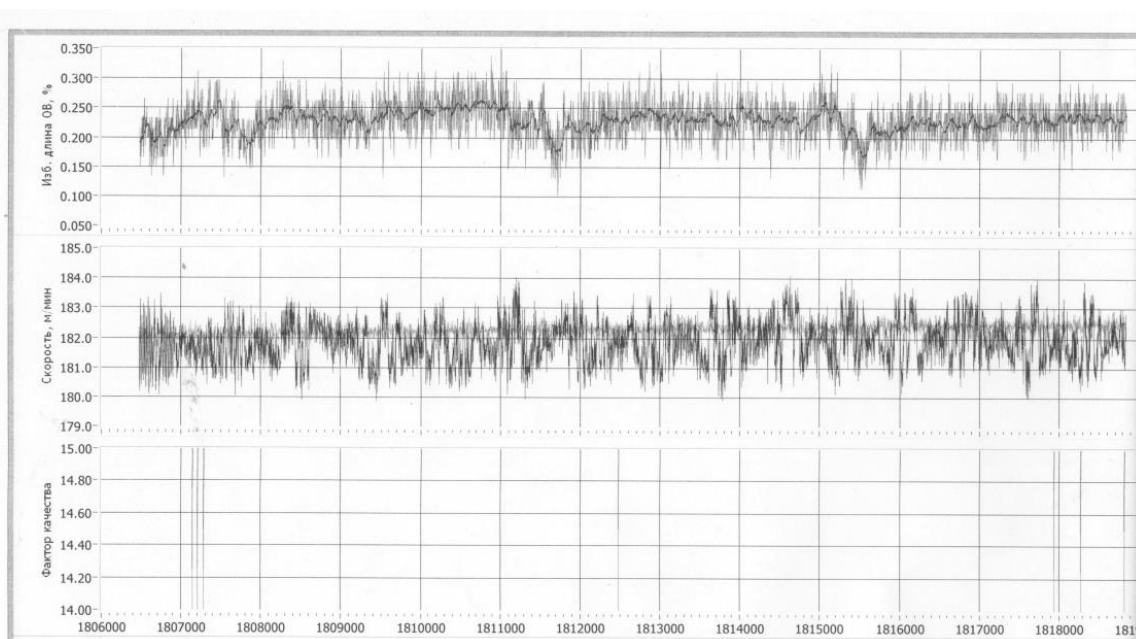


Рис. 1.3 – Пример распечатки статистического графика ИД
в процессе производства модуля

После того, как ОМ изготовили, проводят контроль качества, а именно измеряют избыточную длину волокон на образце изготовленного

модуля [7]. Для измерений используют установку, схема которой представлена на рисунке 1.4. Элементы схемы: 1 – стол, 2 – стойка опоры, 3 – регулируемая стойка опоры, 4 – электромагнит, 5 – блок резки с ножами, 6 – цифровой микрометр, 7 – блок управления, 8 – пневматический цилиндр, 9 – направляющие и крепежные устройства для модуля, 10 – направляющие и крепежные устройства для одного оптического волокна.

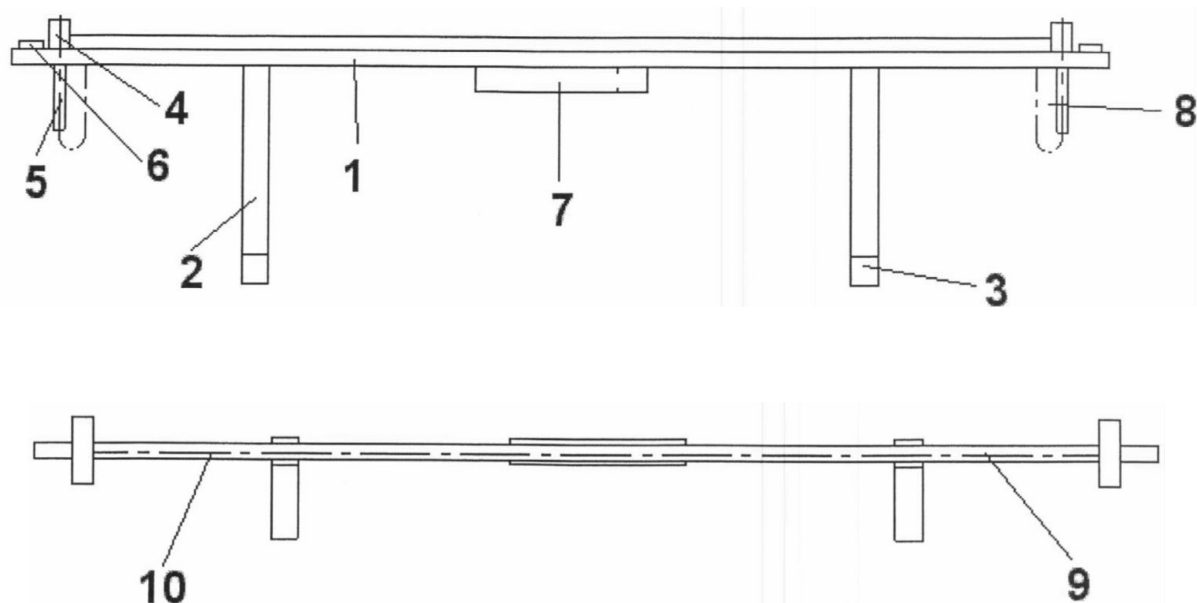


Рис. 1.4 – Схема установки послеоперационного контроля качества

Эта установка предназначена для измерения избыточной длины ОВ в модуле. Для этого модуль укладывают в крепежное устройство (9) и закрепляют специальными зажимами. Далее разрезают концы модуля двумя ножами одновременно. Необходимо отрегулировать положение ножей так, чтобы точная длина при резке составляла 4 м, так как данная установка имеет ограничение по длине образца. Затем из отрезанного образца вытаскивают волокно и укладывают его в направляющие и крепежные устройства (10). Измерение ИД проводят при помощи цифровых микрометров (6). Измерения послеоперационного контроля качества модуля должны выполняться при температуре окружающей среды, в частности $22\pm 4^{\circ}\text{C}$, так как температурный показатель также является важным пунктом.

Измерения ИД проводятся на образцах модуля длиной 4 м, что является выборочной оценкой и также носит случайный характер. Для полноценного оценивания изменения распределения радиусов изгибов волокна вдоль модуля кабеля таких измерений недостаточно.

1.3 Обзор результатов исследований избыточной длины ОВ

Избыточность волокна и, как следствие, изгибы являются причиной растяжения волокон на некоторых участках, что влияет на срок службы. Длютровым О.В. в работе [4] приведена методика расчёта срока службы оптических волокон, основанная на формуле Мицунаги. В результате показано, что для обеспечения надежной эксплуатации волокон в течение 25 лет, растяжение волокон не должно превышать 0,26 %. Если растяжение достигнет 0,44 %, то вероятность обрыва волокон во время эксплуатации составляет 50 %. Также в работе приведена зависимость удлинения волокна, влияющего на срок службы, от радиуса изгиба волокна. Показано что, при радиусе изгиба волокна менее 25 мм удлинение его поверхности превышает 0,26 %, что не обеспечивает надежную эксплуатацию в течение 25 лет. То есть для длительного и качественного использования кабеля максимальное значение избыточности ОВ ограничивается допустимым радиусом изгиба 25 мм.

На изменение распределения избыточности оптического кабеля влияет не только процесс монтажа и эксплуатации кабеля, но и такие технологические процессы, как смотка и размотка кабеля. Овчинниковым А.А. в работе [8] описана разработанная конструкция безынерционной катушки для высокоскоростной размотки оптического микрокабеля, которая позволяет снизить механическую нагрузку на микрокабель. «Отсутствие изгибов с малым радиусом при смотке достигается определенной формой направляющей щеки катушки. Минимальный радиус изгиба профиля направляющей щеки — 25 мм. Однократный изгиб ОК с таким радиусом не приводит к увеличению затухания оптического сигнала в нем».

Авторами научно-исследовательской работы Бурдиным В.А., Андреевым В.А и др. в работе [7] были выполнены исследования избыточной длины ОВ в трех модулях ОК. Модули имели внешний диаметр 2,8 мм, внутренний диаметр 1,6 мм и 8 ОВ в каждом модуле. В исследованиях была проведена обработка результатов измерений избыточной длины ОВ установкой FA 12 фирмы SWISSCAB, Швейцария. Измерения выполнялись при температуре T_n , которая составляла $22\pm 4^\circ\text{C}$. В результате, были получены следующие оценки избыточной длины: среднее значение избыточной длины различных ОВ модуля лежало в пределах 0,168–0,179 %; среднеквадратические отклонения значений избыточной длины составило 0,009–0,016 %. В этой же работе было показано, что избыточная длина при измерениях у различных ОВ в модуле несколько отличалась. Если посмотреть на то, как менялась избыточная длина одних и тех же цветов ОВ в разных модулях, то значение избыточной длины менялось не сильно. Например, для белого ОВ избыточность в трех модулях составляла 0,16750 %, 0,16805 % и 0,16777 %, то есть в среднем 0,168 %. При этом для ОВ другого цвета, избыточность в трех модулях составляла 0,17315 %; 0,17545 %; 0,17430 %, т.е в среднем 0,174 %. Таким образом видно, что для каждого из рассмотренных ОВ значение избыточной длины от модуля к модулю было почти постоянно, изменения не столь существенны, по сравнению с различием избыточной длины между самими волокнами (0,168 % и 0,174 %). Аналогичная ситуация наблюдалась и для всех остальных ОВ модуля. Возможно, это объясняется тем, что при производстве модулей один и тот же цвет ОВ имеет примерно схожее расположение в пучке волокон в модуле. В целом же, выполненные исследования не дают ответа на вопрос о том насколько равномерно распределена избыточная длина ОВ по длине оптического модуля, поскольку были выполнены точечные измерения избыточной длины, которые не дают ответа о распределении избыточности в модуле.

В работе [3] коллективом авторов (Андреев, Б. Попов, В. Попов, М. Важдаев, С. Гаврюшин) были выполнены исследования изменений избыточной длины волокна в самонесущем ОК на отдельных операциях изготовления кабеля. Измерения избыточной длины ОВ также производились точно при помощи установки FA 12, но уже на нескольких этапах изготовления ОК: непосредственно после изготовления модуля, после скрутки модуля в сердечник, после наложения внутренней пластмассовой оболочки кабеля и после проведения приемо-сдаточных испытаний полностью готового ОК. Было показано, что ИД, измеренная непосредственно после изготовления оптического модуля, составила 0,16–0,2%, разброс значений ИД составлял 0,03%. Далее были выполнены измерения ИД ОВ в скрученном сердечнике относительно центрального силового элемента (ЦСЭ). Поскольку напрямую измерить избыточность ОВ относительно модуля установкой FA 12 не представлялось возможным, авторами оценивались значения ИД ОВ скрученных моделей относительно ЦСЭ, а они ожидаемо были больше. Так ИД длины ОВ в скрученном сердечнике составила с учетом коэффициента скрутки 2,313–2,428%. Таким образом, напрямую сравнить значения ИД ОВ после производства модуля и в скрученном сердечнике было невозможно, поэтому авторы выполнили косвенную оценку, ими оценивался разброс значений ИД оптического волокна от модуля к модулю, который не превышает 0,12%. На основании этого авторами работы [3] был сделан вывод, что операция скрутки не оказывает существенного влияния на величину избыточности ОВ в ОК. Аналогичные выводы были сделаны после анализа результатов измерений ИД после наложения внутренней ПЭ оболочки. Различие ИД волокна разных ОК не превышало 0,15%. Анализ результатов измерений ИД готового ОК после приемо-сдаточных измерений также показал незначительное изменение ИД. В итоге авторами работы был сделан вывод, что: в готовом ОК ИД волокна составляет 2,4–2,54% при превышении длины ОК относительно ЦСЭ (длины готового ОК) за счет их скрутки вокруг ЦСЭ на

2,2–2,7%. Разница приведенных результатов показывает, что избыточная длина ОВ в ОМ при выполнении отдельных операций изготовления ОК изменяется незначительно и в готовом кабеле составляет 0,16–0,2% при среднем значении ИД оптического волокна в ОМ 0,19% (после его изготовления). Допустимое значение ИД в исследуемом кабеле равно 0,15–0,25%. При строгом соблюдении технологии изготовления ОК величина ИД волокна, полученная на этапе изготовления ОМ, на последующих операциях практически не изменяется. Однако авторами работы [3] отмечалось также следующее: «Все проведенные выше измерения проводились при нормальных температурных условиях в диапазоне 20–25 °С. В реальных условиях технической эксплуатации самонесущие ОК работают в очень широком температурном диапазоне, практически от 60 до –60 °С. При весьма значительном различии коэффициента линейного расширения ОВ и ОМ (больше, чем на порядок) избыточная длина ОВ в оптическом модуле за счет такого температурного перепада может существенно изменяться и вызывать изгибы ОВ с недопустимо малым радиусом, что неизбежно провоцирует рост затухания и, безусловно, может сказаться на сроке службы ОК».

1.4 Методы измерений распределений избыточной длины волокна в модульной трубке

Вопросам измерения избыточной длины оптического волокна посвящено большое количество работ [2, 4, 9, 10-23].

На этапе производства оптического модуля контроль избыточной длины ОВ в модуле измеряется методами [13-14]. Системы контроля, в которых реализован данный способ, проводят измерения контролируя и сравнивая скорость подачи пучка ОВ и модуля. Однако поскольку в дальнейшем происходит усадка модуля и говорить о неизменности ИД при последующих технологических операциях изготовления ОК в модуле можно лишь в случае, если модуль жестко связан с ЦСЭ [16-17] и как

следствие измерение избыточной длины – данные способы не дают полного представления об избыточной длине ОВ в кабеле. Помимо этого, данные способы невозможно использовать для контроля распределения ИД ОВ в кабеле эксплуатирующейся линии.

Заводами-изготовителями ОК широко применяются способы контроля ИД, при которых после изготовления оптического модуля производится обрезка с двух сторон модуля и далее сравнивается длина модуля и волокна обрезанного участка [18-19]. Однако данные способы относятся к точечному контролю и не позволяют выполнить оценку распределения избыточной длины ОВ по длине модуля. Данные способы относятся к разрушающим – поэтому они не применимы на эксплуатирующейся линии также.

Еще одним способом является измерение при помощи Бриллюэновского рефлектометра [17]. В этом случае Бриллюэновский рефлектометр В-OTDR подключается к ОВ строительной длины кабеля и затем снимается характеристика Бриллюэновского обратного рассеяния. Анализируя характеристики, выполняется оценка ИД ОВ по длине модуля. Одним из недостатков данного способа является то, что излучение от В-OTDR распространяется в сердечнике волокна, а это не позволяет выявлять участки ОВ с изгибом. Фактически В-OTDR оценивает распределение напряжений в ОВ, вызванных разными факторами, в том числе и изгибами. Выше было сказано, что избыточность ОВ вызывает изгибы волокна, которые могут быть на определенных участках с радиусом менее допустимого. Таким образом, встает вопрос о корректности таких оценок. Кроме того существенным недостатком, который ограничивает применение В-OTDR, является высокая стоимость. В эксплуатации находится ограниченное число данных рефлектометров, что не позволяет использовать их массово.

Известны рефлектометрические методы оценки ИД, которые основываются на измерениях потерь в ОВ [2, 7, 9-12, 22]. Они могут быть

реализованы с помощью широко распространенных импульсных оптических рефлектометров обратного рассеяния (OTDR). OTDR – это измерительный прибор, который предназначен для определения расстояния до неоднородностей показателя преломления оптического волокна, а также характер повреждения. Как правило, все методы основаны на сравнительной оценке характеристик обратного рассеяния, снятых на разных длинах волн. Достоинствами таких способов является низкая стоимость, OTDR в сравнении с В-OTDR. Но при разработке конструкций ОВ стремятся минимизировать потери на изгибах, что является существенным ограничением для данного метода. К примеру, он не применим при использовании волокон с уменьшенными потерями на изгибах (G. 657). Но стандартные ступенчатые волокна также востребованы, поэтому этот метод применим для ОВ без минимизации потерь на изгибе. Так же в ряде работ показано, что частично данные ограничения можно снять за счет измерений в условиях, при которых потери на изгибах волокна возрастают, например, при низкой отрицательной температуре или при увеличении длины волны зондирующего сигнала (в частности, на длине волны 1625 нм) [10-12].

Работа [23] посвящена способу измерений распределений избыточной длины волокна на основе поляризационного импульсного оптического рефлектометра (Polarization Optical Time Domain Reflectometer - POTDR), так как он наиболее универсален за счёт отсутствия ограничения к типам волокон. Поляризационная рефлектометрия во временной области основана на зондировании ОВ линейно-поляризованными оптическими импульсами и анализе поляризационных характеристик излучения обратного рэлеевского рассеяния. Двулучепреломление волокна меняется на изгибах под действием растягивающих нагрузок. Это отображается поляризационными характеристиками обратного рассеяния. Этот метод хорош тем, что применим для волокон G.657. Но данные рефлектометры имеют ограничение по расстоянию, а также у них достаточно высокая стоимость.

Как уже было сказано ранее, одним из оптимальных методов является анализ избыточной длины волокна на основе обработки рефлектограмм OTDR снятых на разных длинах волн λ_i . Данному методу и будет посвящена 3 глава.

1.5 Выводы

Оптические кабели модульной конструкции подразумевают укладку волокон с небольшим запасом. За счёт избыточности достигается защита волокон от растягивающих усилий, действующих на кабель. В то же время избыточная длина приводит к многократным изгибам волокна внутри модуля кабеля, и их распределение носит случайный характер. На изгибах возникает механическое напряжение, что в целом сказывается на сроке службы кабеля. Поэтому при разработке конструкций ОК с одной стороны требуется выбрать избыточную длину ОВ достаточной для обеспечения требуемой допустимой растягивающей нагрузки на кабель, но при этом следует так же учитывать, что при увеличении избыточной длины увеличивается прирост затухания и возрастают механические напряжений на изгибах ОВ. Но срок службы кабеля зависит не только от параметров, учтённых при производстве кабеля. Распределение ИД волокна в кабеле величина непостоянная, и это влияет на то, останется ли прирост затухания, а также механические напряжения на изгибах ОВ в допустимых пределах или нет. Поэтому данный параметр контролируют при изготовлении модулей. Однако измерения избыточности длины на этапе изготовления ОМ проводится на длине модуля 4 м, так как установка не позволяет взять отрезок большей длины, то есть оценка получается выборочной. Также в процессе последующих технологических операций изготовления кабеля распределение кривизны ОВ может изменяться. Вышеуказанное говорит об актуальности задачи измерения распределений избыточной длины, и, как следствие, радиусов изгиба волокна в модульных трубках после полного изготовления кабеля и в процессе эксплуатации.

2 Исследование радиусов изгибов оптического волокна в физической модели оптического модуля кабеля

2.1 Общие положения

В идеальной модели оптического кабеля (ОК) оптическое волокно равномерно распределено по всей длине модуля, то есть радиусы изгибов волокна равны между собой. В такой модели нагрузки на оптические волокна будут минимальными. В действительности же избыточная длина (ИД) распределена случайным образом, что приводит к снижению качества кабеля за счёт подверженности к увеличению механического напряжения в волокне и к росту затухания на изгибах.

В данной главе описывается серия экспериментов, цель которых исследовать насколько неравномерно может меняться величина избыточной длины (и связанная с ней величина радиуса изгиба ОВ) по длине оптического модуля. В качестве физической модели оптического модуля используются стеклянные прозрачные трубки, которые позволяют увидеть, как изменяются радиусы изгибов волокна и измерить изменение шага геликоида.

