

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ,
ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
КАБЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»

На правах рукописи



ТАРАСОВ ДМИТРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРВИЧНОГО ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ
НА СВОЙСТВА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН
И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ИХ ПАРАМЕТРОВ

Специальность: 2.4.1 – «Теоретическая и прикладная электротехника»

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
Корякин Алексей Григорьевич

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	6
Глава 1 Анализ результатов исследований и методов испытаний кварцевых оптических волокон, применяемых в кабельной технике, с целью оценки их качества и разработки отечественных композиций первичного защитного покрытия.....	15
1.1 Виды первичного защитного покрытия кварцевых оптических волокон, применяемых в кабельной технике.....	15
1.2 Состав отверждаемых ультрафиолетом полимерных композиций для первого и второго слоёв первичного защитного покрытия кварцевых оптических волокон.....	18
1.3 Способы нанесения двухслойного отверждаемого ультрафиолетом акрилового первичного защитного покрытия на кварцевый световод.....	20
1.4 Общие требования, предъявляемые к кварцевым оптическим волокнам, применяемым в кабельной технике, в части свойств первичного защитного покрытия.....	22
1.5 Исследование свойств первичного защитного покрытия кварцевых оптических волокон, применяемых в кабельной технике.....	25
1.5.1 Совместимость с гидрофобными наполнителями.....	25
1.5.2 Оптические потери, вызванные микроизгибами световода.....	28
1.5.3 Методы определения степени полимеризации первичного защитного покрытия.....	31
1.6 Применение бриллюэновской рефлектометрии для оценки свойств оптического волокна.....	34
1.7 Задачи исследования.....	38
Глава 2 Исследования отверждаемых ультрафиолетом двухслойных защитных покрытий и технологии их наложения с целью создания отечественного покрытия для кварцевых световодов на их основе.....	44

2.1	Определение требований, предъявляемых к разрабатываемым композициям для отверждаемого ультрафиолетом полимерного первичного защитного покрытия.....	44
2.2	Выбор оптимальной программы контроля качества оптического волокна с двухслойным отверждаемым ультрафиолетом первичным защитным покрытием.....	54
2.3	Исследование влияния степени полимеризации двухслойного отверждаемого ультрафиолетом первичного защитного покрытия на характеристики кварцевого оптического волокна.....	62
2.3.1	Исследование характеристик оптического волокна с отверждаемым ультрафиолетом первичным защитным покрытием при условии недостаточной степени его полимеризации.....	62
2.3.2	Характеристики оптического волокна с двухслойным отверждаемым ультрафиолетом первичным защитным покрытием при условии чрезмерной его полимеризации.....	69
2.4	Определение зависимости между технологическими режимами вытяжки оптического волокна и степенью полимеризации двухслойного отверждаемого ультрафиолетом первичного защитного покрытия.....	72
2.5	Исследование влияния уменьшения диаметра отверждаемого ультрафиолетом первичного защитного покрытия на характеристики кварцевого оптического волокна и оптических кабелей на его основе.....	77
2.5.1	Исследование влияния уменьшения диаметра отверждаемого ультрафиолетом первичного защитного покрытия на характеристики кварцевого оптического волокна.....	77
2.5.2	Исследование влияния уменьшения диаметра отверждаемого ультрафиолетом первичного защитного покрытия на характеристики кварцевого оптического волокна, применяемого в оптических микрокабелях с плотным вторичным полимерным защитным покрытием.....	87
2.5.3	Исследование влияния уменьшения диаметра отверждаемого ультрафиолетом первичного защитного покрытия на характеристики кварцевого	

оптического волокна, применяемого в оптических кабелях модульной конструкции.....	91
2.6 Выводы по главе 2.....	97
Глава 3 Оценка технологии наложения буферных покрытий на основе композиций, отверждаемых ультрафиолетом, при изготовлении микрокабеля.....	99
Глава 4 Исследование влияния гидрофобных заполнителей и водонабухающих материалов, применяемых в кабельных конструкциях, на характеристики оптического волокна.....	105
4.1 Исследование совместимости оптического волокна с двухслойным первичным защитным покрытием с внутримодульным гидрофобным заполнителем.....	105
4.2 Исследование совместимости оптического волокна с двухслойным первичным защитным покрытием с водонабухающими материалами.....	111
4.3 Выводы по главе 4.....	114
Глава 5 Исследование возможности определения типа и идентификации производителя одномодового оптического волокна	115
5.1 Исследования с целью разработки методики по определению типа и идентификации производителя одномодового оптического волокна	115
5.2 Выводы по главе 5.....	139
Глава 6 Исследование влияния внесения изменений в процедуру испытаний на стойкость ОВ к воздействию микроизгибов на получаемые результаты.....	141
6.1 Исследование влияния геометрических размеров ячейки сетки и массы грузов при проведении испытаний оптического волокна на воздействие микроизгибов по методу С.....	141
6.1.1 Исследование влияния геометрических размеров ячейки сетки при проведении испытаний оптического волокна на воздействие микроизгибов по методу С.....	141

6.1.2 Исследование влияния массы грузов при проведении испытаний оптического волокна на воздействие микроизгибов по методу С.....	143
6.2 Исследование возможности применения метода С для оценки оптических потерь в ОВ, вызванных микроизгибами при воздействии отрицательных температур.....	148
6.3 Выводы по главе 6.....	152
Заключение.....	153
Список сокращений.....	156
Список литературы.....	157
Приложение А. Акт об использовании результатов диссертационной работы.....	172

Введение

В современном мире постоянно увеличивается потребность в объёмах и скоростях передаваемой информации [1-3]. Ежегодный рост интернет-трафика для фиксированного доступа составляет около 25%, для мобильных устройств — около 70% [3]. Рост обусловлен всё большим проникновением мобильных устройств и повышением качества услуг (5G – мобильная связь, 8K – видео и телевидение). На каждого человека в среднем уже давно приходится не по одному мобильному устройству. Появилась сфера «интернет вещей», одним из элементов которого является «умный дом». С функцией «умный дом» к интернету подключён не только компьютер или смартфон, но и бытовые приборы. Есть своя концепция и для «умного завода». Но прогресс не остановился на стадии «умный дом / завод». В настоящее время начинается эра «умных городов», где к сети подключены не отдельные дома, а элементы городской инфраструктуры. Дальнейшим развитием концепции «умный город» должны стать беспилотные автомобили (уже ведутся эксперименты), поезда (в ряде стран уже функционируют). Данные проекты требуют от линий связи большой пропускной способности и малых задержек.

Именно поэтому в современных системах передачи информации широко применяются оптические кабели (ОК) с использованием кварцевых оптических волокон (ОВ), обладающих высокой пропускной способностью, низкими оптическими потерями, защищённостью от электромагнитных воздействий, малыми габаритами и массой [4]. Мировое производство ОВ постоянно увеличивается – в 2015 году потребление ОВ составило 391 млн км, а в 2022 году превысило 600 млн. км.

Массовость требует эффективности, для этого необходимо качество ОВ: совершенная конструкция с требуемым уровнем физических параметров – результат реализации технологического процесса производства. Представленная

работа относится к решению актуальных задач совершенствования производства и испытания ОВ. В ней исследуются свойства ПЗП, разрабатываются рекомендации по производству и испытаниям ОВ. В развитие проведённых исследований разрабатывается методика идентификации оптических волокон, способствующая защите отечественных поставщиков кабельной техники.

Актуальность темы исследования

ОК нашли широкое применение в современных системах передачи информации. ОК прокладываются в различных климатических регионах, различными способами, в т.ч. укладкой в грунт и в кабельную канализацию, где плотность укладки очень высока. При этом часто, особенно в передовых странах за рубежом, с целью миниатюризации количество ОВ в ОК увеличивается при сохранении внешнего диаметра ОК неизменным, что увеличивает, в частности, продольные и поперечные механические нагрузки, испытываемые ОВ. При уплотнённой укладке ОВ ещё более возрастает роль его первичного защитного покрытия (ПЗП), как основного защитного фактора, обеспечивающего его надёжность и долговечность. Все отверждаемые с помощью облучения ультрафиолетом (УФ) полимерные композиции для ПЗП, доступные производителям на отечественном рынке, пока что производятся за рубежом. В этой связи разработка соответствующих отечественных полимерных композиций для кварцевых ОВ и методов оценки их качества является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования

Первичное защитное покрытие наносится на световод с целью его защиты от внешнего воздействия. Роли первичного защитного покрытия в обеспечении работоспособности оптического волокна, а также методам его испытаний посвящены работы [5-12], имеются стандартизованные методы испытаний, которые охватывают геометрические и механические параметры первичного защитного покрытия оптического волокна. Вместе с тем, ряд таких важных характеристик, как микроизгибные потери и совместимость материалов конструкции оптического кабеля к началу данной работы практически не имели удобных, надёжных и тем более стандартизованных методов контроля.

Технологические режимы нанесения первичного защитного покрытия, а также плотного буферного покрытия на оптические волокна являются, по существу, элементами ноу-хау для каждой композиции и требуют тщательного подбора с целью обеспечения оптимальных характеристик оптических волокон и кабелей на их основе.

Работы по миниатюризации конструкций оптических кабелей и увеличению их «волоконности» (т.е. числа ОВ в ОК) путём замещения ОВ с ПЗП диаметром 250 мкм на ОВ с ПЗП 180-200 мкм – представляет собой сравнительно новое направление в производстве ОК. Однако влияние уменьшения диаметра (и толщины слоёв) ПЗП на характеристики как самого ОВ, так и в составе конструкции ОК до настоящего времени было исследовано не в полной мере.

Цели и задачи работы

Выполнение комплекса исследований, направленного на определение основных параметров, характеризующих качество полимерной композиции для УФ-отверждаемого двухслойного ПЗП, необходимых технологических параметров нанесения композиций на кварцевый световод, параметров, характеризующих качество нанесения ПЗП на световод и разработку усовершенствованных методов оценки качества кварцевого ОВ, применяемого в кабельной технике, двухслойное первичное защитное покрытие которого состоит из УФ-отверждаемых композиций на основе акрилатов.

Научная новизна

– Разработаны критерии совместимости материалов, применяемых в конструкциях ОК. Впервые разработана и апробирована методика по определению совместимости с ОВ с водонабухающими материалами, в т.ч. ОВ диаметром 200 мкм.

– Определены оптимальные для исследованного процесса и применяемых материалов технологические режимы нанесения композиций двухслойного УФ-отверждаемого ПЗП при вытяжке кварцевых световодов.

- Впервые разработаны отечественные УФ-отверждаемые полимерные композиции, применяемые для создания двухслойного ПЗП кварцевых оптических световодов.
- Исследовано влияние уменьшения диаметра ПЗП ОВ на свойства ОВ и ОК.
- Разработана новая методика определения микроизгибных потерь ОВ при отрицательных температурах.
- Впервые разработана методика определения категории, производителя и марки кварцевого одномодового ОВ.

Теоретическая и практическая значимость

- Освоено серийное производство отечественных УФ-отверждаемых полимерных композиций, применяемых для изготовления первого и второго слоёв двухслойного ПЗП кварцевых световодов.
- Разработана УФ-отверждаемая полимерная композиция для второго слоя ПЗП, пригодная для изготовления плотного буферного покрытия ОВ и оптических микрокабелей, эксплуатирующихся при температурах до минус 40 °С.
- Показано существенное влияние степени полимеризации ПЗП на критически важные и практически значимые свойства ОВ. Определены технологические операции, влияющие на полимеризацию ПЗП при вытяжке ОВ.
- Показана возможность использования разработанной методики определения совместимости материалов, применяемых в конструкциях ОК, для осуществления рационального выбора материалов для ОК и элементов их конструкции.
- С применением методики по определению микроизгибных потерь в ОВ осуществлена оценка влияния ПЗП на оптические потери в условиях механических и температурных воздействий, характерных для типовых условий эксплуатации.
- Методика определения категории, производителя и марки кварцевого одномодового ОВ позволяет заказчикам кабельных изделий осуществлять

верификацию производителя, заявленного в документации на ОК ОВ на соответствие указанным в ТЗ на объект, что препятствует применению в ОК менее качественного ОВ, что, в свою очередь, ведёт к повышению качества и срока службы ОК и ВОЛС в целом.

Методология и методы исследования

При выполнении работы использовались экспериментальные методы исследования и статистические методы обработки результатов испытаний и оценки их достоверности.

Реализация и внедрение результатов исследований

1. Разработанные УФ-отверждаемые полимерные композиции применяются для изготовления кварцевых ОВ с двухслойным ПЗП, в т.ч. одномодового радиационностойкого оптического волокна марки ОВ-Ер по КЖИБ.636570.518 ТУ и многомодового оптического волокна с градиентным профилем показателя преломления марки ОВ-МГ1-01 по КЖИБ.636570.540 ТУ, а также ОВ для волоконных гироскопов.

2. Производство ОВ марки ОВ-Ер с применением разработанных композиций, осуществляется на режимах, обеспечивающих необходимую степень полимеризации ПЗП. Оформлен акт об использовании результатов диссертационной работы (Приложение А).

3. Произведена апробация УФ-отверждаемой полимерной композиции для второго слоя ПЗП, показавшая возможность её применения для изготовления плотного буферного покрытия ОВ и оптических микрокабелей, эксплуатирующихся при температурах до минус 40 °С.

4. Разработанная методика определения совместимости материалов, применяемых в конструкциях ОК, вошла в приложение Г ГОСТ Р 52266-2020 «Кабели оптические. Общие технические условия».

5. Согласно методике определения совместимости материалов, применяемых в конструкциях ОК, проведена оценка совместимости ОВ с ПЗП из разработанных полимерных композиций с внутримодульным гидрофобным наполнителем, что позволило рекомендовать ОВ с ПЗП на основе разработанных

УФ-отверждаемых композиции к применению и гарантировать надёжность и долговечность ОВ и ОК, на основе вышеуказанного ОВ, в течение необходимого срока службы.

6. ОВ с диаметром по ПЗП 200 мкм применены в новой конструкции ОК, разработанной при непосредственном участии автора и защищённой патентом № RU 2 772 554 С1.

7. Оформлен патент № RU 2 803 977 С1 «Способ идентификационных испытаний оптических волокон» на методику определения категории, производителя и марки кварцевого одномодового ОВ.

Основные положения, выносимые на защиту.

– Технологические режимы вытяжки ОВ, которые определяют степень полимеризации ПЗП, влияющие существенным образом на свойства ОВ.

– Методика определения совместимости материалов, применяемых в конструкциях ОК, для осуществления обоснованного выбора материалов для ОК и элементов их конструкции.

– Результаты исследований, свидетельствующие о том, что ОВ с уменьшенным диаметром по ПЗП (200 мкм) не отличаются по своим механическим и передаточным свойствам от ОВ с ПЗП диаметром 250 мкм и могут быть применены в конструкциях ОК без контакта ПЗП с гидрофобным наполнителем или ВБ-материалами. А применительно к оптическим микрокабелям позволяют минимизировать массо-габаритные размеры, добиться увеличения строительной длины, а также разрабатывать микрокабелями, обладающими лучшей стойкостью к воздействию отрицательных температур.

– Методика определения микроизгибных потерь в ОВ при отрицательных температурах.

– Разработанная УФ-отверждаемая полимерная композиция для второго слоя ПЗП пригодна для применения в качестве плотного буферного покрытия ОВ и оптических микрокабелей, которые эксплуатируются при температурах не ниже минус 40 °С.

– Методика определения категории, производителя и марки кварцевого одномодового ОВ.

Достоверность

Достоверность результатов исследований по совместимости материалов ОК с заполнителями подтверждена результатами испытаний ОВ с внутримодульным гидрофобным заполнителем.

Достоверность результатов исследований влияния степени полимеризации ПЗП на свойства ОВ подтверждена результатами сравнительных испытаний ОВ, изготовленных на идентичных элементах заготовок на одном и том же оборудовании и при контролируемых технологических режимах.

Достоверность экспериментальных данных по микроизгибным потерям ОВ и оптических микрокабелей, полученных с помощью разработанной испытательной установки, подтверждена сходимостью (повторяемостью) результатов. Достоверность исследований по определению свойств ОВ с уменьшенным диаметром ПЗП (200 мкм) подтверждена исследованиями, проводимыми в рамках проектирования конструкций оптических микрокабелей и сравнительными испытаниями ОК, содержащим в своей конструкции ОВ с диаметром ПЗП 200 и 250 мкм.

Достоверность результатов исследований по определению производителя, категории и марки кварцевого одномодового ОВ согласно разработанной методике подтверждена результатами сравнительных испытаний.

Апробация работы и публикации

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

1. XVII Международная конференция «Электромеханика электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», Алушта, 2018.
2. Международная научная конференция «2019 Системы генерации и обработки сигналов в области бортовых коммуникаций», Москва, 2019.
3. Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО-2019), Пермь, 2019.

4. III Международная научно-техническая конференция: «Современные достижения в области клеев и герметиков: материалы, сырьё, технологии» (Адгезивы-2019), Дзержинск, 2019.

5. XVIII Международная конференция «Электромеханика электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», Алушта, 2020.

6. Международная научная конференция «2020 Системы генерации и обработки сигналов в области бортовых коммуникаций», Москва, 2020.

7. Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО-2021), Пермь, 2021.

8. Двадцать девятая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника энергетика и автоматика».

9. IV Международная научно-техническая конференция: «Современные достижения в области клеев и герметиков: материалы, сырьё, технологии» (Адгезивы-2023), Дзержинск, 2023.

10. Всероссийская Диановская конференция по волоконной оптике (ВКВО-2023), Пермь, 2023.

По теме диссертации опубликовано 10 работ [4, 7, 29, 58, 115, 123, 124, 126, 128, 136], 6 из которых в изданиях перечня ВАК; 3 научных публикаций по теме диссертации вошли в международные базы цитирования. Получены в соавторстве 2 патента на изобретение [127, 139] по нижеприведённому списку литературы.

Кроме того, Методика определения совместимости материалов, применяемых в конструкциях ОК, прошла апробацию в процессе общественного обсуждения стандарта [116], разработанного при непосредственном участии автора диссертационной работы.

Работа [136] из нижеприведённого списка литературы заняла первое место в конкурсе «Лучшая научная статья, публикация, доклад», проведённом НКО «Фонд поддержки программ развития предприятий кабельной промышленности имени профессора Пешкова И.Б.».

Личный вклад

Все исследования выполнены автором лично, при его непосредственном участии в качестве ответственного исполнителя, которое в том числе заключалось в постановке задач, разработке методик исследований, интерпретации результатов исследований.

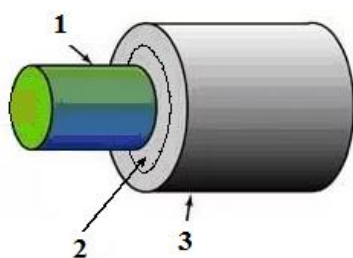
Структура и объём

Диссертация состоит из введения, 6-и разделов, заключения, списка литературы из 141 наименования и 1-го приложения. Материал изложен на 172 страницах текста и иллюстрирован 52 рисунками и 39 таблицами.

1. Анализ результатов исследований и методов испытаний кварцевых оптических волокон, применяемых в кабельной технике, с целью оценки их качества и разработки отечественных композиций первичного защитного покрытия

1.1. Виды первичного защитного покрытия кварцевых оптических волокон, применяемых в кабельной технике

Телекоммуникационное ОВ является основным элементом ОК и представляет собой кварцевый световод – тонкую кварцевую нить диаметром 125 мкм со сложной внутренней, обычно концентрической, структурой в виде слоёв синтетического кварцевого стекла с различным химическим составом, степенью легирования, получаемых разными способами. Для придания ей должных механических характеристик, позволяющих перерабатывать его в ОК и эксплуатировать в сетях и объектах связи, на поверхность ОВ из кварцевого стекла необходимо наносить защитную оболочку – первичное защитное покрытие (ПЗП) [4-6]. Конструкция ОВ с двухслойным покрытием приведена на рисунке 1.1. Размеры ПЗП (диаметры и толщина слоёв) во многих случаях схожи как для одномодовых, так и для многомодовых ОВ, применяемых в телекоммуникационной отрасли и при производстве ОК.



1 – Кварцевый световод

2 – Первый слой ПЗП

3 – Второй слой ПЗП

Рисунок 1.1 – Оптическое волокно с двухслойным ПЗП [7]

ПЗП наносятся при вытяжке ОВ и помимо повышения механических характеристик ОВ служат для повышения коррозионной стойкости к воздействию воды и растворителей, защиты от проникновения газов, в первую очередь водорода, повышения стойкости к микроизгибам.

ПЗП различаются по конструкции (однослойные, двухслойные), свойствам и применяемым материалам (полимерные, металлические, углеродные). Рассмотрим каждый из этих типов.

Технология нанесения углеродного покрытия изложена в [6, 8-11]. Углеродное покрытие наносится при вытяжке на ещё горячее волокно с помощью специального реактора методом химического осаждения из газовой фазы, его толщина обычно не превышает 40-50 нм. Покрытие может наноситься при достаточно большой скорости вытяжки, не приводит к дополнительным оптическим микроизгибным потерям и может применяться для изготовления ОВ большой длины. Для защиты от механических повреждений при эксплуатации поверх тонкого углеродного должно наноситься акриловое, полиимидное или силиконовое покрытие. Волокна с углеродным покрытием можно рекомендовать к применению при температурах до ~ 300 °С, а также при повышенной влажности, присутствии водорода и невозможности применения герметичных конструкций кабелей для защиты волокна. В связи с этим, их можно использовать в волоконных датчиках (гироскопах, распределённых датчиках, например, для химической и нефтегазовой промышленности) [6].

Технология нанесения металлических покрытий изложена в [6, 8, 12]. Металлические покрытия обычно наносятся во время вытяжки методом «намораживания», в процессе которого ОВ пропускается сквозь тонкий слой расплавленного металла. К основным недостаткам данных покрытий, ограничивающим возможность получения и применения длинных металлизированных ОВ, можно отнести чрезмерно большие микроизгибные потери (до десятков дБ/км и более), возникающие из-за большой разницы температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) металла и кварцевого стекла. Следует сказать, что, несмотря на вышеупомянутые проблемы,

ОВ в металлическом покрытии являются одними из лучших кандидатов для применения в экстремальных условиях, т.к., в отличие от углеродного покрытия, могут применяться без дополнительного полимерного или силиконового слоя, что обеспечивает возможность их применения в таких областях, как вакуумные системы, кабели доставки лазерного излучения большой мощности, медицинское оборудование, в жёстких условиях окружающей среды (температура до 1000 °С, воздействие химических веществ) [6].

Перечисленные выше виды покрытий (металлические и углеродные) относятся к герметичным типам ПЗП. Данные виды покрытий не являются распространёнными и применяются только в случае необходимости придания ОВ дополнительных свойств, описанных выше (чаще всего для так называемых «специальных» ОВ).

Для типичных «телекоммуникационных» ОВ и ОК наиболее распространёнными являются полимерные покрытия (акриловые и полиимидные), а также (значительно реже) силиконовые (кремнийорганические и т.п.). Благодаря большой скорости технологического процесса вытяжки ОВ, удобству работы при монтаже, эксплуатации и ремонте ОК, двухслойные покрытия на основе УФ-отверждаемых акрилатов нашли наиболее широкое применение в отрасли.

Для температур, превышающих 85 °С, наряду со спецакрилатами (стойкими к воздействию температур до 200 °С) могут применяться термически отверждаемые однослойные материалы: силиконы и полиимиды. Термически отверждаемые покрытия, являются более стойкими к повышенной температуре, но их труднее удалять при разделке ОК в процессе монтажа линий связи. Кроме того, сырьё для них является более дорогостоящим и производственные процессы более сложными. Два рассматриваемых типа материалов имеют меньшие скорости отверждения, что снижает скорость вытяжки волокна.

Температурный диапазон эксплуатации акриловых ПЗП, как правило, ограничивается рекомендуемым верхним значением 85 °С. Для повышения температурного диапазона эксплуатации акриловых покрытий до 200 °С, были разработаны спецакрилаты. Расширение температурного диапазона достигается, в

частности, посредством вывода из состава композиции уретановых групп, разлагающихся при температурах около 100 °С [6].

Следует отметить, что на российском рынке представлены исключительно импортные композиции для нанесения полимерных первичных защитных покрытий, таких фирм как DSM Desotech и Hercula.

1.2. Состав отверждаемых ультрафиолетом полимерных композиций для первого и второго слоёв первичного защитного покрытия кварцевых оптических волокон

Как уже говорилось ранее, современные УФ-отверждаемые ПЗП для ОВ практически всегда выполняются двухслойными. Согласно проведённому анализу опубликованных патентов [13-24], композиции для ПЗП должны содержать в своём составе следующие ингредиенты: олигомеры, мономеры-разбавители, сшивающие агенты и модифицирующие добавки. Процентное соотношение каждого из этих элементов приводит к существенному изменению свойств материала и, как следствие, к отличиям в характеристиках первого и второго слоёв ПЗП. Рассмотрим роль каждого из элементов композиции.

Олигомеры – олигоуретанаакрилаты с разнообразным строением входящих в их состав блоков находят наибольшее применение в качестве основы ПЗП. От строения этих соединений, их соотношения компонентов при синтезе, условий реакции зависят свойства получаемых покрытий.

Мономеры-разбавители, сшивающие агенты – регулирование вязкости композиций, изменение температуры стеклования покрытий, придание эластичности или жёсткости, регулирование коэффициента преломления ПЗП, улучшение совместимости с основным олигомером, уменьшение содержания

летучих, повышение скорости отверждения, придание повышенных гидрофобных свойств и регулирование адгезионных характеристик;

Фотоинициаторы – инициируют отверждение под воздействием УФ-излучения. Выбор фотоинициатора влияет на скорость отверждения, а, следовательно, и на скорость вытяжки волокна;

Модифицирующие добавки, такие как:

- Промоторы адгезии – улучшение адгезии первого слоя ПЗП к кварцу световода;

- Передатчики цепи – снижение молекулярной массы полимера и, следовательно, уменьшение температуры стеклования. Указывается [20], что передатчики цепи эффективно влияют на плотность сшивки и, таким образом, на модуль упругости как первого, так и второго слоёв покрытий.

- Стабилизаторы – улучшение стабильности при хранении неотверждённых составов, а также стойкости ПЗП к термоокислительной деструкции;

- Антифрикционные соединения – вводятся во второй слой ПЗП и уменьшают трение данного слоя ПЗП (например, при перемотке или задувке ОВ в микромодуль). Вместе с тем, антифрикционные соединения отрицательно влияют на свойства ПЗП и могут вызывать его помутнение, образование налёта, кратеров, «рыбьих глаз» на поверхности ПЗП.

- Агенты совместимости – вводятся для сведения к минимуму отрицательного влияния антифрикционных соединений.

- УФ-абсорберы – поглощение УФ-излучения. Предотвращение старения ПЗП в процессе эксплуатации. Фотолитическое старение обычно приводит к пожелтению, которое нежелательно для покрытия ОВ. В то же время, введение в композиции УФ-абсорберов наряду с положительным эффектом, может понизить скорость отверждения. Учитывая свойства фотоинициаторов и УФ-абсорберов, подбирают их такими, чтобы абсорбционные полосы УФ-поглощения

не конкурировали друг с другом, или конкуренция подавлялась повышенной концентрацией фотоинициатора [21];

– Гидрофобизаторы – придание второму слою ПЗП водоотталкивающих свойств, т.к. вода способствует росту трещин в ОВ, что отрицательно сказывается на его механических характеристиках и сроках службы. Композиции для второго слоя ПЗП с повышенными гидрофобными свойствами и адгезией к первому слою ПЗП созданы в [22].

1.3. Способы нанесения двухслойного отверждаемого ультрафиолетом акрилового первичного защитного покрытия на кварцевый световод

Акриловые ПЗП наносятся в процессе вытяжки ОВ через фильеры (на современных установках – как правило, под давлением) и отверждаются ультрафиолетовым излучением (УФ), обычно с правильно подобранным спектральным составом излучения, создаваемого специальными УФ лампами. Эти покрытия являются, как правило, двухслойными. Первый, прилегающий к ОВ слой ПЗП, должен действовать в качестве амортизатора под жёстким наружным слоем, чтобы свести к минимуму микроизгибы. Этот слой должен иметь хорошую адгезию к волокну и низкий модуль упругости. Внешний, второй слой ПЗП, имеющий высокий модуль упругости, должен защищать ОВ от механических повреждений [6, 23, 24].

Наложение акриловых ПЗП происходит в процессе вытяжки ОВ методом «мокрое по сухому» (wet on dry) или «мокрое по мокрому» (wet on wet). При применении метода «мокрое по сухому» ОВ проходит последовательно через фильеру (1) см. рисунок 1.2а, где накладывается первый слой ПЗП, после чего он отверждается УФ-излучением от системы УФ-ламп (2). На уже отверждённый

(сухой) первый слой ПЗП при прохождении ОВ через фильеру (3) накладывается второй слой ПЗП, который отверждается следующей системой УФ-ламп [6].

Достоинствами метода «мокрое по сухому» являются простота изготовления, низкая стоимость оборудования и простота материально-технического обеспечения.

К недостаткам этого метода можно отнести относительно плохую зачищаемость ПЗП [25] в сравнении с покрытием нанесённым методом «мокрое по мокрому».

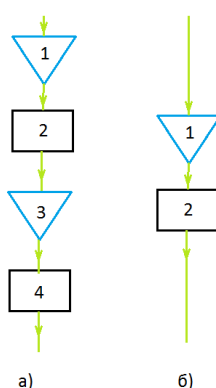


Рисунок 1.2 – методы наложения ПЗП.
а – «мокрое по сухому», б – «мокрое по мокрому»

Отличие метода «мокрое по мокрому» заключается в том, что и первый, и второй слой ПЗП накладываются через одну фильеру и отверждаются одним набором УФ-ламп, т.е. второй слой ПЗП накладывается на ещё неполимеризованный (мокрый) первый слой (см. рисунок 1.2б) [6]. Материалы не смешиваются между собой благодаря идеальной геометрии и правильно подобранному давлению. Этот метод позволяет использовать для внутреннего (первого) слоя мягкие материалы, не обладающие высокой механической устойчивостью. Например, для этого могут использоваться гели [25].

Достоинствами метода «мокрое по мокрому» являются простота изготовления, возможность обеспечить различные механические характеристики конечного продукта, оптимальная зачищаемость [25].

Недостатком метода является более сложный технологический процесс.

1.4. Общие требования, предъявляемые к кварцевым оптическим волокнам, применяемым в кабельной технике, в части свойств первичного защитного покрытия

Типы кварцевых ОВ и предъявляемые к ним требования указаны в [26, 27].

Нормируемые характеристики ОВ делятся на следующие группы:

- геометрические;
- стойкость к механическим воздействиям;
- передаточные (оптические);
- стойкость к воздействию окружающей среды.

В настоящий момент в части требований к ПЗП ОВ, предъявляемых стандартами, имеются геометрия ПЗП и усилие снятия ПЗП.

Для разработки конструкций кабелей, соединительных муфт, проведения измерений и пр. необходимо знать диаметр ОВ по защитному покрытию, его некруглость и концентричность ОВ и ПЗП, указанные параметры стандартизованы, их значения и допуски должны находиться в заданных пределах.

Рассмотрим каждую из геометрических характеристик ПЗП отдельно:

1. диаметр ПЗП – толщина ПЗП влияет на механические характеристики ОВ: минимальный радиус изгиба, разрывное усилие (при применении покрытий из металлов). Кроме того, этот параметр является одним из важнейших в отношении возможности увеличения «волоконности» ОК.

2. максимально допустимая неконцентричность ПЗП – для обеспечения должных механических характеристик и удобства работы с ОВ при заделке его в ОК и при прокладке ОВ, ПЗП должно быть концентрично кварцевому световоду, на который оно наложено. В современных телекоммуникационных ОК для дальней связи при большой информационной ёмкости, неконцентричность ПЗП

также влияет на важный передаточный параметр поляризационной модовой дисперсии (ПМД) ОВ/ОК;

Методика определения геометрических характеристик ПЗП ОВ описана в [28].

Для обеспечения удобства работы с ОВ при монтаже ОК и волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) необходимо, чтобы усилие снятия ПЗП находилось в заданных [26, 27] пределах (от 1,0 Н до 5,0 Н – среднее значение; от 1,0 до 8,9 Н – пиковое) [29]. Данный диапазон был выбран исходя из того, что ПЗП не должно легко повреждаться в процессе монтажа и эксплуатации ОК, вместе с тем, должно обеспечивать удобство зачистки ОВ (снятия ПЗП), например, при проведении сварки ОВ. В случае если усилие снятия ПЗП находится ниже указанного предела, покрытие может отслаиваться само при малейшем воздействии. В случае же, если усилие снятия ПЗП будет превосходить верхний предел, то при снятии ПЗП можно повредить кварцевый световод. Методика определения усилия снятия ПЗП описана в [30].

На оптические и механические свойства ОВ часто негативно влияет влажная среда, т.к. проникновение воды в структуру ОВ способствует деградации как механических (рост трещин в стекле и, как следствие, снижение прочности световода, так и оптических его характеристик. Надёжное ПЗП должно способствовать защите ОВ от влияния окружающей среды, в частности влаги, в течение заданного периода времени. Верхней рабочей температурой для акриловых ПЗП ОВ считается 85 °С, нижней – минус 60 °С. Исходя из изложенного выше, имеется три стандартизованных испытания, на результаты которых способно повлиять качество ПЗП:

– влажное тепло [31] (85 °С, RH = 85%) – для определения стойкости ОВ к воздействию высокой температуры и влажности окружающей среды, которое может возникать в реальных условиях эксплуатации, хранения и/или транспортирования;

– погружение в воду [32] при (нормальных климатических условиях) НКУ – для определения стойкости ОВ к воздействию воды, которое может возникать в реальных условиях эксплуатации, хранения и/или транспортирования.

Два вышеперечисленных испытания не проводятся для герметичных покрытий. Полимерное ПЗП является гигроскопичным и подвергается вышеуказанным испытаниям. Вместе с тем, качественно наложенное полимерное ПЗП частично задерживает влагу, что показано в работах [5, 8, 29, 33-36].

– температурные циклы (испытание на воздействие смены температур) [37] – для определения стойкости ОВ к воздействию смены температуры окружающей среды, которое может возникать в реальных условиях эксплуатации, хранения и/или транспортирования. Первый (мягкий) слой ПЗП при отрицательных температурах может кристаллизоваться, что может приводить к дополнительным изгибам ОВ и росту потерь на микроизгибах.

До и после проведения испытаний по определению стойкости ОВ к воздействиям условий окружающей среды предусмотрено проведение измерений прироста затухания (для одномодовых ОВ обычно на длинах волн 1550 нм и 1625 нм для каждого из приведённых выше испытаний), также, для ряда климатических испытаний до и после воздействия предусмотрено проведение испытания механических характеристик, таких как:

– усилие снятия ПЗП согласно [30] – при определении стойкости ОВ к воздействию повышенной температуры и влажности и к погружению в воду;

– прочность при разрыве по [38] – как было сказано выше, проникновение воды способствует росту трещин, и, как следствие, ухудшению прочностных характеристик ОВ. ПЗП должно максимально препятствовать деградации характеристик ОВ. Измерение прочности при разрыве до и после воздействия повышенной температуры позволяет оценить качество ПЗП;

– измерение усталостной прочности (параметр n) по [39] – основной из ряда параметров, характеризующих способность ОВ проработать без обрыва в течение заданного времени при условии, что на него не будут воздействовать

чрезмерные (более 1,7 Н для ОВ прошедших испытание перемоткой с растяжением согласно [40]) длительные растягивающие нагрузки.

1.5. Исследование свойств первичного защитного покрытия кварцевых оптических волокон, применяемых в кабельной технике

1.5.1. Совместимость с гидрофобными заполнителями

В ОК модульной конструкции для предотвращения распространения влаги внутри оптического модуля (ОМ) часто применяются внутримодульные гидрофобные заполнители. Современная нормативная документация на ОК предъявляет требования по сроку службы, равному 25 годам [41], в ряде случаев – до 30-40 [42-44], также ведутся работы по ужесточению данного требования и доведения его срока службы ОК до 60 лет. В течение всего срока службы ОВ в ОК, изготовленном с применением внутримодульного гидрофобного заполнителя, находится в его среде, при этом, интенсивность процессов, связанных с наличием гидрофобного заполнителя, усиливается при повышенных температурах окружающей среды. Поэтому, одной из важных характеристик ПЗП ОВ, применяемых в рассматриваемых ОК, является их совместимость с внутримодульными гидрофобными заполнителями. Однако, ни один стандарт в РФ как не устанавливает требований, так и не описывает процедуры испытаний по определению совместимости ОВ с гидрофобными заполнителями. Действующие в России стандарты на кабели с медными жилами [45] регламентируют совместимость изоляции токопроводящей жилы с гидрофобным

заполнителем и не могут быть применены для оценки совместимости элементов конструкции с заполнителями, применяемыми в ОК.

Область применения стандарта [46] распространяется на метод проверки воздействия компаундов наполнителей на контактирующие с ним элементы конструкции кабеля из алюминия и меди, которые не часто применяются в ОК.

К области ОК относится методика испытаний МИ 16.К00-158-2005, описанная в [47]. Вышеуказанная методика распространяет своё действие лишь на совместимость ряда полимерных элементов кабельной конструкции – ОВ (в т.ч. его ПЗП) и ОМ с внутримодульными и межмодульными гидрофобными заполнителями. На ОВ в плотном буферном покрытии и ленточное ОВ [47] не распространяется. Область применения [47] распространяется лишь на оценку пригодности гидрофобных заполнителей к применению в конструкциях ОК, однако возможна и ситуация, когда производитель применяет уже проверенный совместимый гидрофобный наполнитель, а в конструкции ОК применяется новое ОВ (или другой элемент конструкции ОК, находящийся в непосредственном контакте с наполнителем), т.е. ПЗП ОВ ещё не проходило проверку на совместимость с используемым гидрофобным наполнителем. В данном случае, при получении отрицательных результатов испытаний, необходимо говорить не о непригодности гидрофобного наполнителя, а о необходимости замены нового конструктивного элемента.

Схожая картина наблюдается и с рекомендациями Международного союза электросвязи в части телекоммуникаций – МСЭ-Т. Требования к ПЗП в части совместимости с гидрофобными наполнителями не прописаны. В рекомендации серии L [48-50] говорится лишь, что цвет окрашенного ОВ должен оставаться различимым в течение всего срока службы ОВ в присутствии любых кабельных материалов.

Не многим лучше дела обстоят со стандартами Международной электротехнической комиссии – МЭК, хотя в части требований к ОВ [51, 52] наблюдается полное отсутствие требований по совместимости ПЗП ОВ с гидрофобными наполнителями. В стандартах, устанавливающих требования к

отдельным группам кабелей, таких как [53, 54], в разделе, определяющем требования к совместимости ПЗП ОВ с гидрофобными заполнителями, дана ссылка лишь на стандарт [55], в котором описана процедура испытаний по определению стабильности усилия снятия ПЗП без установки критериев годности. Также имеется стандарт [56], российский аналог которого – стандарт [46] уже был рассмотрен ранее.