2.2 Физическая модель

Для демонстрации реального поведения волокна внутри модуля кабеля была реализована физическая модель оптического модуля. Вместо модуля использовались полые прозрачные трубки из стекла. В работе брали именно стеклянные прозрачные трубки, чтобы наглядно увидеть распределение избыточной длины и измерить изменение шага геликоида ОВ.

Диаметр настоящих модулей, применяемых в ВОК, составляет от 1.8 мм до 3 мм. В таблице (2.1) представлены номинальные значения диаметров оптических модулей для кабелей с 4, 8 и 12 оптическими волокнами, а также значения, полученные по результатам измерений в работе [26] для оптических кабелей.

Таблица 2.1

Характеристики оптических модулей

Параметр		Ср. значение	Ном.
4 ОВ	Внешний диаметр, мм	2,005	$2,0 \pm 0,1$
	Толщина стенки, мм	0,333	$0,3 \pm 0,05$
8 ОВ	Внешний диаметр, мм	2,283	$2,3 \pm 0,1$
	Толщина стенки, мм	0,368	$0,35 \pm 0,05$
12 ОВ	Внешний диаметр, мм	2,468	$2,5 \pm 0,1$
	Толщина стенки, мм	0,370	$0,35 \pm 0,05$

По данной работе видно, что измеренные значения отличаются от номинальных, но находятся в пределах допустимой нормы.

В данной работе в качестве физической модели модуля применялись 2 трубки диаметром 2 мм и одна трубка – 3 мм, чтобы максимально приблизиться к реальным значениям.

На рисунке (2.1) представлен общий вид трёх трубок. Трубки имеют длину 358, 360 и 129 мм соответственно.

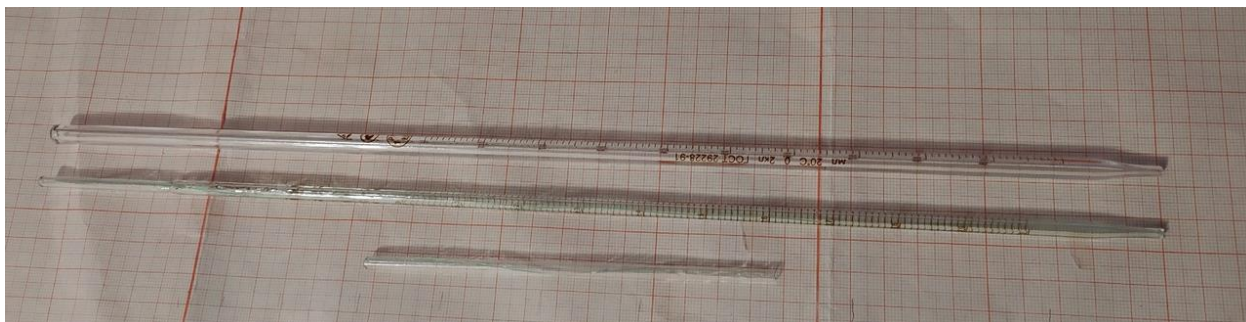


Рис. 2.1 – Внешний вид трубочек

Оптические волокна помещались в трубки с избыточной длиной. Внутри модуля заливали гидрофобный компаунд, главным назначением которого является предотвращение распространения влаги и воды, но в данном случае он должен обеспечивать снижение коэффициента трения между волокнами и стенкой модуля, чтобы волокна могли свободно

перемещаться внутри модуля, даже при самом незначительном воздействии. Вместо гидрофобного заполнителя в эксперименте пробовали использовать подсолнечное масло, что не дало положительного результата, так как оно затрудняет движение волокна (волокно прилипает к стенкам модуля).

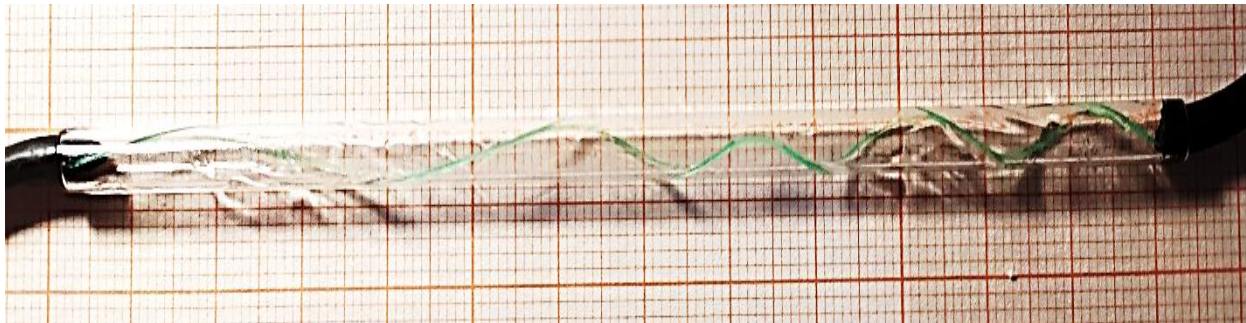


Рис. 2.2 – Общий вид физической модели

В итоге было принято решение использовать именно гидрофобный гель, который для эксперимента был предоставлен ЗАО «СОКК».

2.3 Методика проведения эксперимента

Работа заключалась в следующем.

- 1) При помощи штангенциркуля измерили внутренний диаметр трубки d .



Рис. 2.3 – Измерение диаметра трубки

2) Измерили длину трубки L_{tube} .



Рис. 2.4 – Измерение длины трубки

3) Затем определяли максимальную избыточную длину волокна L_f . В силу того, что ОВ обладает определенной жесткостью, его избыточная длина, которая может поместиться в трубку, была ограничена этой жесткостью. При проведении эксперимента максимальная возможная длина оптического волокна определялась практическим образом. Для этого один конец трубки закрепляли заглушкой и проталкивали в неё максимально возможную длину волокна. Затем обрезали лишнее волокно.

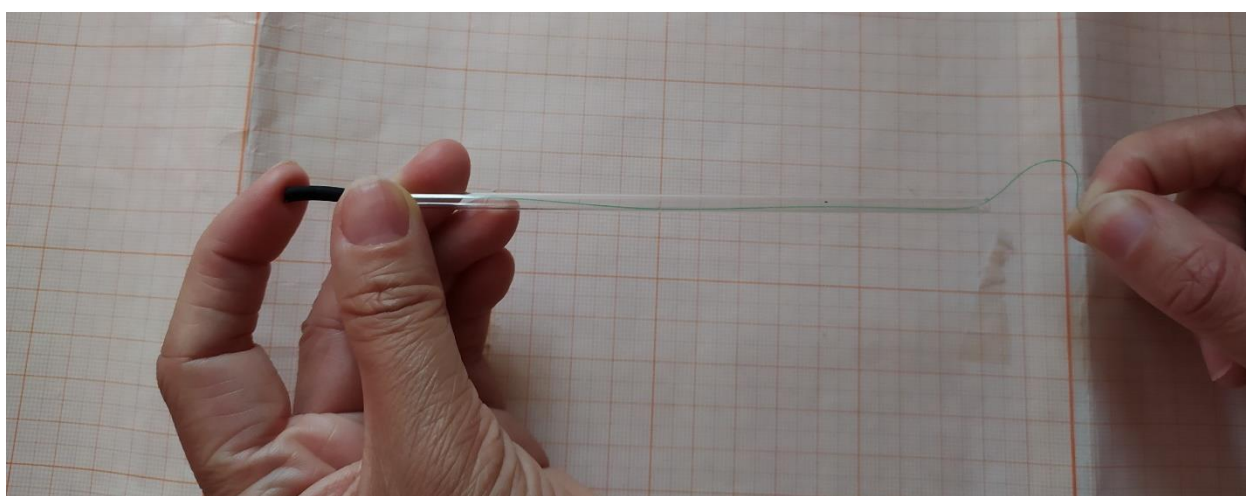


Рис. 2.5 – Нахождение максимально возможной ИД ОВ для конкретной трубки

4) Далее вытаскивали волокно и измеряли его длину.

Для проведения исследования с этой же трубкой, но с другой избыточностью длину волокна последовательно уменьшали от максимально возможной длины.



Рис. 2.6 – Измерение длины волокна

5) Затем смазали внутреннюю поверхность трубки гидрофобом для снижения коэффициента трения между волокном и стенкой трубки.

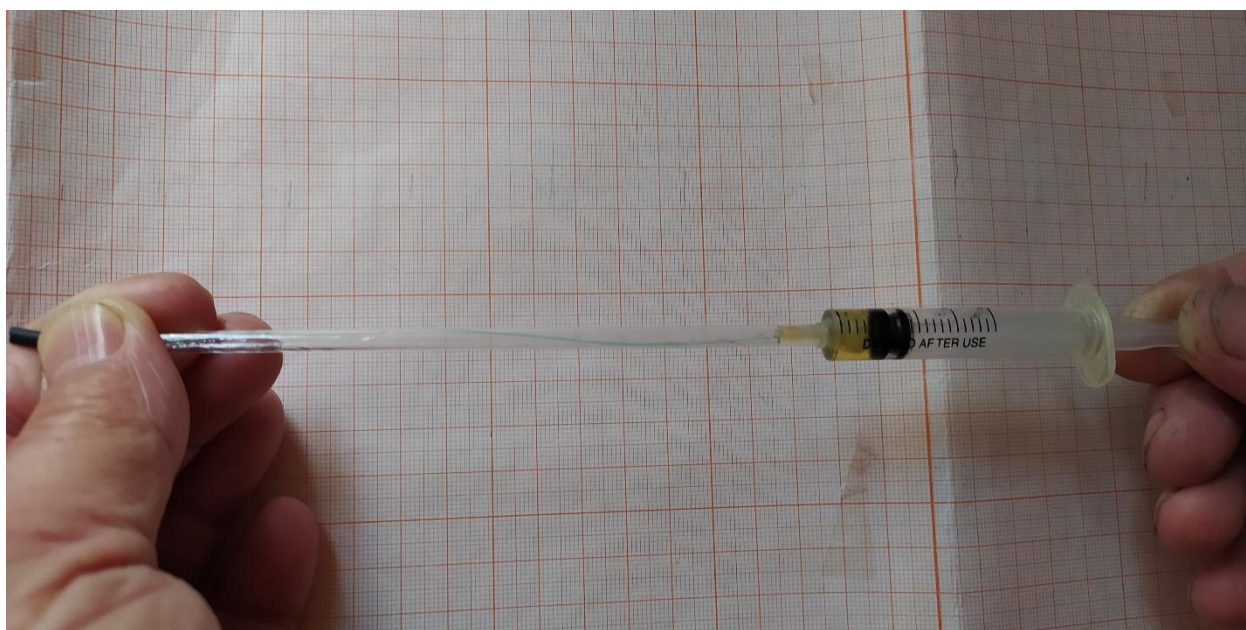


Рис. 2.7 – Заполнение трубки гидрофобом

6) Засунув волокно обратно в трубку, закрепляли трубку со второго конца заглушкой и начинали измерение.

Последовательно измеряли шаг геликоида ОВ по длине трубки. За шаг геликоида принимали длину участка между двумя максимумами ОВ. На фото рис. 2.8 представлено измерение.



Рис. 2.8 – Измерение шага геликоида

Аналогично, проводились измерения для других трубок и разной избыточности волокна.

Фото измерений делалось на фоне миллиметровой бумаги для удобства при дальнейшем анализе.

2.4 Протоколы измерений шага геликоида

Суть первого эксперимента состояла в том, чтобы пронаблюдать, как меняется шаг геликоида волокна по длине рубки в трубках разных длин и диаметров.

1) В таблице представлены параметры трубки и максимальная избыточная длина ОВ.

Таблица 2.2

Параметры первой трубки

L tube	d tube	Lf max
358 мм	3 мм	365 мм

а) Максимальная избыточная длина волокна $L_f = 365$ мм.

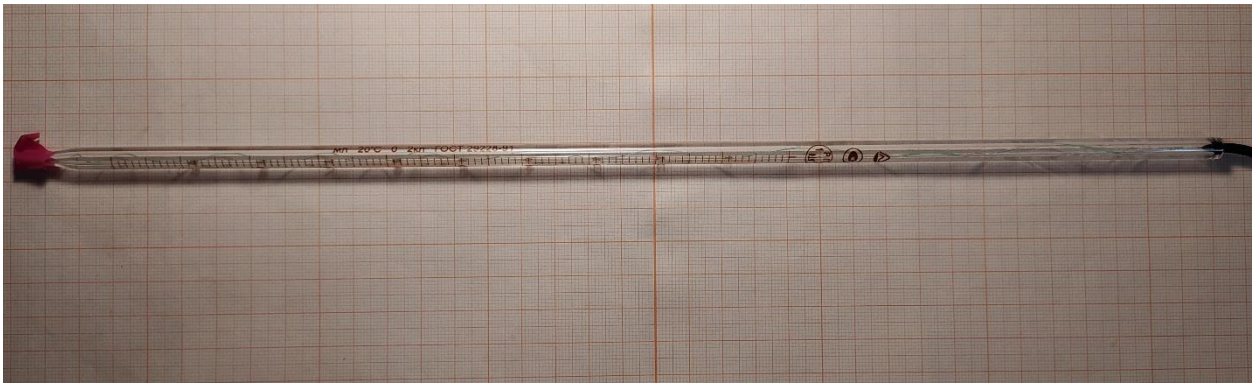


Рис. 2.9 – Измерение шага геликоида волокна в трубке длиной 358 мм при максимальной длине ОВ 365 мм

Далее были проведены измерения шага геликоида волокна в трубке. В таблице представлены результаты измерений в мм.

Таблица 2.3

Шаг геликоида при ИД волокна 365 мм

p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10
50	35	44	32	34	22	17	32	21	13

б) Затем уменьшили длину ОВ на 2 мм $L_f = 363$ мм.

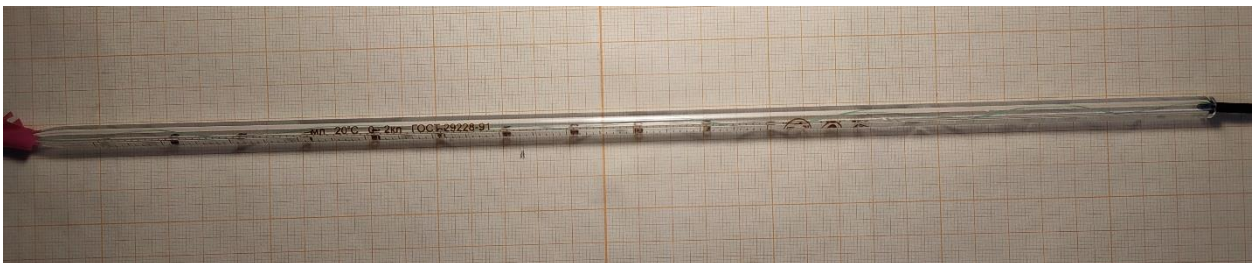


Рис. 2.10 –Измерение шага геликоида волокна в трубке длиной 358 мм при длине ОВ 363 мм

В некоторых случаях возникали волны, которые невозможно было идентифицировать, как одну единую или две отдельные - две незаметные волны, перетекающие в одну большую. На фото ниже представлен такой случай.

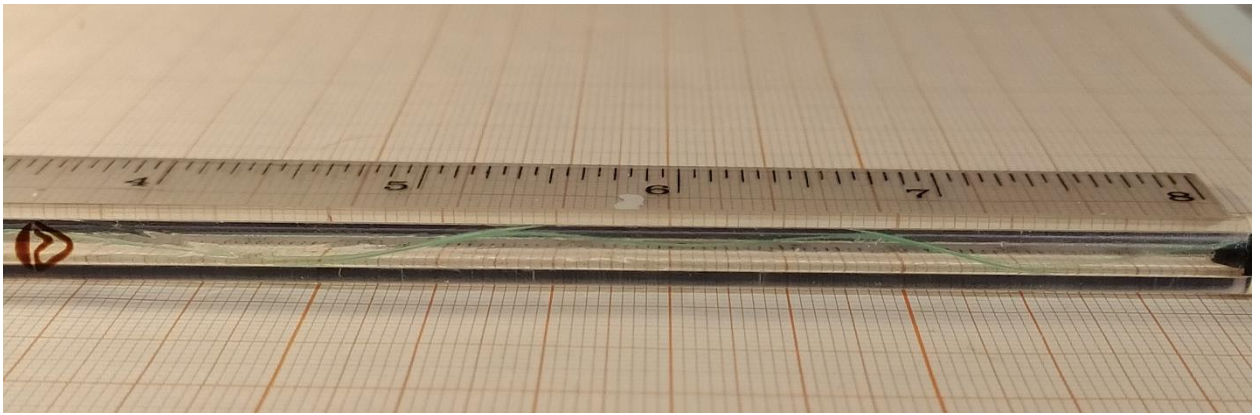


Рис. 2.11 – Возникновение «неоднозначных» шагов геликоида
 Аналогично первому пункту измерили шаг геликоида ОВ.

Таблица 2.4

Шаг геликоида при ИД волокна 363 мм

P1	P2	P3	P4	P5	P6
62	45	43	48	45	50

в) Далее уменьшили длину волокна еще на 3 мм $L_f = 360$ мм.

Изменение шага геликоида представлено в таблице.

Таблица 2.5

Шаг геликоида при ИД волокна 360 мм

P1	P2	P3	P4
50	81	64	163

2) В таблице представлены параметры второй трубки и максимально возможная для неё избыточная длина волокна

Таблица 2.6

Параметры второй трубки

L tube	d tube	Lf max
129 мм	3 мм	134 мм

а) Максимальная длина волокна для второй трубки $L_f = 134$ мм.

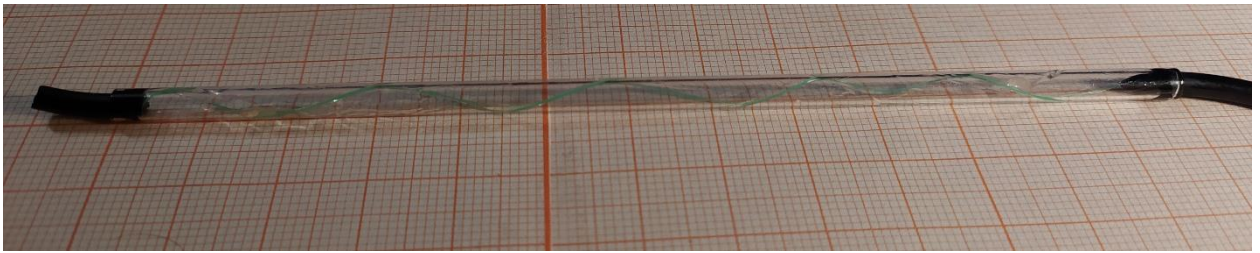


Рис. 2.12 – Измерение шага геликоида волокна в трубке длиной 129 мм при длине ОВ 134 мм

Получены следующие значения шага геликоида:

Таблица 2.7

Шаг геликоид при ИД волокна 134 мм

P1	P2	P3	P4	P5
25	27	27	28	22
0-25	25-52	52-79	79-107	107-129

где значения во второй строке – это шаг геликоид, в третьей строке – их расположение вдоль трубки.

б) Затем длину ОВ укорачиваем на 2 мм $L_f = 132$ мм.