Единственным исключением, описывающим как процедуру испытания на совместимость ПЗП ОВ с гидрофобными заполнителями, так и критерии годности, является американский стандарт ANCI/CEA S-87-640-2006 [57]. Согласно процедуры этого документа, образцы ОК достаточной длины подвергаются воздействию температуры 85 °С в течение 30 дней без контроля относительной влажности воздуха. Концы кабеля должны быть заделаны во избежание вытекания водоблокирующих компаундов. После выдержки ОК в указанных условиях производится его разделка и проверка конструктивных элементов на совместимость с гидрофобными заполнителями. Данная процедура идентична описанной в стандартах МЭК. Но рассматриваемый стандарт [57] даёт и альтернативные способы проведения испытаний – помещение ОМ, заполненных внутримодульным гидрофобным заполнителем и содержащих ОВ, в ёмкость с межмодульным гидрофобным заполнителем.

Для полимерных материалов конструкции ОК имеется и ещё один метод испытаний – нанесение на его поверхность тонкого слоя гидрофобного заполнителя и размещение образцов в вертикальном положении в климатической камере при повышенной температуре.

Исходя из вышесказанного, в [57] для ОВ имеется два варианта проведения испытаний – в составе ОК или в составе ОМ, т.е. необходимо изготовить либо всё изделие, либо его часть, а в случае получения отрицательных результатов испытаний, придётся браковать всю изготовленную длину изделия, а не только отобранную длину для испытаний, что приводит к большим трудозатратам и экономически нецелесообразно [58].

1.5.2. Оптические потери, вызванные микроизгибами световода

Действующие стандарты регламентируют характеристики [26, 27] и описывают процедуры испытаний [28, 30], относящиеся только к внешнему слою ПЗП. Вместе с тем, внутренний слой ПЗП способен оказать не меньшее влияние на свойства ОВ, чем внешний, что подтверждают работы [59-92], которые посвящены исследованию потерь, вызванных микроизгибами, механизм возникновения которых показан на рисунке 1.3. Под воздействием механических усилий или температур могут возникать продольные (аксиальные) F_a и поперечные F_n усилия, которые приводят к изгибам ОВ на малые радиусы.

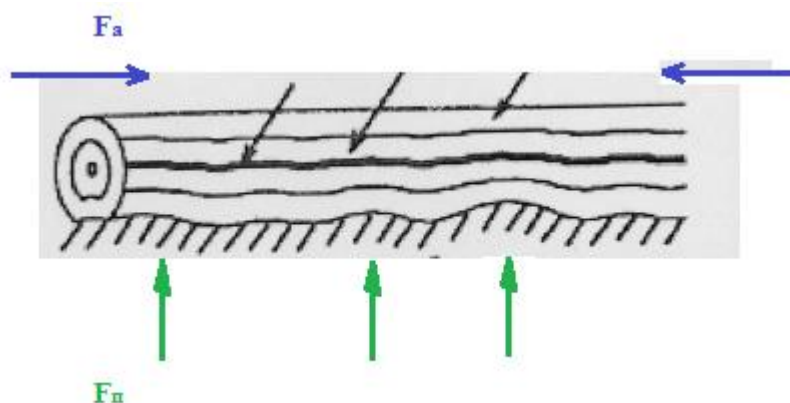


Рисунок 1.3 – механизм возникновения микроизгибов световода

Большое количество микроизгибов способно привести к значительным оптическим потерям [59-66]. Одним из первых наличие микроизгибных потерь обнаружил Гарднер [59], который наблюдал значительные оптические потери при намотке с натяжением ОВ на барабан с неидеально ровной поверхностью. Глож [60] проводил исследования по минимизации микроизгибных потерь в ОК. Именно он предложил применять двухслойные ПЗП, первый слой которых выполнялся из мягкого материала, выступающего в роли амортизатора, и жёсткого внешнего слоя ПЗП.

Работы [61-73] посвящены исследованию зависимости микроизгибных потерь от свойств первого и второго слоёв ПЗП. В этих работах был сделан вывод о том, что на потери, вызванные микроизгибами, влияют такие свойства материалов, как толщина и соотношение толщин первого и второго слоёв ПЗП, их ТКЛР, коэффициент Пуассона, модуль Юнга и значение температуры стеклования первого слоя ПЗП.

Микроизгибные потери могут возникать и вследствие влияния пониженных температур, что обусловлено различием значений ТКЛР кварцевого световода и полимерных материалов ПЗП, а также вторичных покрытий. В особенности это касается таких вторичных защитных покрытий как плотное буферное покрытие и матрица ленточного ОВ. При пониженных температурах полимерные материалы сжимаются, оказывая как поперечное, так и продольное (аксиальное) давление на кварцевый световод (см. рисунок 1.3), который, под действием этих сил, изгибается на малые радиусы. Исследованию природы возникновения потерь, вызванных микроизгибами, при пониженных температурах посвящены работы [68, 74-88].

Работа [76] описывает испытания ОВ температурными циклами – циклическим изменением температуры от минимальной до максимальной температуры с заданной скоростью её изменения и временем выдержки при максимальной и минимальной температуре. Показано, что с каждым циклом микроизгибные потери увеличиваются до тех пор, пока не выйдут на плато.

Явлению деламинации – отслоения слоя ПЗП от световода, посвящены статьи [77, 78]. Как уже говорилось выше, при пониженных температурах на ОВ воздействуют механические усилия, возникающие вследствие разности ТКЛР кварцевого световода и материалов ПЗП. В результате этих воздействий, может происходить отслоение прилегающего к кварцевому световоду первого слоя двухслойного полимерного ПЗП [77] или герметичного ПЗП, как показано в [81].

Работы [66, 67, 80-84 и 87-90] посвящены расчётам потерь, вызванных микроизгибами, в том числе и при пониженных температурах. В частности, Сухиром [88] при исследовании однослойных ПЗП была показана прямая

зависимость потерь, вызванных микроизгибами, (L) от величины сдвливающего ОВ усилия (p), приложенного в области контакта световода и полимерного ПЗП:

$$L = k \cdot p \quad (1.1)$$

где k – постоянная равная 0,0029 дБ/(км·МПа).

ОВ в ОК находятся во вторичном защитном покрытии (ВЗП) – ОМ, плотном буферном покрытии или в полимерной матрице ленточного ОВ. Последние два ВЗП плотно прилегают к ОВ и способны оказать значительное влияние на величину потерь, вызванных микроизгибами, что показано посредством математических расчётов в работах [66, 67 и 80]. В работе [80] проведено сравнение с результатами, полученными в [81]. Была выявлена существенная разница в подходе к выбору свойств материала с целью минимизации потерь, вызванных микроизгибами, для применения его в ОВ с плотно прилегающими ВЗП и без оных (в том числе с ВЗП, наложенными без обжатия – например, ОМ):

- Оптимальная толщина первого слоя ПЗП у ОВ в плотном ВЗП меньше, чем у ОВ без плотно прилегающего ВЗП;
- ТКЛР первичного защитного покрытия для ОВ без плотно прилегающего ВЗП должен иметь близкое (насколько это возможно) значение к ТКЛР кварцевого световода, в то время как для ОВ в плотном ВЗП данным параметром можно пренебречь;
- Толщина второго слоя ПЗП для ОВ в плотно прилегающем ВЗП не имеет определяющего значения и ею можно пренебречь, чего нельзя сделать для ОВ без плотно прилегающего ВЗП;
- Толщина, модуль Юнга и ТКЛР плотно прилегающего ВЗП должны быть увеличены.

Также следует учитывать, что пониженные температуры являются наиболее критичными для мягкого первого (прилегающего непосредственно к световоду) слою ПЗП. Именно этим вызван нижний температурный диапазон применения ОВ, равный минус 60 °С. При температурах ниже минус 60 °С происходит кристаллизация акрилового первого слоя, что приводит к нарушению ровной

структуры слоя ПЗП и росту микроизгибов и потерь, вызванных ими, что, в частности, показано в [82].

Микроизгибы также могут быть вызваны гидростатическим давлением. Этим вопросам посвящены работы [69-73]. На ОВ (ОК), погружённое в воду, воздействует гидростатическое давление, сжимая полимерные материалы, имеющиеся в конструкции ОВ (ОК) и прилегающие к световоду, что приводит к образованию локальных неоднородностей, и, как следствие, микроизгибов световода.

В результате проведённых работ был создан технический отчёт МЭК [91], в котором приведён ряд методик испытаний по определению микроизгибных потерь.

В статье [92] проводится исследование метода В, изложенного в [91]. Было показано, что условия окружающей среды (температура и влажность), а также настройки рефлектометра (длительность импульса и метод расчёта коэффициента затухания – по двум точкам или метод наименьших квадратов) способны значительно повлиять на получаемое значение оптических потерь, вызванных микроизгибами. Кроме того, при подобных исследованиях есть вероятность возникновения поляризационно-зависимых потерь, которые необходимо учитывать при анализе результатов, о чём в упомянутых документах ничего не сказано.

1.5.3. Методы определения степени полимеризации первичного защитного покрытия

В случае ОВ, соответствующему стандартам [26, 27], при использовании ПЗП в виде двухслойного акрилового покрытия и при отсутствии явных нарушений технологических режимов башни вытяжки, существенных проблем с

обеспечением требуемого качества ПЗП не должно возникать. Однако при освоении новых композиций для ПЗП или в результате регламентных работ и/или технического обслуживания башни вытяжки, нельзя полностью исключить такой технологический фактор, как недостаточное УФ-отверждение ПЗП. Известно, что физико-механические параметры таких покрытий (в частности, модуль Юнга, E) сильно зависят от уровня их отверждения, при этом паспортные значения E достигаются при максимальном уровне отверждения (полимеризации).

Для контроля уровня отверждения покрытий разработано несколько методов, среди которых наиболее достоверные результаты дают: спектроскопический метод [93], термоаналитический метод [94], метод разделения гель-золь фракций [95] и pull-out тест [96-98].

Спектроскопический метод [93] оценки уровня отверждения покрытия основан на измерении коэффициентов поглощения плёнки в двух спектральных точках 812 см^{-1} (рабочая точка) и 762 см^{-1} (опорная точка). Коэффициент поглощения на 812 см^{-1} пропорционален концентрации ненасыщенных акриловых групп (двойных связей) в композиции, поэтому в процессе полимеризации он уменьшается от исходного значения в жидкой плёнке до конечного значения в полностью отверждённой. По отношению коэффициентов поглощения в рабочей и опорной спектральных точках можно судить об уровне отверждения покрытия. В качестве ИК-спектрографов используются ИК-Фурье спектрографы (FTIR), либо дифракционные спектрографы [99].

Метод ИК-спектроскопии способен дать оценку степени полимеризации не только внешнего слоя, но и внутреннего. Для этого, как показано в [5] необходимо прорезать ПЗП до световода, снять пластину ПЗП и разложить её плоско вверх внутренним слоем. Данная процедура весьма трудоёмка, поэтому, зачастую производители ОВ применяют измерение только внешнего слоя ОВ.

При проведении (представляющегося перспективным для дальнейших исследований) pull-out теста [96-98] измеряют усилие адгезии первого (внутреннего) слоя ПЗП к световоду. Образец ОВ приклеивают подложке, представляющего собой трубку, после чего прикладывают усилие, необходимое

для извлечения световода из приклеенного к подложке ПЗП. Схема крепления образца ОВ приведена на рисунке 1.4.

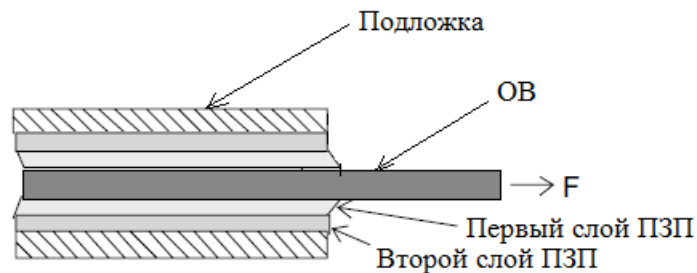


Рисунок 1.4 – схема крепления образца ОВ при pull-out тесте

По получаемому значению усилия адгезии, сопоставляя данные с эталонным образцом, можно получить значение степени полимеризации первого слоя ПЗП. Необходимо учитывать, что значение адгезии зависит от площади нанесения клеящего состава, однородности его нанесения, а также времени выдержки образца, после нанесения клеящего состава [5, 98].

В термоаналитическом методе [94] контроля уровня отверждения для наблюдения за кинетикой УФ-полимеризации покрытия используется сканирующий дифференциальный калориметр. Он измеряет тепло, выделяющееся в процессе радикал-радикальной полимеризации. По времени окончания выделения тепла можно судить о завершении отверждения покрытия.

Метод разделения гель-золь фракций [95] состоит из первоначального взвешивания облученного образца, выделении из него низкомолекулярной золь-фракции путём экстракции образца в органическом растворителе (ацетон, метил-этил-кетон и др.), сушки экстрагированного образца и его повторном взвешивании. Для полностью полимеризованного образца его вес после экстракции должен составлять не менее 90 % от веса исходного неэкстрагированного образца [99].

В работе [100] продемонстрирована необходимость проведения испытаний композиций для ПЗП не в виде плоских плёнок, а именно в виде образцов, нанесённых на кварцевый световод или стальную проволоку. Это вызвано тем фактом, что образцы плоских плёнок, изготовленные из УФ-отверждаемых

композиций, не обладают идентичными свойствами с образцами плёнок, имеющими цилиндрическую форму (нанесённые на световод или стальную проволоку). Одним из таких параметров является степень отверждения (полимеризации). В близких условиях облучения степень полимеризации образцов плоских плёнок превышала 90 %, а образца нанесённого на световод ПЗП составляла менее 70 %.

1.6. Применение бриллюэновской рефлектометрии для оценки свойств оптического волокна

Исследования последних десятилетий показали, что ОВ может выступать не только в роли среды, по которой распространяется сигнал, но и в роли распределённого датчика температур и механических напряжений, как, например, описано в работах [101-103]. В роли оконечного устройства обработки информации могут, в частности выступать бриллюэновский рефлектометр (BOTDR) или анализатор (BOTDA). Принципы действия датчиков на основе (BOTDR/ BOTDA) описаны, в многочисленной литературе, частности, в [102, 103].

Рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (РМБ) в ОВ возникает в результате взаимодействия оптического излучения с акустическими волнами (звуковыми волнами) гигагерцового диапазона. Этот эффект можно рассматривать как дифракцию света на решётке, движущейся со скоростью звука. Скорость звука зависит как от температуры и плотности материала и, следовательно, от внутреннего механического напряжения (деформации). В результате величина сдвига Бриллюэновской частоты несёт информацию о температуре и деформации натяжения на участке рассеяния, причём пространственное разрешение метода (по

длине ОВ) может достигать на практике 0,1 м, а дальность при исследовании телекоммуникационных линий связи порядка 100 км.

В отличие от BOTDR, в BOTDA эффект РМБ может быть несколько усилен за счёт того, что в ОВ наряду с основным сигналом ввести так называемый пробный сигнал, обычно во встречном направлении. В случае, когда разность частот излучения накачки и пробного сигнала равна Бриллюэновскому сдвигу, мощность обратно рассеянного излучения усиливается. Частота пробного сигнала, при которой выполняется условие наибольшего усиления, соответственно, точно так же зависит от температуры и напряжения в ОВ. За счёт увеличения мощности рассеянного сигнала улучшается отношение сигнал-шум в анализируемом сигнале обратного рассеяния. Этот рассмотренный принцип работы BOTDA снижает время и повышает точность измерений по сравнению с BOTDR, однако требует подключения с двух концов исследуемого волокна.

Определение участка (локализация по длине), в котором измеряется температура или деформация, происходит совершенно аналогично обычной оптической рефлектометрии во временной области (OTDR). В ОВ вводятся лазерные импульсы, и характеристики рассеянного излучения регистрируются как функция времени. При известном значении скорости света в волокне (c/n , где c – скорость света, n – показатель преломления сердцевины ОВ) и частоте бриллюэновского сдвига можно вычислить температуру или величину деформации (растяжения) ОВ, как функцию расстояния. Пространственное разрешение таких измерений определяется длительностью оптического импульса, например, импульсы длительностью 10 нс соответствует пространственной разрешающей способности по длине волокна порядка 1 м). Бриллюэновские оптические рефлектометры и анализаторы позволяют измерять распределение деформации или температуры в ОВ длиной свыше нескольких километров, и даже десятков и сотен километров при использовании более сложных схем измерений с оптическими усилителями. Частотный сдвиг Манделъштама-Бриллюэна для стандартных одномодовых ОВ составляет примерно 500 МГц на 1 %

удлинения/сжатия ОВ, а при изменении температуры приблизительно равен $1 \text{ МГц}/^\circ\text{C}$.

Распределённые волоконно-оптические датчики и бриллюэновская рефлектометрия применяются для оценки деформации зданий, мостов, ж/д путей и других сооружений, измерения температуры в нефтепроводах и газопроводах (с целью определения места течи). Применяется бриллюэновская рефлектометрия и в кабельной технике:

- для измерения температуры токопроводящей жилы (ТПЖ) в силовых кабелях;
- для измерения деформации при контроле режимов изготовления [101], эксплуатации [101, 104] и надёжности [104-106] ОК.

Необходимость контроля механического напряжения в процессе эксплуатации ОК, а иногда и в процессе его изготовления обусловлена наличием зависимости между относительным удлинением ОВ (в т.ч. в ОК) и его сроком службы. В соответствии с данными [107] допустимое значение относительного удлинения ОВ в ОК для обеспечения срока службы в 30 – 40 лет не должно превышать 0,25 – 0,30 %. Близкие значения (0,20 – 0,34 %) зафиксированы и в международном стандарте МЭК [108]. Одним из ведущих мировых производителей ОВ – фирмой Corning Inc. были проведены исследования о зависимости срока службы ОВ от его относительного удлинения в процессе эксплуатации [109]. По данным этих исследований допустимое удлинение, при котором вероятность обрыва в течение 40 лет (на 1000 км ОВ) близка к нулю составляет 0,2 %. Вероятность обрыва составляет 0,284 при длительной нагрузке, приводящей к удлинению ОВ до 0,3 %. При нагрузке, приводящей к удлинению 0,6 %, ОВ порвётся в течение нескольких часов с вероятностью 0,787.

Другой крупный мировой производитель ОВ – фирма Fujikura Ltd., исследовала зависимость срока службы ОВ от его натяжения и длины растягиваемого участка [101]. График этой зависимости приведён на рисунке 1.5, откуда следует, что чем больше длина ОВ, тем больше вероятность присутствия на ней механически слабого участка, что увеличивает вероятность обрыва ОВ.

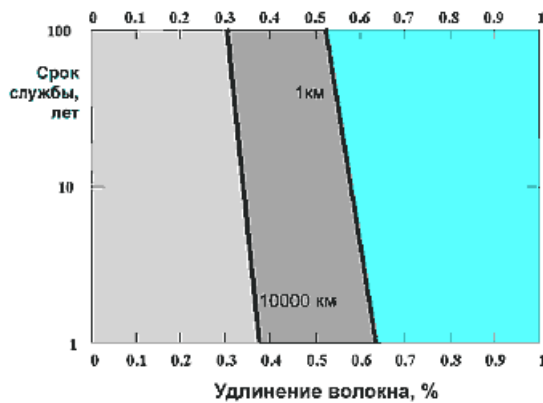


Рисунок 1.5 – Зависимость срока службы оптического волокна от его удлинения [101]

При наложении как ПЗП, так и плотного буферного покрытия на основе УФ-отверждаемых акрилатов могут возникнуть механические напряжения, которые, среди прочих факторов, могут способствовать преждевременному выходу из строя ОВ и ОК. При этом, зачастую, эти механические напряжения не приводят к заметному увеличению коэффициента затухания (особенно в случаях с ОВ с пониженной чувствительностью к изгибам, таких как, например, ОВ категорий В-657.А2 и В-657.В3). Исходя из вышеизложенного, бриллюэновская рефлектометрия сегодня становится одним из наиболее эффективных инструментов контроля качества изготовления ОК, его монтажа, условий эксплуатации и прогнозирования сроков службы.

Применение бриллюэновской рефлектометрии в качестве инструмента для определения разновидностей ОВ приведён в работе [110]. Как видно из таблицы 1.1, в статье по бриллюэновской частоте определяют категории ОВ, в то время как актуальная задача определения производителя ОВ не решена.

Таблица 1.1 – Результаты измерения бриллюэновской частоты образцов оптических волокон [110]

Разновидность оптического волокна	Значения максимума бриллюэновской частоты, ГГц	Рекомендуемые значения максимума бриллюэновской частоты, ГГц
G.652	10.82 ... 10.86	10.84
G.653	10.47 ... 10.49	10.47
G.655	10.61 ... 10.64	10.63
G.657	10.77 ... 10.80	10.79
Волокно, легированное эрбием	10.68 ... 10.70	10.70
«Panda»	10.40 ... 10.43	10.41/10.42

1.7. Задачи исследования

Материал ПЗП определяет такие практически значимые основные характеристики ОВ как:

- затухание в НКУ и его прирост после воздействия повышенной и пониженной температур;
- стойкость к воздействию внешних факторов окружающей среды;
- характеристики механической прочности и долговечности ОВ.

Таким образом, поскольку на характеристики ОВ оказывает влияние не только заготовка (хотя именно она определяет в первую очередь оптические, передаточные и пр. параметры ОВ), но и материалы ПЗП, что необходимо

учитывать при выборе ОВ для его применения в соответствующих областях и конструкциях оптических и комбинированных (содержащих ОВ и ТПЖ) кабелей [6]. Тип ПЗП во многом является определяющим в производстве и в назначении как телекоммуникационных, так и упомянутых выше «специальных» ОВ, т.к. состав покрытия во многом определяет производительность установок вытяжки ОВ, а далее надёжность ОК при его эксплуатации в различных условиях воздействия окружающей среды, а также возможность создания распределённых волоконно-оптических датчиков и систем на их основе.

В виду наличия на рынке РФ исключительно импортных композиций для двухслойного УФ-отверждаемого ПЗП для ОВ, одной из целей данной работы являлось разработка подобных отечественных композиций, для чего представлялось целесообразным решить задачи, описанные в следующих подразделах.

1.7.1 Исследовать влияние степени полимеризации двухслойного УФ-отверждаемого ПЗП на характеристики (оптические, механические и надёжностные) кварцевого ОВ.

1.7.2 В работах [5, 8, 33, 34] сделано утверждение, что полимерное ПЗП способно увеличить срок службы ОВ при взаимодействии с влагой, в то время как в работах Джэнет Мротек (Армстронг) [35, 36], данный тезис опровергается – приводятся данные, что поскольку срок службы ОВ равен 25 годам (10^9 с), а время проникновения влаги к световоду колеблется от 10 до 10^3 . Из чего авторы работ [35, 36] делают вывод, что скорость проникновения влаги к поверхности световода не является доминирующим параметром в определении срока службы ОВ.

В ходе выполнения данной работы будет определено влияние ПЗП на срок службы ОВ – а именно степени полимеризации ПЗП на механические свойства ОВ, в т.ч. на параметр усталостной прочности, при воздействии повышенной влажности и температуры согласно [31], а также подобраны оптимальные режимы вытяжки (в т.ч. скорость вытяжки и мощность УФ-ламп) исходя из необходимости обеспечения степени полимеризации ПЗП, равной 90 %.

1.7.3 Исходя из изложенного в 1.5.1, одной из задач данной работы является разработка методики определения совместимости полимерных материалов, в т.ч. ПЗП ОВ, применяемых в конструкциях ОК, с заполняющими ОК составами путём сравнения трёх методов испытаний и выбора оптимального:

- в составе оптического кабеля – эталонный метод, с которым будут сравниваться два приведённых ниже. Недостатком данного метода является необходимость изготовления кабельного изделия, что увеличивает его трудоёмкость и стоимость.

- размещение образцов ОВ в ёмкости с гидрофобным наполнителем;

- нанесение тонкого слоя гидрофобного наполнителя на образцы ОВ.

В частности, в стандарте [57] говорится о совместимости с водоблокирующими порошками, применяющимися в составе водоблокирующих лент и нитей. Вместе с тем, в [57] нет описания процедуры испытаний на совместимость элементов конструкции ОК с водоблокирующим порошком – в каком агрегатном состоянии должно проводиться данное испытание – при сухом водоблокирующем порошке или уже подвергнутом влиянию влаги и перешедшем в гелеобразное состояние. В ходе выполнения данной работы будет осуществлён ряд экспериментов с целью выбора оптимального метода определения совместимости полимерных материалов ОК с водоблокирующими лентами и порошками.

1.7.4 До настоящего времени процедура определения микроизгибных потерь ОВ детально описана лишь в документе [91], который, однако, не является стандартом. По мнению автора, описанный в [91] Метод С может быть доработан, т.к. он даёт слишком большой разброс применения сеток с различным размером ячеек. Необходимо, в частности, определить оптимальные характеристики сеток при испытаниях ОВ в ПЗП 200/250 мкм, ОВ в плотном буферном покрытии 900 мкм.

Слабым местом чисто механических испытаний на микроизгиб (когда микроизгибы создаются исключительно неровной поверхностью) является отсутствие аксиальных сдавливающих сил, которые возникают от сжатия

полимерных материалов при пониженной температуре. Т.е. механические испытания моделируют только один тип воздействующих на световод усилий – поперечные усилия. В [91] не описана возможность применения испытания на микроизгиб с плитами и сеткой mesh при пониженных температурах. МЭК [91] рекомендует проводить испытания при пониженных температурах на кварцевом барабане или барабане, изготовленного из материала, имеющего ТКЛР близкий к кварцу световода. Это справедливо для испытаний, при которых образец ОВ наматывается с небольшим усилием на барабан или цилиндр, т.к. в случае если ТКЛР барабана будет больше, чем ТКЛР кварца, то шейка барабана усядет сильнее, чем кварцевое ОВ – образец ОВ будет свободно висеть на шейке барабана.

Вместе с тем, на взгляд автора, при должной доработке методики, метод С может быть применён для проведения испытаний на стойкость ОВ к воздействию микроизгибов, т.к. несмотря на разный ТКЛР металла, кварца и полимерных материалов, благодаря давлению, создаваемому верхней плитой и грузами, на ПЗП будет оказываться необходимая нагрузка, приводящая к возникновению микроизгибов. В ходе выполнения данной работы будет проверена данная гипотеза путём доработки описанной в [91] конструкции испытательного стенда и проверки повторяемости полученных результатов испытаний.

1.7.5 Как уже говорилось выше, в т.ч. в [1-3], технологии оптических линий связи постоянно совершенствуются, а объёмы передаваемой информации – поступательно растут. Технологии изготовления ОВ – создание ОВ с пониженными потерями при изгибах категории В-657 согласно [27] довели оптическую связь непосредственно до абонента (технология FTTH – волокно в дом и в перспективе FTTD – волокно до рабочего места), а стремительно возрастающее потребление информации приводит к необходимости прокладки всё новых линий связи, следствием чего являются, в частности, переполненная кабельная канализация. С целью обеспечения возможности прокладки ОК в переполненные кабельные каналы, пространство в которых весьма ограничено, а также с целью обеспечения прокладки большего количества кабелей ведутся

работы по миниатюризации конструкций ОВ и, как следствие ОК. Одним из направлений является уменьшение диаметра ПЗП с 250 мкм до 200 мкм [111, 112] и даже до 180 мкм [113]. Диаметр кварцевого световода, для обеспечения совместимости со стандартными ОВ остаётся неизменным – 125 мкм, т.е. у ОВ с ПЗП 200 мкм уменьшается толщина ПЗП с 62,5 мкм до 37,5 мкм или даже 27,5 мкм. При меньшем диаметре ПЗП имеется возможность либо увеличить число ОВ в ОК при сохранении его конструктивных размеров, либо при том же числе ОВ, уменьшить внешний диаметр ОК и, в добавок к уменьшению габаритов, получить снижение стоимости производства ОК ввиду меньшего потребления материалов конструкции ОК.

В обоих описанных выше подходах применения ОВ с ПЗП 200 мкм (увеличении число ОВ в конструкции ОК или миниатюризации конструкции ОК при сохранении числа ОВ) увеличивается плотность укладки ОВ, возрастают механические напряжения, вызванные микроизгибами, что может негативно повлиять на его передаточные характеристики. Это обуславливает необходимость применения в конструкциях ОК ОВ категории В-657 согласно [27]. Вместе с тем, при применении данного типа ОВ контроль механических напряжений в ОВ посредством измерений оптических потерь может быть недостаточным, т.к. данная категория ОВ конструировалась с целью минимизации оптических потерь, вызванных внешними механическими воздействиями. Т.е. возможны ситуации, при которой на ОВ воздействуют критические механические напряжения, и в результате срок его службы будет ниже заявленного, при этом рефлектометр или оптический тестер не зафиксируют отклонений от нормированных показателей. Решением этой проблемы может стать применение рассмотренной выше бриллюэновской рефлектометрии, которая позволит произвести оценку целесообразности применения ОВ с ПЗП уменьшенного диаметра путём измерения механических напряжений в конструкции ОК.

При применении миниатюрных ОК с ОВ с уменьшенным диаметром (толщиной) ПЗП, могут измениться и его физико-механические свойства. С этой

целью целесообразно провести ряд сравнительных испытаний миниатюрного ОК, содержащего ОВ с ПЗП 250 мкм и миниатюрного ОК с ОВ с ПЗП 200 мкм.

1.7.6 Поскольку УФ-отверждаемое буферное (вторичное) покрытие, применимое в т.ч. для оптических микрокабелей по своему составу, выполняемым функциям и способу наложения близко к УФ-отверждаемой композиции для второго (внешнего) слоя ПЗП ОВ, целесообразно провести апробацию композиции для второго слоя ПЗП ОВ в качестве буферного покрытия ОК.

1.7.7 Ввиду наличия случаев применения незаявленного в конкурсной документации (с низкими показателями качества) ОВ в ОК, разработка методики определения категории, производителя и марки кварцевого одномодового ОВ является актуальной.

2. Исследования отверждаемых ультрафиолетом двухслойных защитных покрытий и технологии их наложения с целью создания отечественного покрытия для кварцевых световодов на их основе

2.1. Определение требований, предъявляемых к разрабатываемым композициям для отверждаемого ультрафиолетом полимерного первичного защитного покрытия

Поскольку, как уже говорилось выше, в России применяются исключительно импортные композиции для производства УФ-отверждаемых ПЗП ОВ, требуемые параметры определялись путём анализа имеющейся технической информации в литературе [5, 13-24] и на основе определения характеристик импортных аналогов, в качестве которых, исходя из опыта их применения, были выбраны образцы композиций для первого слоя ПЗП – DSM Desolite DP1004 и для второго слоя ПЗП – DSM Desolite DS2015. Данные композиции используются для производства как телекоммуникационных, так и специальных типов ОВ и зарекомендовали себя с наилучшей стороны.

Исходя из проведённого анализа, УФ-отверждаемые композиции должны обладать следующими основными свойствами:

- жидкое агрегатное состояние;
- достаточно низкой вязкостью при температуре нанесения ПЗП на кварцевый световод;
- стабильностью характеристик в течение всего срока хранения;
- хорошей смачивающей способностью – важный параметр для обеспечения хорошей адгезии первого слоя ПЗП и водоотталкивающих свойств второго слоя покрытия, который измеряется поверхностным натяжением;

- высокой скоростью отверждения при низких дозах УФ-облучения;
- небольшой усадкой при отверждении.

Отверждённые полимерные композиции характеризуются:

- пределом прочности при растяжении;
- модулем упругости при растяжении на 2,5% (модуль Юнга);
- относительным удлинением при разрыве;

Значения параметров предела прочности при растяжении, модуля Юнга и относительного удлинения при разрыве должны сильно отличаться для первого и второго слоёв ПЗП. При этом, для предела прочности при растяжении для композиции первого слоя ПЗП задаётся верхний предел (не более) значения, а для композиции второго слоя ПЗП – нижний. Это обусловлено разными задачами, возложенными на каждый из слоёв:

- наименьшей температурой стеклования (для первого слоя ПЗП). При пониженных температурах происходит увеличение оптических потерь, связанных с возрастанием жёсткости покрытия в результате стеклования ПЗП, приводящей к микроизгибам световода;

- адгезионной прочностью к кварцу (только для композиций для первого слоя ПЗП). Адгезия первого слоя ПЗП к кварцу должна быть достаточной, чтобы удерживать ПЗП при монтаже ОВ и его эксплуатации. Вместе с тем, адгезия не должна быть слишком большой, что обеспечит возможность полного удаления ПЗП при его зачистке, что необходимо при выполнении соединения ОВ между собой (сварке ОВ или «безсварного» соединения);

- относительно большим показателем преломления. Показатель преломления ПЗП должен быть больше показателя преломления сердцевины и светоотражающей оболочки кварцевого световода, что обеспечит передачу сигнала именно по световоду и отсутствие паразитных «оболочечных» мод;

- стойкостью к агрессивным средам (только для герметичных и термостойких ПЗП, к которым не относятся ПЗП на основе акрилатов);

– низким водо- и влагопоглощением. Влага отрицательно воздействует на световод, вызывая ускоренный рост трещин. Чем ниже показатель водопоглощения и выше влагостойкость – тем дольше прослужит ОВ;

– низким количеством выделяемого водорода. Водород оказывает негативное влияние на передаточные свойства ОВ, вызывая рост оптических потерь в области так называемых «пииков воды» на длинах волн вблизи 1240 нм и 1383 нм. Вместе с тем, для рассматриваемых в настоящей работе телекоммуникационных ОВ данная проблема не столь актуальна, т.к. одним из этапов в современном технологическом процессе изготовления ОВ является операция дейтерирования, в результате которой молекулы дейтерия занимают те места, куда мог проникнуть атомарный водород с образованием гидроксильных групп. Поскольку дейтерий, в отличие от водорода, имеет резонансы поглощения на длинах волн, более длинных, чем те, на которых осуществляется передача сигнала, «пиики воды» не образуются;

– низким коэффициентом трения (только для композиций для второго слоя ПЗП). Коэффициент трения второго слоя ПЗП должен быть как можно меньшим, чтобы обеспечить свободное перемещение ОВ в ОМ при эксплуатации ОК или максимально эффективную задувку ОВ в микромодули;

Для определения характеристик композиций для первого и второго слоёв ПЗП были применены следующие методы исследований и испытаний:

а) Кажущуюся (динамическую) вязкость композиции определяли по ГОСТ 25271-93 «Пластмассы. Смолы жидкие, эмульсии или дисперсии. Определение кажущейся вязкости по Брукфильду» при температуре 25 °С на вискозиметре Брукфильда типа А (модель RVT) с использованием шпинделя № 3 или № 4 при скорости вращения шпинделя 20 мин⁻¹. Во избежание полимеризации композиции испытания проводили в условиях, исключающих попадание на неё солнечных лучей. Перед испытанием композицию заливали в стакан в количестве 200 см³ и выдерживали в термостате при температуре 25 °С. Показания прибора записывали на третьем обороте шкалы. Результат

кажущейся вязкости рассчитывали в мПа·с. За окончательный результат принимали среднее арифметическое значение двух параллельных определений.

б) Определение плотности проводили по ГОСТ 18995.1-73 (СТ СЭВ 1504-79) «Продукты химические жидкие. Методы определения плотности (с Изменениями №№ 1, 2)» с использованием пикнометра стеклянного по ГОСТ 22524-77 типа ПЖ-2 и ПЖ-3, вместимостью 5 см³ при температуре в термостате (23±0,1) °С. Во избежание полимеризации композиции испытания проводили в условиях, исключающих попадание на неё солнечных лучей. Относительную плотность испытуемой жидкости при 23 °С рассчитывали как отношение массы заданного объёма испытуемой жидкости при 20 °С к массе того же объёма дистиллированной воды при 23 °С. За результат испытания принимали среднее арифметическое результатов двух параллельных определений, абсолютное расхождение между которыми при доверительной вероятности 0,95 не превышает значения допускаемого расхождения, равного 0,0005 г/см.

в) Температуру воспламенения определяли по ГОСТ 4333-2014 «Нефтепродукты. Методы определения температур вспышки и воспламенения в открытом тигле» по методу Кливленда. За температуру воспламенения принимается наименьшая температура испытуемого образца, скорректированная на барометрическое давление 101,3 кПа, при которой при поднесении источника зажигания происходит воспламенение паров образца и устойчивое горение в течение не менее 5 секунд при установленных условиях испытания.

г) Показатель преломления жидкой композиции определяли по ГОСТ 18995.2-73 «Продукты химические жидкие. Метод определения показателя преломления» при температуре 23 °С с использованием рефрактометра марки ИРФ454Б. За результат испытания принимали среднее арифметическое значение двух параллельных определений. Окончательный результат округляли до третьего десятичного знака.

д) Показатель преломления отверждённой композиции определяли по ГОСТ 19927-74 «Пластмассы. Методы определения показателя преломления» при температуре 23 °С с использованием рефрактометра марки ИРФ454Б. Образцы

плёнок отверждённой композиции готовили следующим образом: на полиэтилентерефталатную плёнку размером 10×10 см, на которую предварительно наносили вспомогательное вещество ОП-7, наносили небольшое количество композиции, накрывали вторым образцом плёнки и прижимали сверху бруском для распределения композиции между плёнками таким образом, чтобы сформировался слой толщиной 0,2-0,4 мм. Подготовленный таким образом трёхслойный образец вносили в зону облучения под заранее включённую лампу ДРТ-400 на 5 мин (интенсивность излучения лампы не менее 5 мВт/см²), после чего полиэтилентерефталатную плёнку удаляют с обеих сторон пластины отверждённой композиции. Из полученной плёнки отверждённой композиции вырезали образцы размером 10×20 мм для определения показателя преломления. В качестве контактной жидкости использовали 1-бромнафталин. За результат испытания принимали среднее арифметическое трёх параллельных определений. Окончательный результат округляли до третьего десятичного знака.

е) Прочность при отрыве стекло-стекло определяли по ГОСТ 14760-69 «Клеи. Метод определения прочности при отрыве» при температуре испытания от 20 °С до 25 °С и скорости перемещения подвижного захвата испытательной машины 20 мм/мин.

Образцы для испытаний готовили следующим образом: изготавливали металлические образцы стали марки 12Х18Н10Т в виде «грибков» в соответствии с ГОСТ 14760-69. Поверхности «грибков» притирали шлифовальным порошком электрокорунд зернистостью F80 по ГОСТ Р 52381-2005 и обезжиривали ацетоном. Пластины из силикатного стекла размером 25х25х6 мм перед склеиванием промывали проточной водой, обезжиривали изопропиловым спиртом и сушили при 40 °С в течение 1 часа. Подготовленные стёкла склеивали между собой УФ-отверждаемыми композициями при интенсивности облучения 10 мВт/см² в течение 120 сек (доза 1,2 Дж/см²). Полученный пакет из склеенных стеклянных пластин клеивали между металлическими образцами. Для этого на склеиваемую поверхность «грибка» наносили 1-2 капли цианакрилатного клея марки ТК-201 и совмещали со стеклом в центрующем приспособлении.