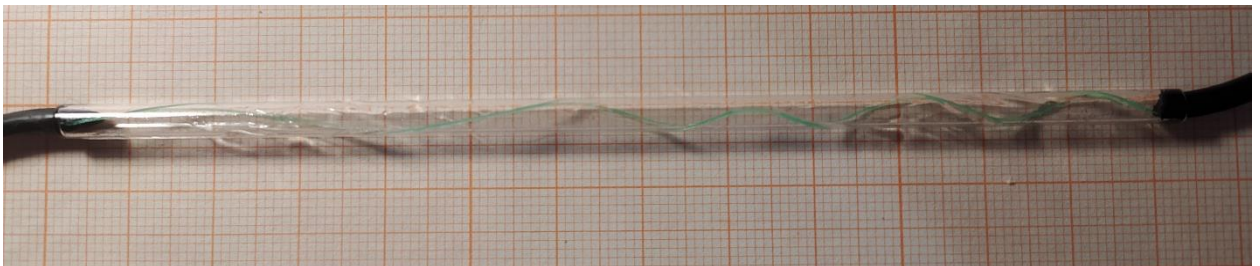


Рис. 2.13 – Измерение шага геликоида волокна в трубке длиной 129 мм при длине ОВ 132 мм

Ниже представлены значения шага геликоида:

Таблица 2.8

Шаги геликоиды при ИД волокна 132 мм

P1	P2	P3	P4	P5
15	22	25	38	29
0-15	15-37	37-62	62-100	100-129

в) Теперь уменьшили длину ОВ еще на 2 мм $L_f = 130$ мм.

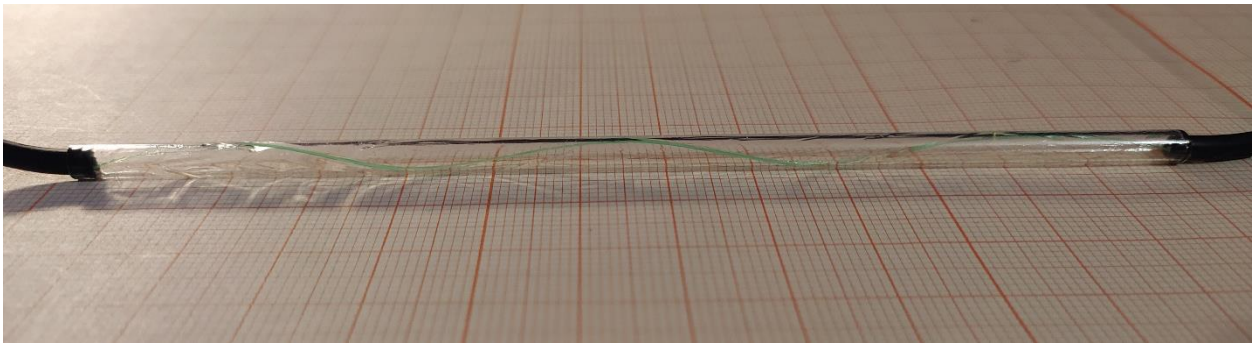


Рис. 2.14 – Измерение шага геликоида волокна в трубке длиной 129 мм при длине ОВ 130 мм

Таблица 2.9

Шаг геликоида при ИД волокна 130 мм

P1	P2	P3
40	44	45
0-40	40-84	84-129

3) В таблице представлены параметры третьей трубки и максимально возможная для неё избыточная длина волокна

Таблица 2.10

Параметры третьей трубки

L tube	d tube	Lf max
360 мм	2 мм	366 мм

а) Максимальная длина волокна для третьей трубки $L_f = 366$ мм.

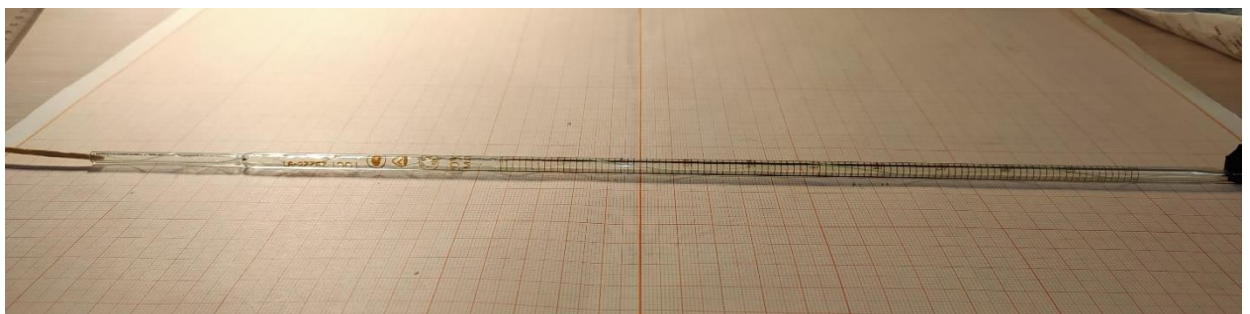


Рис. 2.15 – Измерение шага геликоида волокна в трубке длиной 360 мм при длине ОВ 366 мм

Шаг геликоида при ИД волокна 366 мм

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
40	60	72	52	41	30	25	21	19
0-40	40-100	100-172	172-224	224-265	265-295	295-320	320-341	341-360

б) Затем длину ОВ уменьшили на 2 мм $L_f = 364$ мм.

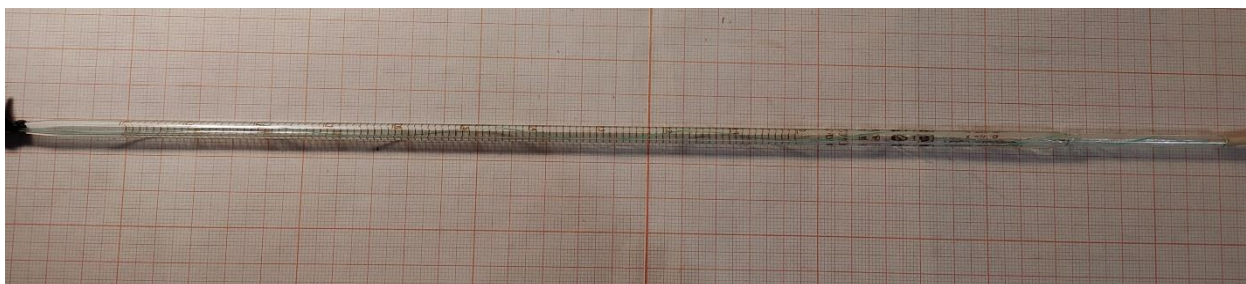


Рис. 2.16 – Измерение шага геликоида волокна в трубке длиной 360 мм при длине ОВ 364 мм

Шаг геликоида при ИД волокна 364 мм

P1	P2	P3	P4	P5	P6
40	34	62	98	74	52
0-40	40-74	74-136	136-234	234-308	308-360

в) Длину ОВ уменьшили еще на 2 мм $L_f = 362$ мм.

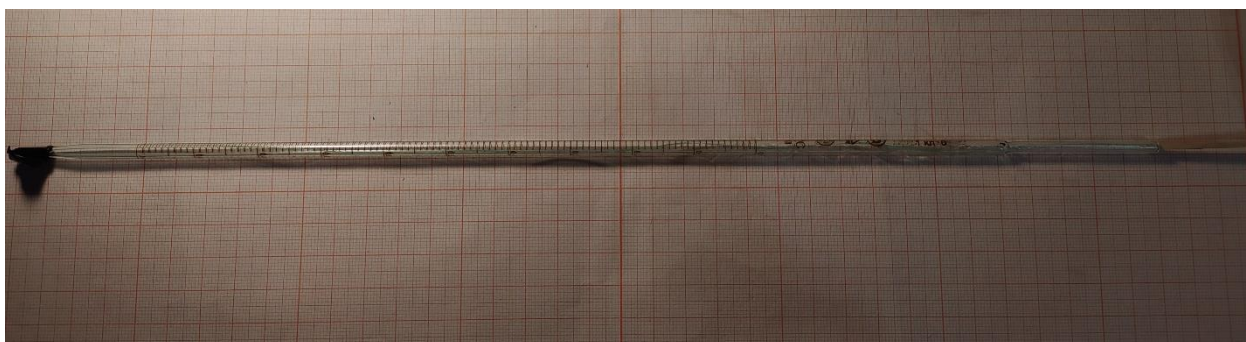


Рис. 2.17 – Измерение шага геликоида волокна в трубке длиной 360 мм при длине ОВ 362 мм

Шаг геликоида при ИД волокна 362 мм

P1	P2	P3	P4
52	60	73	175
0-52	52-112	112-185	185-360

2.5 Протоколы измерений шага геликоида при постоянных параметрах трубки

Во втором эксперименте размеры трубки и волокна взяты из таблицы 2.2. В данном эксперименте размеры трубки и волокна были неизменны. Волокно прокладывали в трубке, измеряли шаг геликоида, затем вытаскивали волокно и выполняли ту же операцию. Количество таких измерений – 5 штук. Данный эксперимент показал, что даже при одинаковых входных условиях шаг геликоида и радиус изгиба величины непостоянные.

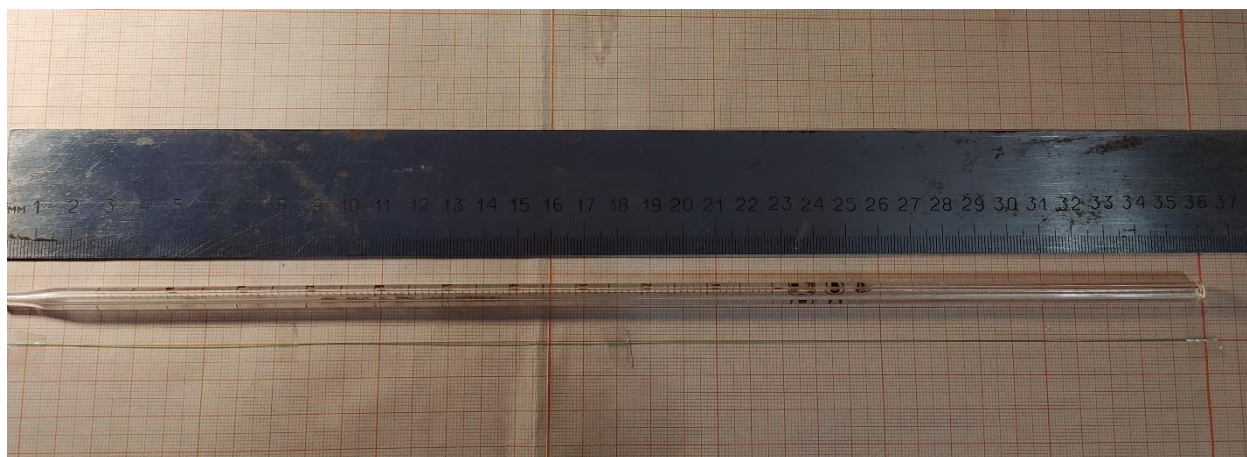


Рис. 2.18 – Общий вид измерений во втором эксперименте

Далее проводили измерения шага геликоида волокна в трубке при помощи линейки. В таблице представлены результаты измерений в мм. Снизу указан шаг геликоида, сверху его расположение в мм относительно трубки.

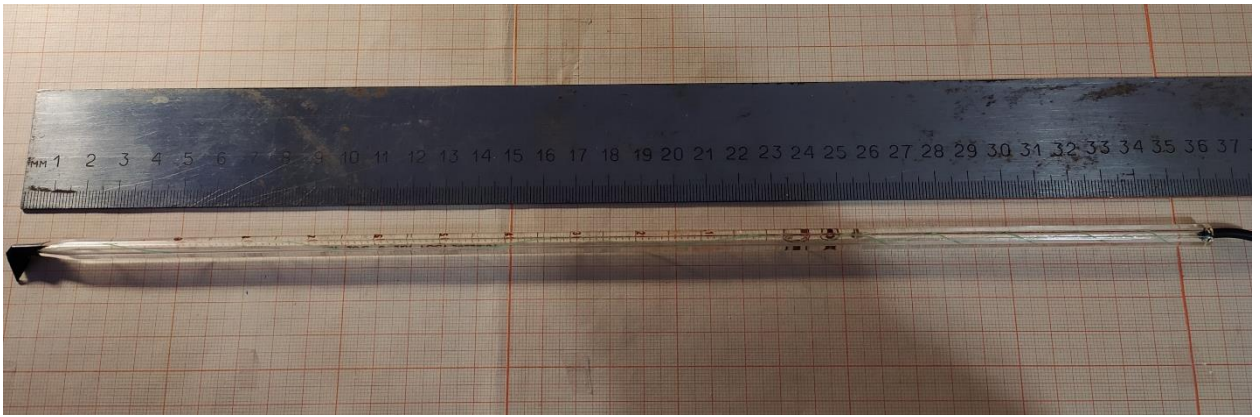


Рис. 2.19 – Измерение при первой прокладке волокна

Таблица 2.14

Шаг геликоида при первой прокладке волокна

луч	0-30	30-90	90-122	122-154	154-218	218-248	248-256	256-280	280-300	300-321	321-340	340-358
Р, мм	30	60	32	32	64	30	8	24	20	21	19	18



Рис. 2.20 – Измерение при второй прокладке волокна

Таблица 2.15

Шаг геликоида при второй прокладке волокна

луч	0-33	33-60	60-92	92-134	134-175	175-209	209-252	252-286	286-313	313-333	333-358
Р, мм	33	27	32	42	41	34	43	34	27	20	25

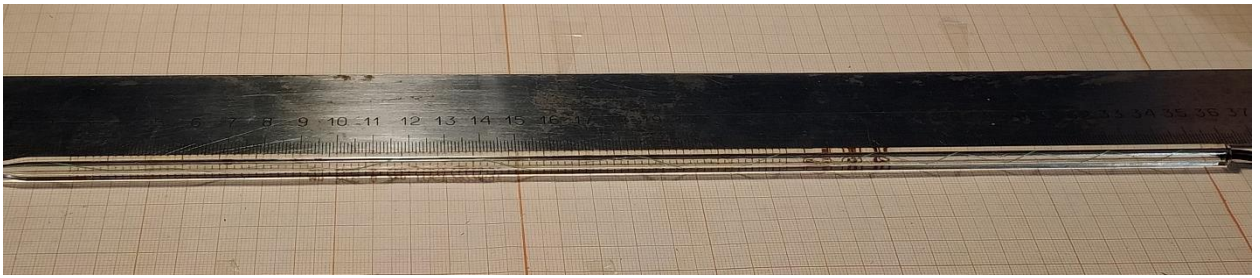


Рис. 2.21 – Измерение при третьей прокладке волокна

Таблица 2.16

Шаг геликоида при третьей прокладке волокна

луч	0-26	26-55	84-116	116-138	138-185	185-222	222-250	250-274	274-297	297-320	320-342	342-358
P, мм	26	29	32	22	47	37	28	24	23	23	22	16

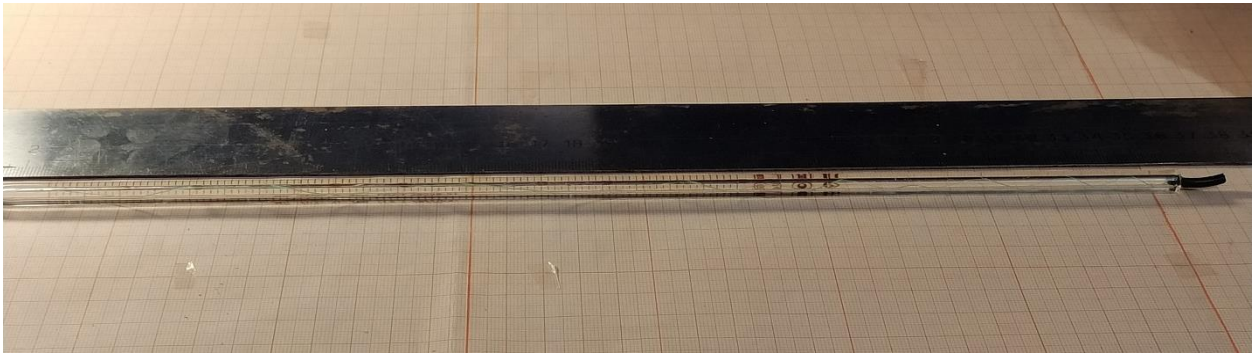


Рис. 2.22 – Измерение при четвертой прокладке волокна

Таблица 2.17

Шаг геликоида при четвертой прокладке волокна

луч	0-28	28-69	69-95	95-149	149-211	211-235	235-257	257-278	278-300	300-324	324-343	343-358
P, мм	28	41	26	54	62	24	22	21	22	24	19	15

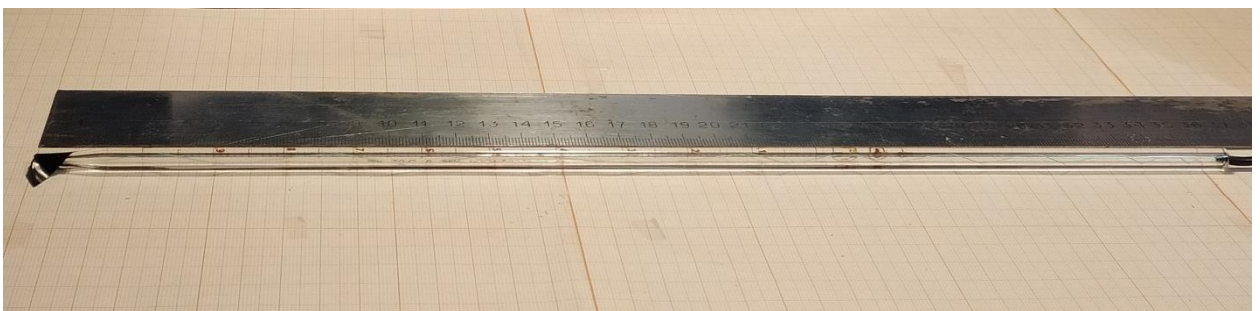


Рис. 2.23 – Измерение при пятой прокладке волокна

Шаг геликоида при пятой прокладке волокна

луч	0-34	34-84	84-139	139-204	204-236	236-267	267-294	294-321	321-339	339-353
P, мм	34	50	55	65	32	31	27	27	18	14

2.5 Формулы для анализа результатов эксперимента

Как уже было сказано ранее, в оптическом модуле волокно располагается по спиралеобразной траектории (по винтовой линии).

Избыточность волокна находится, как отношение превышения длины волокна к длине трубки:

$$K = \frac{L_f - L_{tube}}{L_{tube}} \quad (2.2)$$

где L_f – длина ОВ;

L_{tube} – длина трубки.

Радиус изгиба ОВ, уложенного по траектории винтовой линии, определяется как величина обратная кривизне, и может быть рассчитан по формуле [23]:

$$R_{изм} = r_{tube} \cdot \left(1 + \left(\frac{p}{2\pi \cdot r_{tube}}\right)^2\right), \text{ мм} \quad (2.3)$$

где p – измеренный шаг геликоида ОВ, мм; r_{tube} – внутренний радиус оптического модуля, мм.

Воспользовавшись формулой (2.3) выполним расчет значений радиусов изгибов по длине трубки на основании измеренных значений шага геликоида ОВ по длине трубки.

Теоретическое значение радиуса изгиба получим по формуле [23]:

$$(2.4)$$

$$R_{\text{теор}} = r_{\text{tube}} \cdot \left(\frac{1}{1-(K+1)^{-2}} \right)$$

Здесь K - избыточная длина ОВ, рассчитанная по соотношению 2.2.

2.7 Обработка результатов

1. $L_{\text{tube}} = 358 \text{ мм}$ и $d = 3 \text{ мм}$

а) $L_f = 365 \text{ мм}$.