Интенсивность излучения (энергетическую освещённость) измеряли с помощью люксометра-УФ-радиометра ТКА-01/3 с ослабителем.

Прочность при отрыве определяли на пяти образцах металл-стекло-стекло-металл. Испытания проводили на универсальной испытательной машине ZDM-2,5, позволяющей осуществлять испытания на растяжение или сжатие и обеспечивающей измерение нагрузки с погрешностью не более 1 % от измеряемой величины. В случаях разрушения образцов по стеклу результат ниже нормативного не использовали в расчёте среднего арифметического значения, при необходимости испытание повторяли на новых образцах. Обработку результатов испытаний проводили в соответствии с ГОСТ 14359-69 при доверительной вероятности 0,95. За результат испытания на прочность при отрыве принимали среднее арифметическое значение не менее пяти параллельных определений.

ж) Определение водо- и влагопоглощения проводили по ГОСТ 21513-76 «Методы определения водо- и влагопоглощения лакокрасочной плёнкой» весовым методом при выдержке плёнок отверждённой композиции в дистиллированной воде при температуре (20 ± 2) °С в течение 3 суток и при (95 ± 2) % влажности и температуре 35 °С в течение 6 суток. За результат испытания принимали среднее арифметическое значение трёх параллельных определений, допускаемые расхождения между которыми не должны превышать 10 % относительно среднего результата.

з) Определение физико-механических свойств плёнок отверждённых композиций проводили по ГОСТ 18299-72 «Материалы лакокрасочные. Метод определения предела прочности при растяжении, относительного удлинения при разрыве и модуля упругости» на образцах размером 50x10 мм при температуре 20 ± 2 °С на разрывной машине марки Testometric M350-10AT при скорости раздвижения зажимов 20 мм/мин. При этом определяется три показателя: предел прочности при растяжении (σ_p), МПа; относительное удлинение при разрыве, которое характеризует изменение первоначальной длины плёнки при растяжении до момента разрыва (ϵ), %; модуль упругости при относительном удлинении 2,5%

характеризует степень жёсткости материала ($E_{2,5}$), МПа. За результат испытаний принимали среднее арифметическое значение пяти параллельных определений.

и) Степень полимеризации композиций определяли с помощью прибора фото-ДСК.

Для определения теплоты реакции образец и эталон облучают ультрафиолетовым излучением при постоянной температуре до тех пор, пока образец не затвердеет. После этого отверждённый образец и эталон второй раз облучают в течение того же периода времени и при той же температуре. Далее вычисляют различия между первым и вторым облучением и определяют тепловыделение фотополимеризации (энтальпия) по базовой программе. Меняя дозу облучения, рассчитывают конверсию фотополимеризации от времени облучения. Измерения проводят как на воздухе, так и в атмосфере инертного газа. Кроме того, важными параметрами, характеризующими скорость фотоотверждения, являются величина максимального тепловыделения и время достижения максимального тепловыделения (рисунок 2.1).

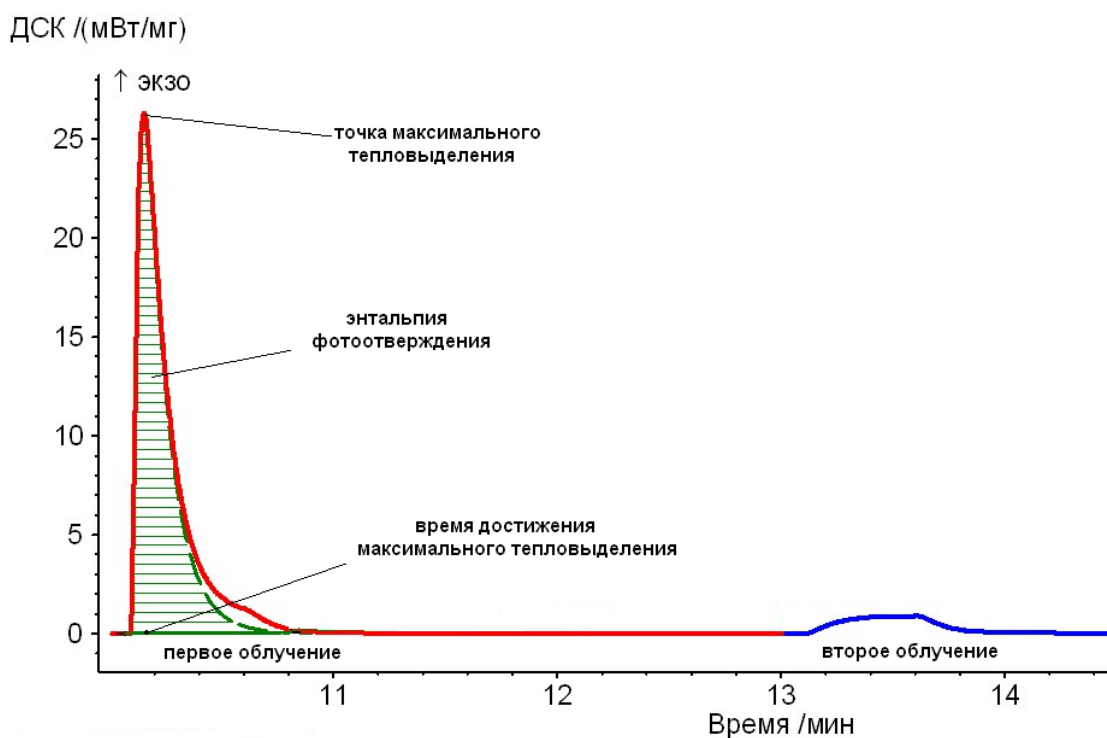


Рисунок 2.1 – Типичная ДСК-кривая фотополимеризации

к) Температуру стеклования отверждённых образцов композиций определяли по ГОСТ Р 55135-2012 методом дифференциальной сканирующей калориметрии на приборе 204 DSC F1 (NETZSCH). Метод заключается в измерении разности между тепловым потоком испытуемого образца и потоком эталонного тигля как функции температуры и/или времени при нагревании испытуемого образца и эталонного тигля по управляемой температурной программе в установленной атмосфере. Характеристические температуры стеклования определяли по полученной ДСК-кривой.

л) Определение объёмной усадки рассчитывали по формуле 2.1, приведённой в [114]:

$$\omega = \left(\frac{(n_{Dm}^2 - 1) \cdot (n_{Dж}^2 + 2)}{(n_{Dm}^2 + 2) \cdot (n_{Dж}^2 - 1)} - 1 \right) \cdot 100 \quad (2.1)$$

Где ω – объёмная усадка, %;

$n_{Dж}$ – показатель преломления жидкой композиции;

n_{Dt} – показатель преломления отверждённой композиции.

м) Значение поверхностного натяжения определяли с помощью тензиометра KRUSS K20 в полуавтоматическом режиме с использованием пластины Вильгельми в соответствии с ГОСТ Р 50003-92 (ИСО 304-85) «Вещества поверхностно-активные. Определение поверхностного натяжения путем вытягивания жидких плёнок».

Характеристики разработанных отечественных композиций в сравнении с импортными аналогами приведены в таблицах 2.1 и 2.2, из которых видно, что разработанные композиции близки по свойствам к импортным аналогам.

Таблица 2.1 – Характеристики разработанной отечественной композиции Квант-408 для первого слоя первичного защитного покрытия в сравнении с импортным аналогом Desolite DP-1004

№ п/п	Наименование показателя	Результат испытаний Квант-408	Результат испытаний Desolite DP-1004	Метод испытаний
1	Вязкость (динамическая) при 25 °С, мПа·с	5090	4340	ГОСТ 25271-93
2	Плотность при 23 °С, г/см ³	1,052	1,048	ГОСТ 18995.1-73
3	Температура воспламенения, °С	132	> 93*	ГОСТ 4333-2014
4	Показатель преломления жидкой композиции при 23 °С	1,487	1,484	ГОСТ 18995.2-73
5	Показатель преломления отвержденной композиции при 23 °С	1,500	1,495	ГОСТ 19927-74
6	Прочность при отрыве стекло-стекло, МПа	1,2	1,2	ГОСТ 14760-69
7	Водопоглощение (3 суток, 22 °С), %	0,8	0,6	ГОСТ 21513-76
8	Влагопоглощение (6 суток, 35 °С, 95% влажности), %	1,1	1,0	ГОСТ 21513-76
9	Предел прочности при растяжении, МПа	1,4	1,1	ГОСТ 18299-72
10	Относительное удлинение при разрыве, %	120	70	ГОСТ 18299-72
11	Модуль упругости при растяжении при относительной деформации 2,5%, МПа	1,2	3,2	ГОСТ 18299-72
12	Время достижения максимального тепловыделения, с	4,6	3,6	Параграф и) раздела 2.1
13	Температура стеклования, °С	-46	-49	ГОСТ 55135-2012
14	Усадка, %	2,2	1,94	Формула 2.1
15	Поверхностное натяжение, мН/м	23,9	22,9	ГОСТ Р 50003-92
* Согласно паспорту производителя				

Таблица 2.2 – Характеристики разработанной отечественной композиции Квант-409 для второго слоя первичного защитного покрытия в сравнении с импортным аналогом Desolite DP-2015

№ п/п	Наименование показателя	Результат испытаний Квант-408	Результат испытаний Desolite DP-1004	Метод испытаний
1	Вязкость (динамическая) при 25 °С, мПа·с	6430	5180	ГОСТ 25271-93
2	Плотность при 23 °С, г/см ³	1,124	1,130	ГОСТ 18995.1-73
3	Температура воспламенения, °С	153	> 93*	ГОСТ 12.1.044-89
4	Показатель преломления жидкой композиции при 23 °С	1,5175	1,517	ГОСТ 18995.2-73
5	Показатель преломления отвержденной композиции при 23 °С	1,5385	1,539	ГОСТ 19927-74
6	Водопоглощение, (3 суток, 22 °С), %	1,1	1,4	ГОСТ 21513-76
7	Влагопоглощение (6 суток, 35 °С, 95% влажность), %	1,4	1,75	ГОСТ 21513-76
8	Предел прочности при растяжении, МПа	25	24	ГОСТ 18299-72
9	Относительное удлинение при разрыве, %	12	13	ГОСТ 18299-72
10	Модуль упругости при растяжении при относительной деформации 2,5%, МПа	405	420	ГОСТ 18299-72
11	Время достижения максимального тепловыделения, с	4,1	3,5	Параграф и) раздела 2.1
12	Температура стеклования, °С	49	53	ГОСТ 55135-2012
13	Усадка, %	3,4	3,5	Формула 2.1
14	Поверхностное натяжение, мН/м	35,1	34,2	ГОСТ Р 50003-92

* Согласно паспорту производителя

2.2. Выбор оптимальной программы контроля качества оптического волокна с двухслойным отверждаемым ультрафиолетом первичным защитным покрытием

Поскольку УФ-отверждаемые композиции для ПЗП кварцевых ОВ разрабатываются впервые, целесообразно на первом этапе провести сравнительные испытания с импортными аналогами. Результаты сравнительных испытаний были приведены в предыдущем разделе в таблице 2.1 и таблице 2.2, которые показали, что разработанные композиции сопоставимы по характеристикам с импортными аналогами.

Для проверки технологичности разработанных образцов композиций Квант-408 и Квант-409 была осуществлена вытяжка ОВ с применением разработанных композиций, а также импортных аналогов DP-1004 и DS-2015.

Вытяжка ОВ проходила с применением одинаковых технологических режимов (скорость вытяжки, мощность ламп, тип охлаждения, способ нанесения покрытия) и с применением заготовок (преформ) одной фирмы и идентичных размеров.

Были разработаны следующие критерии оценки технологичности разработанных материалов:

- Измерение коэффициента затухания. Коэффициент затухания является одной из основных характеристик, позволяющей оценить не только оптические характеристики ОВ, но и качество нанесения ПЗП. Так, например, нарушение concentричности нанесения ПЗП приводит к возникновению неравномерных напряжений по окружности ОВ, которые могут быть причиной увеличения коэффициента затухания при расширении и сжатии покрытия. Также очень существенным может быть возрастание ПМД, о чем упоминалось ранее. Кроме того, неконцентричность ПЗМ потенциально может быть причиной большего разброса результатов при исследованиях ОВ на стойкость к микроизгибам. В

данном случае для оценки технологичности разработанных композиций справедливо сравнение величины коэффициента затухания в образцах ОВ с разработанными композициями и образцах ОВ с импортными аналогами.

– Наличие обрывов в процессе вытяжки ОВ. Возникновение обрывов в процессе вытяжки может быть связано с качеством наносимой на ОВ композиции. Например, неполное отверждение покрытия приводит к постепенному накоплению композиции на технологических роликах башни вытяжки и, как следствие, налипанию и обрыву проходящего через них ОВ. Помимо этого, обрывы могут быть вызваны неоднородностью полимерного покрытия. Такие неоднородности приводят к возникновению на поверхности кварцевой оболочки локальных микронапряжений, вызывающих рост микротрещин и разрушение волокна.

– Технологичность ОВ с нанесённым покрытием в сравнении с импортными аналогами:

- удобство манипуляции (хрупкость и ломкость ОВ);
- отсутствие обрывов при перематке с технологической катушки на транспортную.

Результаты технологической апробации разработанных композиций Квант-408 и Квант-409 в сравнении с импортными аналогами DP-1004 и DS-2015 приведены в таблице 2.3, а также в [115].

Образец ОВ с применением смол DP-1004 и DS-2015 был изготовлен как реперный для дальнейшего сравнения его характеристик с характеристиками разработанных отечественных композиций. В процессе данной вытяжки был выбран оптимальный температурно-скоростной режим, который в дальнейшем использовался для вытяжки экспериментальных образцов.

Скоростной режим 95 ± 3 м/мин используется при производстве специального ОВ на предприятии АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», в связи с чем он и был выбран для осуществления контрольной вытяжки ОВ с нанесением ПЗП с применением импортных и разработанных композиций.

Таблица 2.3 – Технологические параметры вытяжки и характеристики полученных оптических волокон с применением композиций DP-1004 + DS-2015 и Квант-408 + Квант-409

Параметр	Значение	
	образец с DP-1004 + DS-2015	образец с Квант-408 + Квант-409
Диаметр световода, мкм	125 ± 1	125 ± 1
Внешний диаметр оптического волокна по покрытию, мкм	248 ± 2	248 ± 2
Коэффициент затухания*, дБ/км	0,198	0,188
Длина образца оптического волокна, км	10	10
Обрывы в процессе вытяжки и перемотки	Нет	Нет
Количество УФ ламп	2	
Способ нанесения первичного защитного покрытия	Мокрое по сухому	
Максимальная мощность одной лампы, Вт/дюйм**	600	
Номинальная мощность каждой из ламп в процессе вытяжки, %	66	
Тип охлаждения оптического волокна	Естественное (без применения технологических газов - гелия, азота и т.п.)	
Фирма-изготовитель заготовки оптического волокна	j-fiber, Германия	
Диаметр заготовки, мм	25	
Рабочая длина заготовки, мм	1000	
Скорость вытяжки, м/мин	95 ± 3	
Температура печи, °С	2250	
* Измерялся после вытяжки оптического волокна.		
** Приведена размерность, применяемая в установках программного обеспечения технологического оборудования.		

В ходе осуществления операции вытяжки не было замечено технологических отклонений от стандартного процесса, все образцы легко поддавались манипуляции при заправке на технологическую катушку (волокно проводится через серию технологических роликов).

Разница в значениях коэффициента затухания между образцом с импортными аналогами и образцом с разработанными композициями составила не более 0,01 дБ/км, что не превышает допустимой погрешности измерений коэффициента затухания российскими и международными стандартами [108, 116] равной 0,05 дБ/км.

Проведённая апробация показала, что разработанные УФ-композиции при их использовании в промышленном процессе изготовления ОВ обладают «технологичностью», т.е. способностью к переработке без необходимости существенных изменений параметров процесса, сравнимой с импортными аналогами, что позволяет сделать вывод о возможности их применения в процессе вытяжки ОВ.

После вытяжки образцов ОВ с ПЗП из импортных и разработанных композиций, проводились их испытания согласно стандартизованным методикам:

- Измерение коэффициента затухания согласно [117] в НКУ (Таблица 2.3), а также в ходе воздействия температурными циклами от минус 60 °С до 85 °С (2 цикла) согласно [37], повышенной температуры 85 °С в течение 30 дней согласно [118], после выдержки в воде в течение 30 дней согласно [32];

- Измерение усилия снятия ПЗП согласно [30] в НКУ, а также после испытаний температурными циклами, повышенной температурой и после выдержки в воде;

- Измерение геометрии ПЗП – диаметра ПЗП и неконцентричности ПЗП и кварцевой светоотражающей оболочки согласно [28]. Как видно из таблицы 2.3, диаметр ПЗП измерялся непосредственно в ходе вытяжки ОВ, но поскольку точность измерений лабораторного оборудования выше, чем у установленного на производственном оборудовании, целесообразно провести контроль этого параметра повторно.

Результаты испытаний приведены в таблице 2.4

Также было проведено измерение бриллюэновской частоты у вышеупомянутых образцов ОВ для оценки влияния ПЗП на свойства световода в ходе воздействия температурными циклами. Результаты приведены в таблице 2.5.

Как видно из таблицы 2.5, значения бриллюэновской частоты (вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна) макетного образца ОВ с ПЗП из разработанных композиций и образца ОВ с ПЗП из импортного материала близки, что свидетельствует об идентичности выбранных режимов для

производства ОВ (с учётом того, что для производства ОВ были использованы одинаковые заготовки), а также о том, что ПЗП из разработанных композиций, не ухудшает характеристик световода в сравнении с ПЗП из импортных композиций.

Таблица 2.4 – Результаты испытаний образцов оптических волокон с первичными защитными покрытиями из композиций Квант-408+Квант-409 и DP-1004+DS-2015

Наименование контролируемого параметра, единица измерения	Нормированное значение и допуск показателя по нормативной документации	Фактическое значение	
		Квант-408+Квант-409	DP-1004+DS-2015
1	2	3	4
Прирост коэффициента затухания, дБ/км при воздействии смены температур, дБ/км 1550 нм 1625 нм	не более 0,05	0,007 0,009	0,009 0,005
Прирост коэффициента при воздействии повышенной температуры, дБ/км 1550 нм 1625 нм		0,008 0,010	0,008 0,007
Прирост коэффициента затухания при погружении в воду, дБ/км 1550 нм 1625 нм		0,008 0,005	0,002 0,005
Усилие снятия первичного защитного покрытия в нормальных климатических условиях, Н - среднее - пиковое	среднее: 1,0...5,0 пиковое: 1,0...8,9	1,66 1,79	1,37 1,49
Усилие снятия первичного защитного покрытия после воздействия смены температур, Н - среднее - пиковое		2,00 2,14	1,40 1,53
Усилие снятия первичного защитного покрытия после воздействия повышенной температуры, Н - среднее - пиковое		1,98 2,11	1,45 1,58
Усилие снятия первичного защитного покрытия после погружения в воду, Н - среднее - пиковое		1,67 1,81	1,32 1,45

Продолжение таблицы 2.4

1	2	3	4
Диаметр первичного защитного покрытия, мкм	235...255	249	251
Прирост оптических потерь на длине волны 1625 нм, вызванный микроизгибами (груз 6 кг), дБ			
- НКУ	Не нормируется	1,39	1,52
- минус 40 °С	Не нормируется	1,93	2,20

Таблица 2.5 – Измерение вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна частоты образцов оптического волокна до и после воздействия температурными циклами

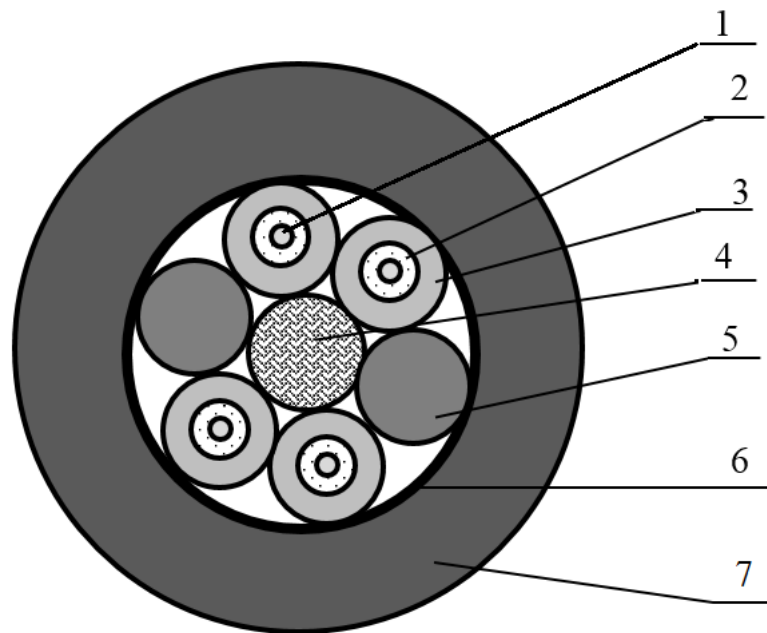
Образец оптического волокна с покрытием	Бриллюэновская частота, ГГц	
	нормальные климатические условия	после воздействия 2-х температурных циклов
Квант-408+Квант-409	10,874	10,869
DP-1004+DS-2015	10,872	10,869

Исходя из изложенного выше в данной главе, можно сделать вывод, что представленные образцы ОВ с ПЗП из разработанных композиций и ОВ с ПЗП из импортных аналогов обладают схожими характеристиками [115].

С целью проверки технологичности ОВ с ПЗП из разработанных композиций были изготовлен образец ОК марки ОКЦБР-03, конструкция которого приведена на рисунке 2.2, содержащий в своей конструкции 4 ОМ, два из которых содержат по одному ОВ с ПЗП из разработанных композиций, а два других – по одному ОВ с ПЗП из импортных композиций.

В ходе производства ОК контролировали отсутствие обрывов ОВ. После изготовления ОК проводился контроль коэффициента затухания при испытаниях ОК на стойкость к воздействию температурными циклами согласно [119]. Измерения проводили при НКУ (до и после воздействия), а также после выдержки в течение 2 часов при минимальной (минус 60 °С) и максимальной (85 °С) температурах. Данная последовательность измерений представляет собой один цикл. Всего проводилось два цикла. Скорость изменения температуры составляла не более 1 °С/мин. Прирост коэффициента затухания как у ОВ на основе

импортных композиций, так и у ОВ на основе отечественных композиций не превысил допустимый стандартом [108, 116] предел, равный 0,05 дБ/км.



1 – Оптическое волокно

2 – Оптический модуль

3 – Гидрофобный наполнитель

4 – Центральный силовой элемент

(стеклопластик)

5 – Кордель заполнения

6 – ПЭТ-Э лента

7 – Полимерная наружная оболочка

Рисунок 2.2 – оптический кабель, содержащий в своей конструкции оптические волокна с первичным защитным покрытием из разработанных композиций и импортных аналогов

С целью защиты ОК от продольного распространения воды, они могут содержать в своей конструкции гидрофобные наполнители, с которыми может контактировать ПЗП ОВ, что может повлечь изменение свойств ПЗП, увеличению затухания или обрыву ОВ. Для предотвращения этого были проведены испытания на совместимость ОВ с ПЗП из разработанных композиций и внутримодульного гидрофобного наполнителя согласно разработанной автором диссертации

методике [120] (подробнее см. раздел 4.1). В ходе испытаний проверялось усилие снятия ПЗП согласно [30] до и после выдержки образца ОВ в ёмкости с гидрофобным наполнителем при температуре 85 °С в течение 30 дней. Усилие снятия ПЗП ни до, ни после испытаний не должно выходить за пределы значений, установленных в [26, 27].

Поскольку для проведения испытаний был взят широко применяющийся внутримодульный гидрофобный наполнитель фирмы Bogdány Petrol марки Lunestra ОС 393-2, в случае отсутствия совместимости ПЗП и наполнителя, негодным следует признать именно ПЗП. Для большей объективности испытания проводились в сравнении с образцом ОВ с ПЗП из импортных композиций.

Из таблицы 2.6 видно, что значение усилия снятия ПЗП у образца ОВ с ПЗП из импортных композиций (образец 1) изначально было несколько выше, чем у образца ОВ с ПЗП из разработанных композиций (образца 2). После выдержки в гидрофобном наполнителе значения усилий снятия ПЗП у образца 1 практически равны значениям образца 2, т.е. после испытания у образца 1 наблюдалось большее снижение значения контролируемого параметра. Однако, наиболее важным является тот факт, что усилие снятия ПЗП у обоих образцов ОВ находится в заданных стандартом [30] пределах, что свидетельствует об их совместимости с внутримодульным гидрофобным наполнителем [121].

Таблица 2.6 – Усилие снятия первичного защитного покрытия до и после выдержки во внутримодульном гидрофобном наполнителе при 85 °С в течение 30 дней [121]

Образцы	Усилие снятия первичного защитного покрытия, Н	
	максимальное значение	среднее значение
Образец 1 (до выдержки)	1,92	1,77
Образец 2 (до выдержки)	1,85	1,67
Образец 1 (после выдержки)	1,40	1,34
Образец 2 (после выдержки)	1,40	1,32
Норма согласно [30]	1,0...8,9	1,0...5,0

2.3. Исследование влияния степени полимеризации двухслойного отверждаемого ультрафиолетом первичного защитного покрытия на характеристики кварцевого оптического волокна

2.3.1 Исследование характеристик оптического волокна с отверждаемым ультрафиолетом первичным защитным покрытием при условии недостаточной степени его полимеризации

Для эксперимента были выбраны образцы одномодового ОВ типа В-652.D согласно [27] с ПЗП из разработанных композиций Квант-408 и Квант-409. (композиция КП1 и КП2, а также KB1 и KB2 отличаются видом фотоинициатора), а также коммерчески доступных композиций DSM Desolite DP-1004 и DSM Desolite DS-2015 (таблица 2.7). Диаметр образцов ОВ по ПЗП равен 245 ± 10 мкм.

Образцы ОВ изготавливались с применением идентичного технологического режима. Вытяжка ОВ происходила на скорости 95 ± 3 м/мин. Наложение ПЗП как из отечественных, так и из импортных композиций осуществлялось методом «мокрое по сухому» (wet on dry). Для полимеризации ПЗП применялось две УФ-лампы (по одной на каждый из слоёв ПЗП), мощностью 600 Вт/дюйм каждая.

Существуют несколько методов контроля степени полимеризации ПЗП, которые были изложены в разделе 1.5.3. Для проведения настоящих исследований был применён метод разделения гель-золь фракций.

Таблица 2.7 – Образцы оптического волокна

Номер группы образцов	Тип ОВ	Композиция для первого слоя ПЗП	Композиция для второго слоя ПЗП
1	В1.3	КП1 – разработанная	КВ1 – разработанная
2	В1.3	КП1 – разработанная	КВ2 – разработанная
3	В1.3	КП2 – разработанная	КВ2 – разработанная
4	В1.3	DP-1004	DS-2015

Для оценки степеней отверждения (полимеризации) нанесённых покрытий из каждого из трёх вытянутых ОВ были отобраны участки длиной $l = 1, 2, \dots, 1, 4$ метра, после чего проводилось первое взвешивание образцов (P_1). Затем образцы были экстрагированы в аппарате Сокслета в течение трёх часов, высушены при температуре 55 ± 5 °С в течение 5 часов, после чего проводили второе взвешивание образцов (P_2). При этом доля веса кварца в образце ОВ ($P_{кв}$) учитывалась следующим образом:

$$P_{кв} = \frac{1}{4}\pi d^2 l \rho \quad (2.1)$$

где $d = 125$ мкм – диаметр кварцевого световода;

$\rho = 2,2$ мг/мм – удельный вес кварцевого стекла.

Степень полимеризации (ξ) рассчитывалась по формуле:

$$\xi = \frac{P_2 - P_{кв}}{P_1 - P_{кв}} 100 \quad (2.2)$$

Результаты приведены в таблице 2.8.

Для оценки влияния степени полимеризации на характеристики ОВ были проведены испытания, описанные ниже.

После кондиционирования в нормальных климатических условиях согласно [122] в течение 12 часов определялось усилие снятия ПЗП согласно [30] разрывное усилие согласно [38] на скорости растяжения 50 мм/мин; стойкость к коррозии в напряжённом состоянии [39], методом А на 4-х скоростях растяжения – 10 мм/мин, 50 мм/мин, 100 мм/мин и 500 мм/мин. Затем образцы помещались в климатическую камеру в виде бухт радиусом 15 см. Длина ОВ в каждой бухте

составляла не менее 2 км, после чего производилось измерение коэффициента затухания согласно [117], по методу С. Далее температуру повышали до 85 °С, влажность – до 85 %, производили выдержку в указанных условиях в течение 30 дней. После выдержки измеряли те же параметры, что и до выдержки (см. таблицу 2.9) – значения коэффициента затухания, усилия снятия ПЗП, разрывного усилия и стойкости к коррозии в напряжённом состоянии (n).

Таблица 2.8 – Вес образцов до и после экстракции и значение степени полимеризации первичного защитного покрытия

Номер группы образцов	P_1 , мг	P_2 , мг	$P_{кв}$, мг	ξ , %
1	91,75	87,20	37,80	91,8
2	77,25	72,00	31,86	89,5
3	92,00	82,62	37,80	82,7
4	79,05	75,75	32,57	92,9

Образец 4 имеет наибольшее значение степени полимеризации. Образец 3 имеет наименьшее значение степени полимеризации.

Результаты испытаний образцов ОВ до и после их выдержки при повышенной температуре и влажности приведены в таблице 2.9.

На рисунках 2.3 – 2.6 приведены графики усилия снятия ПЗП с образцов перед их выдержкой при повышенной температуре и влажности.

Таблица 2.9 – Результаты проверки параметров оптического волокна до и после их выдержки при повышенной температуре и влажности в течение 30 дней

Номер группы образцов	Параметр											
	Коэффициент затухания, дБ/км				Усилие снятия первичного защитного покрытия, Н				Разрывное усилие, ГПа		Параметр динамической усталости	
	до		после		до		после		до	после	до	после
	1550 нм	1625 нм	1550 нм	1625 нм	среднее	пиковое	среднее	пиковое				
1	0,191	0,197	0,197	0,206	1,65	1,77	1,68	1,80	5,12	4,14	22,9	19,6
2	0,183	0,198	0,196	0,211	1,55	1,66	1,60	1,74	5,25	4,28	24,5	22,1
3	0,191	0,199	0,197	0,205	1,21	1,47	1,34	1,52	4,16	2,63	20,1	16,7
4	0,196	0,201	0,199	0,205	1,39	1,50	1,38	1,53	5,42	4,58	24,2	22,8
Норма согласно [27]	$\leq 0,3$	$\leq 0,4$	Прирост не более 0,05 дБ/км		от 1,0 до 5,0	от 1,0 до 8,9	от 1,0 до 5,0	от 1,0 до 8,9	$\geq 3,8$	$\geq 3,03$	≥ 18	≥ 18

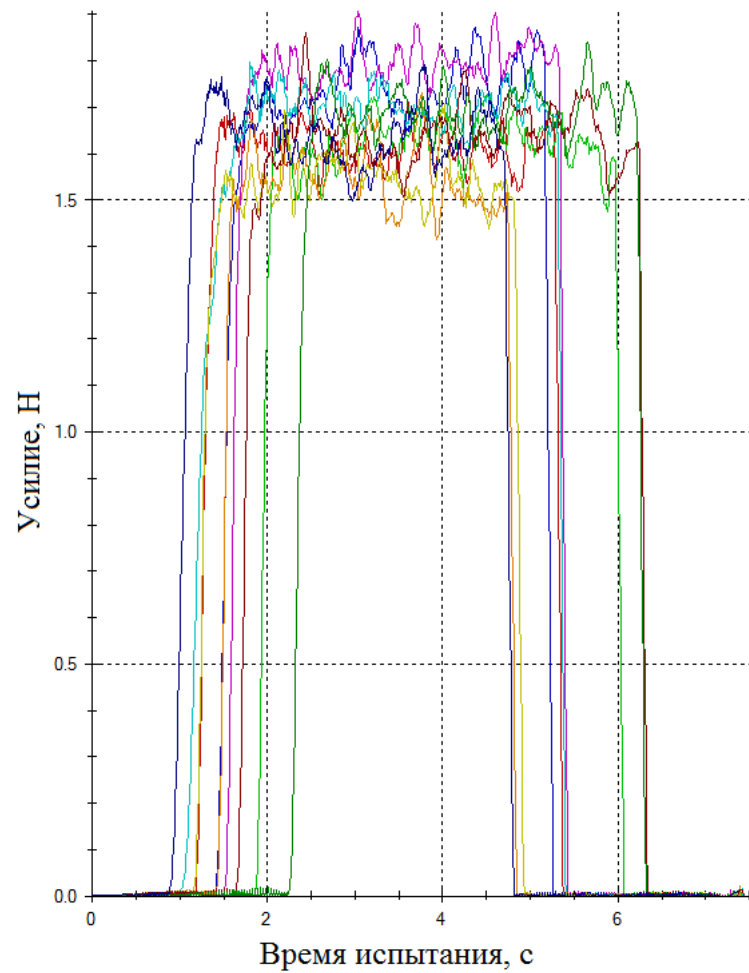


Рисунок 2.3 – Усилие снятия первичного защитного покрытия с образцов оптического волокна группы 1

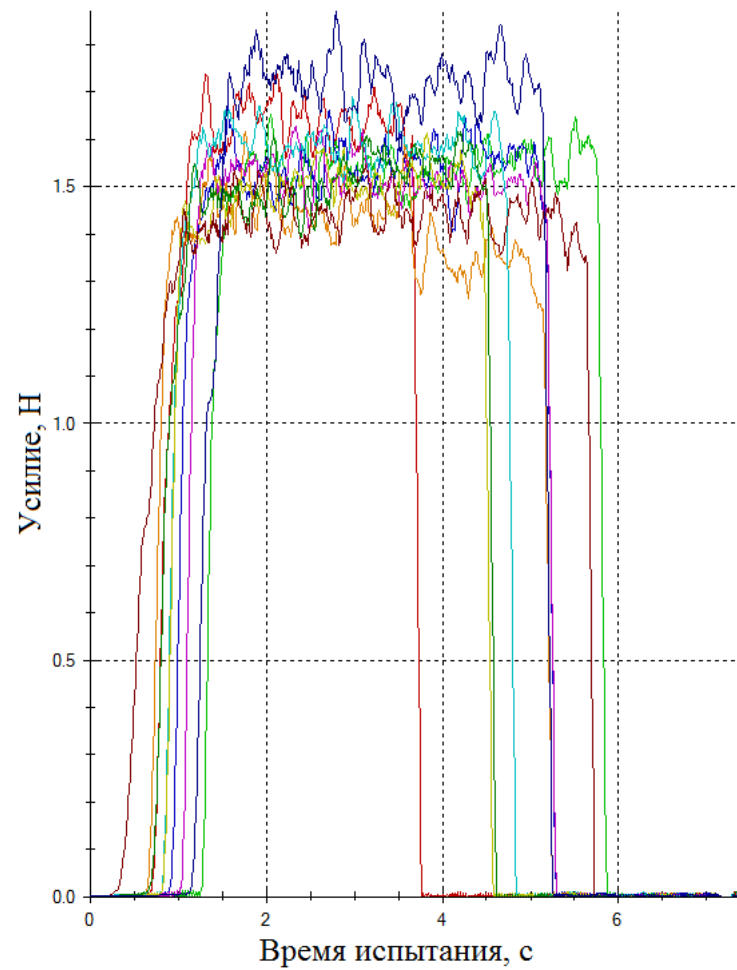


Рисунок 2.4 – Усилие снятия первичного защитного покрытия с образцов оптического волокна группы 2

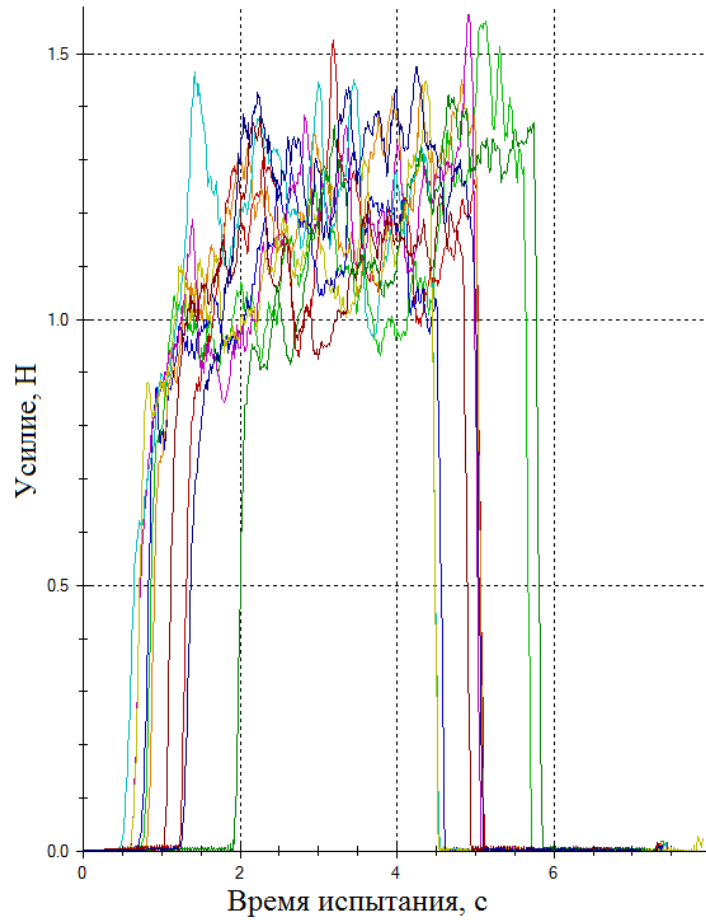


Рисунок 2.5 – Усилие снятия первичного защитного покрытия с образцов оптического волокна группы 3

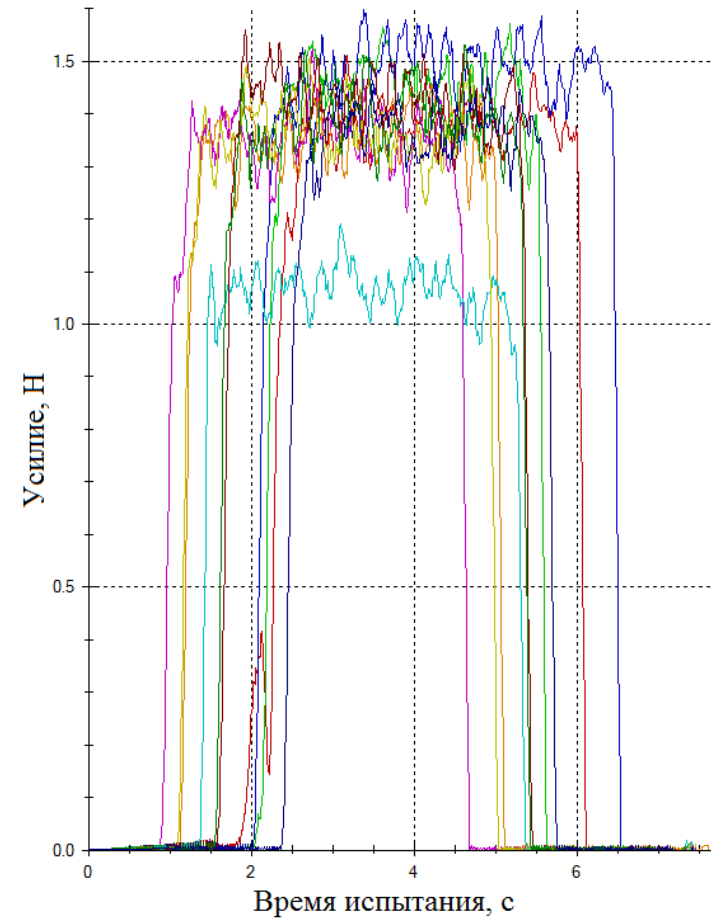


Рисунок 2.6 – Усилие снятия первичного защитного покрытия с образцов оптического волокна группы 4

Изучив данные, приведённые в таблице 2.9, можно сделать вывод, что все образцы соответствуют требованиям [27] в части коэффициента затухания, но не все полученные значения разрывного усилия и параметра динамической усталости (стойкости к коррозии в напряжённом состоянии) находятся в заданных стандартом пределах. Это приводит к выводу о том, что акриловые композиции, применённые для изготовления образцов ОВ третьей группы, не успевали полимеризоваться при той скорости, при которой производилась вытяжка ОВ. Этот вывод косвенно подтверждает и наблюдавшаяся также «липкость» ПЗП, а также ощущаемого опытными операторами наличие более сильного запаха, при работе с образцами ОВ данной группы.