Избыточная длина равна:

$$K = \frac{L_f - L_{\text{tube}}}{L_{\text{tube}}} = \frac{365 - 358}{358} = 0,019 \quad (2.5)$$

Шаг геликоиды равен:

$$p_{\text{теор}} = \frac{2\pi r}{\sqrt{K^2 - 1}} = \frac{2\pi \cdot 1,5}{\sqrt{1,02^2 - 1}} = 47,43 \text{ мм} \quad (2.6)$$

Радиус изгиба можно рассчитать теоретически по данной формуле:

$$R_{\text{теор}} = r_{\text{tube}} \cdot \left(\frac{1}{1-(K+1)^{-2}} \right) = 1,5 \cdot \left(\frac{1}{1-(0,019+1)^{-2}} \right) = 39,48 \text{ мм} \quad (2.7)$$

По измеренным в пункте 2.5 шагам геликоиды рассчитали радиусы изгибов. Ниже представлен расчет радиуса изгиба ОВ для первого шага геликоиды:

$$R_{\text{изм}} = r_{\text{tube}} \cdot \left(1 + \left(\frac{p}{2\pi \cdot r_{\text{tube}}} \right)^2 \right) = 1,5 \cdot \left(1 + \left(\frac{50}{2\pi \cdot 1,5} \right)^2 \right) = 43,76 \text{ мм} \quad (2.8)$$

б) $L_f = 363 \text{ мм}$

Избыточность составила:

$$K = \frac{L_f - L_{\text{tube}}}{L_{\text{tube}}} = \frac{363 - 358}{358} = 0,013 \quad (2.9)$$

Для рассматриваемого случая шаг геликоиды равен:

$$p_{\text{теор}} = \frac{2\pi r}{\sqrt{K^2 - 1}} = \frac{2\pi \cdot 1,5}{\sqrt{1,014^2 - 1}} = 56,195 \text{ мм} \quad (2.10)$$

Теоретически рассчитанный радиус изгиба ОВ составил:

$$R_{\text{теор}} = r_{\text{tube}} \cdot \left(\frac{1}{1-(K+1)^{-2}} \right) = 1,5 \cdot \left(\frac{1}{1-(0,013+1)^{-2}} \right) = 54,82 \text{ мм} \quad (2.11)$$

Радиус изгиба ОВ для первого шага геликоиды по результатам измерений:

$$R_{\text{изм}} = r_{\text{tube}} \cdot \left(1 + \left(\frac{p}{2\pi \cdot r_{\text{tube}}}\right)^2\right) = 1,5 \cdot \left(1 + \left(\frac{62}{2\pi \cdot 1,5}\right)^2\right) = 66,47 \text{ мм} \quad (2.12)$$

в) $L_f = 360$ мм.

K – избыточная длина, рассчитываемая по формуле:

$$K = \frac{L_f - L_{\text{tube}}}{L_{\text{tube}}} = \frac{360 - 358}{358} = 0,005 \quad (2.13)$$

Для рассматриваемого случая:

$$p_{\text{теор}} = \frac{2\pi r}{\sqrt{K^2 - 1}} = \frac{2\pi \cdot 1,5}{\sqrt{1,006^2 - 1}} = 89,038 \text{ мм} \quad (2.14)$$

Теоретически рассчитанный радиус изгиба ОВ составил:

$$R_{\text{теор}} = r_{\text{tube}} \cdot \left(\frac{1}{1 - (K+1)^{-2}}\right) = 1,5 \cdot \left(\frac{1}{1 - (0,005+1)^{-2}}\right) = 135,37 \text{ мм} \quad (2.15)$$

Радиус изгиба ОВ для первого шага геликоиды по результатам измерений:

$$R_{\text{изм}} = r_{\text{tube}} \cdot \left(1 + \left(\frac{p}{2\pi \cdot r_{\text{tube}}}\right)^2\right) = 1,5 \cdot \left(1 + \left(\frac{50}{2\pi \cdot 1,5}\right)^2\right) = 43,76 \text{ мм} \quad (2.16)$$

2. $d = 3$ мм и $L_{\text{tube}} = 129$ мм

а) $L_f = 134$ мм.

K – избыточная длина, рассчитываемая по формуле:

$$K = \frac{L_f - L_{\text{tube}}}{L_{\text{tube}}} = \frac{134 - 129}{129} = 0,038 \quad (2.17)$$

Теоретически шаг геликоиды:

$$p_{\text{теор}} = \frac{2\pi r}{\sqrt{K^2 - 1}} = \frac{2\pi \cdot 1,5}{\sqrt{1,039^2 - 1}} = 33,527 \text{ мм} \quad (2.18)$$

При этом теоретически рассчитанный радиус изгиба ОВ составил:

$$R_{\text{теор}} = r_{\text{tube}} \cdot \left(\frac{1}{1-(K+1)^{-2}} \right) = 1,5 \cdot \left(\frac{1}{1-(0,038+1)^{-2}} \right) = 20,48 \text{ мм} \quad (2.19)$$

Радиус изгиба ОВ для первого шага геликоиды по результатам измерений:

$$R_{\text{изм}} = r_{\text{tube}} \cdot \left(1 + \left(\frac{p}{2\pi \cdot r_{\text{tube}}} \right)^2 \right) = 1,5 \cdot \left(1 + \left(\frac{25}{2\pi \cdot 1,5} \right)^2 \right) = 12,06 \text{ мм} \quad (2.20)$$

б) $L_f = 132 \text{ мм}$.

K – избыточная длина, рассчитываемая по формуле:

$$K = \frac{L_f - L_{\text{tube}}}{L_{\text{tube}}} = \frac{132 - 129}{129} = 0,023 \quad (2.21)$$

Для рассматриваемого нами случая:

$$p_{\text{теор}} = \frac{2\pi r}{\sqrt{K^2 - 1}} = \frac{2\pi \cdot 1,5}{\sqrt{1,023^2 - 1}} = 43,449 \text{ мм} \quad (2.22)$$

При этом теоретически рассчитанный радиус изгиба ОВ составил:

$$R_{\text{теор}} = r_{\text{tube}} \cdot \left(\frac{1}{1-(K+1)^{-2}} \right) = 1,5 \cdot \left(\frac{1}{1-(0,023+1)^{-2}} \right) = 33,37 \text{ мм} \quad (2.23)$$

Радиус изгиба ОВ для первого шага геликоиды по результатам измерений:

$$R_{\text{изм}} = r_{\text{tube}} \cdot \left(1 + \left(\frac{p}{2\pi \cdot r_{\text{tube}}} \right)^2 \right) = 1,5 \cdot \left(1 + \left(\frac{15}{2\pi \cdot 1,5} \right)^2 \right) = 5,30 \text{ мм} \quad (2.24)$$

в) $L_f = 130 \text{ мм}$.

K – избыточная длина, рассчитываемая по формуле:

$$K = \frac{L_f - L_{\text{tube}}}{L_{\text{tube}}} = \frac{130 - 129}{129} = 0,0077 \quad (2.25)$$

Для рассматриваемого нами случая:

$$p_{\text{теор}} = \frac{2\pi r}{\sqrt{K^2 - 1}} = \frac{2\pi \cdot 1,5}{\sqrt{1,008^2 - 1}} = 75,546 \text{ мм} \quad (2.26)$$

При этом теоретически рассчитанный радиус изгиба ОВ составил:

$$R_{\text{теор}} = r_{\text{tube}} \cdot \left(\frac{1}{1-(K+1)^{-2}} \right) = 1,5 \cdot \left(\frac{1}{1-(0,0077+1)^{-2}} \right) = 97,87 \text{ мм} \quad (2.27)$$

Радиус изгиба ОВ для первого шага геликоиды по результатам

измерений:

$$R_{\text{изм}} = r_{\text{tube}} \cdot \left(1 + \left(\frac{p}{2\pi \cdot r_{\text{tube}}} \right)^2 \right) = 1,5 \cdot \left(1 + \left(\frac{40}{2\pi \cdot 1,5} \right)^2 \right) = 28,54 \text{ мм} \quad (2.28)$$

3 Диаметр 2 мм и длина трубки 360 мм.

а) Lf = 366 мм.

K – избыточная длина, рассчитываемая по формуле:

$$K = \frac{L_f - L_{\text{tube}}}{L_{\text{tube}}} = \frac{366 - 360}{360} = 0,016 \quad (2.29)$$

Для рассматриваемого нами случая:

$$p_{\text{теор}} = \frac{2\pi r}{\sqrt{K^2 - 1}} = \frac{2\pi \cdot 1}{\sqrt{1,016^2 - 1}} = 34,272 \text{ мм} \quad (2.30)$$

При этом теоретически рассчитанный радиус изгиба ОВ составил:

$$R_{\text{теор}} = r_{\text{tube}} \cdot \left(\frac{1}{1-(K+1)^{-2}} \right) = 1 \cdot \left(\frac{1}{1-(0,016+1)^{-2}} \right) = 30,75 \text{ мм} \quad (2.31)$$

Радиус изгиба ОВ для первого шага геликоиды по результатам измерений:

$$R_{\text{изм}} = r_{\text{tube}} \cdot \left(1 + \left(\frac{p}{2\pi \cdot r_{\text{tube}}} \right)^2 \right) = 1 \cdot \left(1 + \left(\frac{40}{2\pi \cdot 1} \right)^2 \right) = 41,56 \text{ мм} \quad (2.32)$$

б) Lf = 364 мм.

Избыточная длина равна:

$$K = \frac{L_f - L_{\text{tube}}}{L_{\text{tube}}} = \frac{364 - 360}{360} = 0,011 \quad (2.33)$$

Шаг геликоиды равен:

$$p_{\text{теор}} = \frac{2\pi r}{\sqrt{K^2 - 1}} = \frac{2\pi \cdot 1}{\sqrt{1,011^2 - 1}} = 42,032 \text{ мм} \quad (2.34)$$

При этом теоретически рассчитанный радиус изгиба ОВ составил:

$$R_{\text{теор}} = r_{\text{tube}} \cdot \left(\frac{1}{1-(K+1)^{-2}} \right) = 1 \cdot \left(\frac{1}{1-(0,011+1)^{-2}} \right) = 45,75 \text{ мм} \quad (2.35)$$

Радиус изгиба ОВ для первого шага геликоиды по результатам измерений:

$$R_{\text{изм}} = r_{\text{tube}} \cdot \left(1 + \left(\frac{p}{2\pi \cdot r_{\text{tube}}} \right)^2 \right) = 1 \cdot \left(1 + \left(\frac{40}{2\pi \cdot 1} \right)^2 \right) = 41,56 \text{ мм} \quad (2.36)$$

в) $L_f = 362 \text{ мм}$.

K – избыточная длина, рассчитываемая по формуле:

$$K = \frac{L_f - L_{\text{tube}}}{L_{\text{tube}}} = \frac{362 - 360}{360} = 0,005 \quad (2.37)$$

Для рассматриваемого нами случая:

$$p_{\text{теор}} = \frac{2\pi r}{\sqrt{K^2 - 1}} = \frac{2\pi \cdot 1}{\sqrt{1,006^2 - 1}} = 59,525 \text{ мм} \quad (2.38)$$

При этом теоретически рассчитанный радиус изгиба ОВ составил:

$$R_{\text{теор}} = r_{\text{tube}} \cdot \left(\frac{1}{1-(K+1)^{-2}} \right) = 1 \cdot \left(\frac{1}{1-(0,005+1)^{-2}} \right) = 90,75 \text{ мм} \quad (2.39)$$

Радиус изгиба ОВ для первого шага геликоиды по результатам измерений:

$$R_{\text{изм}} = r_{\text{tube}} \cdot \left(1 + \left(\frac{p}{2\pi \cdot r_{\text{tube}}} \right)^2 \right) = 1 \cdot \left(1 + \left(\frac{52}{2\pi \cdot 1} \right)^2 \right) = 69,56 \text{ мм} \quad (2.40)$$

Аналогично были проведены расчёты радиусов изгибов волокна для второго эксперимента.

2.8 Анализ результатов

1. $L_{\text{tube}} = 358 \text{ мм}$ и $d = 3 \text{ мм}$

а) $L_f = 365 \text{ мм}$.

Таблица 2.19

Рассчитанные радиусы изгибов при ИД волокна 365 мм

p,мм	50	35	44	32	34	22	17	32	21	13
R,мм	43,76	22,20	34,22	18,80	21,04	9,68	6,38	18,80	8,95	4,35

$$P_{cp} = 30 \text{ мм}, R_{cp} = 18.8 \text{ мм}$$

Ниже был произведён расчёт коэффициента вариации рассчитанный в Excel.

$$Cv_p = 39,25\%$$

$$Cv_R = 66,74\%$$

$$б) L_f = 363 \text{ мм.}$$

Таблица 2.20

Рассчитанные радиусы изгибов при ИД волокна 363 мм

P,мм	62	45	43	48	45	50
R,мм	66,47	35,73	32,75	40,44	35,73	43,76

$$P_{cp} = 48,8 \text{ мм}, R = 42.48 \text{ мм}$$

$$Cv_p = 14,15\%$$

$$Cv_R = 29,16\%$$

$$в) L_f = 360 \text{ мм.}$$

Таблица 2.21

Рассчитанные радиусы изгибов при ИД волокна 360 мм

P,мм	50	81	64	163
R,мм	43,76	112,40	70,73	450,62

$$P_{cp} = 89,5 \text{ мм}, R_{cp} = 169.38 \text{ мм}$$

$$Cv_p = 56,55\%$$

$$Cv_R = 111,94\%$$

На рисунках 2.24–2.25 представлены графики зависимости шагов геликоиды и радиусов изгибов (по оси Y) от избыточности волокна (по оси X) соответственно. Где синие точки – это значения, полученные путём теоретического расчёта. Красные значения – это среднее значение шага

геликоиды получены путём измерений, красные значения радиусов получены путём расчетов по результатам измерений.



Рис. 2.24 – График зависимости шага геликоиды от ИД для первой трубки

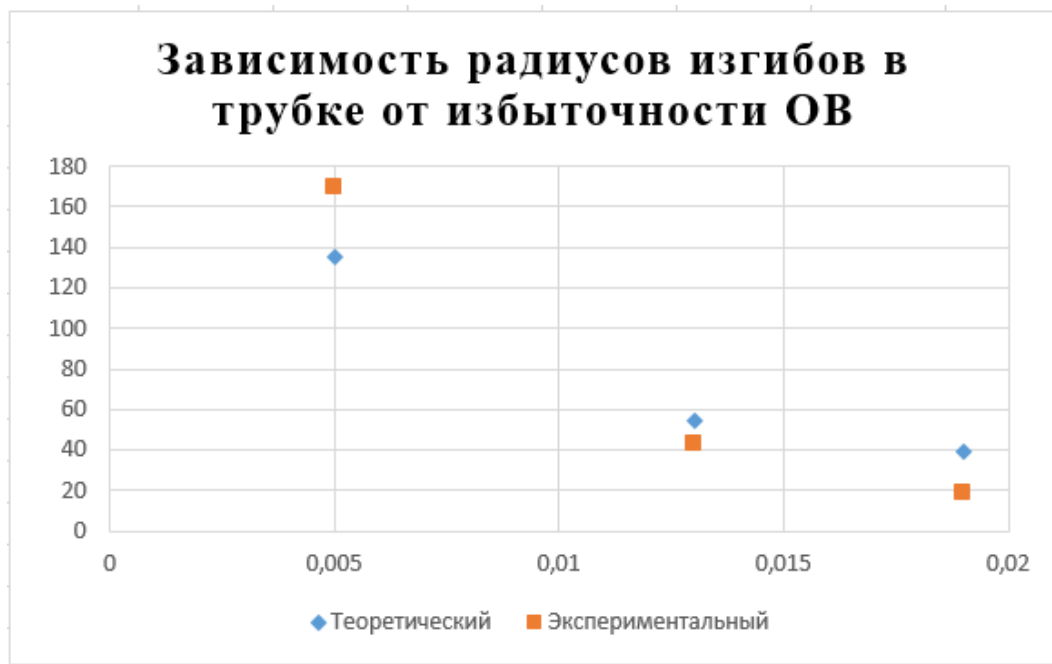


Рис. 2.25– График зависимости радиуса изгиба от ИД для первой трубки

2. $d = 3 \text{ мм}$ и $L_{\text{tube}} = 129 \text{ мм}$

а) $L_f = 134 \text{ мм}$.

Таблица 2.22

Рассчитанные радиусы изгибов при ИД волокна 134 мм

P, мм	25	27	27	28	22
R, мм	12,06	13,82	13,82	14,75	9,68

Найдём средние значения: $P_{cp} = 25,8$ мм, $R_{cp} = 12,82$ мм

$$Cv_p = 9,25\%$$

$$Cv_R = 15,68\%$$

б) $L_f = 132$ мм.

Таблица 2.23

Рассчитанные радиусы изгибов при ИД волокна 132 мм

P, мм	15	22	25	38	29
R, мм	5,3	9,68	12,06	25,90	15,71

P среднее = 25,8 мм, R = 13,73 мм

$$Cv_p = 33,05\%$$

$$Cv_R = 56,68\%$$

в) $L_f = 130$ мм.

Таблица 2.24

Рассчитанные радиусы изгибов при ИД волокна 130 мм

P, мм	40	44	45
R, мм	28,54	34,22	35,73

P среднее = 43 мм, R = 32,83 мм

$$Cv_p = 6,15\%$$

$$Cv_R = 11,53\%$$

На рисунках 2.26–2.27 представлены графики зависимости шагов геликоиды и радиусов изгибов (по оси Y) от избыточности волокна (по оси X) соответственно.

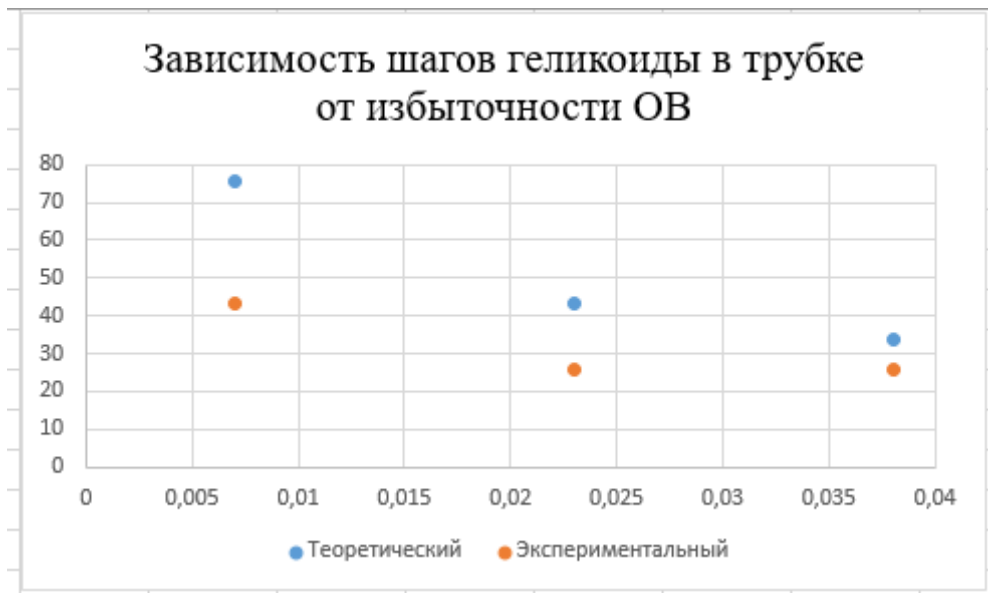


Рис. 2.26 – График зависимости шага геликоиды от ИД для второй трубки

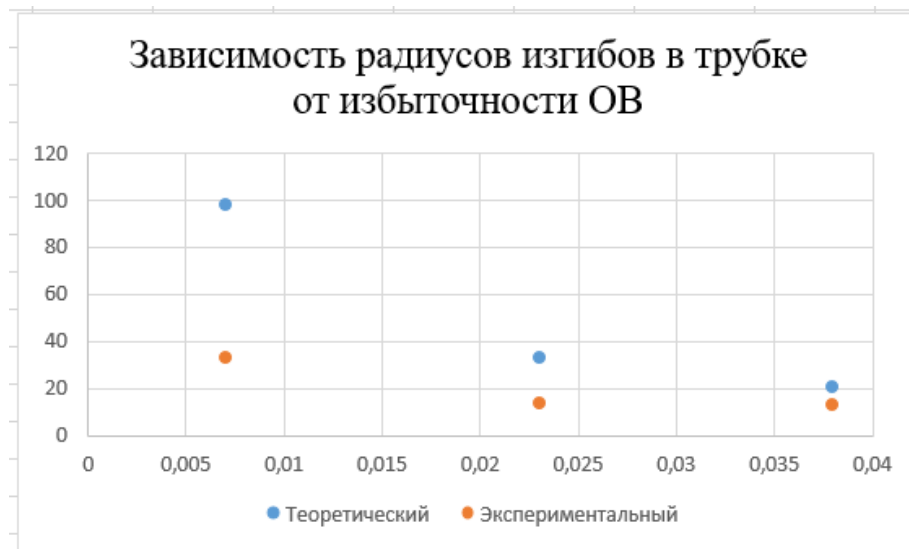


Рис. 2.27– График зависимости радиуса изгиба от ИД для второй трубки

3. Диаметр 2 мм и длина трубки 360 мм.