О неполной полимеризации ПЗП образцов ОВ третьей группы может свидетельствовать и график усилия снятия ПЗП (см. рисунок 2.5). Характерный график усилия снятия ПЗП для полимеризованного покрытия должен иметь «П-образную» форму, как это можно видеть на рисунках 2.3, 2.4 и 2.6. График же на рисунке 2.5 имеет ярко выраженную возрастающую область. Это вызвано тем, что не до конца полимеризованное ПЗП не «слетает» с ОВ, а налипает на ножи инструмента, применяемого для его снятия, что приводит к постоянному росту значения усилия снятия ПЗП, видному на рисунке 2.5. Следует отметить, что после выдержки при повышенной температуре и влажности характер графиков не изменился.

Недостаточно полимеризованное ПЗП образца 3 меньше задерживало влагу, чем ПЗП других образцов, обладающих большей степенью полимеризации. Это привело к ускоренному росту микротрещин и снижению одного из параметров ОВ, характеризующих его надёжность – параметра динамической усталости и выходу его за пределы, установленные стандартом [27], что свидетельствует о высокой вероятности разрушения ОВ до истечения двадцатилетнего срока службы.

Композиции, применённые для изготовления первой и второй групп образцов, полностью выдержали испытания, соответствуют по своим показателям образцам четвёртой группы, у которых ПЗП состоит из импортных композиций, и

подходят для производства ОВ на скоростях вытяжки не превышающих 95 ± 3 м/мин [29].

2.3.2 Характеристики оптического волокна с двухслойным отверждаемым ультрафиолетом первичным защитным покрытием при условии чрезмерной его полимеризации

Для оценки влияния «переполимеризованного» ПЗП были проведён термомеханический анализ в атмосфере воздуха при силе воздействия на образец ОВ – 0,6 Н и скорости нагрева – 10 град/мин трёх образцов одномодовых ОВ:

Образец №1 – с «недополимеризованным» ПЗП, степень полимеризации которого ниже 80 %;

Образец № 2 – с полимеризованным ПЗП, степень полимеризации выше 90 %;

Образец № 3 – с «переполимеризованным» ПЗП – при нанесении ПЗП во время вытяжки ОВ, УФ-отверждаемые композиции подвергались воздействию УФ-облучения в 3 раза дольше, чем у образца № 2.

Как видно из рисунка 2.7, на котором приведены ТМА кривые трёх образцов, первый образец с «недополимеризованным» ПЗП и второй образец, ПЗП которого имеет оптимальную степень полимеризации, имеют схожие свойства, т.к. их кривые хоть и смещены относительно друг друга, но их характер идентичен, а кривая образца № 3 полностью отличается от первых двух, что свидетельствует о радикальном изменении свойств ПЗП в следствии его «переполимеризации», т.е. ОВ с таким ПЗП не сможет обладать схожими характеристиками, что и ОВ с ПЗП образца № 2 и даже № 1, что позже было подтверждено при проведении испытаний согласно [30] – несмотря на соответствие значений усилия снятия ПЗП

(среднего и пикового), приведённым в [27] (см. таблицу 2.10), как видно из графика, приведённого на рисунке 2.8, усилие снятия ПЗП вдоль образца имеет большой разброс значений, т.е. покрытие снимается не равномерно, а рывками. Также образец имеет повышенные оптические потери при испытаниях температурными циклами согласно [37] – прирост коэффициента затухания при пониженной температуре (минус 60 °С) превышает 0,05 дБ/км.

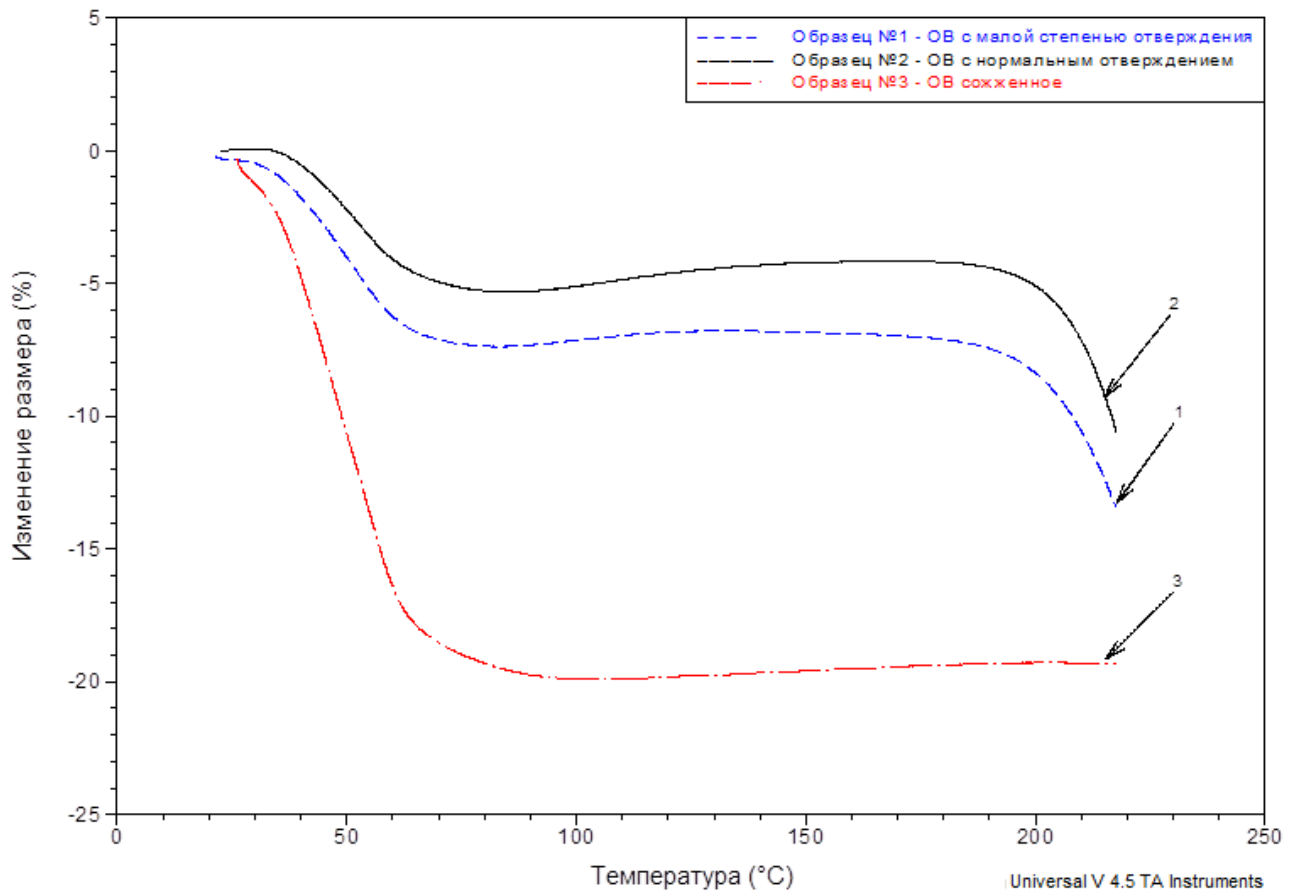


Рисунок 2.7 – Термомеханический анализ образцов оптического волокна, первичное защитное покрытие которых имеет различную степень полимеризации

Таблица 2.10 – Усилие снятия первичного защитного покрытия с образца оптического волокна «переполимеризованным» первичным защитным покрытием

Норма согласно [27], Н	Измеренное значение, Н
Среднее – от 1,0 до 5,0	1,78
Пиковое – от 1,0 до 8,9	3,07

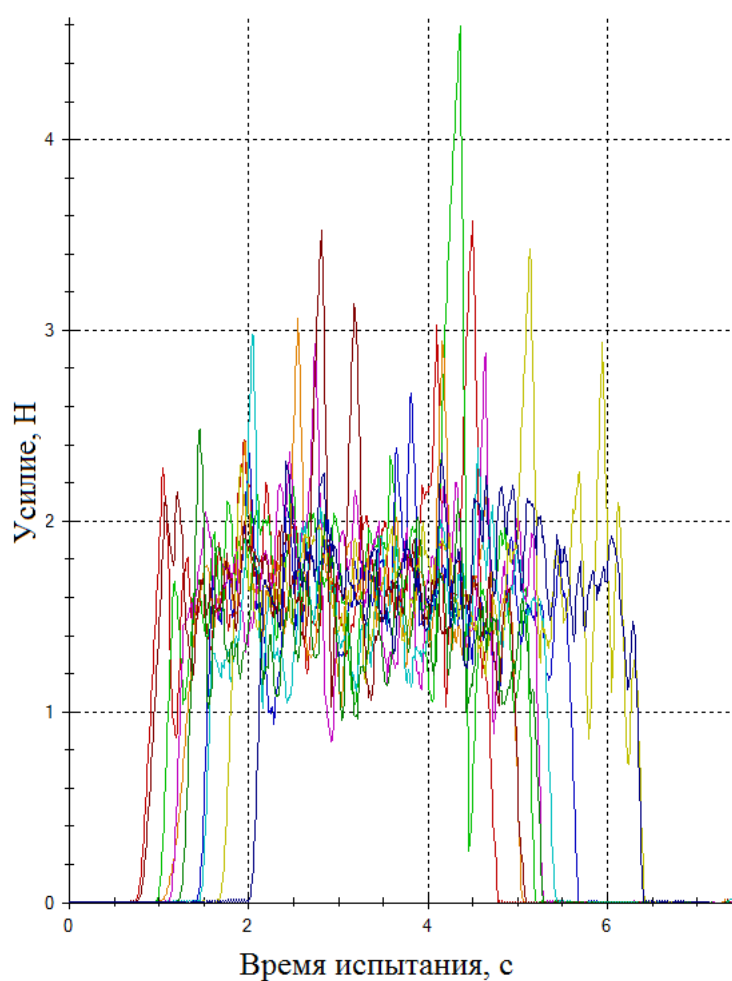


Рисунок 2.8 – Усилие снятия первичного защитного покрытия с образца оптического волокна «переполимеризованным» первичным защитным покрытием

По результатам испытаний, приведённых в разделе 2.3, можно сделать вывод, что характеристики ПЗП способны повлиять на характеристики самого ОВ, в т.ч. и на надёжностные (параметр динамической усталости). Недостаточная полимеризация может привести к ускоренному выходу из строя ОВ и, как

следствие, ОК и ВОЛС, в котором оно применяется [29]. Исходя из результатов, приведённых выше, для разработанных композиций было принято целесообразным установить требование по обеспечению степени полимеризации ПЗП в диапазоне от 90 % до 100 %.

2.4. Определение зависимости между технологическими режимами вытяжки оптического волокна и степенью полимеризации двухслойного отверждаемого ультрафиолетом первичного защитного покрытия

Как было показано в разделе 2.3, необходимым фактором выполнения ПЗП своих функций является его должная «оптимальная» степень полимеризации. Для более подробного понимания этого фактора методом НПВО-ИК-спектроскопии (НПВО – нарушенное полное внутреннее отражение – когда часть спектра поглощается отражающей средой) было проведено исследование зависимости конверсии двойных связей композиций (степени полимеризации) Квант-408 и Квант-409 от времени УФ-облучения. При этом интенсивность облучения, измеренная с помощью радиометра Духах, составила 6 мВт/см². Результаты приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Зависимость степени полимеризации от времени облучения композиций для первичного защитного покрытия

Время облучения, сек	Степень полимеризации, %	
	Квант-408	Квант-409
1	24,0...86,5	-
2	92,0...96,5	46,6...51,0
5	100	66,3...76,8
10	-	81,0...87,8
20	-	85,9...90,2
50	-	91,9...94,7

Из результатов, приведённых в таблице 2.11, видно, что композиции обладают высокой скоростью отверждения при УФ-облучении, при этом скорость композиции для первого слоя ПЗП несколько выше, чем для второго.

Поскольку условия полимеризации плёнок композиций для ПЗП в лабораторных условиях отличаются от реальных условий производства – на производстве применяются УФ-лампы большей мощности, существует возможность варьировать не только время облучения композиций ультрафиолетом путём изменения скорости вытяжки ОВ, но и мощность УФ-ламп и объём подачи азота в них. Как указано в [100], свойства отверждённых композиций в виде плоских плёнок и в виде цилиндров, нанесённых на ОВ или на схожий по свойствам адгезии материал, несколько отличаются, поэтому было решено осуществить пробные вытяжки с целью подбора технологических режимов нанесения ПЗП для обеспечения оптимальной степени его полимеризации.

Покрyтия наносились методом «мокрое по сухому» (wet on dry). Для полимеризации ПЗП применялось две УФ-лампы (по одной на каждый из слоёв ПЗП), мощностью 600 Вт/дюйм каждая. Остальные технологические параметры нанесения ПЗП во время вытяжки ОВ, а также степень полимеризации ПЗП,

которая определялась методом разделения гель-золь фракций, приведены в таблицах 2.12 – 2.14.

Таблица 2.12 – Влияние изменения скорости вытяжки на степень полимеризации первичного защитного покрытия

Номер катушки	Покрытие	Скорость вытяжки, м/мин	Мощность ламп ультрафиолетового отверждения, %	Поток азота во второй лампе ультрафиолетового отверждения, л/мин	Степень полимеризации, %
1	Квант-408 + Квант-409	18	90	15	96
2		40	90	15	92
4		55	90	15	93
8		55	52	15	77
10		95	51	12	74

Таблица 2.13 – Влияние изменения мощности ламп ультрафиолетового отверждения на степень полимеризации первичного защитного покрытия

Номер катушки	Покрытие	Скорость вытяжки, м/мин	Мощность ламп ультрафиолетового отверждения, %	Поток азота во второй лампе ультрафиолетового отверждения, л/мин	Степень полимеризации, %
2	Квант-408 + Квант-409	40	90	15	92
3		40	72	15	88
4		55	90	15	93
5		55	72	15	87
6		55	62	15	84
8		55	52	15	77

Таблица 2.14 – Влияние изменения объёмов подачи азота на степень полимеризации первичного защитного покрытия

Номер катушки	Покрытие	Скорость вытяжки, м/мин	Мощность ламп ультрафиолетового отверждения, %	Поток азота во второй лампе ультрафиолетового отверждения, л/мин	Степень полимеризации, %
7	Квант-408 +	55	52	30	90
8	Квант-409	55	52	15	77

Как видно из таблиц 2.12 – 2.14, на скоростях вытяжки до 95 м/мин более полной конверсии покрытий можно добиться увеличением мощности ламп или увеличением потока азота нежели изменением самой скорости вытяжки. Поэтому, для определения возможности работы на максимальной скорости вытяжки, которое позволяет производственное оборудование, и на котором производилась вытяжка образцов ОВ (95 м/мин), было принято решение установить мощность ламп до 90 % при потоке азота до 25 л/мин и провести дополнительную серию пробных вытяжек. Значения степени полимеризации ПЗП полученных в ходе их проведения образцов ОВ, а также технологические параметры приведены в таблице 2.15.

Таблица 2.15 – Определение степени полимеризации первичного защитного покрытия при максимальной скорости вытяжки оптического волокна

Номер катушки	Покрытие	Скорость вытяжки, м/мин	Мощность ламп ультрафиолетового отверждения, %	Поток азота во второй лампе ультрафиолетового отверждения, л/мин	Степень полимеризации, %
9	Квант-408 +	95	90	12	96
10	Квант-409	95	51	12	74
11		95	51	25	79
12		95	75	20	94
13		60	65	20	93

Как видно из таблицы 2.15, образцы под номерами 9, 12 и 13 имеют степень полимеризации ПЗП выше порогового значения равного 90 %, наибольшее из которых у образца № 9. При производстве категорий телекоммуникационных ОВ, охваченных стандартами [26, 27], оптимальным режимом будет являться режим, соответствующий образцу № 12, позволяющий достигнуть требуемой степени полимеризации ПЗП при бережной эксплуатации ламп УФ-отверждения, но высокой производительности [122]. В качестве альтернативного технологического режима наложения ПЗП (при производстве специальных типов ОВ, которое осуществляется на меньших скоростях вытяжки) можно рассматривать режим № 13. Акт об использовании результатов диссертационной работы приведён в Приложении А.

2.5. Исследование влияния уменьшения диаметра отверждаемого ультрафиолетом первичного защитного покрытия на характеристики кварцевого оптического волокна и оптических кабелей на его основе

2.5.1. Исследование влияния уменьшения диаметра отверждаемого ультрафиолетом первичного защитного покрытия на характеристики кварцевого оптического волокна

Уменьшение диаметра ПЗП является одним из способов миниатюризации конструкций ОК, т.е. на единицу площади поперечного сечения ОК при уменьшении ПЗП приходится больше «полезной нагрузки» в виде большего числа ОВ. Вместе с тем, уменьшение диаметра ПЗП уменьшает толщину защитного барьера, предохраняющего хрупкий кварцевый световод от внешних воздействий. Целью данного раздела является сравнение характеристик ОВ с ПЗП диаметром 200 мкм и 250 мкм, а также ОК, содержащих в своей конструкции указанные волокна с целью определения оптимальных областей применений ОВ с уменьшенным диаметром ПЗП.

Первым этапом являлись сравнительные испытания ОВ с диаметром 200 мкм и 250 мкм по усилию снятия ПЗП и на стойкость к влиянию внешних воздействующих факторов. Результаты приведены в таблице 2.16.

Таблица 2.16 – Результаты сравнительных испытаний оптических волокон с первичными защитными покрытиями 200 мкм и 250 мкм

Параметр	Диаметр первичного защитного покрытия образца оптического волокна		Норма согласно [52]	
	200 мкм	250 мкм	200 мкм	250 мкм
1	2	3	4	5
Усилие снятия первичного защитного покрытия, Н				
- среднее	1,44	1,39	0,4...5,0	1,0...5,0
- пиковое	1,57	1,50	0,4...8,9	1,0...8,9
Усилие снятия первичного защитного покрытия, после выдержки в воде в течение 30 дней, Н				
- среднее	1,41	1,44	0,4...5,0	1,0...5,0
- пиковое	1,52	1,55	0,4...8,9	1,0...8,9
Усилие снятия первичного защитного покрытия после испытания на совместимость с внутримодульным гидрофобным наполнителем, Н				
- среднее	1,20	1,32	0,4...5,0	1,0...5,
- пиковое	1,31	1,40	0,4...8,9	0 1,0...8, 9
Коэффициент затухания при выдержке в воде на длинах волн 1550 нм / 1625 нм, дБ/км				
- до погружения	0,184 / 0,210	0,186 / 0,191	Прирост	
- через 2 часа после погружения	0,190 / 0,208	0,188 / 0,191	не более	
- после 30 дней	0,186 / 0,210	0,187 / 0,189	0,05	

Продолжение таблицы 2.16

1	2	3	4	5
Коэффициента затухания во время воздействия температурных циклов на длинах волн 1550 нм / 1625 нм, дБ/км	При НКУ: 0,185 / 0,187 При минус 60 °С: 0,185 / 0,234 При 85 °С: 0,188 / 0,192 2 цикл – При минус 60 °С: 0,189 / 0,209 При 85 °С: 0,184 / 0,204 При НКУ: 0,186 / 0,191	1 цикл – При НКУ: 0,188 / 0,193 При минус 60 °С: 0,197 / 0,190 При 85 °С: 0,196 / 0,191 2 цикл – При минус 60 °С: 0,199 / 0,195 При 85 °С: 0,186 / 0,194 При НКУ: 0,186 / 0,193	Прирост не более 0,05	
Прирост оптических потерь на длине волны 1625 нм, вызванных микроизгибами, груз 6 кг, дБ - НКУ	1,32	1,86	Не нормируются	

Исходя из результатов, приведённых в таблице 2.16, можно сделать вывод, что образцы волокон с диаметром ПЗП 200 мкм и 250 мкм имеют схожие значения характеристик, полностью удовлетворяющие действующим стандартам. Однако, заметным отличием является более резкое снижение усилия снятия ПЗП у образцов ОВ с диаметром ПЗП 200 мкм по сравнению с образцами с диаметром ПЗП 250 мкм после испытания на совместимость с внутримодульным гидрофобным наполнителем. Для образцов с диаметром ПЗП 200 мкм усилие снятия ПЗП уменьшилось на 17 % – среднее и 14 % – пиковое значение. Для образцов с диаметром ПЗП 250 мкм – 5 % и 7 % соответственно. Данный факт объясняется тем, что во время испытаний под воздействием предельной рабочей

температуры и внутримодульного гидрофобного заполнителя происходит потеря массы ПЗП. В основном внешнего его слоя, обладающим большим модулем Юнга. Поскольку, усилие снятия ПЗП характеризует именно внешний слой ПЗП, а у образцов ОВ с диаметром ПЗП он тоньше по сравнению с образцами ОВ с диаметром ПЗП 250 мкм, происходит более значительное снижение усилие снятия ПЗП. Данный факт необходимо учитывать при прогнозировании срока службы ОК, содержащих внутримодульный гидрофобный заполнитель.

Другим отличием в результатах испытаний образцов ОВ с ПЗП диаметром 200 мкм и 250 мкм является их стойкость к воздействию микроизгибов. Уровень оптических потерь образца ОВ с ПЗП диаметром 200 мкм заметно ниже, чем у образца ОВ с диаметром ПЗП 250 мкм. Следует отметить, что распространять полученный результат по стойкости к воздействию микроизгибов на все ОВ с ПЗП 250 мкм и 200 мкм некорректно. Полученный результат справедлив для ОВ конкретных категорий, конкретных производителей, изготовленных с применением конкретных композиций для первого и второго слоёв ПЗП. Т.е. полученный результат не означает, что все ОВ с ПЗП 200 мкм менее восприимчивы к воздействию микроизгибов. Приведённые выше результаты испытаний, в т.ч. и по определению потерь, вызванных микроизгибами, позволяют сделать предположение, что снижение диаметра ПЗП до 200 мкм не может являться препятствием для конструирования ОК с характеристиками не хуже, чем ОК, содержащими в своей конструкции ОВ с ПЗП с «классическим» диаметром 250 мкм, что было продемонстрировано в разделах 2.5.2 и 2.5.3.

Согласно [8] свойства полимерного ПЗП нарушаются при превышении разрывного усилия, воздействующего на ОВ, при котором ПЗП удлиняется более чем на 2 %. Учитывая тот факт, что при изгибе ОВ внешним диаметром d на диаметр D внешний его слой растягивается на длину l , а внутренний – сжимается, при этом длина его нейтральной оси l_0 , которая показана пунктирной линией на рисунке 2.9, остаётся неизменной. Запишем очевидные соотношения:

$$l = \pi\alpha(D/2 + d)/180 \quad (2.2)$$

$$l_0 = \pi\alpha(D + d/2)/180 \quad (2.3)$$

Деформация растяжения внешнего слоя с учётом (2.2) и (2.3) равна [47]:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{d}{D + d} \quad (2.4)$$

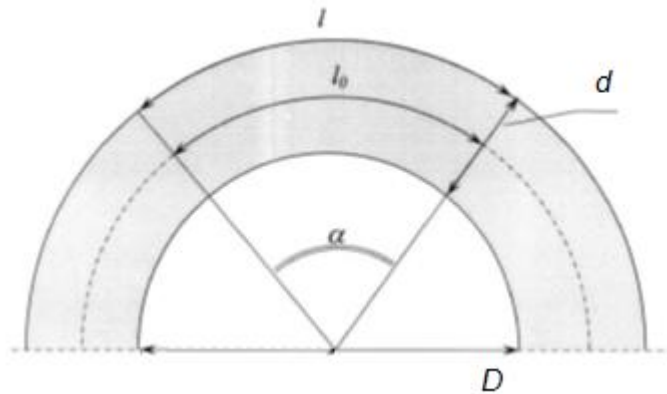


Рисунок 2.9 – изгиб цилиндра на диаметр D [47]

Формулой (2.4) можно описать растяжение первичного защитного покрытия (ПЗП) ОВ. Умножив результат вычислений (2.4) на 100%, получим процент удлинения внешнего слоя ПЗП ОВ ($\varepsilon_{\text{ПЗП}\%}$):

$$\varepsilon_{\text{ПЗП}\%} = \frac{d_{\text{ПЗП}}}{D + d_{\text{ПЗП}}} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

где $d_{\text{ПЗП}}$ – диаметр по ПЗП [124].

Чтобы получить процент растяжения внешнего слоя световода $\varepsilon_{\text{si}\%}$ необходимо также умножить полученный результат по формуле (5) на 100 %:

$$\varepsilon_{\text{si}\%} = \frac{d_{\text{si}}}{D + d_{\text{ПЗП}}} \cdot 100\% \quad (2.6)$$

где d_{si} – диаметр световода, равный 125 мкм.

В статье [124] приводятся результаты вычислений величин растяжения световода (таблица 2.17) и ПЗП (таблица 2.18) диаметром 250 мкм в процентном отношении при изгибе ОВ на различные радиусы. Дополним эти таблицы

вычислениями согласно (2.5) растягивающих усилий для световода и ПЗП диаметром 200 мкм и 180 мкм.

Также стоит учитывать тот факт, что с целью миниатюризации конструкций ОК применяется подход не только уменьшения толщины ПЗП, но и уменьшения диаметра световода. В частности, компанией Fujikura Ltd. Было представлено ОВ с диаметром 80 мкм вместо 125 мкм и внешним диаметром по ПЗП, равным 160 мкм [125].

Уменьшения диаметра световода и ПЗП могут оказать влияние на проведение испытаний по определению одного из ключевых параметров ОВ, определяющих его срок службы – стойкость к коррозии в напряжённом состоянии. При проведении испытаний согласно [39] по методу Е применяются стержни, на которые наматываются образцы ОВ. В таблицах 2.17 – 2.19 приведены расчёты, позволяющие оценить изменение конструкции ОВ на проведение вышеуказанных испытаний.

Таблица 2.17 – Зависимость растяжения световода от диаметра изгиба оптического волокна с диаметром световода 125 мкм

D, мм	Растяжение световода, %		
	Диаметр первичного защитного покрытия 250 мкм	Диаметр первичного защитного покрытия 200 мкм	Диаметр первичного защитного покрытия 180 мкм
170,00 ¹	0,07	0,07	0,07
75,00 ²	0,17	0,17	0,17
62,25	0,20 ³	0,20 ³	0,20 ³
60,00 ⁴	0,21	0,21	0,21
36,50	0,34 ⁵	0,34 ⁵	0,34 ⁵
30,00 ^{2,4}	0,41	0,41	0,41
20,00 ⁴	0,62	0,62	0,62
15,00 ^{2,4}	0,82	0,82	0,82
12,25	1,00 ⁶	1,00 ⁶	1,00 ⁶
10,00 ^{4,7}	1,22	1,23	1,23
9,80	1,24	1,25	1,25
8,82	1,38	1,39	1,39
8,00 ⁷	1,52	1,52	1,53
6,00	2,00 ⁸	2,01 ⁶	2,02 ⁶
5,00 ⁹	2,38	2,40	2,41
3,10 ¹⁰	3,73	3,79	3,81
2,50 ¹¹	4,55	4,63	4,66

1 – Диаметр шейки поставочной катушки оптического волокна.
2 – Нормируемый изгиб согласно [26].
3 – Натяжение оптического волокна при изгибе равно 20 % от усилия при испытании перемоткой с натяжением, равном 1 % согласно [108].
4 – Нормируемый изгиб согласно [27].
5 – Натяжение оптического волокна при изгибе равно 17 % от усилия при испытании перемоткой с натяжением, равном 2 % согласно [108].
6 – Натяжение оптического волокна при испытании перемоткой с натяжением согласно [40].
7 – Изгиб оптического волокна внутри коннектора определённой конструкции.
8 – Натяжение оптического волокна при испытании перемоткой с натяжением при испытаниях оптического волокна повышенной прочности.
9 – Изгиб, указываемый одним из производителей оптического волокна в спецификации.
10 – Максимальный диаметр оправки для определения параметра усталостной прочности для оптического волокна со световодом диаметром 125 мкм и первичным защитным покрытием 250 мкм согласно [39] по методу E.
11 – Минимальный диаметр оправки для определения параметра усталостной прочности для оптического волокна со световодом диаметром 125 мкм и первичным защитным покрытием 250 мкм согласно [39] по методу E.

Таблица 2.18 – Зависимость растяжения первичного защитного покрытия от диаметра изгиба оптического волокна с диаметром световода 125 мкм

D, мм	Растяжение первичного защитного покрытия, %		
	Диаметр 250 мкм	Диаметр 200 мкм	Диаметр 180 мкм
170,00 ¹	0,15	0,12	0,11
75,00 ²	0,33	0,27	0,24
62,25	0,40	0,32	0,29
60,00 ⁴	0,41	0,33	0,30
36,50	0,68	0,54	0,49
30,00 ^{2,4}	0,83	0,66	0,60
20,00 ⁴	1,23	0,99	0,89
15,00 ^{2,4}	1,64	1,32	1,19
12,25	2,00	1,61	1,45
10,00 ^{4,7}	2,44	1,96	1,77
9,80	2,49	2,00	1,80
8,82	2,76	2,21	2,00
8,00 ⁷	3,03	2,44	2,20
6,00	4,00	3,23	2,91
5,00 ⁹	4,76	3,85	3,47
3,10 ¹⁰	7,46	6,06	5,49
2,50 ¹¹	9,09	7,41	6,72

1 – Диаметр шейки поставочной катушки оптического волокна.

2 – Нормируемый изгиб согласно [26].

3 – Натяжение оптического волокна при изгибе равно 20 % от усилия при испытании перемоткой с натяжением, равном 1 % согласно [108].

4 – Нормируемый изгиб согласно [27].

5 – Натяжение оптического волокна при изгибе равно 17 % от усилия при испытании перемоткой с натяжением, равном 2 % согласно [108].

6 – Натяжение оптического волокна при испытании перемоткой с натяжением согласно [40]

7 – Изгиб оптического волокна внутри коннектора определённой конструкции.

8 – Натяжение оптического волокна при испытании перемоткой с натяжением при испытаниях оптического волокна повышенной прочности.

9 – Изгиб, указываемый одним из производителей оптического волокна в спецификации.

10 – Максимальный диаметр оправки для определения параметра усталостной прочности для оптического волокна со световодом диаметром 125 мкм и первичным защитным покрытием 250 мкм согласно [39] по методу E.

11 – Минимальный диаметр оправки для определения параметра усталостной прочности для оптического волокна со световодом диаметром 125 мкм и первичным защитным покрытием 250 мкм согласно [39] по методу E.

Таблица 2.19 – Зависимость растяжения первичного защитного покрытия от диаметра изгиба оптического волокна с диаметром световода 80 мкм и диаметром по первичному защитному покрытию 160 мкм

D, мм	Растяжение световода, %	Растяжение первичного защитного покрытия, %
170,00 ¹	0,05	0,09
75,00 ²	0,11	0,21
60,00 ³	0,13	0,27
39,84	0,20 ⁴	0,40
30,00 ^{2,3}	0,27	0,53
23,37	0,34 ⁵	0,68
20,00 ³	0,40	0,79
15,00 ^{2,3}	0,53	1,06
10,00 ^{4,6}	0,79	1,57
8,00 ⁶	0,98	1,96
7,84	1,00 ⁷	2,00
5,00 ⁸	1,55	3,10
3,84	2,00 ⁹	4,00
3,10 ¹⁰	2,45	4,91
2,50 ¹¹	3,01	6,02

1 – Диаметр шейки поставочной катушки оптического волокна.
2 – Нормируемый изгиб согласно [26].
3 – Нормируемый изгиб согласно [27].
4 – Натяжение оптического волокна при изгибе равно 20 % от усилия при испытании перемоткой с натяжением, равном 1 % согласно [108].
5 – Натяжение оптического волокна при изгибе равно 17 % от усилия при испытании перемоткой с натяжением, равном 2 % согласно [108].
6 – Изгиб оптического волокна внутри коннектора определённой конструкции.
7 – Натяжение оптического волокна при испытании перемоткой с натяжением согласно [40]
8 – Изгиб, указываемый одним из производителей оптического волокна в спецификации.
9 – Натяжение оптического волокна при испытании перемоткой с натяжением при испытаниях оптического волокна повышенной прочности.
10 – Максимальный диаметр оправки для определения параметра усталостной прочности для оптического волокна со световодом диаметром 125 мкм и первичным защитным покрытием 250 мкм согласно [39] по методу E.
11 – Минимальный диаметр оправки для определения параметра усталостной прочности для оптического волокна со световодом диаметром 125 мкм и первичным защитным покрытием 250 мкм согласно [39] по методу E.

Как видно из таблицы 2.17, у ОВ со световодом диаметром 125 мкм изменение диаметра ПЗП с 250 мкм до 180 мкм не приводит к каким-либо значимым изменениям удлинения световода – все световоды достигают удлинения в 0,2 %, 0,34 %, 1 % и 2 % при радиусах изгиба 62,25 мм, 36,5 мм, 12,25 мм и 6 мм соответственно.

Уменьшение диаметра световода более значительно сказывается на растяжении световода – на меньших диаметрах изгиба световод испытывает меньшее растягивающее усилие. Например, при диаметре световода 125 мкм и диаметрами ПЗП от 180 мкм до 250 мкм, безопасный диаметр изгиба, при котором световод испытывает растяжение 0,2 % – 62,25 мм. В то время как для световода 80 мкм с диаметром ПЗП 160 мкм световод испытывает растяжение, равное 0,2 % при диаметре изгиба 39,84 мм.

Уменьшение диаметра ПЗП приводит к уменьшению безопасного диаметра изгиба ОВ, при котором ПЗП испытывает растяжение, не превышающее 2 %, с 12,25 мм (для ОВ с диаметром ПЗП 250 мкм) до 7,84 мм (для ОВ с диаметром ПЗП 160 мкм, см. таблицу 2.19). Но при таких диаметрах изгиба необходимо помнить, что световод растягивается выше критических значений (0,2 % или 0,34 %), т.е. необходимо соответствующим образом корректировать гарантийный срок службы ОВ.

Расчёт растягивающего усилия, действующего на ОВ, в зависимости от диаметра изгиба производился согласно [39]:

$$\sigma(D) = E_0 \varepsilon_{si} (1 + 2,25 \cdot \varepsilon_{si}) \quad (2.8)$$

Где E_0 – модуль Юнга кварца, равный 70,3 ГПа;

ε_{si} – относительное удлинение световода при изгибе на диаметр D и равно:

$$\varepsilon_{si} = \frac{d_{si}}{D + d_{ПЗП}} \quad (2.9)$$

Подставив (2.9) в (2.8), получим:

$$\sigma(D) = E_0 \frac{d_{si}}{D + d_{ПЗП}} \left(1 + 2,25 \frac{d_{si}}{D + d_{ПЗП}} \right) \quad (2.10)$$

В таблице 2.20 приведены значения растягивающих усилий, действующих на световод диаметром 125 мкм с диаметрами ПЗП 180 мкм, 200 мкм и 250 мкм, а также световод диаметром 80 мкм с диаметром ПЗП 160 мкм, при их намотке на стержни диаметрами 2,5 мм и 3,1 мм при испытаниях по определению стойкости к коррозии в напряжённом состоянии по методу Е согласно [39].

Таблица 2.20 – Растягивающие усилия с учётом разрешённого допуска (ГПа), воздействующие на световод, при их намотке на стержни диаметрами 2,5 мм и 3,1 мм

Диаметр стержня, мм	Диаметр световода / диаметр первичного защитного покрытия, мкм			
	125/250	125/200	125/180	80/160
3,1	2,843	2,890	2,908	1,820
2,5	3,522	3,594	3,623	2,257

Из таблиц 2.18 – 2.20 видно, что существенные изменения значений растягивающих усилий, воздействующих на световод при его намотке на оправку (стержень) возможны в первую очередь при изменении диаметра световода.

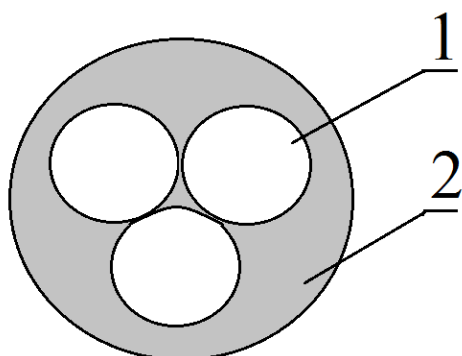
2.5.2. Исследование влияния уменьшения диаметра отверждаемого ультрафиолетом первичного защитного покрытия на характеристики кварцевого оптического волокна, применяемого в оптических микрокабелях с плотным вторичным полимерным защитным покрытием

С целью оценки влияния характеристик ОВ с уменьшенным диаметром ПЗП на свойства ОК были проведены сравнительные испытания ОК различных конструкций, содержащих ОВ с ПЗП диаметром 250 мкм и 200 мкм. Испытаниям ОК модульной конструкции посвящён раздел 2.5.3. В настоящем разделе, в таблице 2.21, приведены результаты сравнительных испытаний микрокабелей с плотным вторичным полимерным защитным покрытием, конструкция которых приведена на рисунке 2.10.