а) $L_f = 366$ мм.

Таблица 2.25

Рассчитанные радиусы изгибов при ИД волокна 366 мм

P, мм	40	60	72	52	41	30	25	21	19
R, мм	41,56	92,28	132,44	69,56	43,62	23,82	16,84	12,18	10,15

$$P_{cp} = 40 \text{ мм}, R = 49,16 \text{ мм}$$

$$Cv_p = 45,89\%$$

$$Cv_R = 84,71\%$$

$$б) Lf = 364 \text{ мм.}$$

Таблица 2.26

Рассчитанные радиусы изгибов при ИД волокна 364 мм

P, мм	40	34	62	98	74	52
R, мм	41,56	30,31	98,46	244,51	139,84	69,56

$$P_{cp} = 60 \text{ мм}, R = 104,04 \text{ мм}$$

$$Cv_p = 39,33\%$$

$$Cv_R = 76,38\%$$

$$в) Lf = 362 \text{ мм.}$$

Таблица 2.27

Рассчитанные радиусы изгибов при ИД волокна 362 мм

P, мм	52	60	73	175
R, мм	69,56	92,28	136,12	777,52

$$P = 90 \text{ мм}, R = 268,8 \text{ мм}$$

$$Cv_p = 63,69\%$$

$$Cv_R = 126,54\%$$

На рисунках 2.28–2.29 представлены графики зависимости шагов геликоиды и радиусов изгибов (по оси Y) от избыточности волокна (по оси X) соответственно.

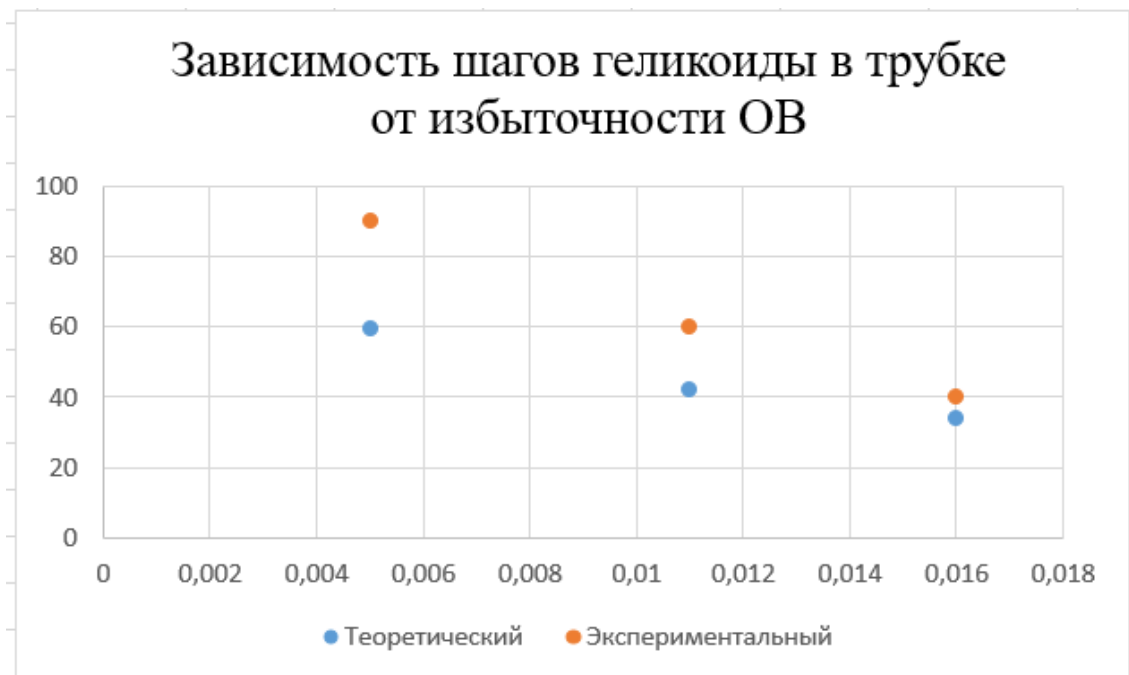


Рис. 2.28 – График зависимости шага геликоиды от ИД для третьей трубки

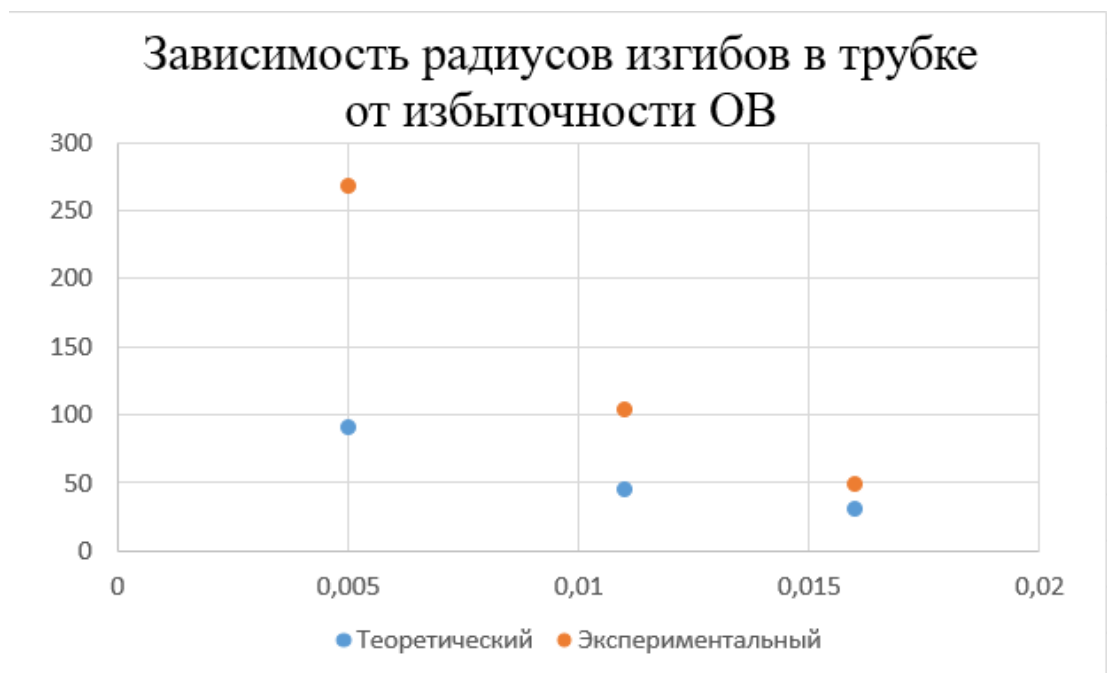


Рис. 2.29– График зависимости радиуса изгиба от ИД для третьей трубки

Анализ результатов для второго эксперимента

1 прокладка ОВ

Таблица 2.28

Рассчитанные радиусы изгибов при первой прокладке волокна в мм

P, мм	30	60	32	32	64	30	8	24	20	21	19	18
R, мм	16,71	62,35	18,80	18,80	70,73	16,71	2,58	11,23	8,26	8,95	7,60	6,97

$$P = 29,83 \text{ мм}, R = 20,81 \text{ мм}$$

$$Cv_p = 55,63\%$$

$$Cv_R = 105,95\%$$

2 прокладка ОВ

Таблица 2.29

Рассчитанные радиусы изгибов при второй прокладке волокна в мм

P, мм	33	27	32	42	41	34	43	34	27	20	25
R, мм	19,90	13,82	18,80	31,31	29,91	21,04	32,75	21,04	13,82	8,26	12,06

$$P = 32,54 \text{ мм}, R = 20,25 \text{ мм}$$

$$Cv_p = 22,80\%$$

$$Cv_R = 40,40\%$$

3 прокладка ОВ

Таблица 2.30

Рассчитанные радиусы изгибов при третьей прокладке волокна в мм

P, мм	26	29	32	22	47	37	28	24	23	23	22	16
R, мм	12,92	15,71	18,80	9,68	38,84	24,64	14,75	11,23	10,44	10,44	9,68	5,82

$$P = 27,41 \text{ мм}, R = 15,24 \text{ мм}$$

$$Cv_p = 29,93\%$$

$$Cv_R = 58,53\%$$

4 прокладка ОВ

Таблица 2.31

Рассчитанные радиусы изгибов при четвертой прокладке волокна в мм

P, мм	28	41	26	54	62	24	22	21	22	24	19	15
R, мм	14,75	29,91	12,92	50,79	66,47	11,23	9,68	8,95	9,68	11,23	7,60	5,3

$$P = 29,83 \text{ мм}, R = 19,88 \text{ мм}$$

$$Cv_p = 49,18\%$$

$$Cv_R = 97,60\%$$

5 прокладка ОВ

Таблица 2.32

Рассчитанные радиусы изгибов при пятой прокладке волокна в мм

P, мм	34	50	55	65	32	31	27	27	18	14
R, мм	21,04	43,76	52,63	72,91	18,80	17,74	13,82	13,82	6,97	4,81

$$P = 35,3 \text{ мм}, R = 26,6 \text{ мм}$$

$$Cv_p = 46,34\%$$

$$Cv_R = 76,05\%$$

Ниже представлены графики зависимости неизменной избыточности волокна (по оси Y) от шагов геликоиды и радиусов изгибов (по оси X) соответственно. Данный эксперимент показал, что даже при одинаковых входных условиях, значения шагов геликоиды и радиусов изгибов изменяются.

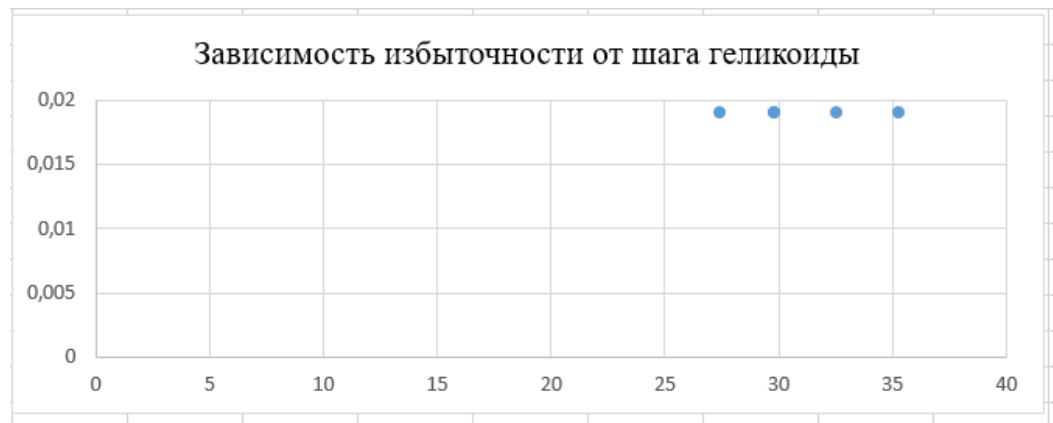


Рис. 2.30 – График зависимости шага геликоиды от ИД для третьей трубки



Рис. 2.31 – График зависимости радиуса изгиба от ИД для третьей трубки

3 Исследование распределения радиусов изгибов ОВ в кабеле ВОЛС, находящейся в эксплуатации

3.1 Общие положения

В первой главе данной работы были описаны возможные методы для анализа распределения избыточной длины. Избыточность ОВ в модульной трубке можно измерить косвенными методами на основе измерений механических напряжений в ОВ, поляризационных характеристик или затухания ОВ. Зачастую применяются рефлектометрические методы. В данной работе избыточность находится по результатам обработки характеристики обратного рассеяния, снятой оптическим рефлектометром OTRD. Анализируются дополнительные потери на изгибах оптического волокна в модуле на двух длинах волн (1310 и 1625 нм). По результатам анализа этих потерь вычисляются радиусы изгибов волокна, непосредственно связанные с избыточностью оптического волокна. Основной причиной выбора данного метода является относительно низкая стоимость рефлектометров и их массовое применение.

3.2 Описание трассы

В данной работе использовались рефлектограммы OTDR в формате sog, предоставленные нам сторонней организацией. Данные измерения были проведены в городе Казани. Измерения затуханий проводились на двух длинах волн - 1310 и 1625 нм с одной стороны.

При измерениях был выставлен диапазон расстояний 200.0 км, длительность импульса 1 us (мкс), показатель преломления IOR для длины волны 1310 нм - 1.46760, для 1625 нм - 1,46860. На рисунке 3.1 представлена рефлектограмма для длины волны 1625 нм.

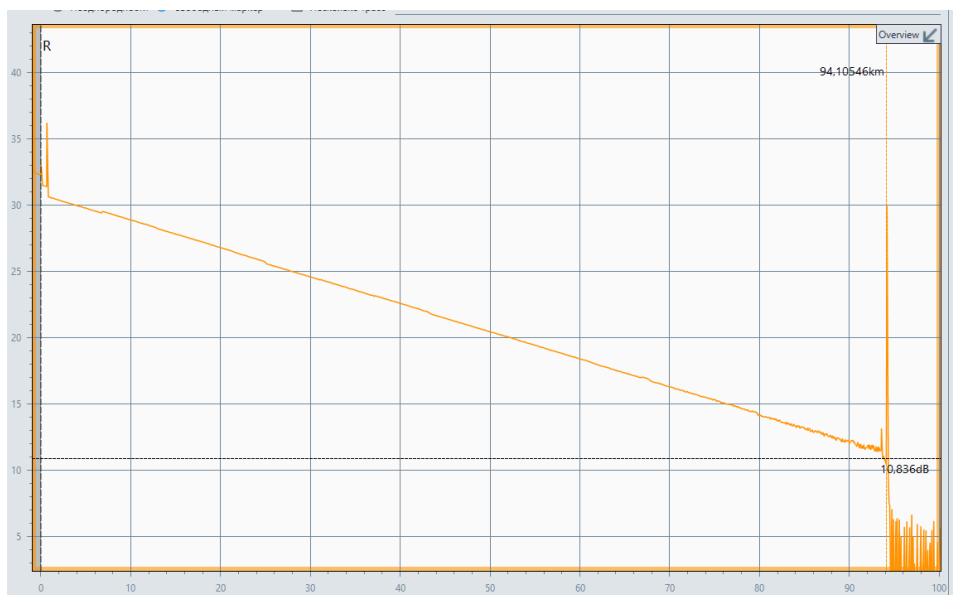


Рис. 3.1 – Рефлектограмма при 1625 нм

Анализ рефлектограмм проводился в программе для Yokogawa AQ 7933. Для измерения длины трассы нужно было выставить маркеры в начале и в конце участка, либо наводить курсор на конец участка. На рисунках 3.2 и 3.3 представлены интерфейс программы и рефлектограммы для длин 1310 и 1625 нм соответственно.

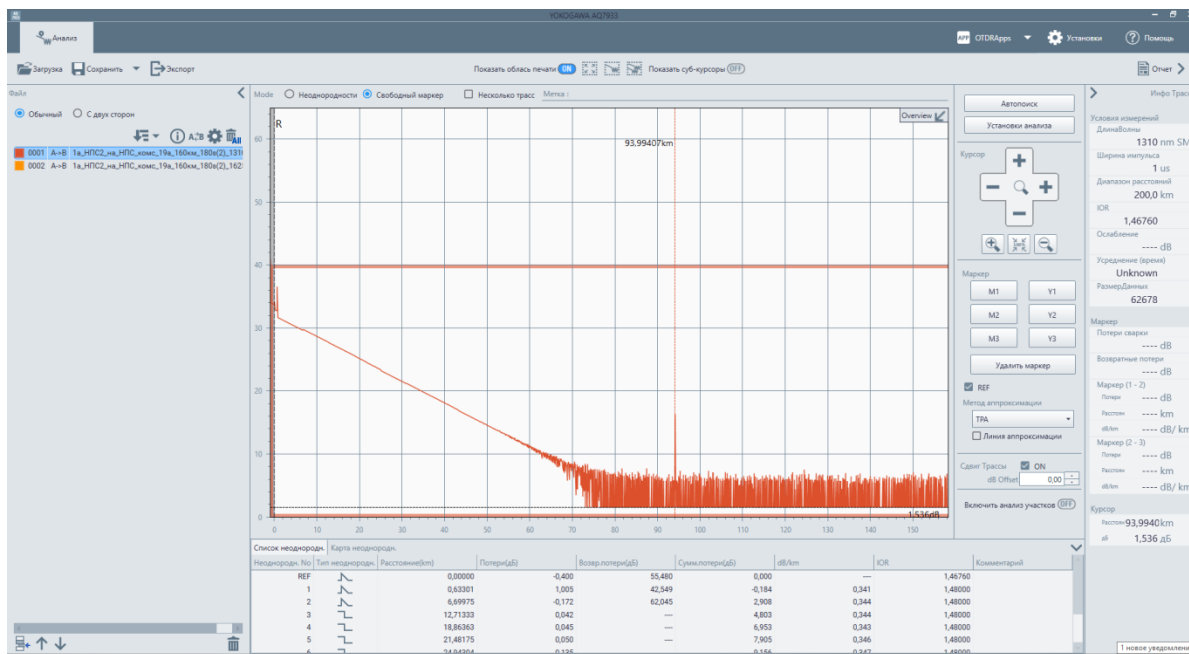


Рис. 3.2 – Анализ рефлектограмм в программе для 1310 нм

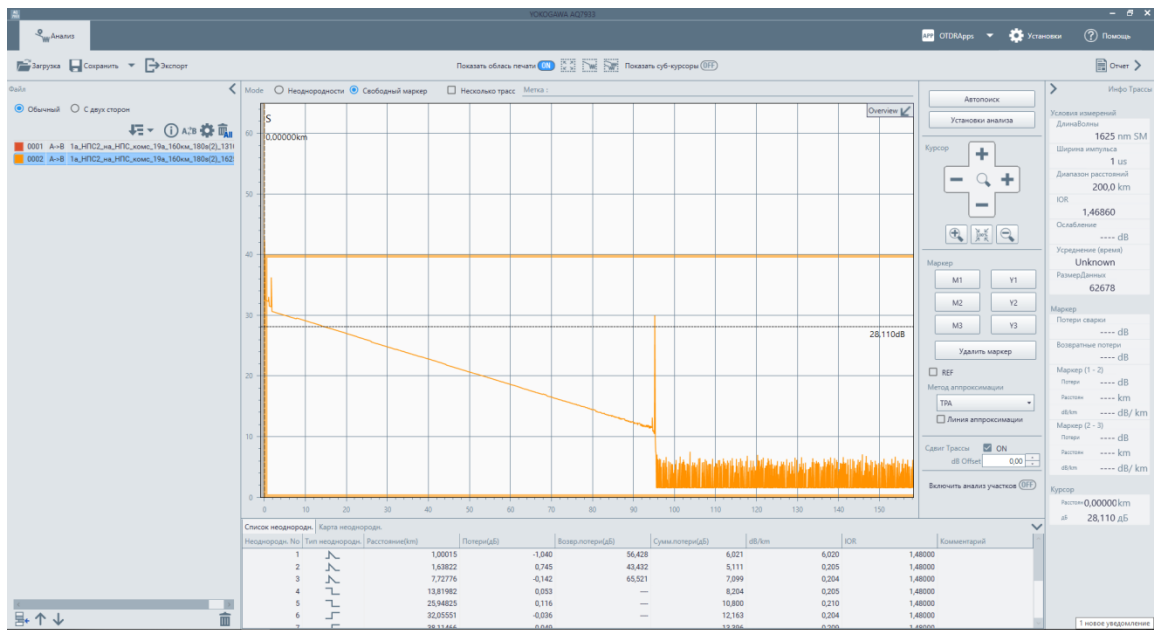


Рис. 3.3 – Анализ рефлектограмм в программе для 1625 нм

Протяженность анализируемой трассы составляет 94,835 км. Ниже представлена её схема (рис. 3.4).