Образец 1 – микрокабель, содержащий ОВ с диаметром ПЗП 250 мкм;

Образец 2 – микрокабель, содержащий ОВ с диаметром ПЗП 200 мкм.

Деформация ОВ внутри оптических микрокабелей измерялась с помощью бриллюэновского анализатора.



1 – Оптическое волокно с первичным защитным покрытием из акрилата, отверждаемого ультрафиолетом, диаметром 250 мкм или 200 мкм

2 – Плотное буферное покрытие из акрилата, отверждаемого ультрафиолетом

Рисунок 2.10 – Конструкция микрокабелей с плотным вторичным полимерным защитным покрытием

Таблица 2.21 – Результаты сравнительных испытаний оптических микрокабелей, содержащих в своей конструкции оптические волокна с первичным защитным покрытием 250 мкм и 200 мкм

Параметр	Образец 1	Образец 2
1	2	3
Масса, кг/км	0,652	0,362
Внешний диаметр, мм	0,8	0,6
Максимальная длина на поставочной катушке, км	13,6	25,0
Прирост оптических потерь при растягивающем усилии 20 Н на длинах волн 1310 нм /1550 нм, дБ*	<u>При воздействии нагрузки</u>	<u>При воздействии нагрузки</u>
	0,02/0,06	0,02/0,15
	<u>После снятия нагрузки</u>	<u>После снятия нагрузки</u>
	0,02/0,03	0,05/0,07
Разрывное усилие, Н	210	215

Продолжение таблицы 2.21

1	2	3
<p>Коэффициент затухания при воздействии предельной повышенной температуры 70 °С на длинах волн 1310 нм 1550 нм, дБ/км</p>	<p><u>До испытания</u> ОВ1: 0,338/0,188 ОВ2: 0,333/0,179 ОВ3: 0,334/0,181 <u>Во время испытания</u> ОВ1: 0,339/0,182 ОВ2: 0,337/0,173 ОВ3: 0,337/0,182 <u>После испытания</u> ОВ1: 0,344/0,182 ОВ2: 0,334/0,179 ОВ3: 0,332/0,184</p>	<p><u>До испытания</u> ОВ1: 0,331/0,181 ОВ2: 0,335/0,185 ОВ3: 0,329/0,186 <u>Во время испытания</u> ОВ1: 0,336/0,183 ОВ2: 0,333/0,183 ОВ3: 0,331/0,179 <u>После испытания</u> ОВ1: 0,332/0,185 ОВ2: 0,332/0,179 ОВ3: 0,327/0,181</p>
<p>Коэффициент затухания при воздействии пониженных температур, дБ/км</p>	<p><u>До испытания</u> ОВ1: 0,366/0,184 ОВ2: 0,340/0,184 ОВ3: 0,339/0,191 <u>При минус 40 °С</u> ОВ1: 0,309/0,183 ОВ2: 0,320/0,176 ОВ3: 0,321/0,182 <u>При минус 50 °С</u> ОВ1: 0,322/0,192 ОВ2: 0,337/0,191 ОВ3: 0,328/0,187 <u>При минус 65 °С</u> ОВ1: 0,478/0,350 ОВ2: 0,443/0,334 ОВ3: 0,361/0,236 <u>После испытания</u> ОВ1: 0,328/0,185 ОВ2: 0,328/0,180 ОВ3: 0,322/0,181</p>	<p><u>До испытания</u> ОВ1: 0,331/0,183 ОВ2: 0,344/0,201 ОВ3: 0,339/0,175 <u>При минус 40 °С</u> ОВ1: 0,344/0,196 ОВ2: 0,347/0,199 ОВ3: 0,340/0,190 <u>При минус 50 °С</u> ОВ1: 0,316/0,193 ОВ2: 0,332/0,195 ОВ3: 0,344/0,211 <u>При минус 65 °С</u> ОВ1: 0,397/0,294 ОВ2: 0,399/0,257 ОВ3: 0,405/0,288 <u>После испытания</u> ОВ1: 0,316/0,180 ОВ2: 0,338/0,188 ОВ3: 0,323/0,191</p>

Продолжение таблицы 2.21

1	2	3
Деформация при воздействии пониженных температур, %	<u>До испытания</u>	<u>До испытания</u>
	ОВ1: 0,000	ОВ1: 0,000
	ОВ2: 0,000	ОВ2: 0,000
	ОВ3: 0,000	ОВ3: 0,000
	<u>При минус 40 °С</u>	<u>При минус 40 °С</u>
	ОВ1: -0,091	ОВ1: -0,045
	ОВ2: -0,085	ОВ2: -0,049
	ОВ3: -0,090	ОВ3: -0,065
	<u>При минус 50 °С</u>	<u>При минус 50 °С</u>
	ОВ1: -0,109	ОВ1: -0,052
	ОВ2: -0,099	ОВ2: -0,056
	ОВ3: -0,117	ОВ3: -0,070
	<u>При минус 65 °С</u>	<u>При минус 65 °С</u>
	ОВ1: -0,143	ОВ1: -0,073
	ОВ2: -0,132	ОВ2: -0,092
	ОВ3: -0,150	ОВ3: -0,098
<u>После испытания</u>	<u>После испытания</u>	
ОВ1: 0,002	ОВ1: -0,002	
ОВ2: 0,006	ОВ2: -0,009	
ОВ3: -0,007	ОВ3: -0,007	
* Норма прироста оптических потерь при воздействии растягивающего усилия согласно нормативной документации на оптический микрокабель составляет не более 0,15 дБ.		

Как видно из представленных результатов, приведённых в таблице 2.21, образец 1 более подвержен влиянию отрицательных температур, чем образец 2, о чем свидетельствует большая деформация образца 1, приводящая к увеличенному по сравнению с образцом 2, приросту значений коэффициента затуханий вследствие микроизгибов световода, возникающих из-за разницы ТКЛР кварца, из которого состоит световод, и полимера, из которого состоит ПЗП и плотное буферное покрытие.

Основное различие между образцами 1 и 2 заключается в толщине ПЗП, площадь поперечного сечения которого в образце 1 в 1,9 раза больше, чем в образце 2 и составляет $1,335 \text{ мм}^2$ против $0,707 \text{ мм}^2$, в то время как площадь кварцевых световодов у двух образцов равна ($1,335 \text{ мм}^2$). Т.е. на один и тот же объём световодов, полимерные покрытия образца микрокабеля внешним диаметром 0,9 мм (с ОВ диаметром ПЗП 250 мкм), при воздействии отрицательных температур оказывают большее негативное воздействие, чем на образец микрокабеля внешним диаметром 0,6 мм (с ОВ диаметром ПЗП 250 мкм).

Данное предположение, а также тот факт что, образец 2 обладает меньшими массой и диаметром, что позволяет разместить на одинаковой таре большую строительную длину, приводит к выводу, что для рассматриваемой конструкции микрокабеля (см. рисунок 2.10), оптимальным является применение ОВ с ПЗП диаметром 200 мкм.

2.5.3. Исследование влияния уменьшения диаметра отверждаемого ультрафиолетом первичного защитного покрытия на характеристики кварцевого оптического волокна, применяемого в оптических кабелях модульной конструкции

Влияние уменьшения диаметра ПЗП на свойства ОК модульной конструкции было оценено в процессе производства и испытаний образца кабеля, конструкция которого приведена на рисунке 2.11. Образец ОК имеет разное число ОВ в каждом ОМ:

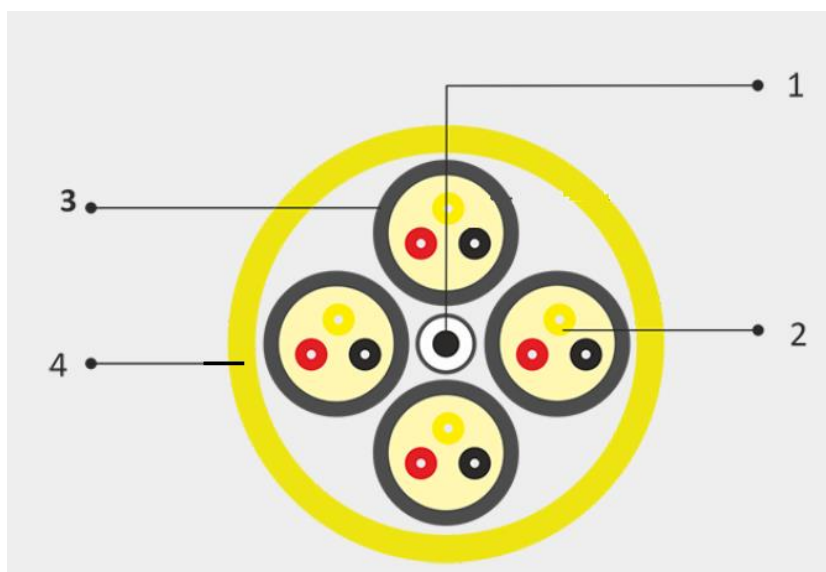
- ОМ1, содержащий 8 ОВ с ПЗП диаметром 250 мкм;
- ОМ2, содержащий 12 ОВ с ПЗП диаметром 200 мкм;
- ОМ3, содержащий 4 ОВ с ПЗП диаметром 250 мкм;

- ОМ4, содержащий 6 ОВ с ПЗП диаметром 200 мкм.

Число ОВ с диаметром ПЗП 250 мкм в ОМ подбиралось исходя из практики заполнения ОМ, применяемой на заводе АО «Электропровод». Для ОМ с внутренним диаметром 1,1 мм в конструкциях самонесущих ОК размещаются 4 ОВ, в конструкциях ОК, прокладываемых в землю или кабельную канализацию – от 6 до 8 ОВ. Для оценки допустимого количества ОВ с ПЗП диаметром 200 мкм в ОМ применялся следующий подход:

- рассчитывалась суммарная площадь ОВ с ПЗП диаметром 250 мкм в ОМ 1 и ОМ 3;
- исходя из полученных значений, площадей, подбиралось количество ОВ с ПЗП диаметром 200 мкм для ОМ 2 и ОМ 4 с учётом того, что ОВ с ПЗП диаметром 200 мкм должны занимать тот же объём внутреннего пространства ОМ, что и ОВ с ПЗП 250 мкм.

Измерения коэффициента затухания и деформации производились до, во время и после испытаний образца ОК на стойкость к воздействиям повышенной и пониженной температуры окружающей среды. Деформация ОВ определялась с помощью бриллюэновского анализатора. Результаты приведены в таблицах 2.22 и 2.23, а также на рисунках 2.12 — 2.14.



1. Центральный силовой элемент;
2. Оптические волокна категории G.657A1/G.652D;
3. Оптический модуль (ОМ) внутренним диаметром 1,1 мм;
4. Внешняя оболочка из полимерного материала

Рисунок 2.11 — Конструкция экспериментального кабеля модульной конструкции

Таблица 2.22 – Значения коэффициента затухания на длинах волн 1310 нм / 1550 нм в ходе испытаний оптического кабеля, содержащего в своей конструкции оптические модули с волокнами с первичным защитным покрытием 250 мкм и 200 мкм на воздействие температурных циклов от минус 60 °С до 85 °С

Температура, °С	Количество оптических волокон, шт. / диаметр первичного защитного покрытия, мм, в оптическом модуле							
	4 ОВ / 250		6 ОВ / 200		8 ОВ / 250		12 ОВ / 200	
	1310 нм	1550 нм	1310 нм	1550 нм	1310 нм	1550 нм	1310 нм	1550 нм
85	0,354	0,192	0,386	0,227	0,362	0,259	0,375	0,222
23	0,366	0,210	0,371	0,222	0,367	0,266	0,380	0,238
0	0,363	0,211	0,372	0,229	0,368	0,275	0,399	0,306
-20	0,357	0,193	0,396	0,257	0,367	0,399	0,431	0,670
-30	0,339	0,187	0,397	0,321	0,365	0,747	0,458	1,847
-40	0,351	0,202	0,434	1,833	0,398	3,751	0,600	10,275
-50	0,362	0,202	0,747	6,760	0,571	21,706	1,333	34,055

Таблица 2.23 — Значения деформации в ходе испытаний оптического кабеля, содержащего в своей конструкции оптические модули с волокнами с первичным защитным покрытием 250 мкм и 200 мкм на воздействие температурных циклов от минус 60 °С до 85 °С

Температура, °С	Количество оптических волокон, шт. / диаметр первичного защитного покрытия, мм, в оптическом модуле			
	4 ОВ / 250	6 ОВ / 200	8 ОВ / 250	12 ОВ / 200
85	0,130	0,130	0,130	0,130
23	0,000	0,000	0,000	0,000
0	-0,055	-0,082	-0,067	-0,074
-20	-0,103	-0,111	-0,143	-0,138
-30	-0,125	-0,140	-0,169	-0,400
-40	-0,153	-0,183	-0,400	-0,400
-50	-0,178	-0,400	-0,400	-0,400

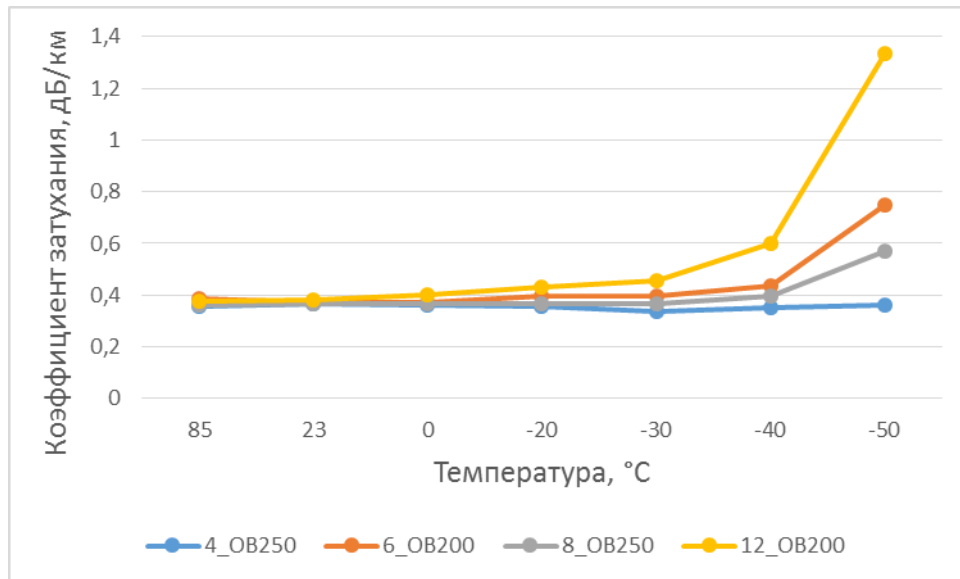


Рисунок 2.12 — Графики зависимости коэффициента затухания на длине 1310 нм в экспериментальном кабеле от температуры

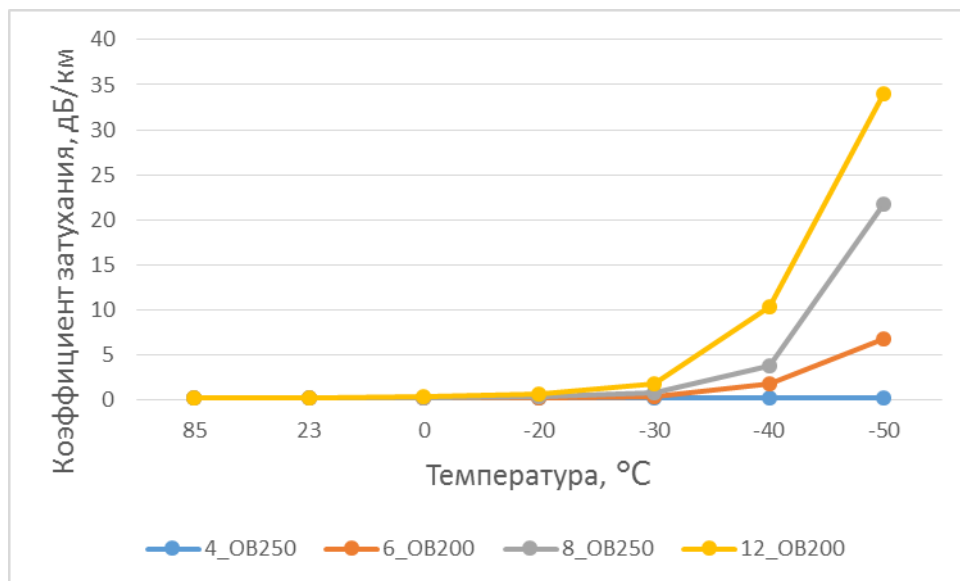


Рисунок 2.13 — Графики зависимости коэффициента затухания на длине 1550 нм в экспериментальном кабеле от температуры

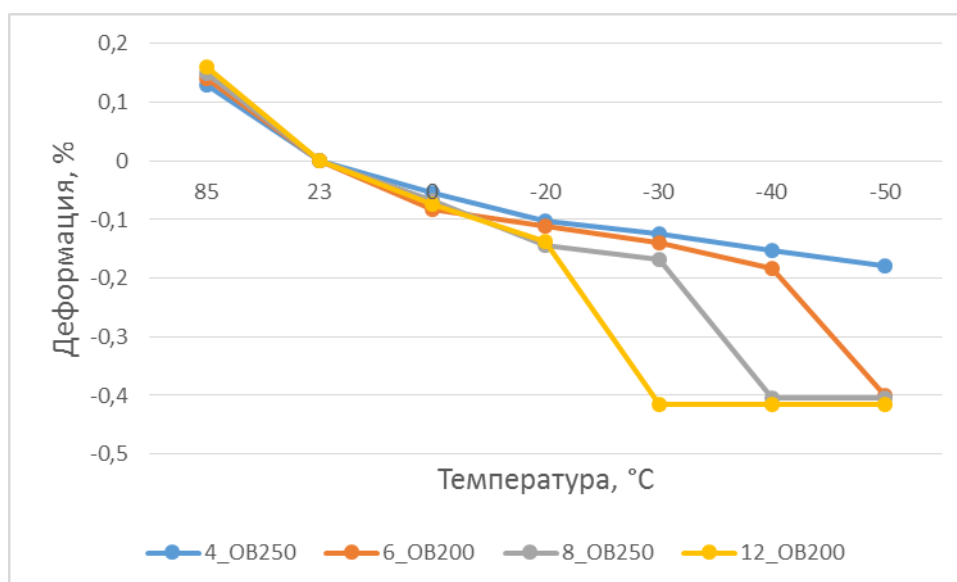


Рисунок 2.14 — Графики зависимости деформации в экспериментальном кабеле от температуры

Сравнивая попарно (4_ОВ250 с 6_ОВ200 и 8_ОВ250 с 12_ОВ200) полученные зависимости коэффициентов затухания на длинах волн 1310 нм и 1550 нм для ОВ в различных ОМ экспериментального кабеля можно сделать предположение, что ОВ с ПЗП диаметром 250 мкм несколько лучше ОВ с ПЗП диаметром 200 мкм — ОМ, содержащий 4 ОВ с ПЗП диаметром 250 мкм практически не испытывает деформаций, следствием чего является колебание значений коэффициента затухания в пределах погрешности измерений, которая согласно ГОСТ Р 52266 для одномодовых ОВ составляет 0,05 дБ/км. ОМ, содержащий 6 ОВ с ПЗП диаметром 200 мкм, имеет прирост значений коэффициента затухания, превышающий пороговое значение (0,05 дБ/км), при воздействии температур от минус 40 °C на длине волны 1310 нм и минус 30 °C — на 1550 нм. ОМ, содержащий 8 ОВ с ПЗП диаметром 250 мкм, имеет прирост значений коэффициента затухания, превышающий 0,05 дБ/км, при воздействии температур от минус 20 °C на длине волны 1550 нм и минус 50 °C — на 1310 нм. ОМ, содержащий 12 ОВ с ПЗП диаметром 200 мкм, имеет прирост значений коэффициента затухания, превышающий 0,05

дБ/км, при воздействии температур от 0 °С на длине волны 1550 нм и минус 20 °С — на 1310 нм.

Однако, сравнение всех результатов измерений коэффициентов затухания ОВ во всех четырёх модулях экспериментального ОК, скорее свидетельствует о зависимости прироста оптических потерь (значения коэффициента затухания) от количества ОВ в ОМ, нежели от значения толщины (диаметра) ПЗП. Об этом же может свидетельствовать и результаты зависимостей деформации от воздействия температур — ОМ, содержащий 4 ОВ диаметром 200 мкм, не подвергается критическим воздействиям в 0,2 %. ОМ, содержащий 6 ОВ 200 мкм испытывает критические воздействия при температуре от минус 50 °С, ОМ с 8 ОВ диаметром 250 мкм — минус 40 °С, ОМ с 12 ОВ диаметром 200 мкм — минус 30 °С.

Результаты исследования ОВ и кабелей на их основе приведены автором данной диссертации в работе [126].

2.6. Выводы по главе 2

1. Степень полимеризации ПЗП влияет на срок службы ОВ, особенно в присутствии влаги. Значение параметра n (стойкости к коррозии в напряжённом состоянии) ОВ с ПЗП с низкой степенью полимеризации после испытания влажным теплом значительно ниже ОВ, ПЗП которого имеет степень полимеризации не менее 90 %, что свидетельствует о гораздо большей вероятности обрыва ОВ с низкой степенью полимеризации ПЗП.

2. Осуществлён выбор технологического режима для производства ОВ с применением композиций Квант-408 и Квант-409, обеспечивающие необходимую степень полимеризации ПЗП на скоростях до 95 м/мин. Оформлен акт об использовании результатов диссертационной работы (Приложение А).

3. Уменьшение диаметра ПЗП не приводит к ухудшению механических и передаточных характеристики ОВ.

4. ПЗП диаметром 200 мкм в конструкциях кабелей с применением внутримодульного гидрофобного заполнителя или ВБ материалов более подвержено деградации механических характеристик, особенно при длительном воздействии повышенных температур, по сравнению с ПЗП диаметром 250 мкм.

5. ОВ с диаметром ПЗП 200 мкм позволяют конструировать оптические микрокабели обладающие лучшими массогабаритными характеристиками, а также менее подверженными воздействию отрицательных температур, результатом исследований в этой области является патент [127] на оптический микрокабель.

6. При применении ОВ с ПЗП диаметром 200 мкм и 250 мкм в ОК модульной конструкции с идентичным значением заполняемости ОМ, не было выявлено различий в передаточных характеристиках ОВ, связанных с разницей в диаметрах ПЗП. Различия в характеристиках были обусловлены количеством ОВ в ОМ.

3. Оценка технологии наложения буферных покрытий на основе композиций, отверждаемых ультрафиолетом, при изготовлении микрокабеля

В настоящее время с целью удовлетворения спроса на растущий объём передаваемой информации активно применяются оптические микрокабели, которые позволяют передать больше информации в пересчёте на единицу занимаемой кабелем площади. Оптические микрокабели находят применение в сетях доступа, где компактность кабелей является одним из основных требований ввиду ограниченного места, выделяемого под их прокладку. Нашёл данный тип ОК широкое применение и в области специальной техники (авиация, космос, военная промышленность и пр.) [128].

На рисунке 2.10 приведена конструкция одного из микрокабелей, разработанного с участием автора, внешняя оболочка которого изготовлена из УФ-отверждаемой акриловой композиции для плотного буферного (вторичного) покрытия ОВ [127]. Ввиду того, что УФ-отверждаемые акриловые композиции для второго (внешнего) слоя ПЗП и УФ-отверждаемые акриловые композиции для плотного буферного покрытия ОВ выполняют схожие функции – защищают кварцевый световод от внешних воздействий, а также по причине отсутствия отечественной композиции для изготовления плотного буферного покрытия, было принято решение провести апробацию разработанной композиции для второго слоя ПЗП марки Квант-409 при изготовлении упомянутого оптического микрокабеля.

Наложение плотного буферного покрытия, как из отечественных композиций, так и из импортных, осуществлялось на одном и том же технологическом оборудовании с применением идентичных производственных режимов, приведённых в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры технологического процесса наложения буферного покрытия

Параметр	Значение
Рабочая скорость линии, м/мин	50
Температура воды в охлаждающей ванне, °С	30
Давление, бар	80/80
Натяжение отдатчика, Н	1,0
Натяжение приёмника, Н	0,8
Диаметр, мм	0,90...0,95

Образцы, которые подвергались испытанию, представляют собой две бухты оптических микрокабелей длиной 1 км, диаметром 0,9 мм. Плотное буферное покрытие первого образца было изготовлено из композиции Квант-409, второго образца – из импортной композиции фирмы DSM марки Cablelite 3287-9-41.

Результаты испытаний оптических микрокабелей, приведённые в таблице 3.2, в ходе которых измерялся коэффициент затухания и его прирост при влиянии отрицательных температур, показали соответствие микрокабелей как с буферным покрытием из отечественных УФ-отверждаемых композиций на основе акрилатов, так и из импортных, требованиям заказчика. Также, посредством бриллюэновского анализатора измерялась деформация, которой подвергаются ОВ вследствие разницы ТКЛР кварцевых световодов и полимерных покрытий (ПЗП и плотного буферного покрытия). Необходимо учесть, что в образце с буферным покрытием из отечественной композиции для исследовательских целей было заложено многомодовое ОВ, на которое не распространяется требование заказчика к приросту затухания.

Таблица 3.2 – Результаты испытаний оптических микрокабелей

Температура, °С	время воздействия, ч	Коэффициент затухания на длине волны 1310 нм / 1550 нм, дБ/км			Деформация, %	
		Образец с отечественным буферным покрытием	Образец с импортным буферным покрытием	Требования нормативной документации на микрокабель, не более	Образец с отечественным буферным покрытием	Образец с импортным буферным покрытием
НКУ	2	ОВ1: 0,345/0,214 ОВ2: 0,358/0,252 ОВ3*: 2,617/0,703	ОВ1: 0,366/0,184 ОВ2: 0,340/0,184 ОВ3: 0,339/0,191	2	ОВ1: 0,000 ОВ2: 0,000 ОВ3*: -	ОВ1: 0,000 ОВ2: 0,000 ОВ3: 0,000
-40	2	ОВ1: 0,404/0,383 ОВ2: 0,378/0,376 ОВ3*: 3,024/1,102	ОВ1: 0,309/0,183 ОВ2: 0,320/0,176 ОВ3: 0,321/0,182	4	ОВ1: -0,180 ОВ2: -0,145 ОВ3*: -	ОВ1: -0,091 ОВ2: -0,085 ОВ3: -0,090
-50	2	ОВ1: 0,602/0,730 ОВ2: 0,550/0,726 ОВ3*: 3,846/1,927	ОВ1: 0,322/0,192 ОВ2: 0,337/0,191 ОВ3: 0,328/0,187	4	ОВ1: -0,210 ОВ2: -0,170 ОВ3*: -	ОВ1: -0,109 ОВ2: -0,099 ОВ3: -0,117
-65	2	ОВ1: 0,523/0,564 ОВ2: 0,538/0,560 ОВ3*: 5,601/3,773	ОВ1: 0,478/0,350 ОВ2: 0,443/0,334 ОВ3: 0,361/0,236	4	ОВ1: -0,246 ОВ2: -0,197 ОВ3*: -	ОВ1: -0,143 ОВ2: -0,132 ОВ3: -0,150
НКУ	18	ОВ1: 0,327/0,195 ОВ2: 0,340/0,235 ОВ3*: 2,566/0,669	ОВ1: 0,328/0,185 ОВ2: 0,328/0,180 ОВ3: 0,322/0,181	4	ОВ1: 0,004 ОВ2: 0,015 ОВ3*: -	ОВ1: 0,002 ОВ2: 0,006 ОВ3: -0,007

* Многомодовое ОВ. Измерения проводились на длинах волн 850 нм и 1300 нм.

Вместе с тем, видно, что оптические микрокабели с буферным покрытием из импортных композиций обладают значительно меньшим приростом коэффициента затухания при отрицательных температурах. Прирост значений коэффициента затухания обусловлен большей деформацией буферного покрытия из отечественной композиции по сравнению с импортной, что видно из данных таблицы 3.2. При температуре минус 50 °С деформация образца с буферным покрытием из отечественной композиции выходит за 0,2 % – значение, при котором, согласно расчётам [91], кабель с вероятностью 99 % прослужит не менее 25 лет, в то время как максимальная деформация образца с буферным покрытием из импортной композиции не превышала 0,15 % при температуре минус 65 °С.

Столь большая разница в результатах испытаний обусловлена тем, что по причине отсутствия отечественных аналогов (как уже говорилось выше), была применена композиция, изначально не предназначавшаяся для наложения в качестве буферного покрытия.

Рассматриваемая отечественная композиция может применяться в роли плотного буферного покрытия только в ОВ и тех конструкциях оптических микрокабелей, где нет жёстких требований по приросту оптических потерь при отрицательных температурах и (или) срок службы менее 20 лет. Необходима доработка отечественной композиции или разработка новой для обеспечения возможности её применения в микрокабелях, эксплуатирующихся при отрицательных температурах окружающей среды [128], особенно это касается длительной эксплуатации – превышающий срок в 20 лет.

Сравнивая характеристики композиций для мягкого первого слоя ПЗП (таблица 3.3), жёсткого второго слоя ПЗП и для плотного буферного (вторичного) покрытия, можно сделать вывод, что по своим механическим свойствам композиция для плотного буферного покрытия находится между первыми двумя, а по плотности ближе к композиции для первого слоя ПЗП.

Т.е. с целью создания оптимального отечественного аналога импортной композиции для плотного буферного покрытия необходимо, скорректировать следующие параметры:

- уменьшить предел прочности при растяжении;
- увеличить относительное удлинение при разрыве
- значительно уменьшить модуль упругости.

Выводы по главе 3

Рассматриваемая отечественная композиция может применяться в роли плотного буферного покрытия только в ОВ и тех конструкциях оптических микрокабелей, где нет жёстких требований по приросту оптических потерь при отрицательных температурах и (или) срок службы менее 20 лет.

Таблица 3.3 – Сравнение характеристик композиций для первого слоя первичного защитного покрытия, второго слоя первичного защитного покрытия (Квант-409) и плотного буферного покрытия

Характеристика	Композиции для первого слоя первичного защитного покрытия		Квант-409		Cablelite 3287-9-41	
	Нормируемое значение	Измеренное значение	Нормируемое значение	Измеренное значение	Нормируемое значение	Измеренное значение
Динамическая вязкость при 25 °С, МПа·с	3600...5500	5090	5250...6750	6430	8000...12000	8952
Плотность при 23 °С, г/см ³	0,9...1,2	1,052	0,9...1,2	1,124	-	1,08
Предел прочности при растяжении, МПа	≤ 2,5	1,4	≥ 20	25	≥ 3	16
Относительное удлинение при разрыве, %	≥ 60	120	≥ 5	12	≥ 20	72
Модуль упругости при растяжении при относительной деформации 2,5 %, МПа	1,0...3,0	1,2	≥ 300	405	20...55	30

4. Исследование влияния гидрофобных заполнителей и водонабухающих материалов, применяемых в кабельных конструкциях, на характеристики оптического волокна

4.1. Исследование совместимости оптического волокна с двухслойным первичным защитным покрытием с внутримодульным гидрофобным заполнителем

С целью выбора оптимального метода испытаний на совместимость с гидрофобным заполнителем были сформированы три группы образцов:

- Метод А – образец ОВ в составе ОК (эталонный метод);
- Метод В – образец ОВ в ёмкости с внутримодульным гидрофобным заполнителем;
- Метод С – образец ОВ, на поверхность которого тонким слоем нанесён внутримодульный гидрофобный заполнитель.

Все три группы образцов размещались в климатической камере и выдерживались при температуре 85 °С в течение 30 дней. Образцы группы 3 размещались в климатической камере вертикально.

После анализа нормативной базы [47, 48, 52, 57] были установлены следующие критерии годности:

1. Максимальное значение усилия снятия ПЗП с отрезка ОВ 30 ± 3 мм до и после испытаний должно лежать в диапазоне от 1,0 Н до 8,9 Н,
2. Среднее значение усилия снятия ПЗП с отрезка ОВ 30 ± 3 мм до и после испытаний должно лежать в диапазоне от 1,0 Н до 5,0 Н;
3. До и после проведения испытаний при 5-кратном увеличении ПЗП не должно иметь трещин, разрывов или деламинации [58].

Результаты сравнительных испытаний приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты сравнительных испытаний по определению совместимости оптического волокна с акриловым первичным защитным покрытием с внутримодульным гидрофобным наполнителем

Характеристики	До испытаний	Метод А (Кабель)	Метод В (Ёмкость)	Метод С (Смачивание)	Норма по нормативной документации
Усилие снятия первичного защитного покрытия, Н					
- среднее / стандартное отклонение	1,36 / 0,03	1,04 / 0,04	1,01 / 0,03	1,56 / 0,25	1,0...5,0 / -
- максимальное / стандартное отклонение	1,54 / 0,04	1,18 / 0,04	1,10 / 0,04	1,76 / 0,27	1,0...8,9 / -
Наличие трещин, разрывов, деламинации	отсутствуют	отсутствуют	отсутствуют	отсутствуют	отсутствуют

Как видно из таблицы, результаты группы образцов 2 (Метод В) схожи с результатами, полученными при испытаниях эталонной группы 1 (Метод А), в то время как результаты испытаний в группе 3 (Метод С) несопоставимы с эталонными и имеют гораздо большее стандартное отклонение.

Помимо этого, во время испытаний по методу С необходимо было дополнительно наносить внутримодульный гидрофобный наполнитель каждые 15 дней ввиду испарения гидрофобного наполнителя, что приводило к необходимости открытия двери климатической камеры и, как следствие, нарушению температурного режима испытаний. По окончании испытания по

методу С на образцах ОВ имелись остатки запекшегося внутримодульного гидрофобного заполнителя, удаление которого требовало усилий.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод о неприменимости метода С – нанесения тонкого слоя гидрофобного заполнителя на образцы ОВ и о допустимости замены эталонного метода А методом В ввиду полученной сходимости результатов между данными методами.

С целью проверки правильности сделанного выбора был проведён термогравиметрический (ТГА) анализ образцов ОВ, после их испытания в соответствии со всеми тремя методами А, В и С. Результаты приведены на рисунке 4.1.

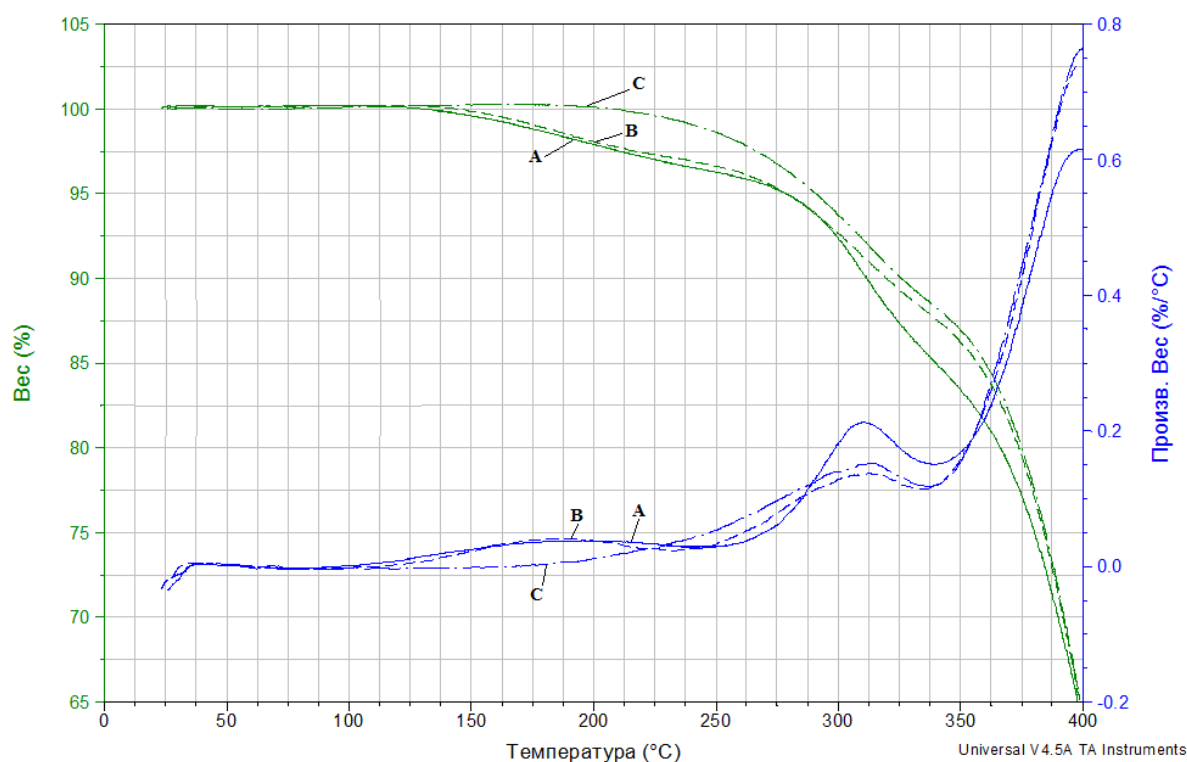


Рисунок 4.1 – ТГА-анализ образцов после их испытания по методам А, В и С

ТГА-анализ также показал, что метод В ближе к эталонному методу, нежели метод С, о чём свидетельствуют практически совпадающие графики образцов, испытанных по методам А и В, вплоть до температур приближающихся к 300 °С,

в то время как график образца, испытанного по методу С, сильно отличается от двух этих кривых.

Полученные результаты испытаний позволяют сделать следующие выводы:

Метод В – испытание погружением образца ОВ в ёмкость с гидрофобным наполнителем, наиболее близко к эталонному методу А – испытанию образца ОВ в составе ОК.

Для проведения испытаний методом В требуется лишь ОВ и внутримодульный гидрофобный наполнитель, что даёт возможность экономии средств и времени, требующихся на изготовление ОК или элементов его конструкции.

В ходе апробации методики (метода В) было установлено влияние отклонения от процедуры испытаний посредством снятия остатков внутримодульного гидрофобного наполнителя с образца спиртом или специальной жидкости для снятия гидрофобного наполнителя (D-Gel), доступной на рынке, вместо безворсовой ветоши. Установлено, что отклонение от процедуры испытаний приводило к существенной разнице в получаемых результатах испытаний (рисунки 4.2 – 4.5) [7].

На рисунке 4.2 виден характерный пик в районе 317 °С, который отсутствует на рисунке 4.3, что свидетельствует об изменении структуры материала вследствие воздействия на него жидкости для снятия гидрофобного наполнителя (D-Gel). В то же самое время на рисунке 4.4, и 4.5 характерный пик присутствует как до испытаний, так и после испытаний, что свидетельствует о том, что для получения корректных воспроизводимых результатов испытаний допускается остатки гидрофобного наполнителя удалять исключительно безворсовой ветошью.

Основываясь на полученных результатах, методы А и В были включены в разработанную автором методику [120], вошедшую в ГОСТ Р 52266-2020 [116].

Разработанная методика [120] применялась для оценки качества разработанных композиций ПЗП Квант-408 и Квант-409 и для оценки влияния уменьшения диаметра ПЗП на свойства ОВ. Результаты приведены в таблицах 2.6 и 2.15, разделы 2.2 и 2.5.1 соответственно.

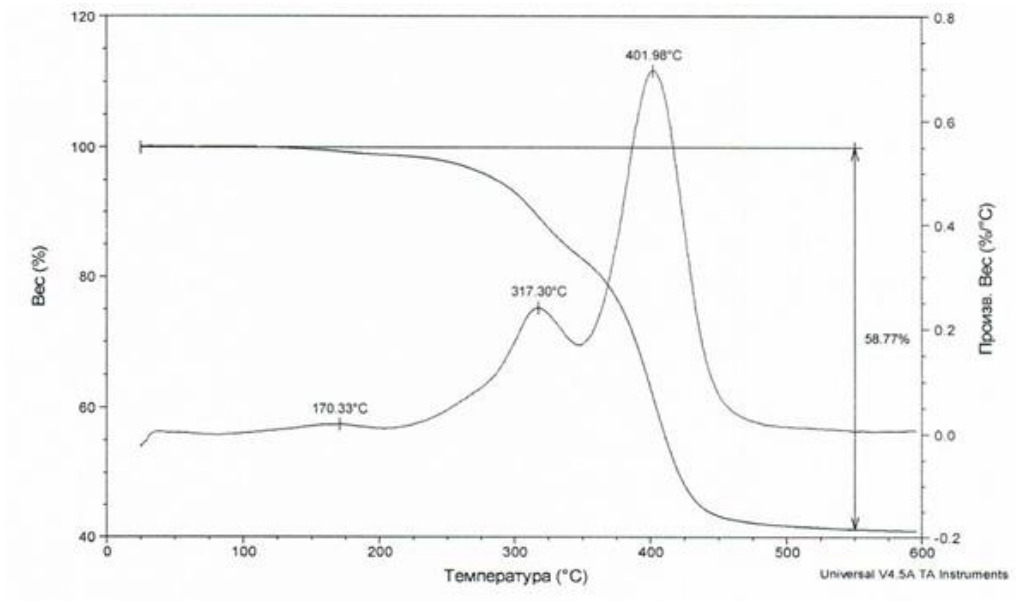


Рисунок 4.2 – Термогравиметрический анализ образца 1 до испытания по методу В

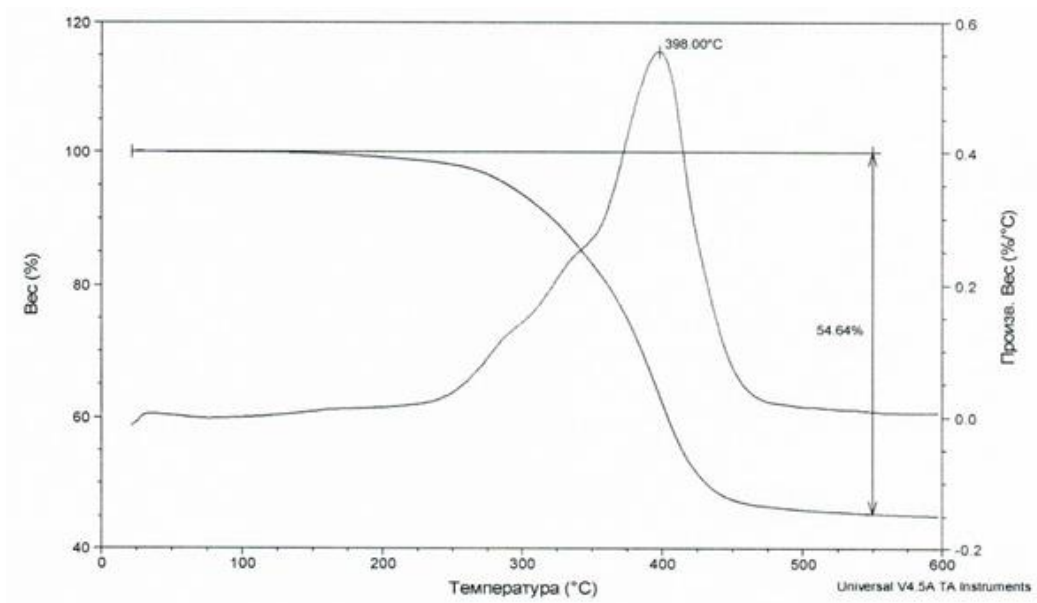


Рисунок 4.3 – Термогравиметрический анализ образца 1 после испытания по методу В и удаления остатков гидрофобного наполнителя жидкостью D-Gel

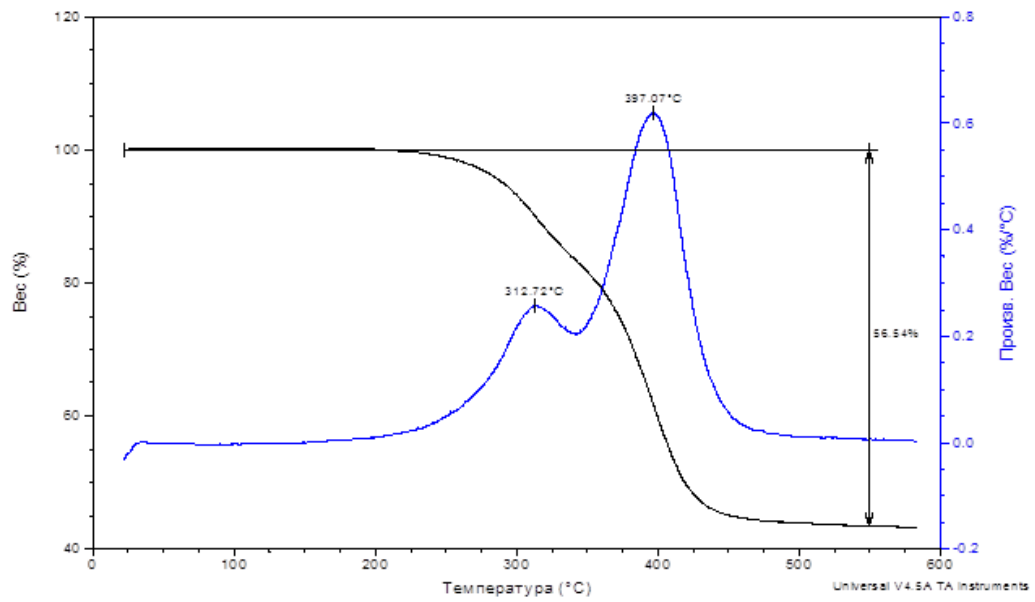


Рисунок 4.4 – Термогравиметрический анализ образца 2 до испытания по методу В

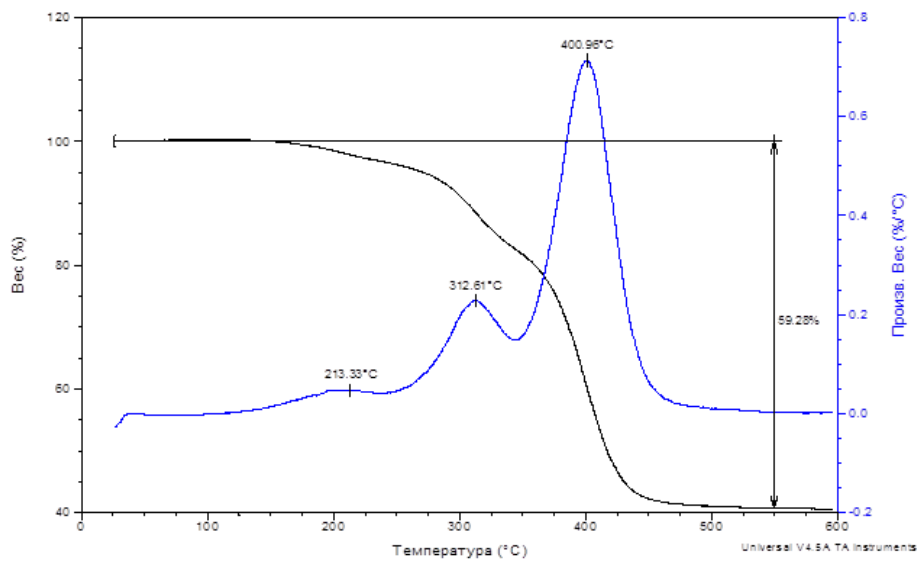


Рисунок 4.5 – Термогравиметрический анализ образца 2 после испытания по методу В и удаления остатков гидрофобного наполнителя безворсовой ветошью

4.2. Исследование совместимости оптического волокна с двухслойным первичным защитным покрытием с водонабухающими материалами

С целью ответа на поставленные в подразделе 1.7.3 вопросы, относящиеся к совместимости ПЗП с водоблокирующими материалами, были отобраны группы образцов ОВ с диаметром ПЗП 200 мкм и 250 мкм, которые выдерживали в стеклянной ёмкости при температуре 85 °С в следующих условиях:

- с влажным водоблокирующим порошком;
- с сухим водоблокирующим порошком;
- с влажной водоблокирующей лентой;
- с сухой водоблокирующей лентой;
- без воздействия водонабухающих элементов.

Аналогичные испытания были проведены в НКУ для другой группы образцов ОВ, отобранных с тех же катушек.

Образцы подвергались испытаниям по определению усилия снятия ПЗП согласно [30] после 30 и 45 дней выдержки.

Результаты испытаний приведены в таблицах 4.2 и 4.3.

Таблица 4.2 – Усилие снятия первичного защитного покрытия (среднее / максимальное) после испытания на совместимость с водонабухающими элементами после выдержки при 85 °С

Среда, в которую помещён образец	Усилие снятия ПЗП, Н среднее /максимальное			
	200 мкм		250 мкм	
	30 дней	45 дней	30 дней	45 дней
1	2	3	4	5
Порошок мокрый	0,928 / 1,147	0,850 / 0,984	1,203 / 1,299	1,089 / 1,162
Порошок сухой	1,252 / 1,343	1,105 / 1,218	1,335 / 1,410	1,261 / 1,351
Лента мокрая	1,110 / 1,166	1,145 / 1,225	1,210 / 1,311	1,312 / 1,408
Лента сухая	1,128 / 1,410	1,184 / 1,333	1,350 / 1,465	1,276 / 1,368
Без воздействия водоблокирующих элементов	1,203 / 1,349	1,198 / 1,374	1,298 / 1,401	1,257 / 1,345

Таблица 4.3 – Усилие снятия первичного защитного покрытия после испытания на совместимость с водонабухающими элементами после выдержки при нормальных климатических условиях

Среда, в которую помещён образец	Усилие снятия ПЗП, Н среднее /максимальное			
	200 мкм		250 мкм	
	30 дней	45 дней	30 дней	45 дней
Порошок мокрый	1,190 / 1,291	1,151 / 1,284	1,466 / 1,575	1,290 / 1,379
Порошок сухой	1,179 / 1,287	1,162 / 1,276	1,374 / 1,480	1,330 / 1,421
Лента мокрая	1,163 / 1,273	1,144 / 1,271	1,409 / 1,503	1,332 / 1,405
Лента сухая	1,273 / 1,375	1,198 / 1,294	1,386 / 1,523	1,346 / 1,428
Без воздействия водоблокирующих элементов	1,235 / 1,335	1,175 / 1,286	1,373 / 1,465	1,335 / 1,411

Исходя из результатов эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Испытания при НКУ не приводят к каким-либо значимым изменениям значений усилия снятия ПЗП.

2. Наиболее агрессивной средой является влажный водоблокирующий порошок при предельно допустимой повышенной рабочей температуре для акрилового ПЗП — 85 °С, т. к. именно в данных условиях у образцов наблюдается наибольшее снижения значения усилия снятия ПЗП, что может быть обусловлено большей площадью взаимодействия (в ходе испытания) водоблокирующего порошка с поверхностью ПЗП ввиду меньшей дисперсности порошка.

3. Образцы ОВ с диаметром ПЗП 200 мкм после выдержки во влажном водоблокирующем порошке при температуре 85 °С показали большее снижение значения усилия снятия ПЗП по сравнению с образцами ОВ с диаметром ПЗП 250 мкм, что объясняется теми же причинами, которые были описаны в разделе 2.5.1 при испытаниях на совместимость с внутримодульным гидрофобным наполнителем.

4.3. Выводы по главе 4

– В качестве альтернативы эталонному методу испытания на совместимость с гидрофобным наполнителем, представляющего из себя испытание кабельной конструкции, в случае проведения испытания на совместимость ОВ и гидрофобного наполнителя, допускается проводить эти испытания погружением образца ОВ в ёмкость с гидрофобным наполнителем.

– При проведении испытаний на совместимость ОВ и гидрофобного наполнителя с целью получения корректных воспроизводимых результатов испытаний допускается остатки гидрофобного наполнителя удалять исключительно безворсовой ветошью.

– При проведении испытаний на совместимость с водоблокирующими материалами следует выбирать режим, соответствующий наиболее агрессивной среде, которой является влажный водоблокирующий порошок при температуре 85 °С.

– По результатам исследований разработана методика определения совместимости материалов конструкции ОК [120], согласованная с ПАО «Ростелеком» и вошедшая в стандарт [116].

5. Исследование возможности определения типа и идентификации производителя одномодового оптического волокна

5.1. Исследования с целью разработки методики по определению типа и идентификации производителя одномодового оптического волокна

С целью установления подкатегории ОВ (согласно МЭК и/или МСЭ-Т) и выяснения принципиальной возможности идентификации его производителя с использованием имеющихся в наличии образцов предложена программа испытаний, включающая анализ следующих характеристик ОВ:

1. Геометрические характеристики:
 - 1.1. Диаметр сердцевины;
 - 1.2. Диаметр оболочки;
 - 1.3. Диаметр первого (внутреннего) слоя ПЗП;
 - 1.4. Диаметр второго слоя (внешнего) ПЗП.
2. Оптические характеристики:
 - 2.1. Коэффициент затухания в диапазоне длин волн от 1100 нм до 1650 нм, определённое с шагом 10 нм (спектральное затухание);
 - 2.2. Диаметр модового поля;
 - 2.3. Длина волны отсечки λ_c («волоконная»);
 - 2.4. Оптические потери на макроизгибах;
 - 2.5. Коэффициент хроматической дисперсии;
 - 2.6. Характеристики вынужденного рассеяния Манделъштама-Бриллюэна (ВРМБ);
 - 2.7. Профиль показателя преломления (ППП) сердцевины ОВ.
3. Длинноволновый ИК-спектр материала ПЗП.

Исследования производились по следующей программе:

Геометрические характеристики измерялись в соответствии требованиями [129] и [28] на установке SECRI FGM-502.

Оптические характеристики, как указано в п. п. 2.1 – 2.4, определяли в соответствии с требованиями [117, 130-132] на установке SECRI OFM-1701.

Коэффициент хроматической дисперсии, согласно п. 2.5, определялся в соответствии с [133] с использованием оптического рефлектометра EXFO FTB-500 с блоком FTB-5700-CD-PMD.

Параметры ВРМБ, указанные в п. 2.6, измеряли с помощью бриллюэновского анализатора OZ Optics DSTS-C-0.1/50-1/100-H.

Форма ППП (п. 2.7) определялась с использованием установки Photon Kinetics S14.

Характеристики ИК-спектров материала ПЗП были исследованы методом полного внутреннего отражения [134] с использованием ИК-спектрометра Фурье СИМЕКС Инфралюм ФТ-801.

Известно, что разные подкатегории ОВ имеют характерные отличия – признаки, установленные стандартом [27], а также указанные в приведённой таблице 5.1. При этом достаточно часто, как показывали предварительные исследования, характеристики ОВ от разных производителей, принадлежащих к одной подкатегории, могут быть близки (таблица 5.2). В связи с этим, надёжное определение и идентификация производителя ОВ требует значительно более детального анализа.

Наиболее распространённым, по количеству производимого и применяемого в мире ОВ, а также по количеству представленных на рынке производителей, является ОВ категории В-652, согласно МЭК [27]. В связи с этим для исследования возможности идентификации производителя посредством определения указанных выше параметров ОВ, было выбраны образцы ОВ категории В-652, и, кроме этого, образцы «родственной» подкатегории В-657.А. Основное отличие последней подкатегории от стандартной, заключается в меньшей чувствительности ОВ к макроизгибам.

Таблица 5.1 – Характеристики различных категорий оптических волокон в соответствии со стандартом [27]

Характеристика	Категория оптического волокна			
	B-652.D	B-654.D	B-655.E	B-657.B2
Диаметр оболочки, мкм	125 ± 0,7	125 ± 1,0	125 ± 1,0	125 ± 0,7
Диаметр первичного защитного покрытия (неокрашенного), мкм	235 – 255	235 – 255	235 – 255	235 – 255
Диаметр модового поля, мкм, на длине волны:				
1310 нм	8,6 – 9,2	-	-	8,6 – 9,2
1550 нм	-	11,5 – 15,0	8,0 – 11,0	-
Кабельная длина волны отсечки λ_{cc} , нм, не более	1260	1530	1450	1260
Коэффициент затухания на длинах 1310/1383/1550/1625 нм, дБ/км, не более	0,4/0,4/0,3/0,4	-/-/0,2/0,4	-/-/0,35/0,4	0,4/0,4/0,3/0,4
Коэффициент дисперсии на длине волны 1550 нм, пс/нм*км	13,3 – 18,6	≤ 23	8,06 – 9,31	13,3 – 18,6
Потери, на макроизгибах, дБ, не более:				
100 витков на радиус 30 мм, длина волны 1625 нм	0,1	2,0	0,1	-
10 витков на радиус 15 мм, длины волн 1550/1625 нм	-/-	-/-	-/-	0,03/0,1
1 виток на радиус 10 мм, длины волн 1550/1625 нм	-/-	-/-	-/-	0,1/0,2
1 виток на радиус 7,5 мм, длины волн 1550/1625 нм	-/-	-/-	-/-	0,5/1,0

Таблица 5.2 – Характеристики оптических волокон категории В-652 различных производителей (данные производителя):

Характеристика	Производитель оптического волокна		
	Оптико-волоконные Системы	Corning	OFS
Диаметр оболочки, мкм	$125 \pm 0,7$	$125 \pm 0,7$	$125 \pm 0,7$
Диаметр защитного покрытия, мкм	$243,5 \pm 3,0$	$242 \pm 5,0$	245 – 260
Диаметр модового поля, мкм, на длине волны 1310 нм	$9,2 \pm 0,4$	$9,2 \pm 0,4$	$9,2 \pm 0,4$
Кабельная длина волны отсечки λ_{cc} , нм, не более	1260	1260	1260
Коэффициент затухания на длинах 1310/1550/1625 нм, дБ/км, не более	0,34/0,33/0,20/0,25	0,35/0,35/0,20/0,23	0,34/0,31/0,21/0,24
Хроматическая дисперсия, пс/нм*км	≤ 18	≤ 18	≤ 18
Потери на макроизгибах (100 витков на радиус 30 мм, длина волны 1625 нм), дБ, не более	0,1	0,05	0,05

Образцы ОВ, являющиеся предметом исследования в данной работе, представляли собой намотанные на транспортные катушки отрезки ОВ длиной до 2 км. Исходная информация по происхождению образцов (производители отмечены условными номерами) приведена в таблице 5.3. Всего в настоящем исследовании было отобрано 15 образцов ОВ восьми различных производителей.

Согласно стандарту [27], исследуемые образцы ОВ могут быть отнесены к пяти подкатегориям: В-652.В, В-652.С, В-652.Д, В-657.А1 и В-657.А2. Каждому образцу присвоен индивидуальный номер, который в дальнейшем не изменялся.

Таблица 5.3 – Исходная информация по образцам оптического волокна

№ образца	Производитель	Подкатегория ОВ
1	Производитель 1	В-657.А1/В-652.Д
2		В-657.А2
3	Производитель 2	В-652.Д
4	Производитель 3	В-652.Д
5	Производитель 4	В-652.Д
6		В-652.Д
7		В-652.Д
8		В-652.Д
9	Производитель 5	В-652.С (1994 г)
10	Производитель 6	В-652.Д
11	Производитель 7	В-652.В
12		В-652.Д
13		В-652.Д
14		В-652.Д
15	Производитель 8	В-652.Д

Результаты проведённых исследований были представлены автором данной диссертации в работах [135, 136]. Результаты измерений геометрических параметров ОВ приведены в таблице 5.4. При этом, образец № 11 имел окрашенное покрытие, поэтому измерения диаметров первого и второго слоёв ПЗП для него не производились.

Таблица 5.4 – Результаты измерений геометрических характеристик ОВ

№ образца	Производитель	Диаметр сердцевины, мкм	Диаметр оболочки, мкм	Диаметр первого слоя покрытия, мкм	Диаметр второго слоя покрытия, мкм
1	2	3	4	5	6
1	Производитель 1	8,946	124,735	176,959	240,736
2		8,405	124,965	196,723	250,716
3	Производитель 2	8,461	124,402	190,505	237,283
4	Производитель 3	8,605	125,104	182,297	233,286
5	Производитель 4	8,681	124,953	-	-
6		8,700	124,842	173,752	233,453
7		8,713	125,013	178,805	243,556
8		8,533	125,461	181,615	238,273
9	Производитель 5	8,700	124,830	230,500	243,436

Продолжение таблицы 5.4

1	2	3	4	5	6
10	Производитель 6	8,546	124,699	156,269	238,123
11	Производитель 7	8,196	124,785	-	-
12		8,796	124,860	182,697	240,347
13		8,992	124,778	186,645	238,382
14		9,345	124,858	188,205	237,413
15	Производитель 8	8,184	125,214	178,413	239,294

Исходя из данных в таблице 5.4, можно сделать вывод, что все полученные значения являются характерными для одномодовых ОВ, причём основным отличительным признаком здесь был диаметр сердцевины. Можно отметить, что этот параметр для одномодовых ОВ (в отличие от многомодовых) является «справочной» величиной и обычно в технической документации производителя не приводится).

Следующим шагом является исследование формы профиля показателя преломления, этот параметр является одним из главных его конструктивных признаков. Кроме того, отличия в конструкции ОВ разных производителей можно наблюдать в геометрии ПЗП. Однако, геометрические параметры ПЗП чаще всего не позволяют однозначно отнести исследуемый образец к конкретному производителю, поскольку один и тот же производитель ОВ может использовать композиции от различных производителей ПЗП. При этом в последние годы наблюдалась тенденция к повышению стойкости ОВ к микроизгибам, а для этого производитель ОВ может, в частности, изменять также соотношение толщин первого и второго слоёв ПЗП.

Таким образом, по одним только геометрическим параметрам ОВ (включая геометрию ПЗП) однозначно определить подкатегорию и производителя ОВ не представляется возможным. Оптические характеристик ОВ в гораздо большей степени подходят для решения поставленной задачи. Это видно из результатов проведённых исследований, представленных в таблицах 5.5 и 5.6. Также на рисунках 5.1 – 5.15, приведены формы ПЗП ОВ. Как видно из представленных данных, образцы ОВ одной подкатегории и одного и того же производителя дают

хорошую сходимость результатов (см. образцы с № 5 по № 8 и с № 12 по № 14). При этом, ОВ разных подкатегорий или одной подкатегории, но разных производителей имеют характерные отличительные признаки. К таким отличиям, в данном случае, относятся:

- меньший (относительно других образцов) диаметр модового поля для образцов № 2 и № 9, а это бывает характерным для ОВ с пониженной чувствительностью к изгибам, начиная с подкатегории В-657.А2.

- увеличенное значение коэффициента затухания на длине волны 1383 нм для образцов № 9 и № 11. Это свидетельствует о том, что данные ОВ не относятся к волокнам «без пика воды».

Также следует обратить внимание на несколько отличающиеся значения коэффициента хроматической дисперсии (таблица 5.5) у образца № 5 в сравнении с образцами № 6, № 7 и № 8, все из которых (включая образец № 5) изготовлены производителем 4. Помимо этого, коэффициент затухания образца № 5 в диапазоне длин волн от 1300 нм до 1650 нм больше, чем у образцов № 6, № 7 и № 8 (таблица 5.6). Максимальная разность в значениях коэффициента затухания была здесь не более 0,021 дБ/км, т.е. относительно невелика. Однако максимальная разность этого параметра для образцов № 6, № 7 и № 8 между собой в этом же диапазоне длин волн находится в пределах 0,010 дБ/км. Предположительно данные различия могут быть объяснены тем, что образец № 5 окрашен, а образцы №№ 6-8 – нет.

Таблица 5.5 – Оптические характеристики образцов оптического волокна

№ образца	Производитель	Диаметр модового поля, мкм		Длина волны отсечки, нм	Хроматическая дисперсия пс/нм*км (1550 нм)	ВРМБ, ГГц (24 °С)
		1310 нм	1550 нм			
1	2	3	4	5	6	7
1	Производитель 1	9,267	10,403	1340,70	17,26	10,781
2		8,432	9,365	1272,10	17,58	10,757
3	Производитель 2	9,158	10,361	1263,50	17,24	10,816
4	Производитель 3	9,176	10,342	1300,05	18,64	10,818
5	Производитель 4	9,159	10,313	1290,06	18,57	10,820
6		9,041	10,241	1268,10	16,79	10,822

Продолжение таблицы 5.5

1	2	3	4	5	6	7
7	Производитель 4	9,175	10,283	1279,57	16,77	10,804
8		9,151	10,410	1241,45	16,70	10,824
9	Производитель 5	8,764	9,787	1246,00	17,26	10,820
10	Производитель 6	8,674	10,160	1331,29	18,52	10,790
11	Производитель 7	9,064	10,402	1264,11	18,13	10,966
12		9,082	10,302	1300,92	16,65	10,816
13		9,230	10,426	1284,90	16,96	10,840
14		9,142	10,283	1272,15	17,05	10,817
15	Производитель 8	9,151	10,410	1278,30	16,07	10,835

С целью проверки возможности определения производителя ОВ исключительно по значению сдвига частоты ВРМБ – такая гипотеза, в частности, была приведена в работе [109] (см. таблицу 1.1). Выполненный в настоящем исследовании анализ данных ВРМБ показал, что значения ВРМБ образцов № 12 и № 14 близки, а значения ВРМБ образца № 13 сильно отличается, хотя при этом все три образца имеют происхождение из одной партии ОВ. Подобный результат был ранее описан в работе [137], где отмечалось, что разный сдвиг частоты ВРМБ (в пределах типично ± 20 МГц от некоторого фиксированного значения) может быть обусловлен не только воздействием внешних факторов (температуры или растяжения), но также и т.н. «собственной», бриллюэновской частотой каждого индивидуального ОВ. Это свидетельствует о том, что значения ВРМБ для ОВ одного и того же производителя в большинстве случаев находятся в определённом диапазоне, чаще всего в интервале частот ± 20 МГц. Однако, отдельные образцы ОВ могут иметь значения ВРМБ, и за пределами этого диапазона. Это указывает на необходимость «комплексного» подхода к определению характеристик ОВ, если ставится задача определения подкатегории и производителя ОВ.

В таблице 5.6 приведены данные по «спектральному затуханию» исследованных образцов. Анализ подвергалась только область графиков выше длины волны отсечки. Это связано с тем, что в области ниже длины волны отсечки, характер кривой может сильно изменяться вследствие нарушения одномодового режима. С учётом этого, видно, что образцы №№ 9, 11, 12-14 проявляют так называемый «пик воды» вблизи длины волны 1383 нм. Для

остальных исследованных образцов этот «пик воды» отсутствует. Величина максимума потерь на длине волны 1383 нм, наряду с характеристиками, приведёнными в таблицах 5.4 и 5.5, позволяет сделать вывод, что образец № 9 относится к ОВ с уменьшенным пиком воды (В-652.С), а образец № 11 соответствует подкатегории В-652.В. Остальные образцы относятся к подкатегории ОВ с «нулевым пиком воды», к которой можно отнести и образцы № 12, № 13 и № 14. Это позволяет, несмотря на наличие небольшого локального максимума затухания вблизи волны длиной 1383 нм, отнести данные образцы к ОВ с «низким пиком воды» (допустимая величина этого максимума определена отечественных и международных стандартах, таких как [27]).

На рисунках 5.1 – 5.15 представлен вид ППП исследованных образцов ОВ.