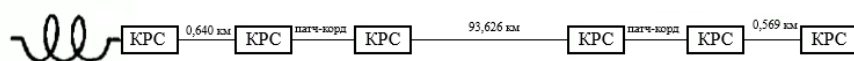


Рис. 3.4 – Схема трассы

На схеме представлены следующие компоненты. В начале трассы расположена нормализующая (компенсационная) катушка. Катушка – это оптическое волокно длиной 1 км, оконцованное с двух сторон оптическими разъёмами, которое используют для компенсации мёртвой зоны на входе в ВОК. Катушка подключается к кроссу.

Оптический кросс - устройство для разъёмного соединения оконцованного многоволоконного оптического кабеля и оптических шнуров с помощью специальных розеток. Бывают как настенные, так и стоечные.

Трасса состоит из трёх участков:

- 1) Проклужение с кросса на кросс протяженностью 0,640 км.
- 2) Основной участок – проклучение с кросса на кросс длиной 93,626 км.

км.

3) Крайний участок – проключение с кросса на кросс длиной 0,569 км.

Для проведения измерений к схеме подключали оптический рефлектометр OTDR (рис. 3.5).



Рис. 3.5 – Схема для измерения затуханий в волокне

В помещении был реализован минимакет данной трассы для наглядного представления. На рисунке 3.6 слева представлен рефлектометр, к которому подключена катушка при помощи оптического разъема. С другого конца катушка подключена к кроссу. В кроссе уже расшиты волокна для последующего сращивания их с волокнами подведенного кабеля.



Рис. 3.6 – Макет для измерения затуханий в волокне

3.3 Метод исследования распределений радиусов изгибов ОВ на основе обработки рефлектограмм OTDR

Для анализа распределения избыточности волокна в модуле кабеля использовался косвенный метод. А именно по рефлектограммам находились потери на изгибах волокна. Зная их, рассчитывали радиусы изгибов, которые непосредственно связаны с избыточностью ОВ.

Изначально находили коэффициенты затухания для двух длин волны - 1310 и 1625 нм.

Длина волны 1310 нм менее чувствительна к изгибам и потери на этой длине в основном обусловлены Релеевским рассеянием. Потери на изгибах на данной длине волны (1310 нм) полагались нулевыми.

При 1625 нм присутствуют потери, вызванные не только Релеевским рассеянием, но и потерями на изгибах. Поэтому после нахождения коэффициентов затухания для двух длин волн отдельно, находилась разница коэффициентов затуханий полученных на этих длинах волн: $a(1625) - a(1310)$ дБ/км. Нахождение коэффициентов затухания для разности длин волн позволяет вычесть потери, вызванные Релеевским рассеянием, оставив только потери на изгибах.

Затем, зная потери на изгибах волокна, по формуле Маркузе (3.1) [24], в которой приведена зависимость потерь от радиусов изгиба можно найти радиусы изгибов, поскольку значения потерь известны. Ниже приведена формула Маркузе [24]:

(3.1)

$$2\alpha = \frac{\sqrt{\pi} \cdot \kappa^2 \cdot \exp\left[-\frac{2}{3}\left(\frac{\gamma^3}{\beta_g^2}\right)R\right]}{2 \cdot \gamma^{3/2} \cdot V^2 \cdot \sqrt{R} \cdot (\ln \gamma \alpha)^2},$$

где α – потери на изгибе волокна,

R – радиус кривизны,

κ , γ и β_g - вспомогательные параметры, которые находятся по формулам 3.2–3.4

(3.2)

$$\gamma = (\beta_g^2 - n_2^2 \cdot \kappa^2)^{1/2}$$

(3.3)

$$\kappa = (n_1^2 \cdot \kappa^2 - \beta_g^2)^{1/2}$$

(3.4)

$$V^2 = (\kappa^2 \cdot \alpha^2 \cdot (n_1^2 - n_2^2)),$$

где n_1 – показатель преломления сердцевины волокна,
 n_2 – показатель преломления оболочки

(3.5)

$$k = 2\pi/\lambda$$

3.4 Алгоритм обработки рефлектограмм

Для обработки полученных рефлектограмм воспользуемся математической программой MATLAB.

Обработка состоит из нескольких этапов:

- 1) Подготовка массивов данных.
- 2) Работа с кодом.
- 3) Построение итоговых графиков.

Первый этап:

Нужно подготовить массивы данных для обработки. Для этого рефлектограммы в формате `sig` необходимо преобразовать в формат `txt`. Данные массивы содержат в себе значения мощности сигнала по координате Y (в Дб) от длины трассы по X (в км). Эти массивы нужно скопировать в папку с кодом, это обязательно, иначе они не запустятся.

Второй этап:

Нужно запустить программу MATLAB, далее нажимаем на вкладку `None`, появится рабочее окно. Для открытия кода обработки нужно нажать на `open` и выбрать необходимый файл из папки. Для удобства код был разбит на 3 файла. В окне появится код из нескольких строк. В данный код нужно вписать названия своих массивов поочередно.

Ниже представлены коды необходимые для приведения трассы в надлежащий вид. Появляется окошко со всей рефлектограммой. Курсором нужно выбрать сначала начало трассы, затем указать конец трассы. Код удалит все точки массива, идущие до и после указанной позиции. Делается

это для того, чтобы оставить рабочую зону трассы, избавившись от шумов в конце рефлектограммы.

```
% Выбор исследуемой трассы
figure (2)
plot(x1,y1, x2,y2, x3,y3)
title('Укажите начало линии');
zoom on;
pause
[xstart0,ystart0] = ginput(1);
delete(figure (2));

xstart1=find(x1>xstart0(1));
Nxstart1310=xstart1(1); % номер значения, для Y шкалы тоже актуально
Nxstart1625=Nxstart1310;

figure (3)
plot(x1,y1, x2,y2, x3,y3)
title('Укажите конец линии');
zoom on;
pause
[xend0,yend0] = ginput(1);
delete(figure (3));

xend1=find(x1>xend0(1));
Nxend1310=xend1(1); % номер значения, для Y шкалы тоже актуально
Nxend1625=Nxend1310;

xStrace1310=x1(Nxstart1310:Nxend1310); % исходная трасса
yStrace1310=y1(Nxstart1310:Nxend1310);

xStrace1625=x3(Nxstart1625:Nxend1625);
yStrace1625=y3(Nxstart1625:Nxend1625);
```

Вся трасса разбивается на множество отрезков одинаковой длины. В нашем случае отрезки длиной 0,7 км, 1 км, 1,5 км и 2 км. Код считывает трассу, берёт отрезок определённой длины и ищет на нем коэффициент затухания α для данного отрезка и формирует массив данных. Полученные α сопоставляются в массиве с серединой длины отрезка, на котором было вычислено значение α .

По результатам запуска кода получается распределение α на отрезках трассы по всей длине.

```
% Для 1310
x1310=xtrace1310(1:WinSize);
y1310=ytrace1310(1:WinSize);

C1310=[C1310;polyfit(x1310,y1310,1)];
```

```

NNNalpha1310=(x1310(end)-x1310(1))/2; % ищем примерную середину
zzz=x1310(1)+NNNalpha1310;% находим примерное значение середины
NNalpha1310=find(x1310>zzz); % ищем существующую точку
NXalpha=NNalpha1310(1); % номер значения данной точки для получения X
Xalpha1310=x1310(NXalpha); % знач центр точки X

LC1310=[LC1310;Xalpha1310]; % запись значений X для привязки

xtrace1310=xtrace1310(WinSize+1:end); %перезапись трассы для цикла
ytrace1310=ytrace1310(WinSize+1:end);

```

Затем полученные данные записываются в отдельные массивы переменных. Код высчитывает разность α для 1625–1310 нм. Берётся именно разность затуханий на двух длинах волн, чтобы корректно распознать затухания, возникшие из-за изгибов волокна.

```

alp1310=abs(C1310(:,1));
alp1625=abs(C1625(:,1));

Delta16m13=abs(C1625(:,1)-C1310(:,1));

```

Получив значения разности α для 1625–1310 нм, код начинает расчёт радиусов изгиба. Для этого использует формулу Маркузе [21].

Для этого сначала происходит расчет необходимых компонент, входящих в формулу.

```

Delta1310=0.5*(nCore1310^2-n1310^2)/nCore1310^2;
Delta1550=0.5*(nCore1550^2-n1550^2)/nCore1550^2;
Delta1625=0.5*(nCore1625^2-n1625^2)/nCore1625^2;

ko1310=2*pi/A1;
ko1550=2*pi/A2;
ko1625=2*pi/A3;

V1310=sqrt((ko1310^2)*(a^2)*((nCore1310^2)-(n1310^2)));
V1550=sqrt((ko1550^2)*(a^2)*((nCore1550^2)-(n1550^2)));
V1625=sqrt((ko1625^2)*(a^2)*((nCore1625^2)-(n1625^2)));

Ro1310=sqrt(1/(log(V1310^2)));
Ro1550=sqrt(1/(log(V1550^2)));
Ro1625=sqrt(1/(log(V1625^2)));

Uo1310=sqrt(1+(log(V1310^2)));
Uo1550=sqrt(1+(log(V1550^2)));
Uo1625=sqrt(1+(log(V1625^2)));

b1310=sqrt((ko1310^2)*(nCore1310^2)-(Uo1310^2)/(a^2)); %  $\beta$ 
b1550=sqrt((ko1550^2)*(nCore1550^2)-(Uo1550^2)/(a^2)); %  $\beta$ 
b1625=sqrt((ko1625^2)*(nCore1625^2)-(Uo1625^2)/(a^2)); %  $\beta$ 

w1310=sqrt((b1310^2)-(ko1310^2)*(n1310^2));

```



```

w1550=sqrt((b1550^2)-(ko1550^2)*(n1550^2));
w1625=sqrt((b1625^2)-(ko1625^2)*(n1625^2));

Y1310=sqrt((ko1310^2)*(nCore1310^2)-(b1310^2));
Y1550=sqrt((ko1550^2)*(nCore1550^2)-(b1550^2));
Y1625=sqrt((ko1625^2)*(nCore1625^2)-(b1625^2));

G1310=((2*(w1310^3))/(3*(b1310^2)));
G1550=((2*(w1550^3))/(3*(b1550^2)));
G1625=((2*(w1625^3))/(3*(b1625^2)));

```

И далее идёт аналитический поиск решения уравнения со всеми выше найденными составляющими.

```

syms R A
Q1310=(sqrt(pi).*(ko1310.^2).*exp(-
1.*(2./3).*((w1310).^3)./(b1310.^2)).*R))./(2.*(w1310.^(3./2)).*(V13
10.^2).*sqrt(R).*(log(w1310.*4.15.*10.^-6)).^2))-2.*A;

Q1625=(sqrt(pi).*(ko1625.^2).*exp(-
1.*(2./3).*((w1625).^3)./(b1625.^2)).*R))./(2.*(w1625.^(3./2)).*(V16
25.^2).*sqrt(R).*(log(w1625.*4.15.*10.^-6)).^2))-2.*A;
solve(Q1310, R)
solve(Q1625, R)

```

Получается формула, куда указывается дельта α для конечного расчёта.

```

R16m13=(4398046511104.*lambertw(0,
3545055344314307893157983526885210100085060184516023564488387346848231
65599744./(15258585117745146892578441202174981556785362302635306674804
18225.*Delta16m13.^2)))./1519244407811239;

```

Ниже представлен код для отображения итоговых графиков с полученными зависимостями.

```

figure(5)
plot(LC1310,alp1310,'s', LC1550,alp1550,'o', LC1625,alp1625,'*')
title('Распределение \alpha по длине трассы');
legend('1310','1550','1625');
xlabel('L, km');
ylabel('\alpha, dB');
filenameFig2=['ALPHA-',name,'.fig'];
savefig(filenameFig2)

```

```

figure(6)
plot(LC1310,Delta16m13,'s',LC1550,Delta16m15,'o')
title('Отношения \alpha');
legend('1625-1310','1625-1550');
xlabel('L, km');
ylabel('\delta \alpha, dB');
filenameFig3=['DelALPHA-',name,'.fig'];
savefig(filenameFig3)

```

```

figure(7)
plot(LC1310,R16m13,'s',LC1550,R16m15,'o')
title('Распределение R');

```

```

legend('R для 1625-1310', 'R для 1625-1550');
xlabel('L, km');
ylabel('R, мм');
filenameFig4=['R-',name, '.fig'];
savefig(filenameFig4)

```

На экране появятся графики, для их сохранения нужно выбрать Save AS – сохранить как. Следует сохранить в двух форматах – fig и bmp.

3.5 Результаты обработки

Ниже представлен график зависимости мощности оптического сигнала от длины трассы в км.

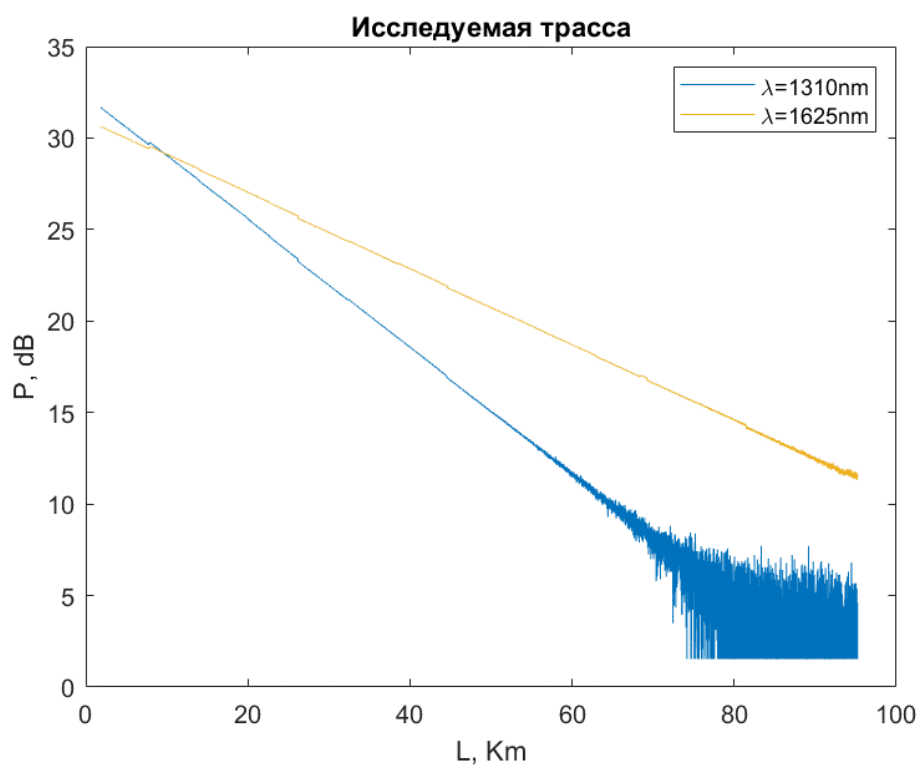


Рис. 3.7 – График зависимости мощности сигнала от длины трассы

В программе MATLAB нашли средние значения коэффициентов затухания для множества отрезков, взятых последовательно по всей длине трассы. Отрезки брали длиной 0,7; 1; 1,5; 2 км.

Ниже представлены распределения коэффициентов затуханий по длине трассы для разных отрезков.

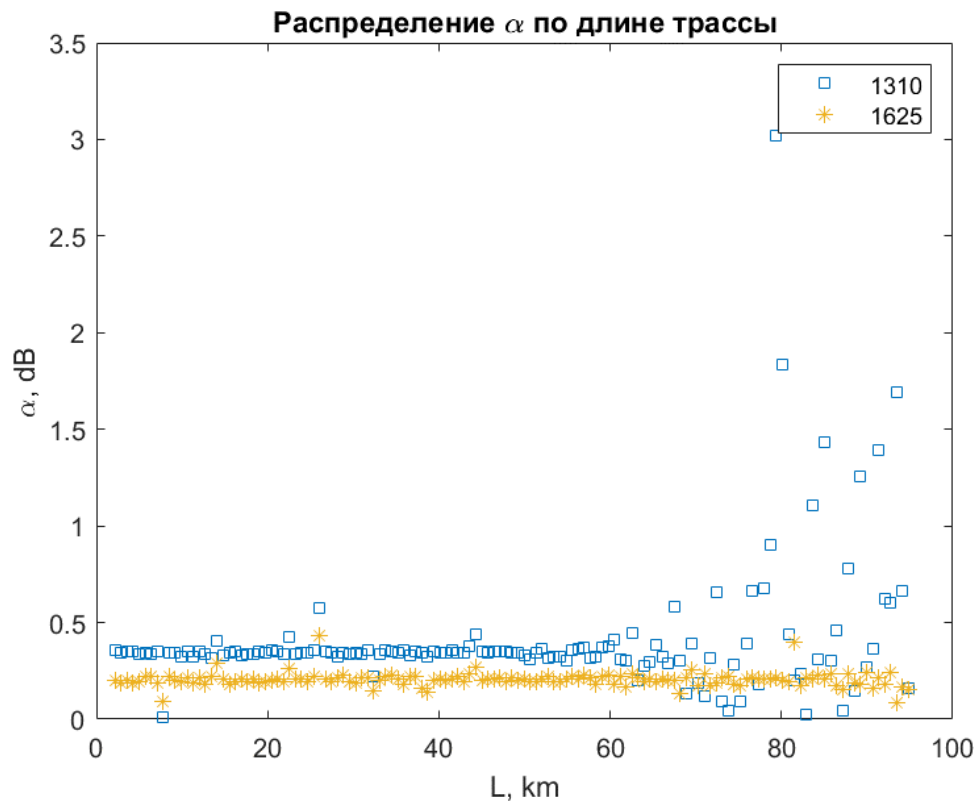


Рис. 3.8 – Распределение коэффициентов затухания по длине трассы, разбитой на отрезки по 0,7 км

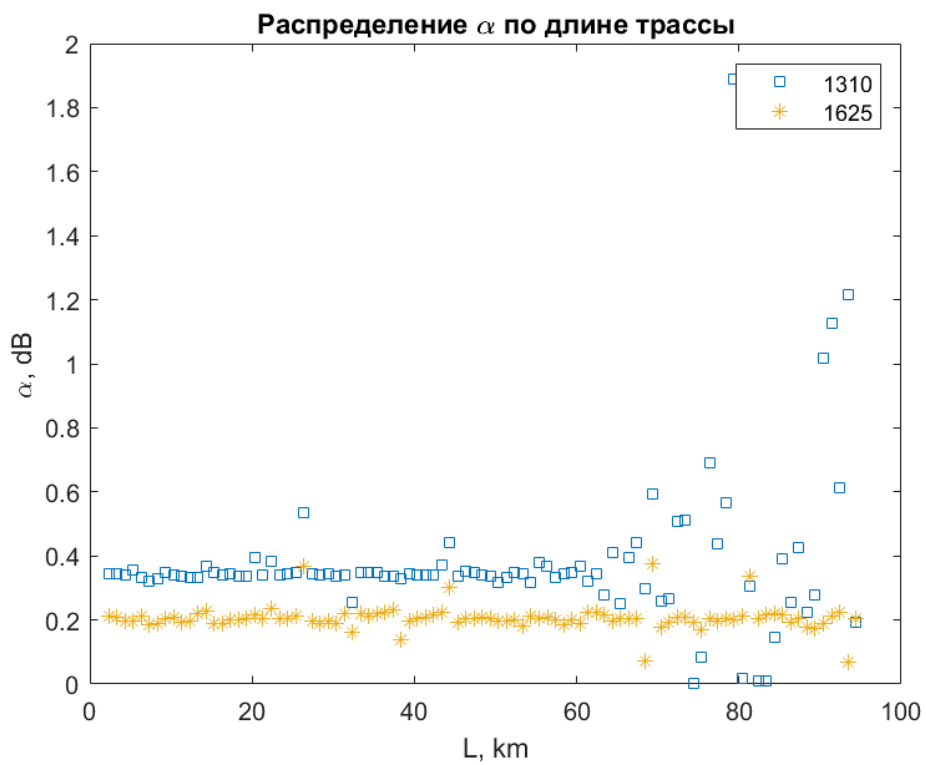


Рис. 3.9 – Распределение коэффициентов затухания по длине трассы, разбитой на отрезки по 1 км