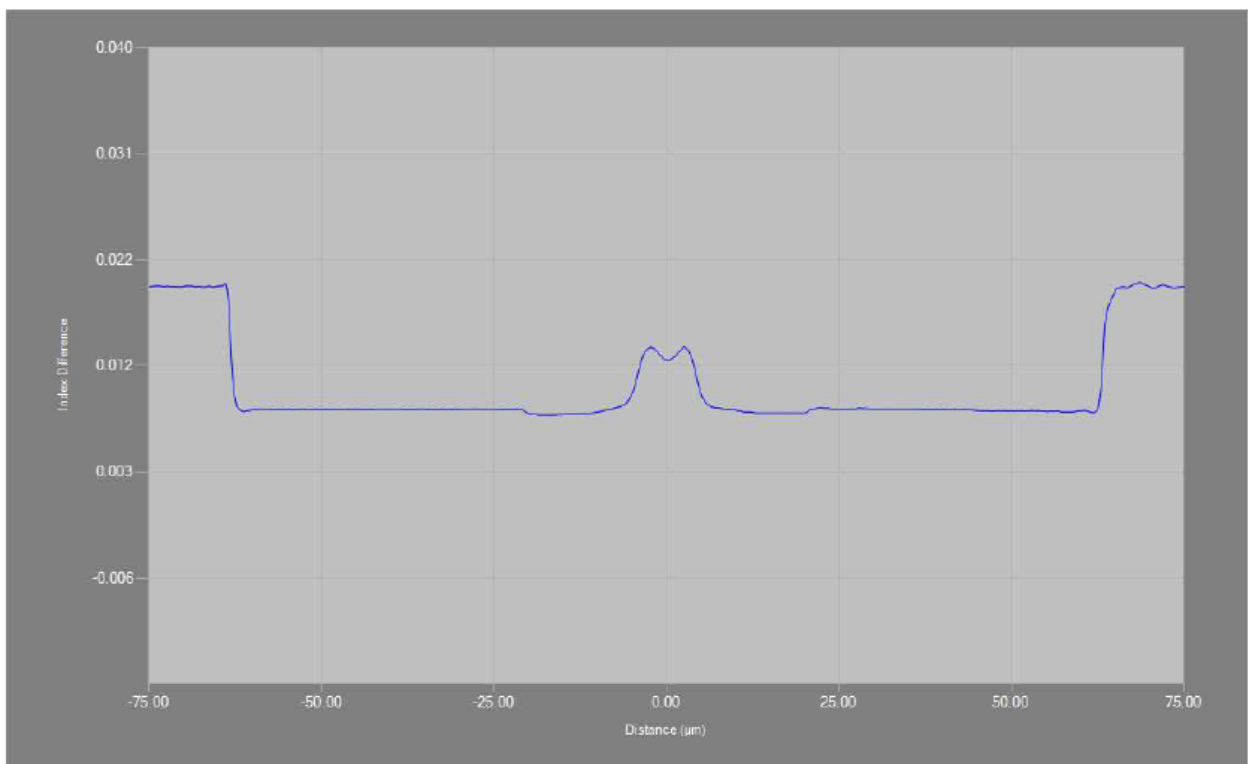


Рисунок 5.1 – Профиль показателя преломления образца № 1

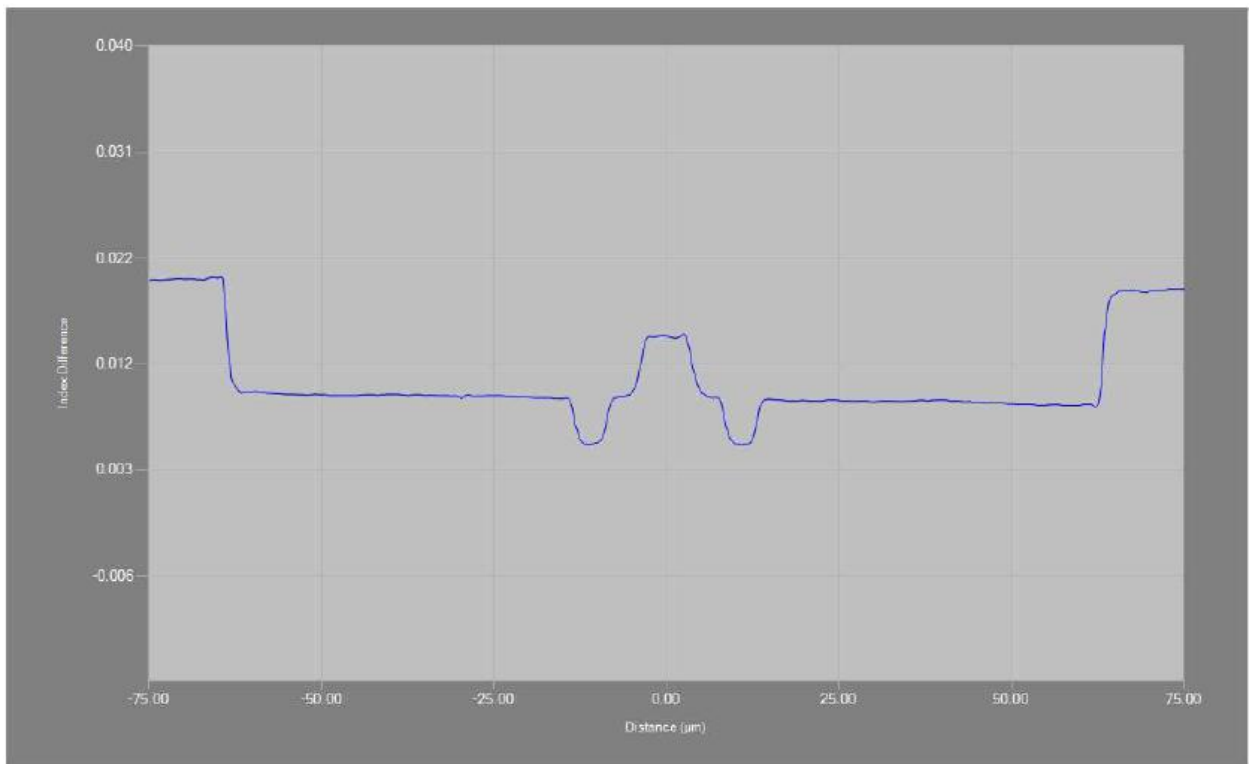


Рисунок 5.2 – Профиль показателя преломления образца № 2

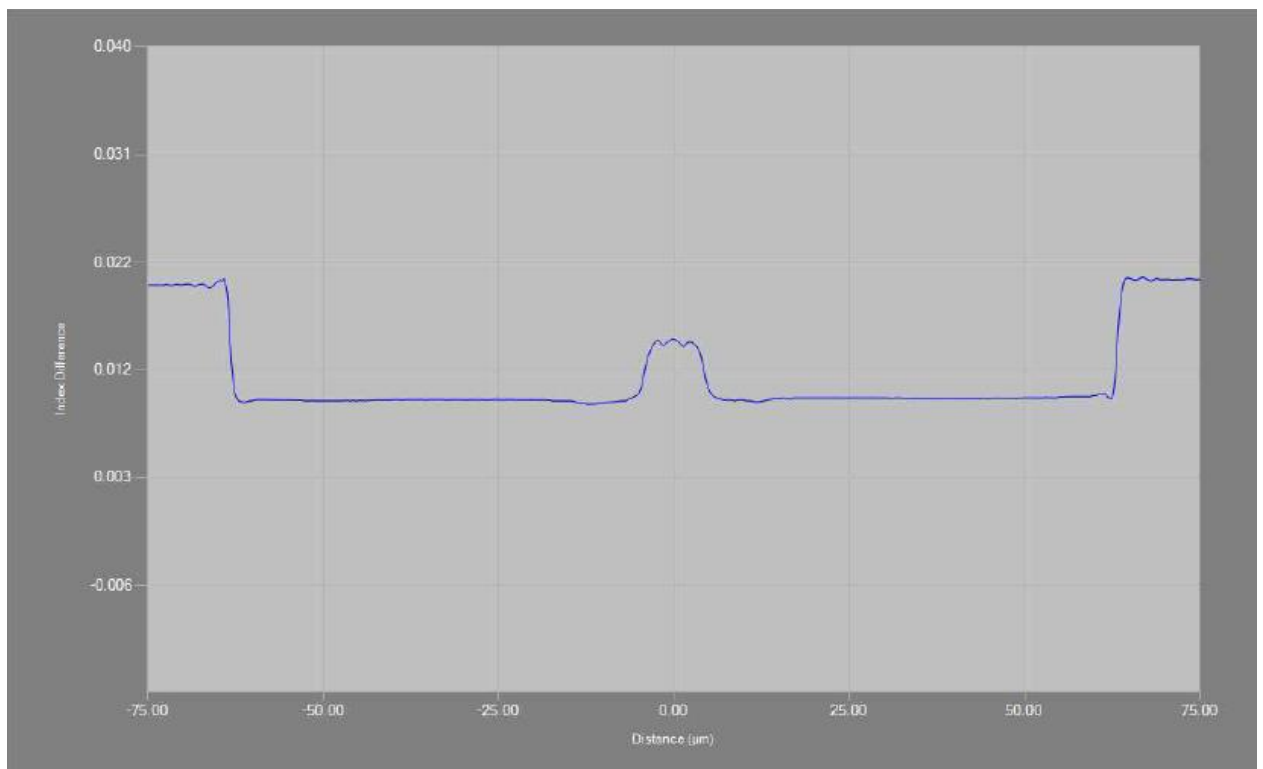


Рисунок 5.3 – Профиль показателя преломления образца № 3

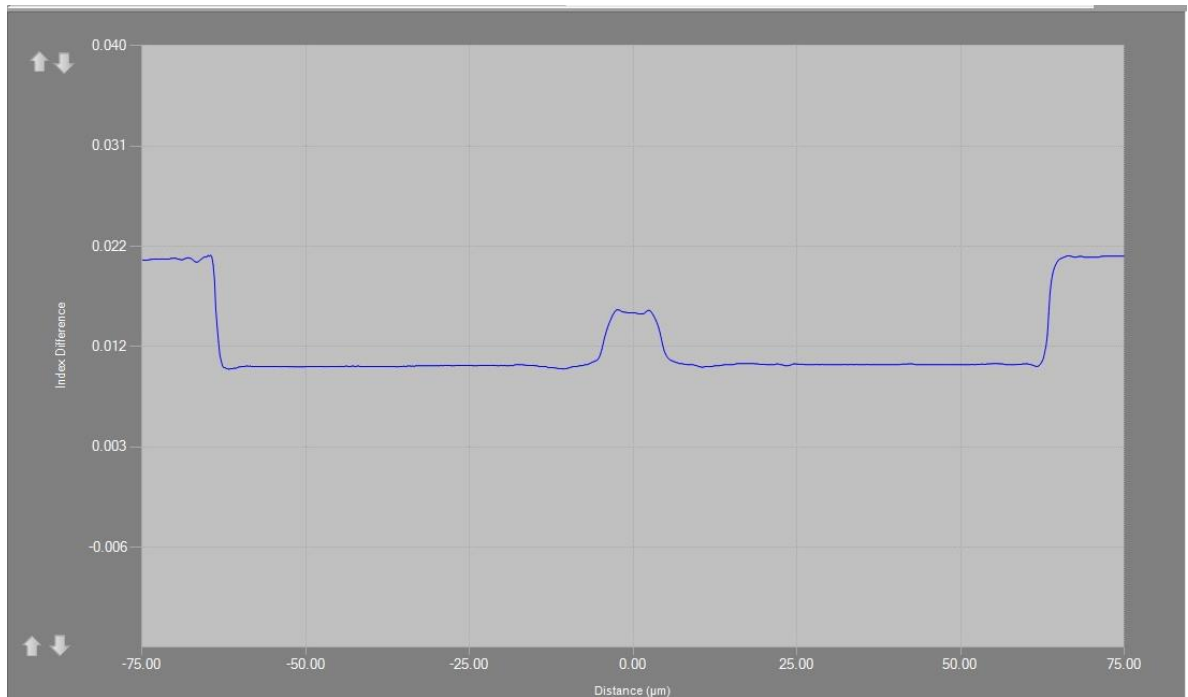


Рисунок 5.4 – Профиль показателя преломления образца № 4

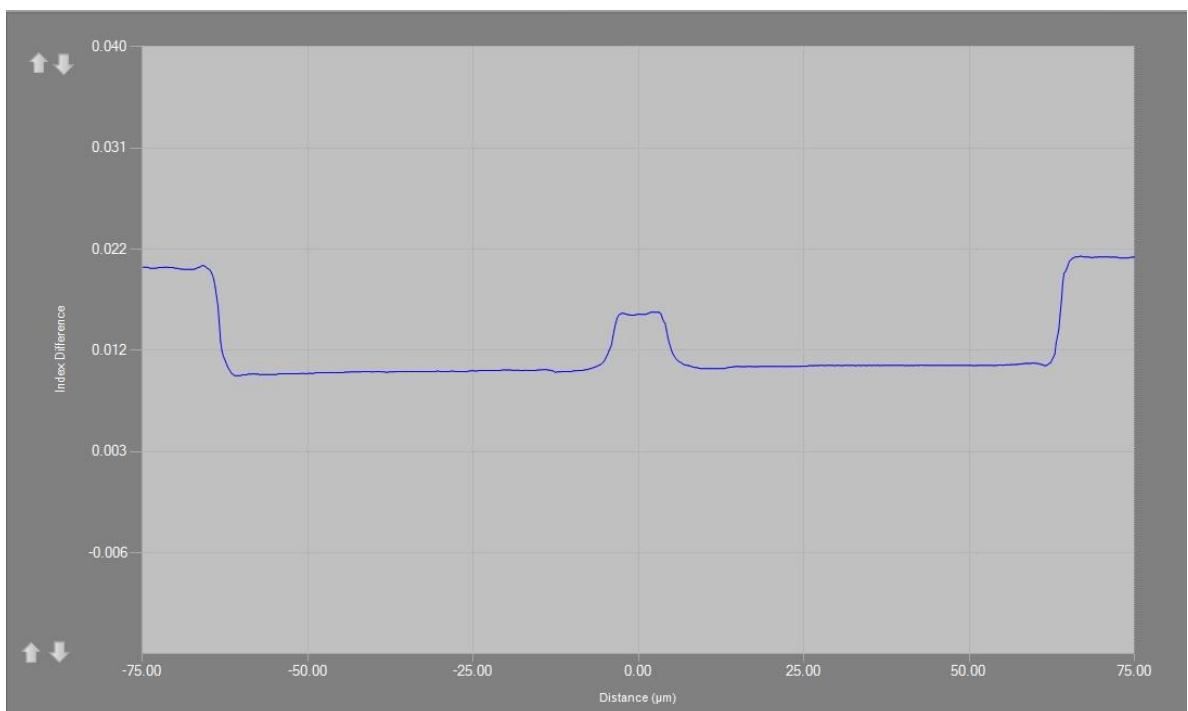


Рисунок 5.5 – Профиль показателя преломления образца № 5

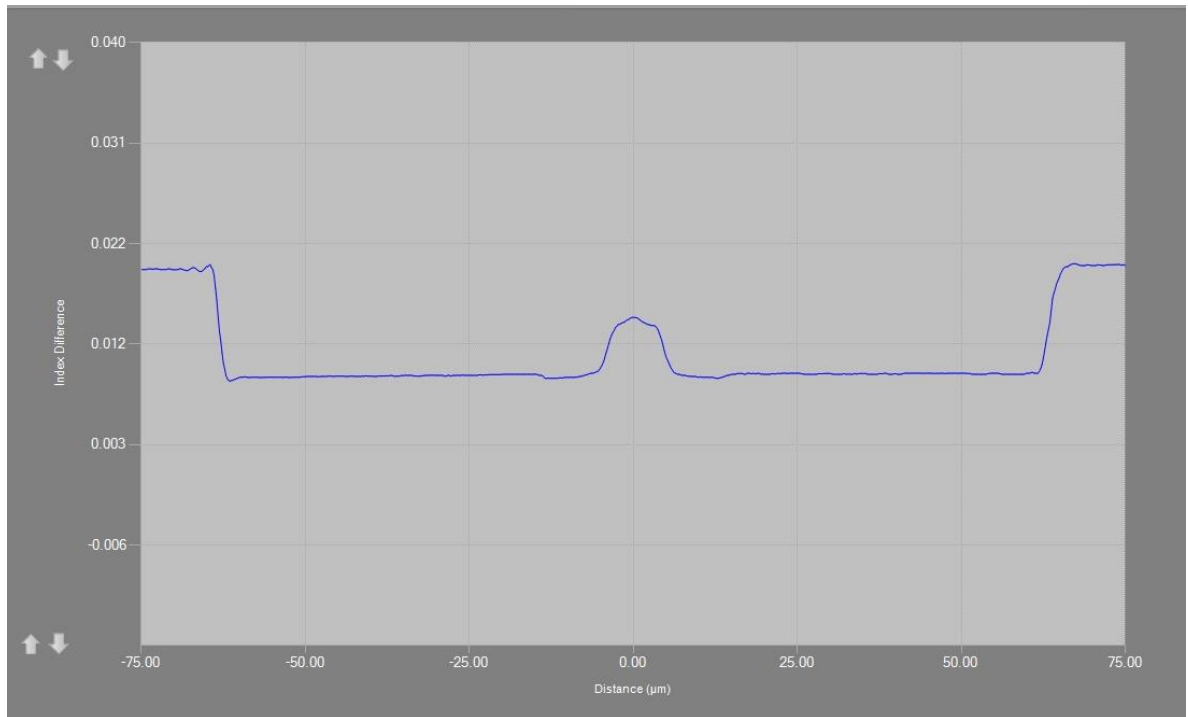


Рисунок 5.6 – Профиль показателя преломления образца № 6

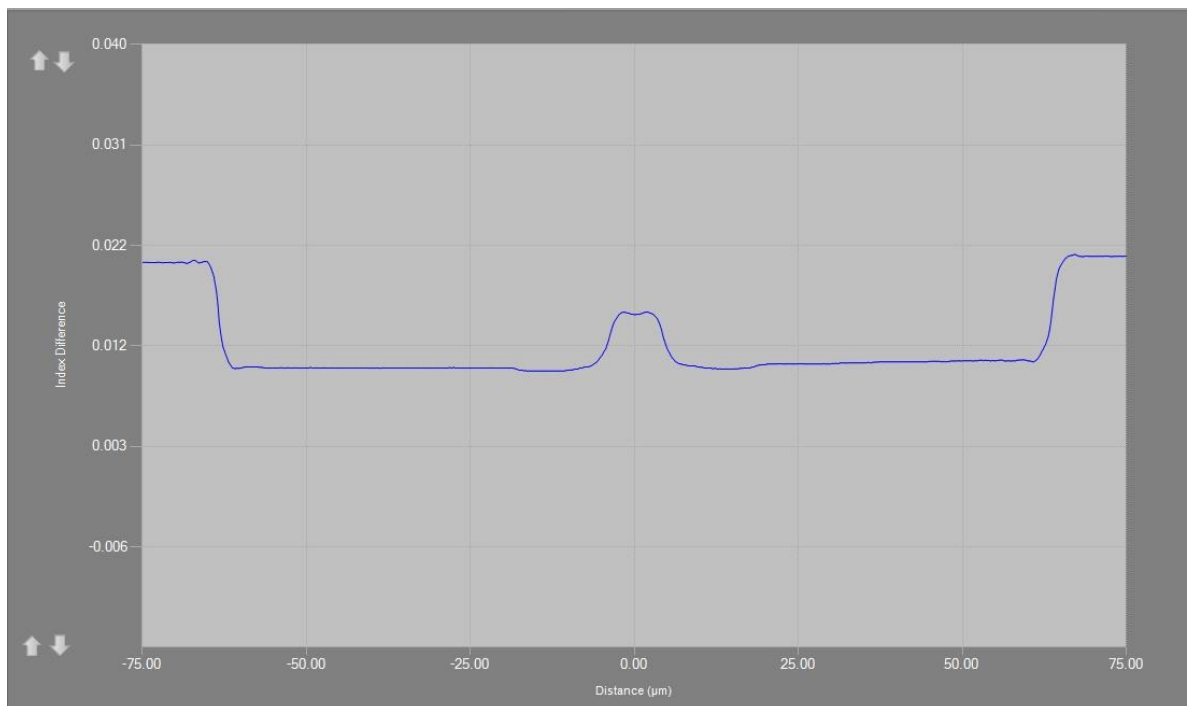


Рисунок 5.7 – Профиль показателя преломления образца № 7

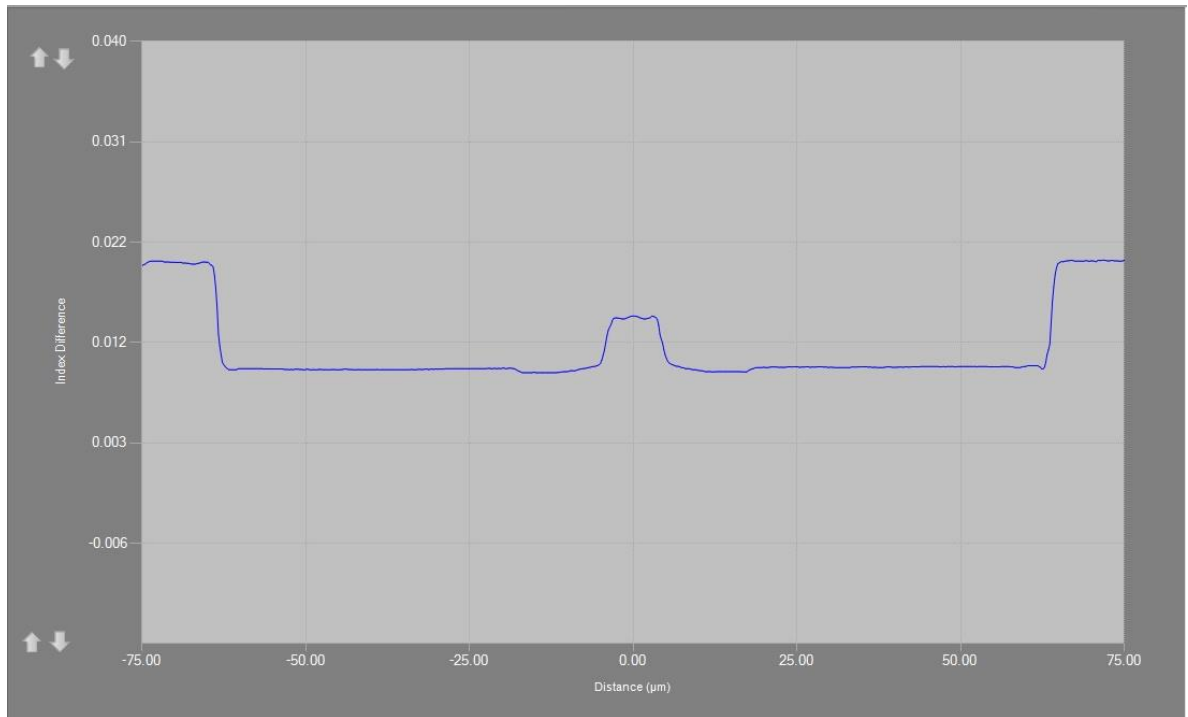


Рисунок 5.8 – Профиль показателя преломления образца № 8

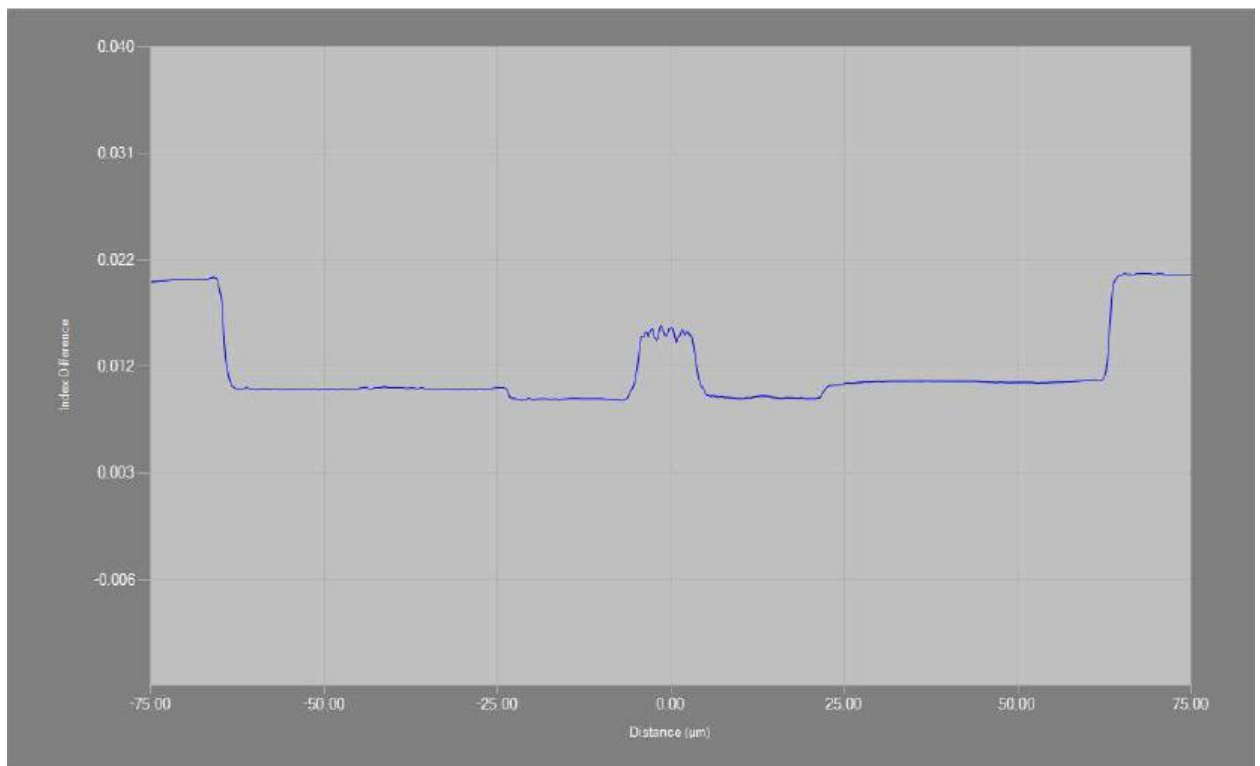


Рисунок 5.9 – Профиль показателя преломления образца № 9

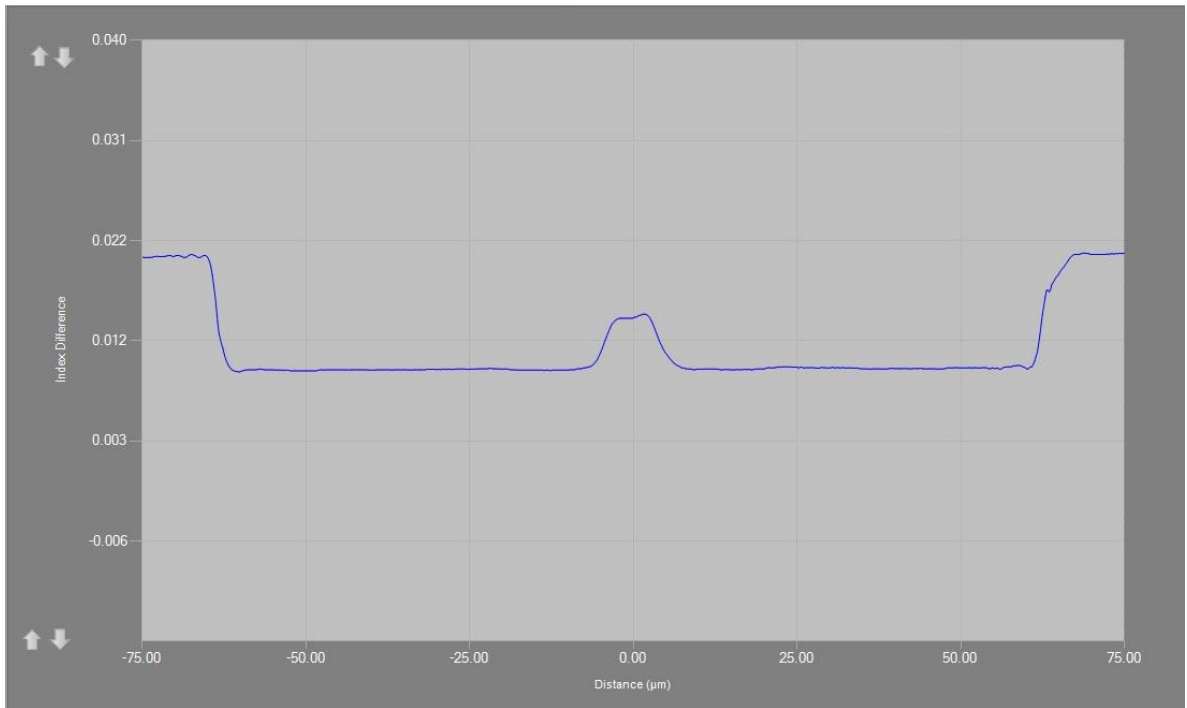


Рисунок 5.10 – Профиль показателя преломления образца № 10

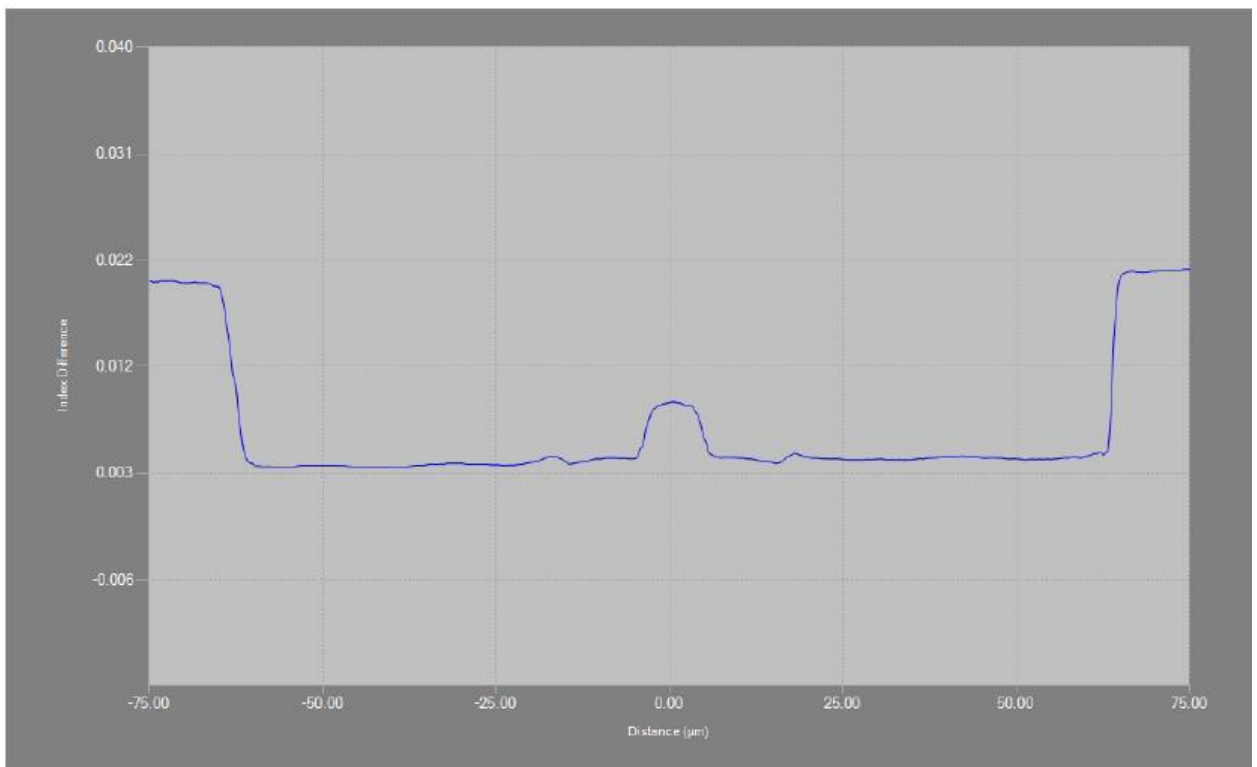


Рисунок 5.11 – Профиль показателя преломления образца № 11

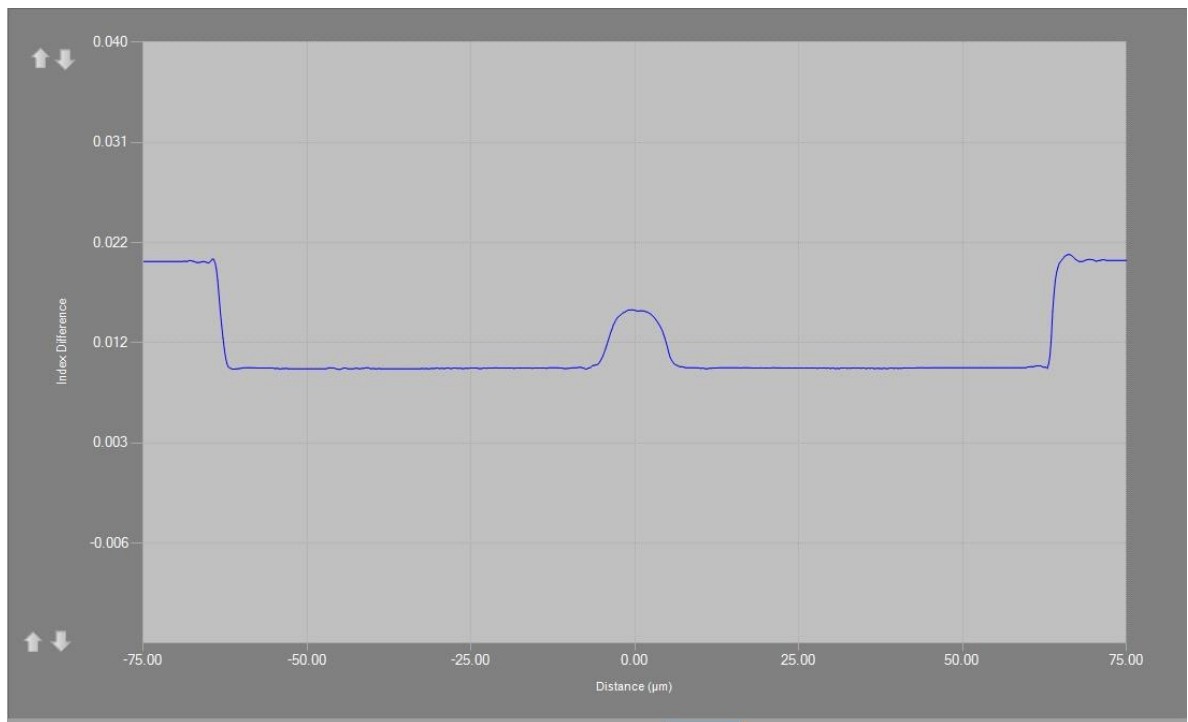


Рисунок 5.12 – Профиль показателя преломления образца № 12

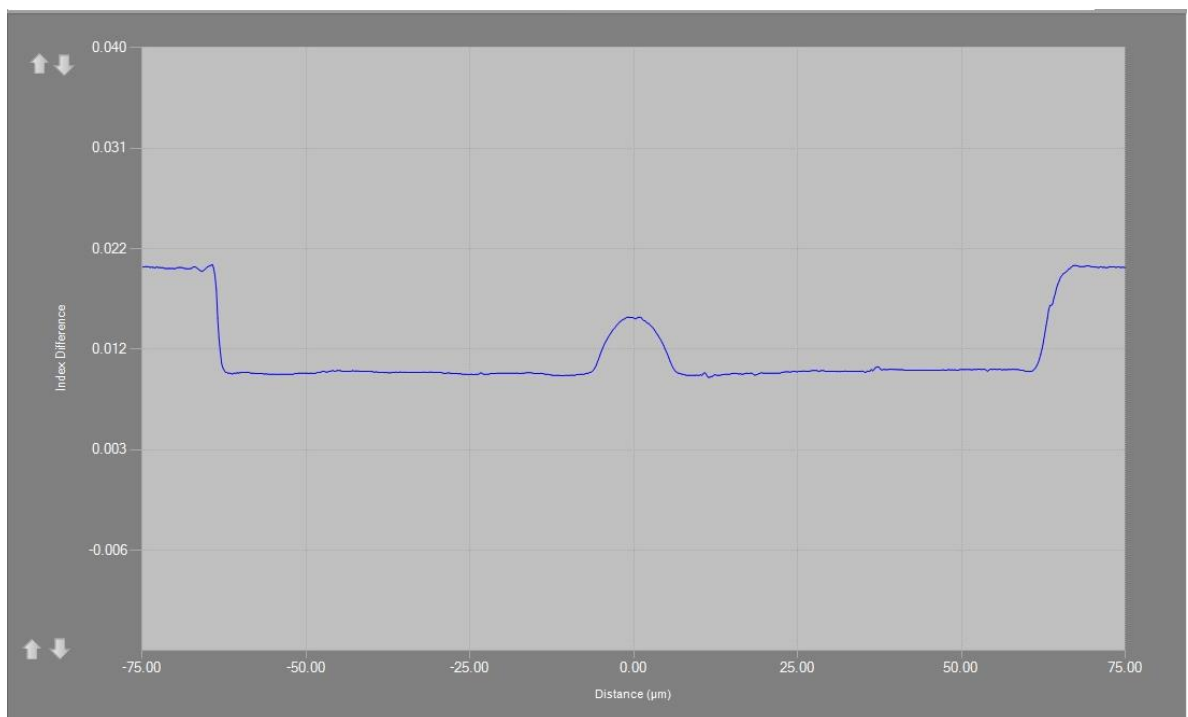


Рисунок 5.13 – Профиль показателя преломления образца № 13

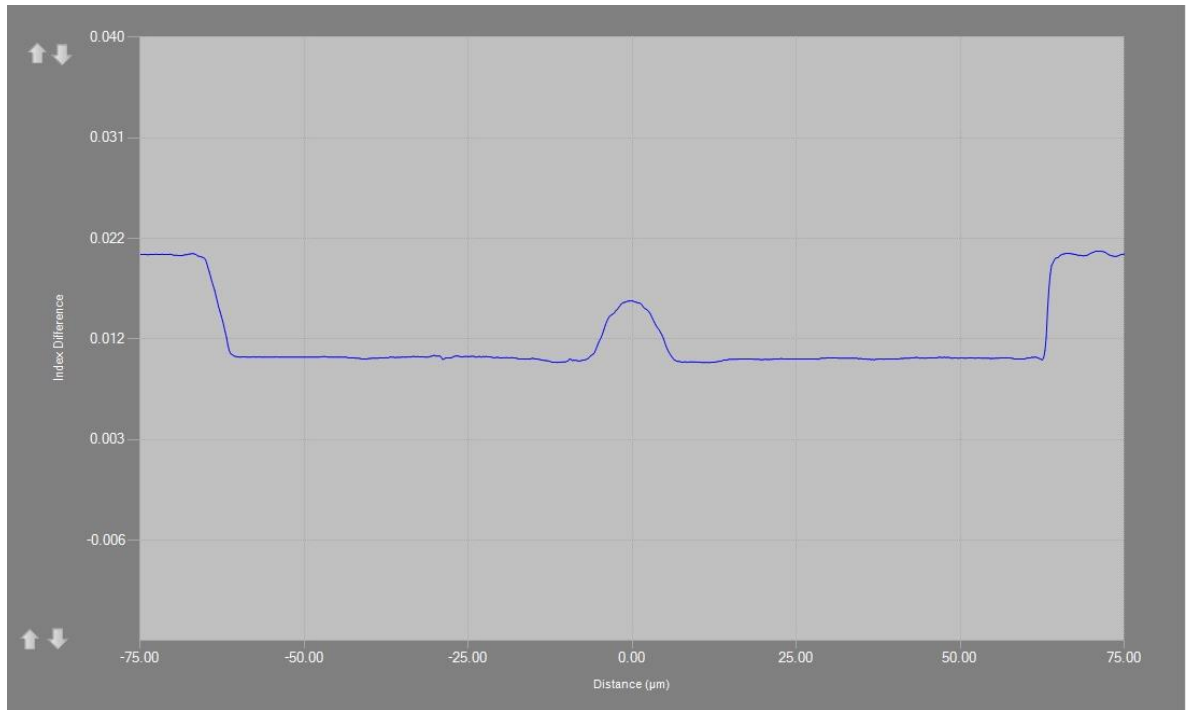


Рисунок 5.14 – Профиль показателя преломления образца № 14

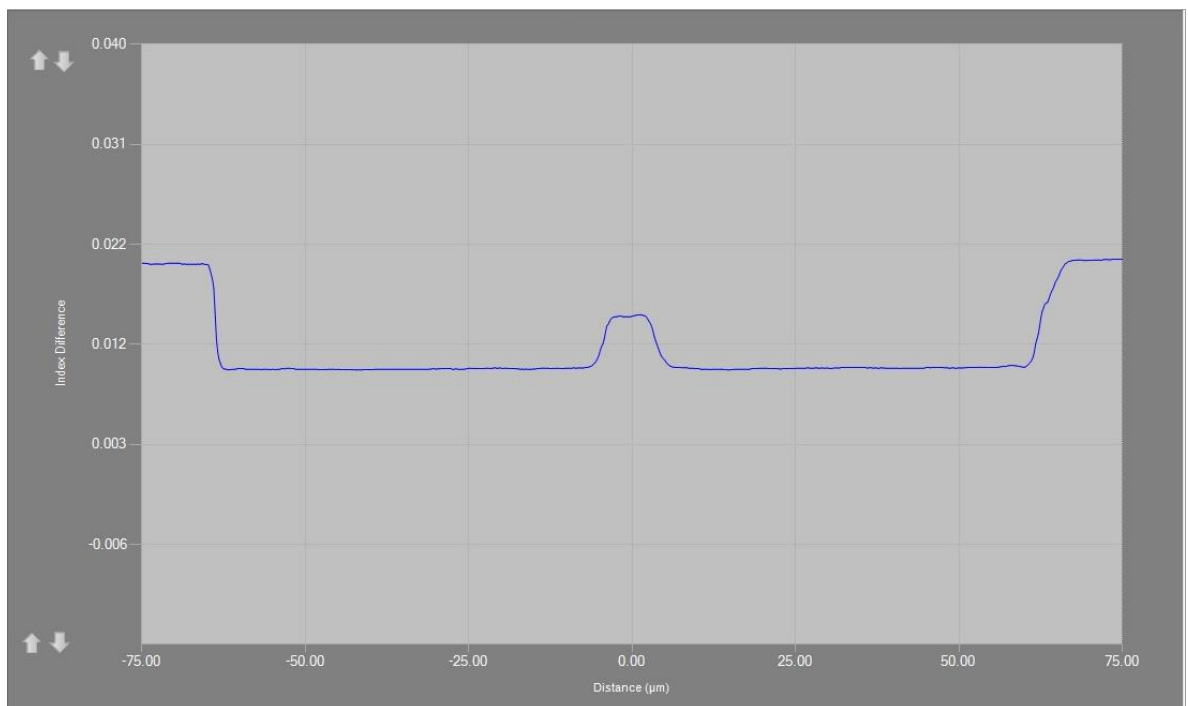


Рисунок 5.15 – Профиль показателя преломления образца № 15

Изучение графиков сразу выявляет характерное отличие образца № 2 (рисунок 5.2) из-за наличия так называемых «канавок» с пониженным значением ППП. Подобные технологии используются производителями ОВ с целью снижения потерь, вызванных макроизгибами. Также заметно отличается профиль для образца № 11 (рисунок 5.11), из которого видно, что здесь легирована светоотражающая оболочка, при этом сердцевина нелегирована (чистое кварцевое стекло). Данная конструкция ОВ применяется в случае необходимости наличия минимальных оптических потерь на длинах волн 1310 нм, 1550 нм и 1625 нм, что видно из сравнения спектрального затухания образца № 11 (таблица 5.6) с остальными. Характерные различия в формах ППП присутствуют у большинства образцов, причём не только в волокнах различных подкатегорий, но и у образцов одной подкатегории от разных производителей, что видно из рисунков 5.1 – 5.15.

У образцов, у которых ППП близки по форме (рисунки 5.4-5.8, 5.10, 5.15), отличия наблюдаются по другим оптическим характеристикам (таблица 5.5), при некоторых исключениях:

1. Отсутствуют отличия между образцами № 5, № 6, №7 и № 8, это вызвано тем, что, все данные образцы относятся к подкатегории В-652.D и принадлежат одному производителю 4.

2. Не видно заметных отличий между образцами № 12, № 13 и № 14, которые представляют подкатегорию В-652.D и изготовлены производителем 7.

3. Для образцов производителей 4 и 8 различий не выявлено. Это можно объяснить тем, что производитель 8 использует при вытяжке ОВ заготовки, закупленные у производителя 4.

У других исследованных образцов различия следующие: у образца № 10 заметно отличается от других значение диаметра модового поля, у образца № 3 – длина волны отсечки и коэффициент хроматической дисперсии.

Сходство формы ППП ОВ производителей 3 и 4 представляется не случайным, поскольку данные компании применяют во многом схожую технологию производства заготовок VAD (Vertical Axial Deposition – вертикальное осевое осаждение), разработанную ими совместно.