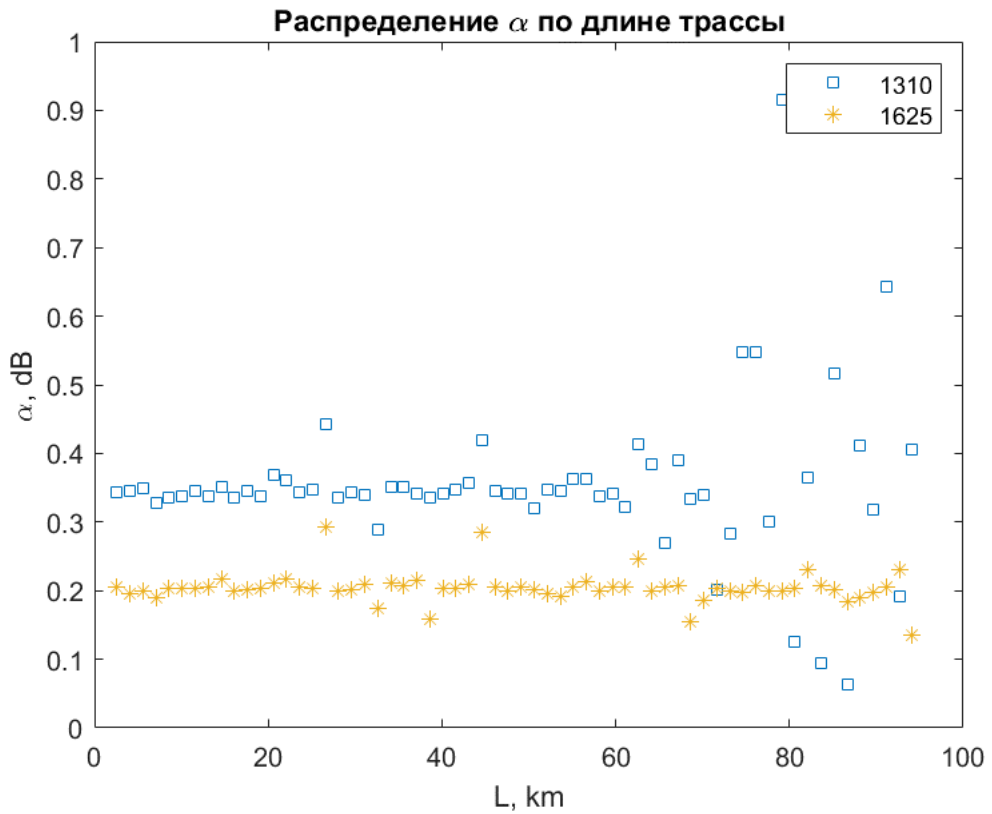


Рис. 3.10 – Распределение коэффициентов затухания по длине трассы, разбитой на отрезки по 1,5 км

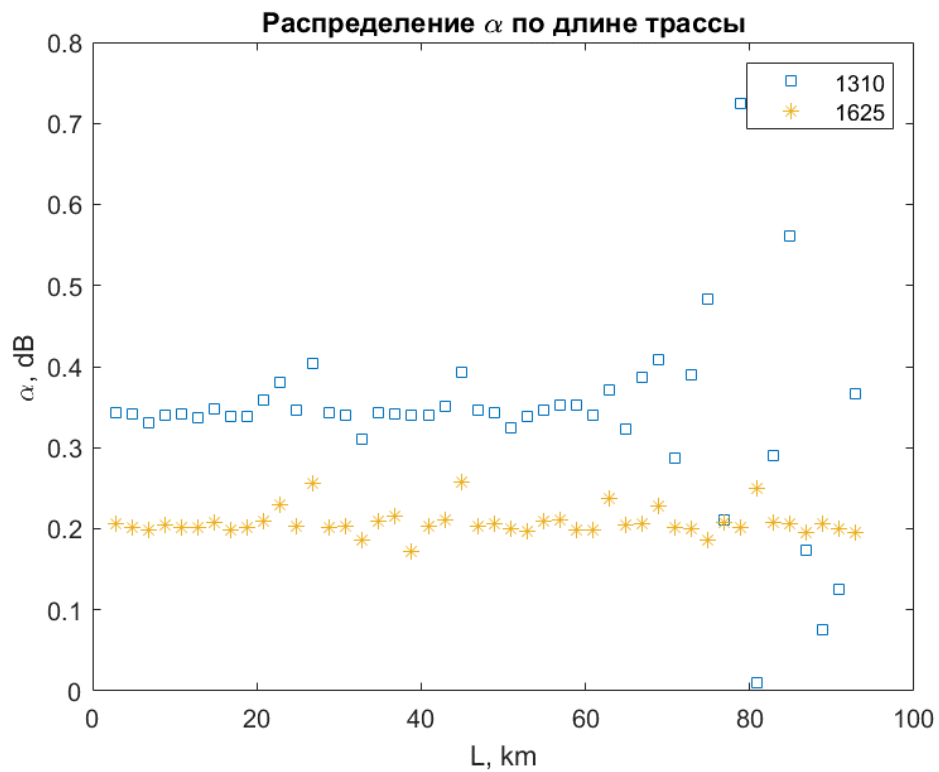


Рис. 3.11 – Распределение коэффициентов затухания по длине трассы, разбитой на отрезки по 2 км

Затем находится разность коэффициентов затухания при 1625–1310 нм для тех же отрезков. Данная разность позволяет вычесть потери, вызванные Рэлеевским рассеянием, оставив только потери на изгибах.

Ниже представлены распределения коэффициентов затуханий по длине трассы для разных отрезков.

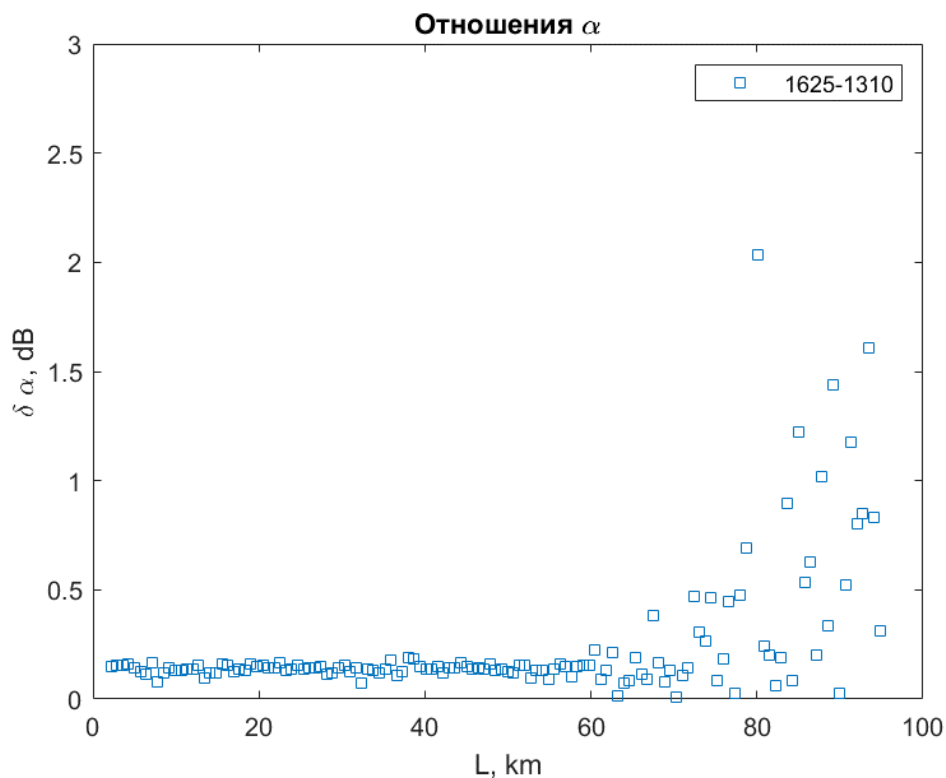


Рис. 3.12 – Распределение разности коэффициентов затухания по длине трассы, разбитой на отрезки по 0,7 км

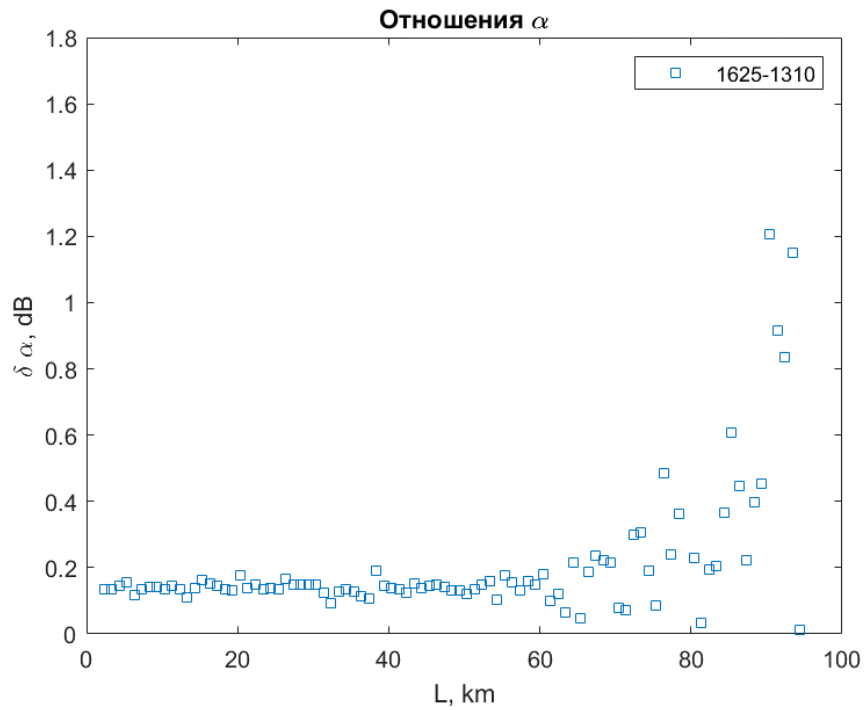


Рис. 3.13 – Распределение разности коэффициентов затухания по длине трассы, разбитой на отрезки по 1 км

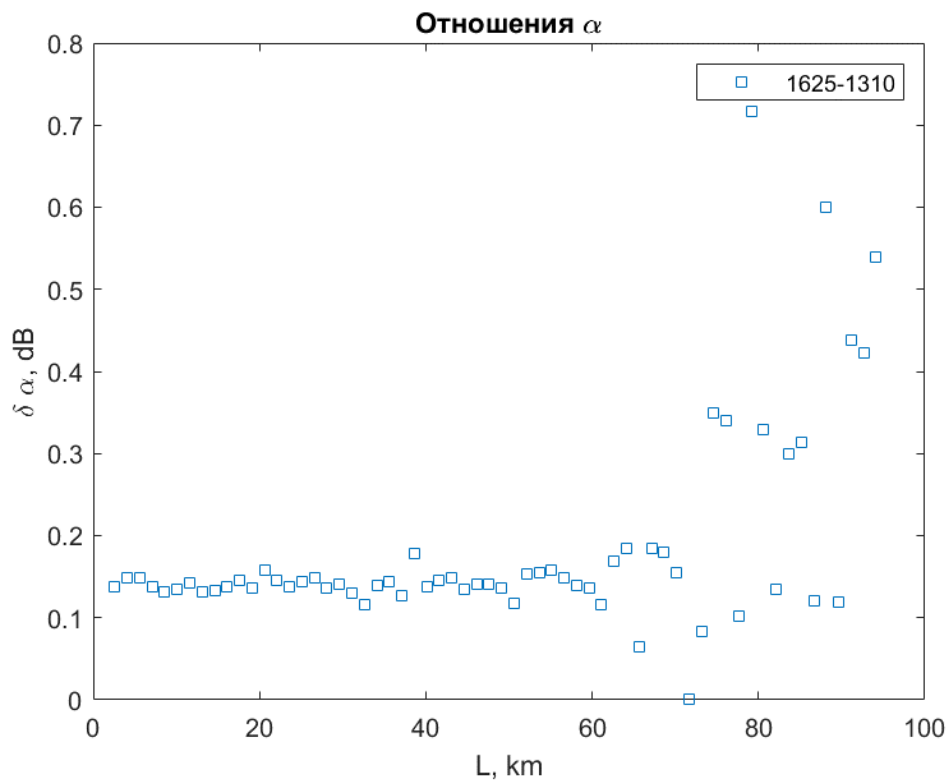


Рис. 3.14 – Распределение разности коэффициентов затухания по длине трассы, разбитой на отрезки по 1,5 км

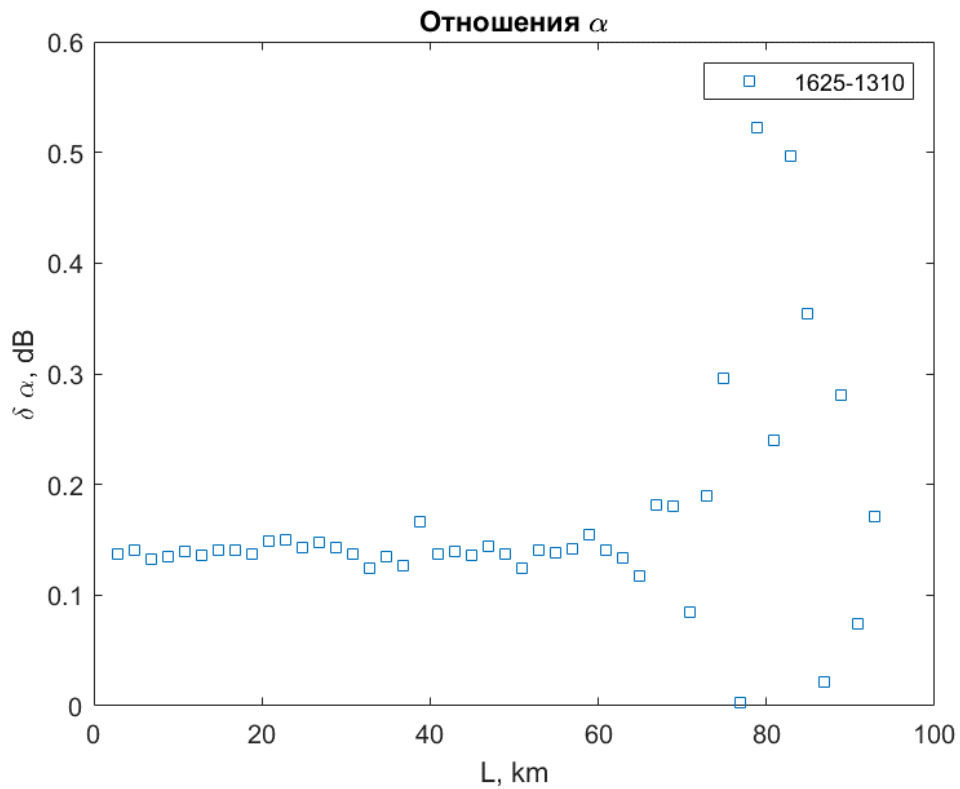


Рис. 3.15 – Распределение разности коэффициентов затухания по длине трассы, разбитой на отрезки по 2 км

По полученной разности коэффициентов затухание находим значения радиусов изгибов.

Ниже представлены распределения радиусов изгибов волокна вдоль всей трассы, разбитой на равные участки.

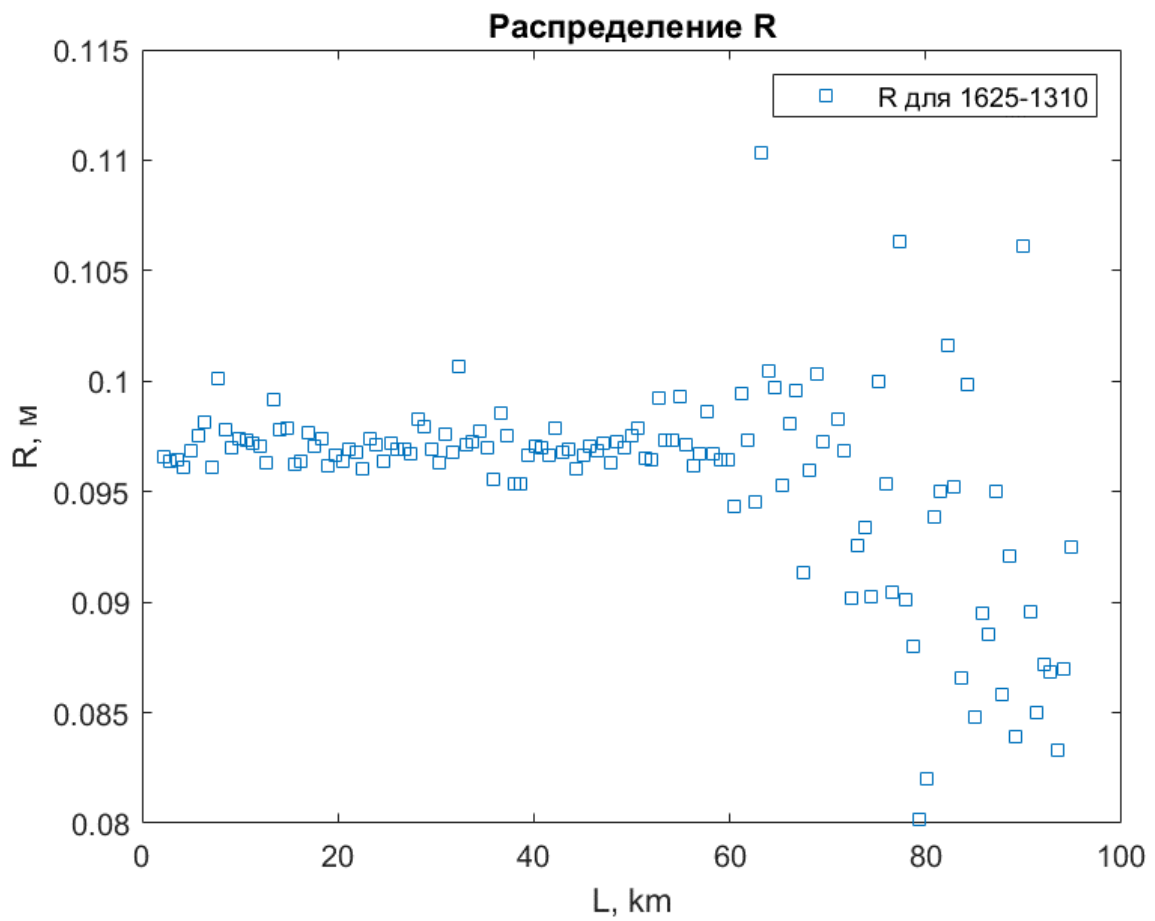


Рис. 3.16 – Распределение радиусов изгибов волокна по длине трассы, разбитой на отрезки по 0,7 км

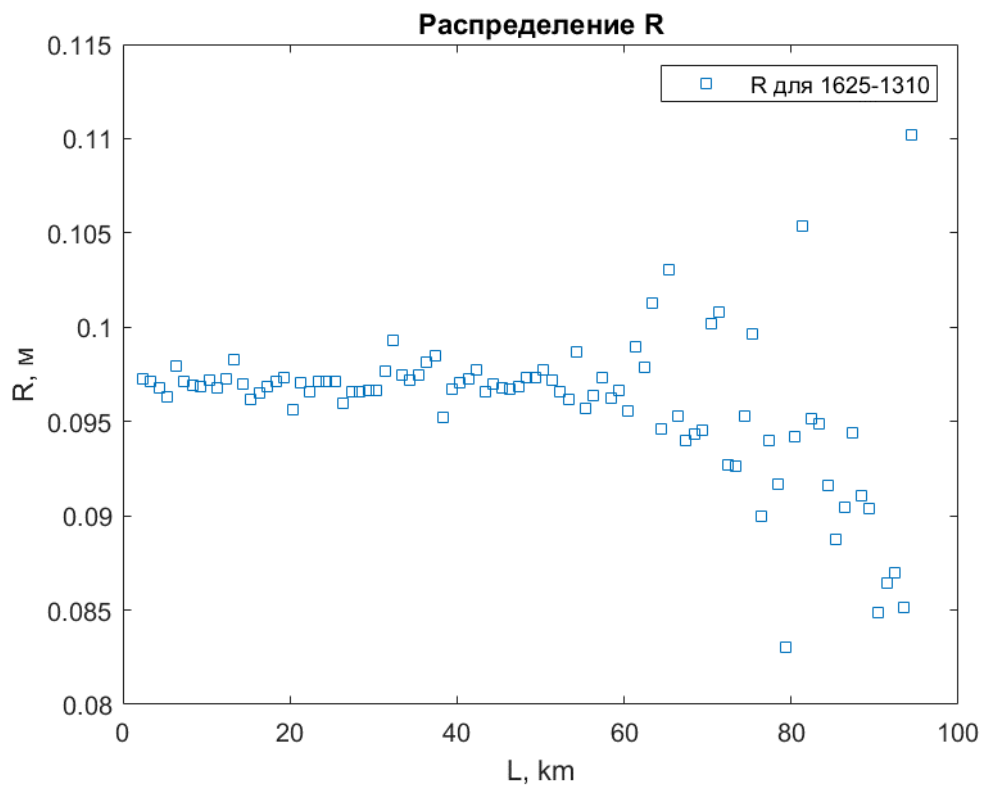


Рис. 3.17 – Распределение радиусов изгибов волокна по длине трассы, разбитой на отрезки по 1 км

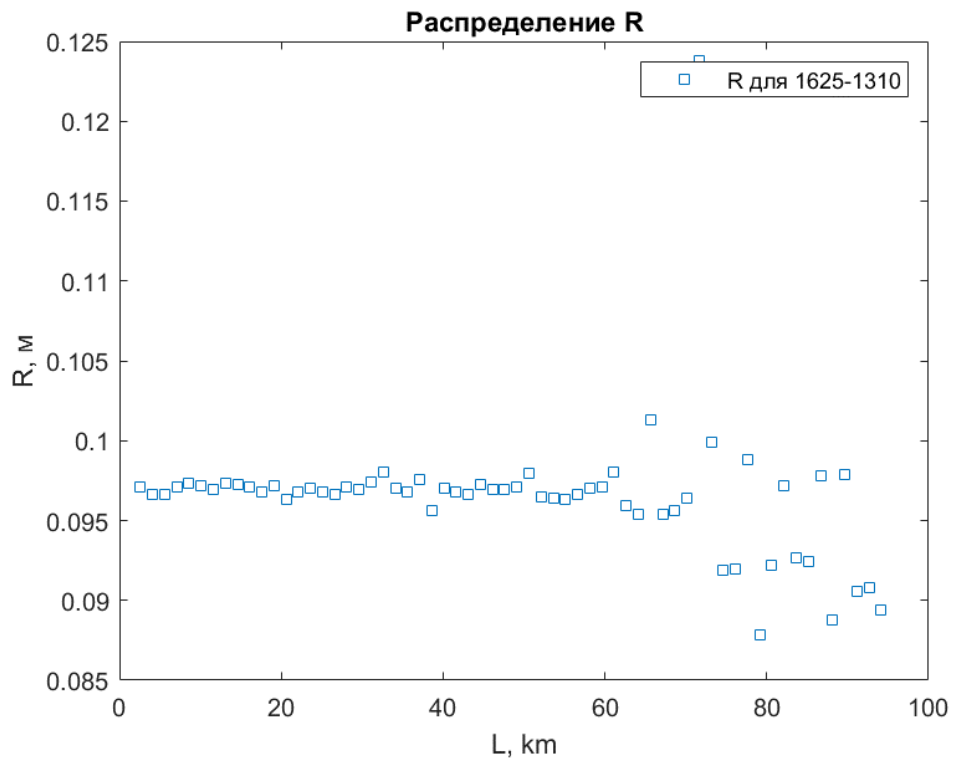


Рис. 3.18 – Распределение радиусов изгибов волокна по длине трассы, разбитой на отрезки по 1,5 км

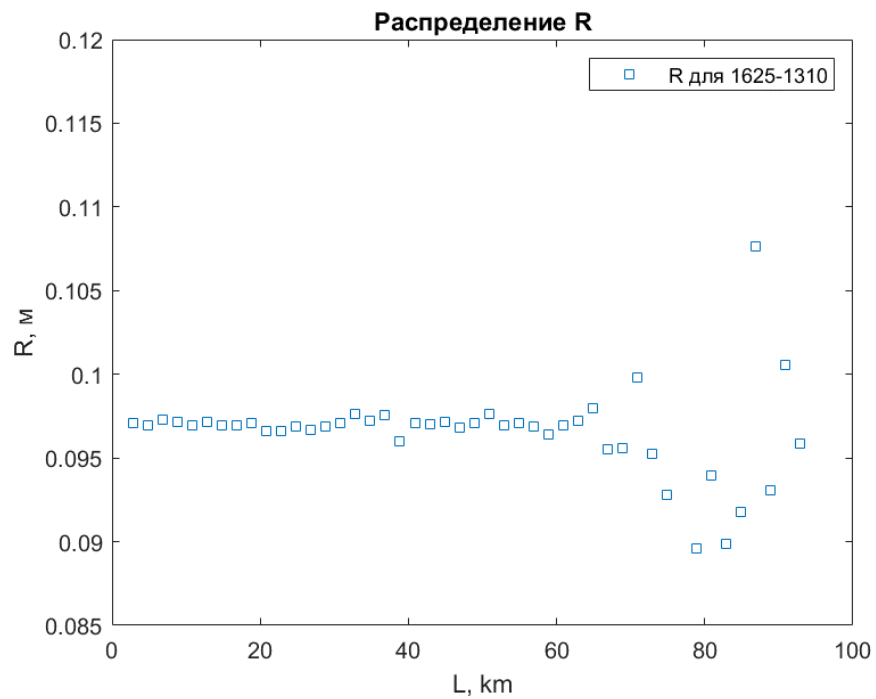


Рис. 3.19 – Распределение радиусов изгибов волокна по длине трассы, разбитой на отрезки по 2 км

В результате анализа получили, что радиусы изгибов по длине трассы так же, как это было показано в главе 2 распределены неравномерно.

В зависимости от длины отрезков, на которые разбивали трассу при анализе, были получены следующие значений радиусов изгибов:

1) Длина разбиения 0,7 км: радиусы изгиба лежали в диапазоне 80,1...112,3 мм. Среднее значение составило 95,8 мм.

2) Длина разбиения 1 км: радиусы изгиба лежали в диапазоне 83,0...110,2 мм. Среднее значение составило 95,9 мм.

3) Длина разбиения 1,5 км: радиусы изгиба лежали в диапазоне 87,8...123,8 мм. Среднее значение составило 96,5 мм.

4) Длина разбиения 2 км: радиусы изгиба лежали в диапазоне 89,6...118,1 мм. Среднее значение составило 97 мм.

Как видно, в целом получены схожие результаты при разных длинах разбиения.

Таким образом, можно сказать, что разброс значений радиусов изгибов лежит в пределах от 80 до 118 мм. Среднее значение радиуса изгиба составляет 96 мм.

При этом не зависимо от длины участков разбиения трассы, на исследуемом ОК эксплуатирующийся ВОЛС участков, где радиус изгиба был менее допустимого выявлено не было.

Заключение

Избыточная длина ОВ предотвращает разрывы волокна в процессе эксплуатации оптического кабеля. С другой стороны, избыточность приводит многократным изгибам волокна внутри модуля кабеля. Волокно распределено случайным образом. Равномерность распределения избыточной длины оптического волокна по длине модуля кабеля – один из критериев качества оптического кабеля. Избыточная длина напрямую связана с радиусами изгибов ОВ.

В работе были найдены значения распределения радиусов изгибов ОВ в физической модели оптического модуля и в кабеле реальной трассы ВОЛС, находящейся в эксплуатации.

В ВКР последовательно были решены следующие задачи:

- выполнено физическое моделирование расположения ОВ в оптическом модуле.
- выполнено исследование распределения радиусов изгиба волокна в физической модели модуля.
- выполнено исследование распределения радиусов изгиба волокна в кабеле по рефлектограммам реальной трассы.

Первая глава посвящена обзору исследований избыточной длины ОВ в кабелях модульной конструкции. В главе были даны основные понятия, касающиеся области исследования, подробно описаны способы контроля и измерения избыточной длины ОВ применяемые заводами-изготовителями ОК. Показано, что применяемые методы не дают полного представления о распределении избыточной длины ОВ в кабеле после завершения всех операций изготовления ОК, поскольку контроль ИД осуществляется только на этапе изготовления оптического модуля. Также рассмотрены результаты исследований ИД, выполненные другими авторами ранее. Исследованиями избыточной длины ОВ в кабеле занимались следующие авторы: коллектив авторов под руководством Длюстрова О.В. – выполняли исследования ИД

методом Бриллюэновской рефлектометрии. Длютровым О.В. было показано, что допустимый радиус изгиба ОВ в модуле не должен быть менее 25 мм. Также исследованиями ИД занимались Бурдин В.А., Андреев В.А., Попов Б.В., Попов В.Б., Алехин И.Н., Гаврюшин С.А. и др. В ряде работ представлены результаты измерений локальных значений ИД, полученных путем сравнения абсолютной длины ОВ в модуле с длиной модуля. Показано, что избыточная длина ОВ в модулях ОК лежит в пределах от 0,168–0,179 %. Также в данной главе был выполнен обзор существующих косвенных методов измерения избыточной длины волокна.

Во второй главе было выполнено физическое моделирование расположения ОВ с избыточной длиной в модуле. Был подробно описан эксперимент с физической моделью оптического модуля. В качестве физической модели были использованы стеклянные трубки с диаметрами близкими к реальным диаметрам, изготавливаемых в кабельной промышленности модулей. Результаты эксперимента наглядно показали, что радиусы изгиба, которые определяют избыточность волокна, по всей длине модуля распределены неравномерно. При этом есть участки, где значения радиусов изгибов ОВ становятся менее допустимых, составляющих 25 мм. Теоретический расчет радиуса изгиба по результатам измерения ИД ОВ дает при этом лишь одно значение, что не позволяет судить корректно о том, что происходит по длине всего модуля.

В третьей главе выполнено исследование распределения радиусов изгибов ОВ в кабеле ВОЛС, находящейся в эксплуатации. Описан метод исследования распределений радиусов изгибов ОВ на основе обработки рефлектограмм OTDR измеренных на двух длинах волн 1310 и 1625 нм. Также подробно описан алгоритм обработки рефлектограмм. В результате были получены графики распределения радиусов изгиба волокна по всей длине трассы. Распределение радиусов изгибов также являлось неравномерным. Разброс значений радиусов изгибов лежал в пределах от 80 до 118 мм. В среднем радиус изгиба, в зависимости длины участка разбиения

трассы при обработке рефлектограмм составлял 96-97 мм. При этом, не зависимо от длины участков разбиения трассы, на исследуемом ОК эксплуатирующийся ВОЛС участков, где радиус изгиба был менее допустимого выявлено не было.

Список использованных источников

1. Авдеев, Б.В. Об избыточной длине оптического волокна в оптическом кабеле [Электронный ресурс] / Б.В. Авдеев, Е. Н. Барышников, О. В. Длютров, И. И. Стародубцев // RusCable.Ru: Электрон. журн. - Режим доступа к журн: <https://www.ruscable.ru/doc/analytic/statya-042.html>. – Загл. с экрана.
2. Бурдин, В.А. Рефлектометрические методы измерений распределений избыточной длины оптических волокон в модульных трубах кабеля [Текст] / В.А. Бурдин, А.В. Бурдин // Фотоника. – 2017. – Т. 64, № 4. – С. 96-105.
3. Андреев, В. Исследование изменений избыточной длины волокна в самонесущем ОК на отдельных операциях изготовления [Текст] / А. Андреев, Б. Попов, В. Попов, М. Важдаев, С. Гаврюшин // Первая миля. – 2016. – № 6. – С. 66-70.
4. Длютров, О.В. Исследование механического состояния оптического волокна неразрушающими методами контроля относительного удлинения в процессе производства оптических кабелей [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.02 / О.В Длютров; рук. работы С.В. Серебрянников ; МЭИ. - 2004. - 20 с.
5. Андреев, В.А. Особенности технической эксплуатации ВОЛС в районах крайнего Севера и Сибири [Текст] / В.А. Андреев, В.А. Бурдин, А.Н. Бессмертный, А.О. Нижгородов, Т.Г. Никулина // Электросвязь. – 2018. – № 8. – С. 67-71.
6. Малов, А.Н. Временная эволюция свойств оптоволоконных линий передачи информации под действием циклических механо-термических нагрузок. [Текст] /А.Н. Малов // В кн.: Взаимодействие излучения и полей с веществом. БШФФ-99. – Иркутск- ИГУ, 2000. - С. 301-305.

7. Бурдин, В.А. Анализ изменений статистических характеристик избыточной длины оптического волокна в процессе производства оптического кабеля [Текст] / В.А Бурдин, В.А. Андреев, А.А. Воронков и др. // Отчет о НИР. – Самара. - 2016. – С.92.
8. Овчинников, А.А. Исследование влияния конструкций и технологии изготовления на стойкость оптических кабелей для систем передачи информации к воздействию механических нагрузок [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.02 / А.А. Овчинников; рук. работы М.Я. Яковлев; ОАО «ЦНИТИ Техномаш». - 2006. - 24 с.
9. Burdin, V.A. Method of excess fiber length estimating based on low subzero temperature climatic test [Text] / V.A. Burdin, M.A. Vazhdaev // SPIE Proceedings, 2014. – 9156. – P. 91560P-1 - 91560P-12.
10. Бурдин, В.А. Способ измерения избыточной длины оптического волокна в оптическом модуле оптического кабеля в процессе климатических испытаний [Текст] // Пат. RU 2562141, 2015.
11. Бурдин, В.А. Способ измерения избыточной длины оптического волокна в модуле оптического кабеля [Текст] // Пат. RU 2685066, 2019.
12. Бурдин, В.А. Метод оценивания распределений избыточной длины волокна в оптическом кабеле по результатам рефлектометрических измерений коэффициентов затухания при низких отрицательных температура [Текст] / В.А. Бурдин, М.А. Важдаев // Инфокоммуникационные технологии. – 2014. – Т. 2, № 3. – С. 22-28.
13. Douglas J. Blew. Apparatus for controlling excess fiber length in a loose tube optical fiber buffer tube [Электронный ресурс] / Douglas J. Blew// Patent US 4921413. - Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/US4921413?q=US+4921413>. – Загл. с экрана.
14. Douglas J. Blew. Method for controlling excess fiber length in a loose tube optical fiber buffer tube [Электронный ресурс] / Douglas J. Blew// Patent US 4983333. - Режим доступа:

<https://patents.google.com/patent/US4983333A/en?q=US+4983333>. –

Загл. с экрана.

15. For Loose Tube Fiber and Fiber Ribbon Cabling - Excess Fiber Length Manufacturing Measurement System, www.betalasermike.com.
16. Авдеев, Б.В. Изменение избыточной длины в процессе изготовления ВОК [Текст] / Б.В. Авдеев, Е.Н. Барышников, О.В. Длютров, И.И. Стародубцев // Кабели и провода. - 2002. - №3(274). - с. 32-34.
17. Авдеев, Б.В. Проблемы корректного определения избыточной длины оптического волокна в оптическом кабеле [Текст] / Б.В. Авдеев, Е.Н. Барышников // Электротехника, электромеханика и электротехнологии: Тез. докладов III международной конференции 1999 г., Россия, Клязьма. - М.: МЭИ, 1999 г, - с. 86-87.
18. Барышников, Е.Н. Измерение избыточной длины волокна в оптическом модуле [Текст] / Е.Н. Барышников, О.В. Длютров, И.Б. Рязанов, С.В. Серебрянников // Тез. докладов IV международной конференции по физико-техническим проблемам электротехнических материалов и компонентов 24-27 сентября 2001 г., Россия, Клязьма. - М.: МЭИ, 2001 г. - с. 40-42.
19. Патент CN 101105559. Optical fiber secondary coating excess length tester/
<https://patents.google.com/patent/CN101105559A/en?q=CN+101105559>
20. Корн, В.М. О применении метода Мандельштам-Бриллюэновского рассеяния для измерений характеристик оптических кабелей [Текст] / В.М. Корн, О.В. Длютров, Б.В. Авдеев, Е.Н. Барышников // Кабели и провода, №5 (288), 2004. - с. 19-21.
21. Акопов, С.Г. Контроль бриллюэновским рефлектометром технологии производства оптических кабелей // Вестник связи, 2003. №4. - с. 136-138.

22. Chen H., Chen X. and Yao X.S., “Distributed fiber bend and stress measurement for determining optical fiber reliability by multi-wavelength optical reflectometry,” US 2014/0362367 (2014).
23. Alekhin I. N. Application of the polarization reflectometry for estimating the distribution of mechanical stress in optical fiber [Text] / I. N. Alekhin, M. V. Dashkov, T. G. Nikulina // Optical Technologies for Telecommunications 2018. - 111461L 2019
24. Marcuse D. Curvature loss formula for optical fibers.– J. Opt. Soc. Am., 1976, № 66(3), p.216–220
25. Stueflotten, S. “Low temperature excess loss of loose tube fiber cables,” Applied Optic 21(23), pp. 4300-4307 (1982).
26. Никулина, Т. Г. Исследование затухания оптических волокон кабеля в защитном полимерном трубопроводе с замерзающей водой и разработка мер защиты [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13 / Т.Г Никулина; рук. работы В.Б. Попов ; ГОУВПО ПГУТИ. - 2010. - 16 с.
27. Галлямова, Р.Х. Исследование радиусов изгиба оптического волокна в модулях [Текст] / Р.Х. Галлямова, Т.Г. Никулина // в IV научном форуме телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2020 — XVIII международной научной конференции «оптические технологии в телекоммуникациях» (ОТТ-2020): – Самара, 2020. – С. 123.
28. Галлямова, Р.Х. Исследование радиусов изгиба оптического волокна в физической модели оптического модуля кабеля [Текст] / Р.Х. Галлямова, Т.Г. Никулина // XXVIII Российская научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов университета с приглашением ведущих ученых и специалистов родственных вузов и организаций: Самара, 2021. – С. 76-77.
29. Галлямова, Р.Х. Методика обработки рефлектограмм OTDR для анализа распределений избыточной длины оптического волокна вдоль

кабеля [Текст] / Р.Х. Галлямова // 60 Юбилейная студенческая научная конференция: - Самара, 2021. – С. 75.