Таблица 5.6 – Спектральное затухание образцов оптического волокна

Дли- на вол- ны, нм	Коэффициент затухания, дБ/км									
	Производитель 1		Произ- води- тель 2	Про- изво- дитель 3	Производитель 4				Про- изво- ди- тель 5	Про- изво- дитель 6
	Образец 1	Обра- зец 2	Обра- зец 3	Обра- зец 4	Обра- зец 5	Обра- зец 6	Обра- зец 7	Обра- зец 8	Обра- зец 9	Обра- зец 10
1250	-	-	-	-	-	-	-	0,392	-	-
1260	-	-	-	-	-	-	-	0,386	-	-
1270	-	-	0,384	-	-	0,371	-	0,372	0,403	-
1280	-	0,385	0,376	-	-	0,361	0,363	0,356	0,386	-
1290	-	0,365	0,361	-	0,380	0,350	0,352	0,344	0,372	-
1300	0,340	0,351	0,353	0,347	0,357	0,337	0,341	0,337	0,359	-
1310	0,327	0,341	0,338	0,331	0,346	0,325	0,330	0,328	0,349	0,397
1320	0,316	0,332	0,326	0,327	0,334	0,317	0,320	0,317	0,339	0,345
1330	0,306	0,320	0,317	0,318	0,325	0,308	0,311	0,308	0,330	0,330
1340	0,297	0,311	0,311	0,305	0,313	0,301	0,302	0,299	0,327	0,319
1350	0,290	0,302	0,299	0,291	0,305	0,294	0,294	0,289	0,322	0,310
1360	0,284	0,294	0,291	0,281	0,296	0,283	0,286	0,285	0,319	0,300
1370	0,275	0,288	0,283	0,280	0,286	0,275	0,278	0,277	0,326	0,291
1380	0,278	0,276	0,289	0,261	0,286	0,271	0,275	0,276	0,437	0,301
1383	0,281	0,275	0,292	0,271	0,289	0,268	0,275	0,275	0,473	0,302
1390	0,271	0,273	0,281	0,275	0,278	0,264	0,269	0,274	0,476	0,291
1400	0,263	0,263	0,275	0,249	0,272	0,256	0,261	0,263	0,400	0,281
1410	0,252	0,261	0,257	0,246	0,259	0,251	0,253	0,253	0,349	0,265
1420	0,240	0,253	0,251	0,251	0,255	0,242	0,245	0,245	0,311	0,255
1430	0,231	0,246	0,237	0,254	0,243	0,236	0,239	0,237	0,282	0,250
1440	0,228	0,238	0,242	0,234	0,244	0,229	0,232	0,230	0,269	0,241
1450	0,223	0,234	0,230	0,230	0,232	0,225	0,226	0,225	0,254	0,233
1460	0,214	0,226	0,229	0,232	0,224	0,219	0,221	0,218	0,242	0,229
1470	0,211	0,221	0,225	0,214	0,229	0,212	0,215	0,213	0,236	0,222
1480	0,208	0,217	0,217	0,205	0,221	0,209	0,210	0,208	0,227	0,217
1490	0,203	0,214	0,208	0,201	0,212	0,204	0,205	0,204	0,220	0,213
1500	0,199	0,210	0,204	0,201	0,208	0,201	0,201	0,199	0,214	0,206
1510	0,194	0,205	0,202	0,198	0,200	0,196	0,197	0,195	0,210	0,203
1520	0,190	0,200	0,200	0,196	0,198	0,192	0,193	0,191	0,205	0,203
1530	0,188	0,196	0,195	0,189	0,194	0,188	0,189	0,188	0,202	0,199
1540	0,184	0,193	0,192	0,183	0,195	0,186	0,186	0,185	0,197	0,193
1550	0,182	0,190	0,189	0,181	0,193	0,183	0,184	0,182	0,195	0,195
1560	0,180	0,187	0,189	0,179	0,190	0,180	0,182	0,180	0,194	0,190
1570	0,178	0,187	0,185	0,182	0,191	0,179	0,181	0,178	0,191	0,187
1580	0,179	0,187	0,185	0,179	0,187	0,179	0,180	0,179	0,191	0,189
1590	0,179	0,187	0,188	0,180	0,187	0,179	0,180	0,179	0,192	0,189
1600	0,181	0,189	0,190	0,182	0,189	0,180	0,181	0,181	0,192	0,193
1610	0,183	0,192	0,191	0,186	0,191	0,183	0,184	0,183	0,194	0,194
1620	0,189	0,196	0,196	0,189	0,198	0,186	0,189	0,187	0,199	0,201
1625	0,191	0,199	0,197	0,188	0,202	0,189	0,191	0,189	0,202	0,201
1630	0,195	0,203	0,201	0,199	0,204	0,192	0,195	0,192	0,205	0,206
1640	0,204	0,213	0,211	0,203	0,215	0,200	0,202	0,202	0,216	0,218
1650	0,214	0,226	0,222	0,222	0,227	0,210	0,213	0,212	0,231	0,235

Продолжение таблицы 5.6

Длина волны, нм	Коэффициент затухания, дБ/км				
	Производитель 7				Производитель 8
	Образец 11	Образец 12	Образец 13	Образец 14	Образец 15
1250	-	-	-	-	-
1260	-	-	-	-	-
1270	0,345	-	-	-	-
1280	0,322	-	-	0,361	0,365
1290	0,313	-	0,338	0,348	0,354
1300	0,294	0,334	0,327	0,335	0,342
1310	0,294	0,326	0,317	0,326	0,333
1320	0,286	0,315	0,308	0,317	0,323
1330	0,283	0,306	0,298	0,309	0,313
1340	0,290	0,299	0,291	0,303	0,305
1350	0,303	0,292	0,284	0,293	0,296
1360	0,316	0,286	0,276	0,287	0,290
1370	0,359	0,282	0,275	0,282	0,283
1380	0,759	0,307	0,295	0,303	0,283
1383	0,925	0,317	0,306	0,308	0,287
1390	0,961	0,312	0,296	0,308	0,275
1400	0,667	0,288	0,278	0,283	0,268
1410	0,452	0,267	0,261	0,266	0,258
1420	0,334	0,252	0,250	0,253	0,246
1430	0,283	0,242	0,238	0,242	0,240
1440	0,247	0,234	0,230	0,233	0,233
1450	0,233	0,227	0,223	0,227	0,229
1460	0,207	0,220	0,218	0,221	0,221
1470	0,198	0,215	0,210	0,215	0,216
1480	0,199	0,211	0,205	0,210	0,213
1490	0,194	0,206	0,199	0,205	0,209
1500	0,188	0,201	0,194	0,200	0,204
1510	0,184	0,197	0,190	0,196	0,200
1520	0,180	0,193	0,186	0,193	0,195
1530	0,180	0,189	0,183	0,189	0,192
1540	0,177	0,187	0,180	0,186	0,188
1550	0,170	0,184	0,177	0,184	0,185
1560	0,168	0,181	0,174	0,182	0,182
1570	0,170	0,180	0,172	0,181	0,180
1580	0,172	0,180	0,173	0,180	0,180
1590	0,174	0,180	0,173	0,181	0,180
1600	0,177	0,182	0,174	0,183	0,180
1610	0,180	0,184	0,175	0,185	0,182
1620	0,185	0,189	0,179	0,190	0,185
1625	0,185	0,192	0,182	0,193	0,187
1630	0,189	0,195	0,186	0,196	0,190
1640	0,204	0,203	0,193	0,205	0,197
1650	0,219	0,214	0,203	0,216	0,207

Для определения оптических потерь на макроизгибах далее были проведены испытания по методике, описанной в [132]. Результаты испытаний, приведённые в таблице 5.7, позволяют отнести либо нет испытываемый образец ОВ к категории В-657, т.е. к ОВ с повышенной стойкостью к изгибам. Испытания проводились следующим образом – все 15 образцов проходили испытаний намоткой одного витка на оправку радиусом 10 мм, что соответствует требованиям к подкатегории В-657.А1, В-657.А2 и В-657.В2, и производилось измерение прироста затухания. В случае, если результаты превышали значения, установленные стандартом для подкатегории В-657.А1, дальнейшие испытания не проводились, т.к. в этом случае ОВ не соответствуют категории В-657. В случае, потерь не превышали установленные стандартом пределы для подкатегории В-657.А1, но были выше, чем нормируемые значения для подкатегории В-657.А2, ОВ относили к подкатегории В-657.А1, и дальнейшие испытания не проводили. Если потери в ОВ образца не превышали установленных стандартом для категории В-657.А2, образец подвергали следующему этапу испытаний путём намотки одного витка на оправку радиусом 7,5 мм. Последнее требуется для определения соответствия требованиям подкатегорий В-657.А2, В-657.В2 и В-657.В3. Аналогично предыдущему этапу, полученные значения потерь сравнивались с приведёнными в стандарте значениями. Если затухание на макроизгибах превышали установленные в стандарте значения для этих категорий, образец относили к подкатегории В-657.А1. Если значения соответствовали подкатегориям В-657.А2 и В-657.В2, но превышали нормируемые для В-657.В3 – образец относили к категории В-657.А2/В2. В связи с тем, что стандарты дают одинаковые допуски значений по приросту оптических потерь, вызванных макроизгибами для ОВ подкатегорий В-657.А2 и В-657.В2, точно определить подкатеорию ОВ лишь по потерям, вызванным макроизгибами, не представляется возможным. С учётом требований стандарта [27] эти подкатегории ОВ могут отличаться лишь значениями дисперсии. Поэтому для окончательного отнесения ОВ к подкатегории В-657.А2 или В-657.В2 необходимо сравнить в совокупности по

меньшей мере два параметра: потери, вызванные макроизгибами, и хроматическую дисперсию.

Если потери на макроизгибах не превышали установленных для категории В-657.В2 значений, в заключительной стадии испытаний образец подвергали намотке на оправку диаметром 10 мм, в соответствии с требованием стандарта [27] для данной подкатегории. Несмотря на то, что среди исследуемых образцов не было ОВ подкатегории В-657.В3, проведённые испытания образца № 2, на предыдущих стадиях испытаний показали соответствие данной подкатегории значений приростов оптических потерь. Однако, намотка на радиус 5 мм показала, что потери в ОВ образца № 2 значительно превосходят нормируемые значения, таким образом ОВ отнесено к подкатегории В-657.А2.

Таблица 5.7 – Оптические потери образцов оптических волокон на макроизгибах

№ образца	Производитель	Прирост оптических потерь, дБ					
		Радиус 10 мм		Радиус 7,5 мм		Радиус 5 мм	
		1550 нм	1625 нм	1550 нм	1625 нм	1550 нм	1625 нм
1	Производитель 1	0,262	0,667	1,734	3,602	-	-
2		0,001	0,021	0,048	0,253	0,509	1,094
3	Производитель 2	0,682	1,159	3,337	6,320	-	-
4	Производитель 3	0,500	0,898	2,612	7,100	-	-
5	Производитель 4	0,289	0,665	2,413	4,948	-	-
6		1,049	2,233	-	-	-	-
7		0,469	0,815	1,942	4,125	-	-
8		1,045	2,615	-	-	-	-
9	Производитель 5	0,080	0,222	0,307	0,769	-	-
10	Производитель 6	0,257	0,635	2,519	5,013	-	-
11	Производитель 7	2,137	4,993	-	-	-	-
12		0,229	0,787	2,776	5,937	-	-
13		0,602	1,283	3,039	6,090	-	-
14		0,313	0,825	2,073	3,726	-	-
15	Производитель 8	1,003	3,172	-	-	-	-
Допустимый прирост затухания, дБ, не более							
В-657.А.1		0,75	1,5	-	-	-	-
В-657.А2		0,1	0,2	0,5	1,0	-	-
В-657.В2		0,1	0,2	0,5	1,0	-	-
В-657.В3		0,03	0,1	0,08	0,25	0,15	0,45

Как следует из данных таблицы 5.7, значения потерь, вызванных макроизгибами, в ОВ образцов с повышенной стойкостью к макроизгибам соответствуют заявленным подкатегориям. Отдельно образец № 9, хотя и декларируется производителем, как относящийся к подкатегории В-652.С, по результатам испытаний показывает, что может быть отнесён к В-657.А или В-657.В2. Это можно объяснить следующим: во-первых, у данного образца диаметр модового поля (соответствует установленным в [27] для категории В-652 значениям) оказался заметно меньшим, чем у ОВ данной категории других производителей, подтверждая при этом известный факт, что меньший диаметр модового поля обеспечивает меньшие потери на макроизгибах. При этом, данный образец не мог быть отнесён к категории ОВ с повышенной стойкостью к макроизгибам, если судить по времени его изготовления – это ОВ было изготовлено в 1994 году. На дату времени изготовления образца №9 стандарты для ОВ с повышенной стойкостью к макроизгибам ещё не были разработаны. Этот вывод также подтверждается и тем, что у образца № 9 заметен пониженный ППП в периферийной области, примыкающей к сердцевине (рисунок 5.9), таким образом, данная «старая» конструкция этого ОВ оказалась во многом подобна конструкции современных категорий В-657.А1 и В-657.А2.

Проведённые исследования на стойкость к макроизгибам также показали, что некоторые ОВ, не заявленные как стойкие к макроизгибам, тем не менее соответствуют подкатегории В-657.А1. Данный факт даёт основания предположить, что при изготовлении ОВ как подкатегории В-652, так и В-657.А1, могли быть использоваться одинаковые по конструкции заготовки (преформы). Таким образом, очень возможно, что отнесение ОВ к той или иной подкатегории производитель окончательно делает по результатам испытаний методом отбора.

Для оценки возможности определения производителя ОВ по данным анализа ИК-спектра материала ПЗП была проведена инфракрасная спектроскопия образцов ОВ подкатегории В-652.Д от производителей 1, 2, 3, 4, 6 и 7 (рисунки 5.16 и 5.17).

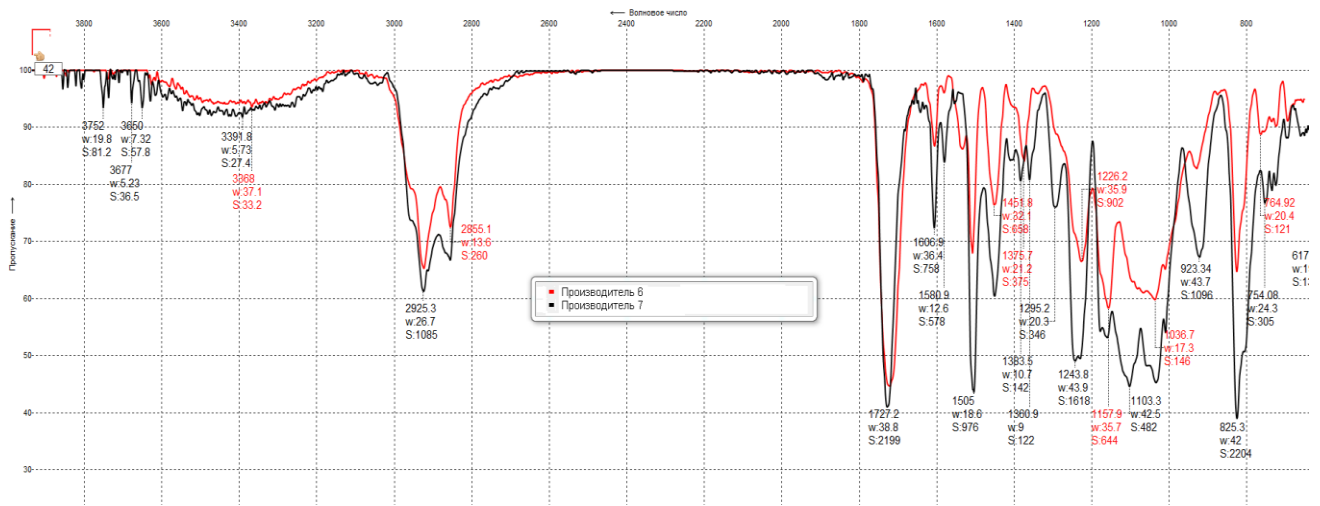


Рисунок 5.16 – Графики ИК-спектров ПЗП образцов ОВ от производителей 6 и 7

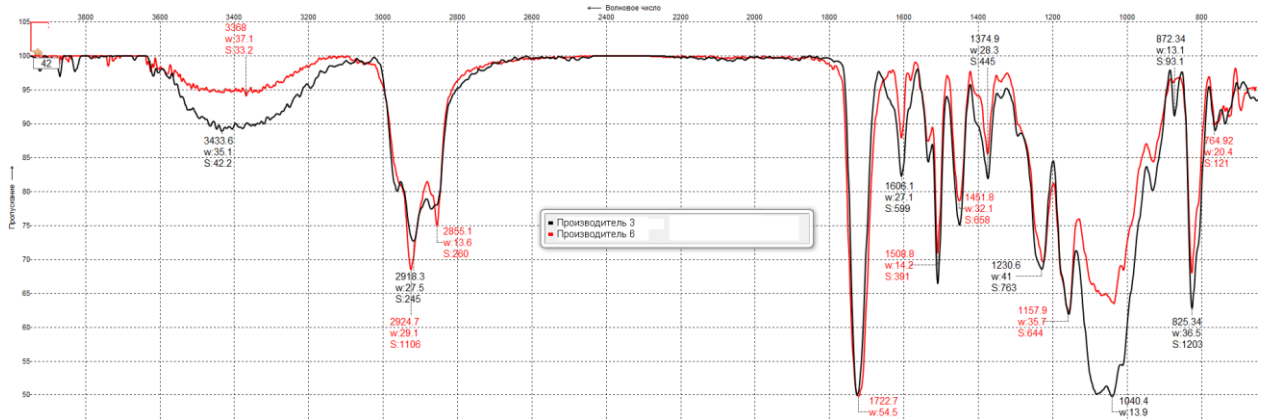


Рисунок 5.17 – Графики ИК-спектров ПЗП образцов ОВ от производителей 3 и 6

Анализ результатов проведённых испытаний показал, что наименьшее совпадение спектров наблюдалось у производителей 6 и 7 (60,6 %), что говорит об отличиях в составе материала внешнего слоя ПЗП при изготовлении ОВ, (рисунок 5.16). Наибольшее совпадение графиков (81,4 %) наблюдается у производителей 3 и 6 (рисунок 5.17). Исходя из спектральных кривых, приведённых на рисунке 5.17, можно сделать вывод, что графики выглядят идентичными. Остаточные различия заключаются в несколько большем поглощении в областях спектра $1000-1100\text{ см}^{-1}$ и $3250-3550\text{ см}^{-1}$. Это можно объяснить разной степенью полимеризации ПЗП у сравниваемых образцов, о чём было сказано ранее в гл. 2.

У образцов, для которых точно известно, что они имеют одинаковый состав композиций и технологию нанесения ПЗП, ИК-спектр может иметь значительные отличия при сравнении окрашенных и неокрашенных образцов (рисунок 5.18). Это можно объяснить с учётом того, что глубина сканирования при получении ИК спектра значительно превышает толщину слоя краски (его толщина обычно находится в пределах 3-5 мкм). В результате этого на графике спектральной зависимости выводится результирующий ИК-спектр как второго слоя ПЗП, так и окрашивающего слоя. Совпадение графиков ИК-спектра окрашенного и неокрашенного ПЗП, как следует из рисунка 5.18, составило 72,4 %.

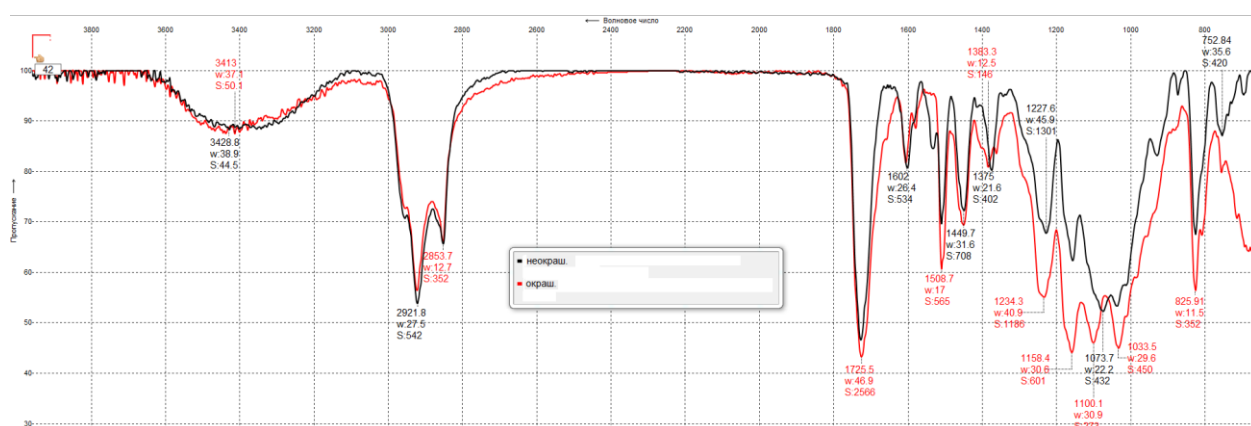


Рисунок 5.18 – Спектры ИК образцов с неокрашенным и окрашенным защитным покрытием

Суммируя изложенное, на основе приведённых данных, и с учётом того, что производитель ОВ может по своему усмотрению поменять поставщика композиций для ПЗП, надёжно идентифицировать производителя ОВ только по ИК-спектру представляется затруднительным. Исключением здесь могут быть случаи (что имеет место в практике зарубежных фирм), когда производитель ПЗП разрабатывает композиции эксклюзивно для конкретного производителя ОВ.

При этом, по виду ИК-спектра вполне возможно определить именно производителя ПЗП. Однако, для окрашенных ОВ, которые по большей степени используются в уже произведённых и проложенных ОК, эта задача сильно усложняется, т.к. предполагает исследование множества вариантов и

комбинаций ПЗП различных производителей, окрашенных всеми присутствующими на рынке производителями красок различных цветов (одних только цветов для окраски ПЗП в типовых ОК обычно может быть от 4-х до 16-ти). Число возможных комбинаций при этом может быть несколько десятков и даже сотен. Дополнительным усложнением задачи здесь также может быть возможность применения ОВ с ПЗП, окрашенным в процессе вытяжки (Color on Draw), по значительно отличающейся конструкции и технологии, по сравнению с ПЗП исследованными в данной работе, и другие «нововведения» в технологиях нанесения ПЗП, о чём ранее упоминалось в главе 1.

5.2. Выводы по главе 5

1. По результатам проведённых исследований можно заключить, что делать вывод по какому-то одному из параметров о производителе ОВ в большинстве случаев не представляется возможным.

2. Вместе с тем, при комплексном анализе оптических и геометрических параметров ОВ и их сравнении с имеющейся эталонной базой возможно с достаточной большой достоверностью определить следующее (в порядке возрастания сложности задачи) идентификационные признаки изготовителя ОВ:

- подтвердить факт, что исследуемый образец ОВ не относится к некоторой определённой подкатегории и/или указанному производителю;
- образец ОВ можно отнести к определённой подкатегории;
- определить производителя ОВ.

3. Решить задачи, указанные выше, тем проще, чем больше база данных по каждой категории и подкатегории ОВ от различных производителей. При этом, чтобы увеличить достоверность определения каждого из параметров ОВ для

любой подкатегории и любого производителя необходимо проанализировать как можно большее количество образцов.

4. Вместе с тем, определить производителя ОВ в случае применения несколькими производителями преформ от одного изготовителя, в ряде случаев не представляется возможным. С помощью анализа оптических характеристик, указанных в таблицах 5.5 и 5.6, а также с помощью анализа ППП, имеется возможность определить производителя преформы, тем самым сузив круг потенциальных производителей ОВ.

5. На основе ИК спектра ПЗП вывод о производителе ОВ может быть сделан в ограниченном числе случаев – когда известно, что данное покрытие изготавливается эксклюзивно для конкретного производителя ОВ.

ИК спектр ПЗП может являться параметром определения производителя ПЗП, что может являться отдельной задачей.

6. По результатам исследований разработана методика определения категории, производителя и марки кварцевого одномодового оптического волокна № МИ 16.К00-211-2022 [138], согласованная с ПАО «Ростелеком».

7. Оформлен патент на изобретение [139].

6. Исследование влияния внесения изменений в процедуру испытаний на стойкость ОВ к воздействию микроизгибов на получаемые результаты

6.1. Исследование влияния геометрических размеров ячейки сетки и массы грузов при проведении испытаний оптического волокна на воздействие микроизгибов по методу С

6.1.1. Исследование влияния геометрических размеров ячейки сетки при проведении испытаний оптического волокна на воздействие микроизгибов по методу С

Испытания проводились по методу С, приведённому в [91], на установке (рисунок 6.1), состоящей из: нижней металлической плиты – основания с фиксирующими стойками, прокладки из вулканизированной резины, твёрдость по Шору А которой находится в пределах от 73 до 78, набор сеток из нержавеющей стали, параметры которых приведены в таблице 6.1, верхней плиты массой 1 кг и набора калиброванных гирь массой от 1 кг до 8 кг.

Прирост затухания измерялся с помощью источника излучения Топаз-7100-А и измерителя оптической мощности Exfo FPM-302 на длинах волн 1310 нм, 1550 нм и 1625 нм.

Зависимость прироста оптических потерь, вызванных микроизгибами на примере образца ОВ с диаметром ПЗП 200 мкм, от параметров сетки при массе груза 9 кг приведена на рисунке 6.2.

Испытаниям подвергались образцы ОВ типа В-652.D. Длина образца ОВ, подвергаемая воздействию микроизгибов, равна (320 ± 5) мм.

Таблица 6.1 – Параметры сеток

№ п/п	Размер ячейки, мм	Диаметр проволоки, мм
1	0,25	0,16
2	0,40	0,25
3	0,55	0,28
4	0,80	0,25
5	1,0	0,25

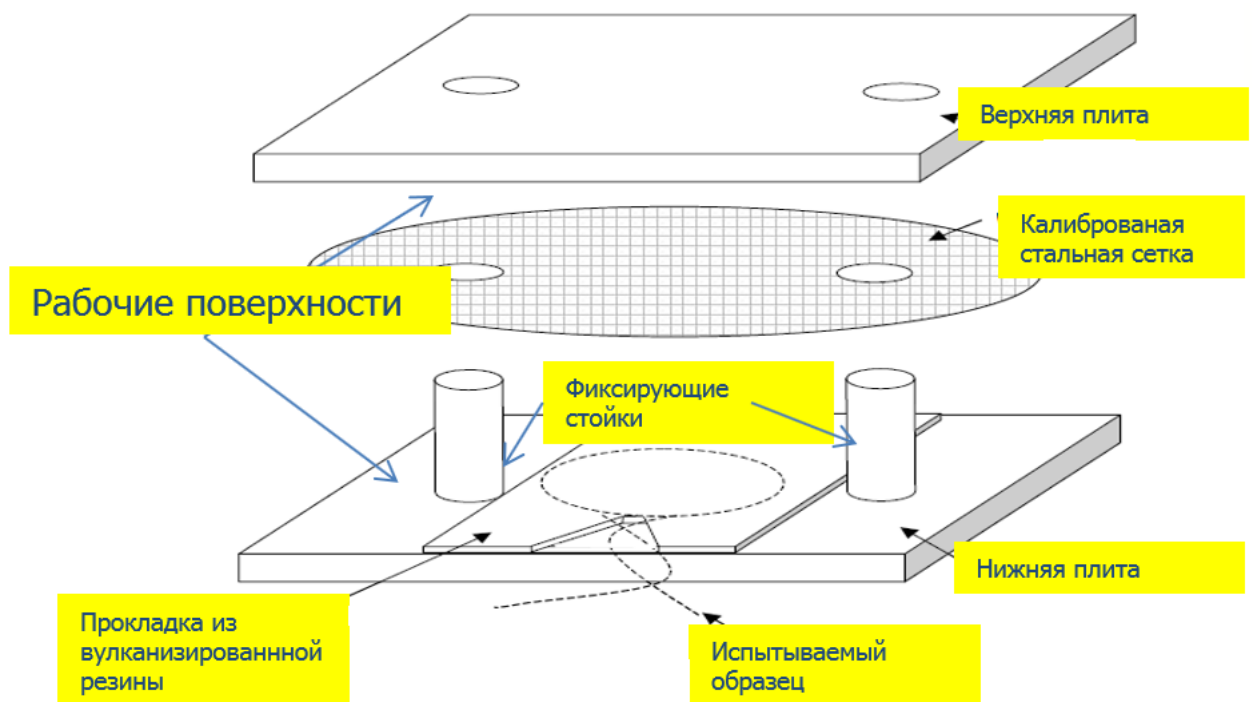


Рисунок 6.1 – Установка для проведения испытаний по методу С [91]

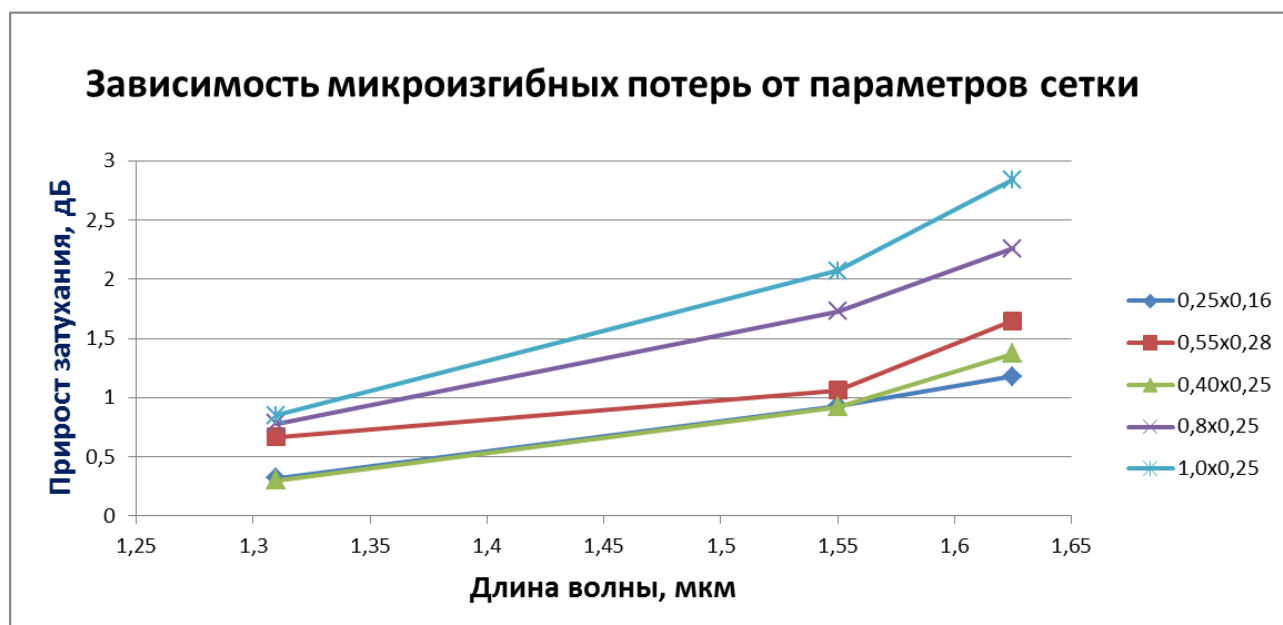


Рисунок 6.2 – Зависимость прироста оптических потерь, вызванных микроизгибами оптического волокна, от параметров сетки

6.1.2. Исследование влияния массы грузов при проведении испытаний оптического волокна на воздействие микроизгибов по методу С

Графики зависимости прироста затухания от прилагаемой нагрузки приведены на рисунках 6.3 – 6.5. При массе груза менее 2 кг (включая массу плиты), наблюдаемый прирост затухания находится на уровне экспериментальных шумов и не превышает $\pm 0,2$ дБ на всех длинах волн 1310 нм, 1550 нм и 1625 нм. Надёжные количественные оценки и сравнения становятся возможными при массе груза более 4 кг. Кроме того, при нагрузках более 8 кг (с учётом массы плиты) для некоторых образцов наблюдалось нарушение структуры ПЗП в результате механического воздействия со стороны сетки.

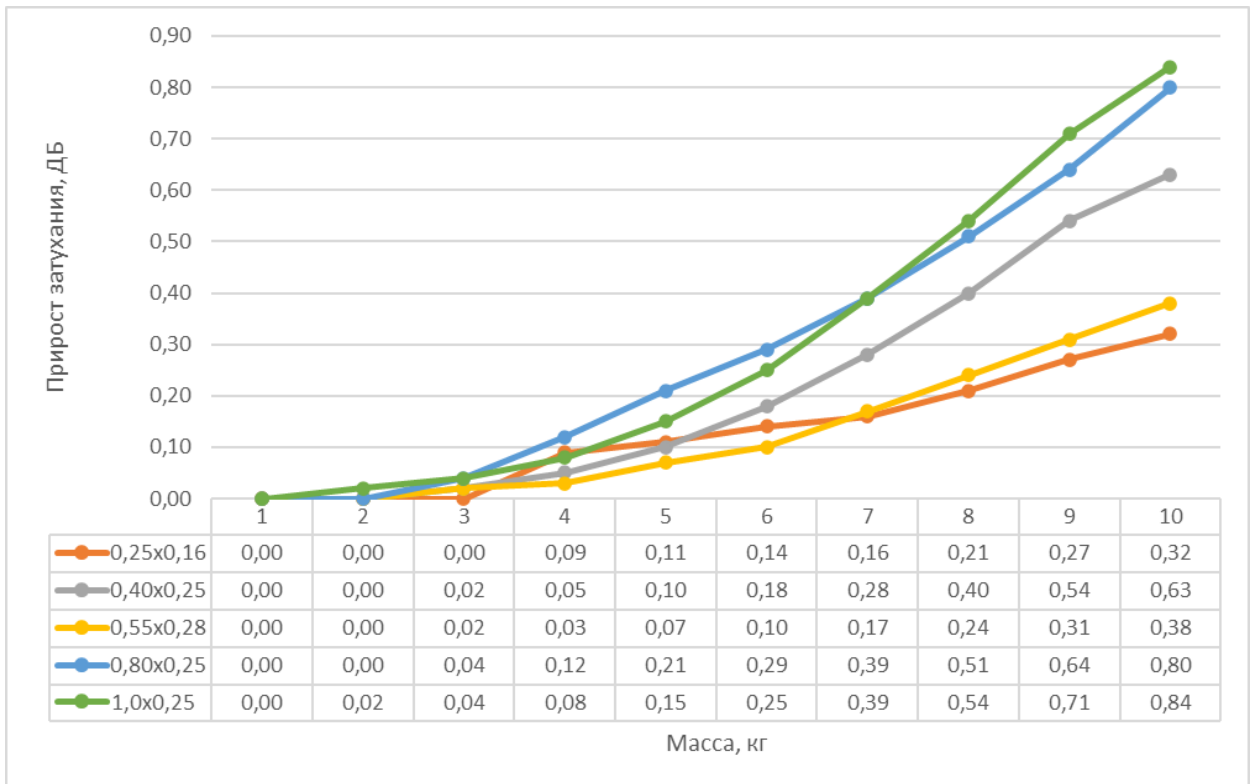


Рисунок 6.3 – Зависимость оптических потерь от массы груза на длине волны 1310 нм

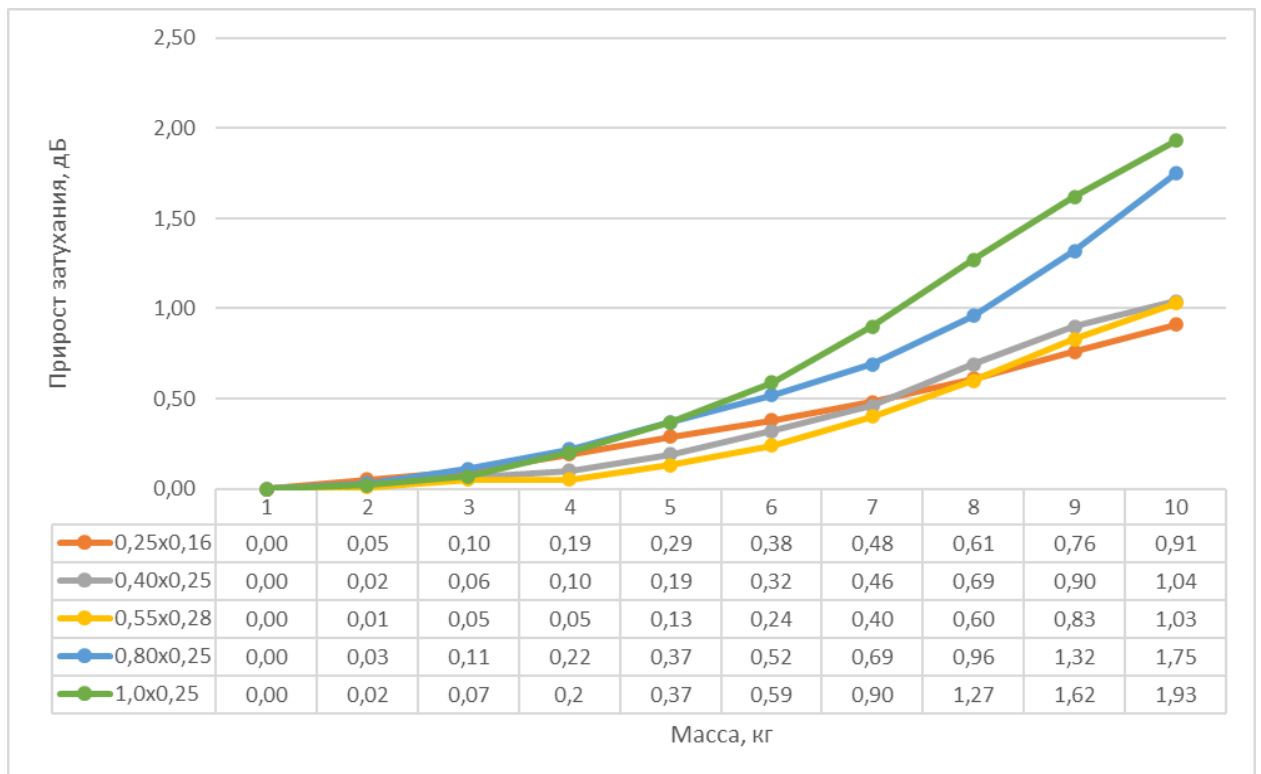


Рисунок 6.4 – Зависимость оптических потерь от массы груза на длине волны 1550 нм

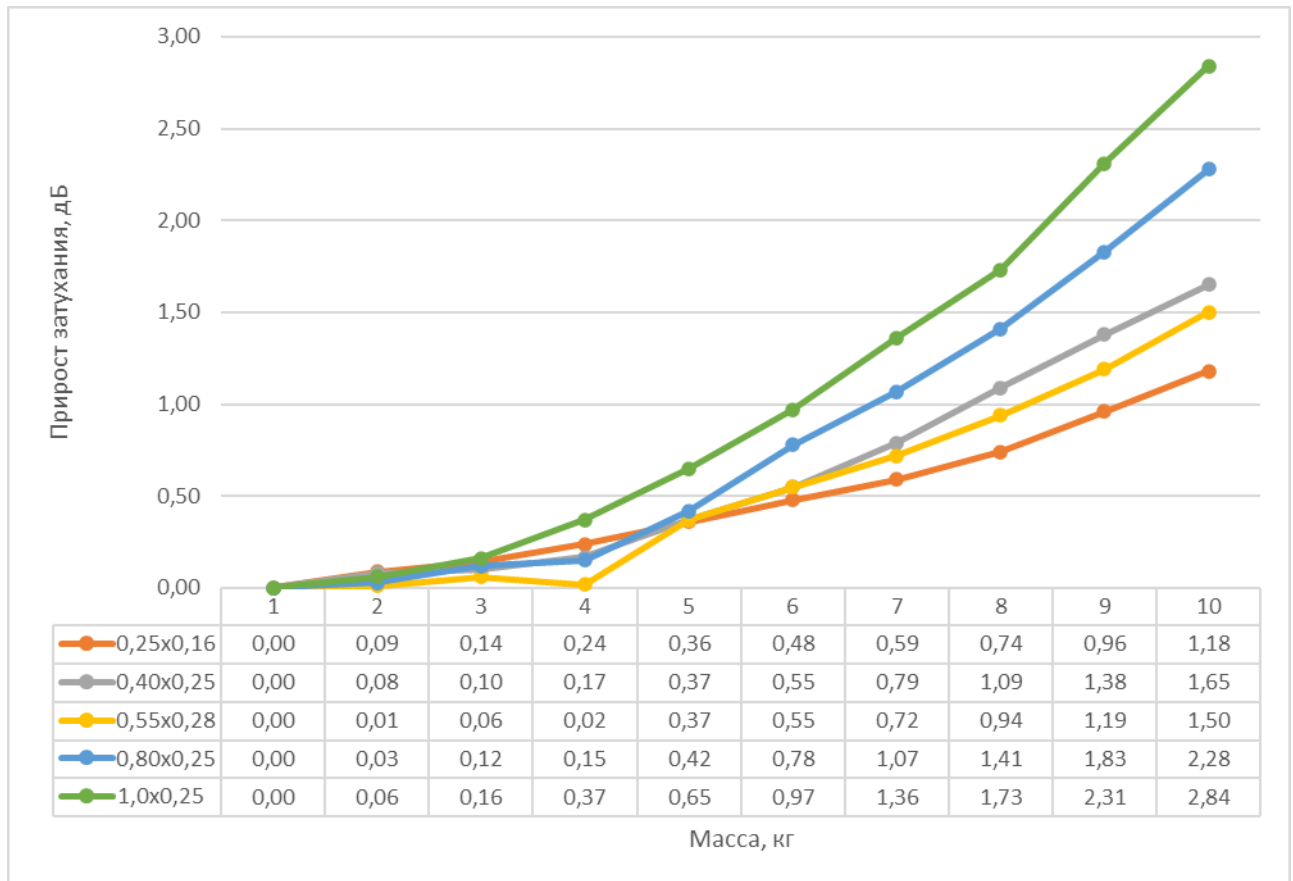


Рисунок 6.5 – Зависимость оптических потерь от массы груза на длине волны 1625 нм

В результате проведённых экспериментов было установлено, что оптимальная масса грузов при исследованиях выбранного набора образцов ОВ находится в пределах от 4 до 7 кг.

С учётом изложенного выше, а также того факта, что потери, вызванные микроизгибами ОВ, при применении сетки с размером ячеек 1,0x0,25 мм проявляются при меньшей массе грузов, исследования, описанные в разделе 6.2 проводились с применением сетки с размером ячеек 1,0x0,25 мм и нагрузкой 6 кг, включая массу плиты.

Согласно [91] требуется произвести расчёт чувствительности (S) – зависимости прироста оптических потерь от массы, по формуле:

$$S = \frac{\alpha}{W} \text{ (дБ/кг)} \quad (6.1)$$

где, α – прирост затухание вследствие воздействия микроизгибов,

W – масса, воздействующая на ОВ.

Предполагается, что чувствительность может применяться для прогнозирования оптических потерь, вызванных микроизгибами при воздействии на ОВ отличной массы, что может быть полезно при сравнении результатов испытаний, полученных разными лабораториями, использующими идентичный размер сеток, но разные веса грузов.

Для того чтобы вышесказанное было справедливым графики на рисунках 6.6 – 6.8 должны представлять собой прямую линию, параллельную оси абсцисс.

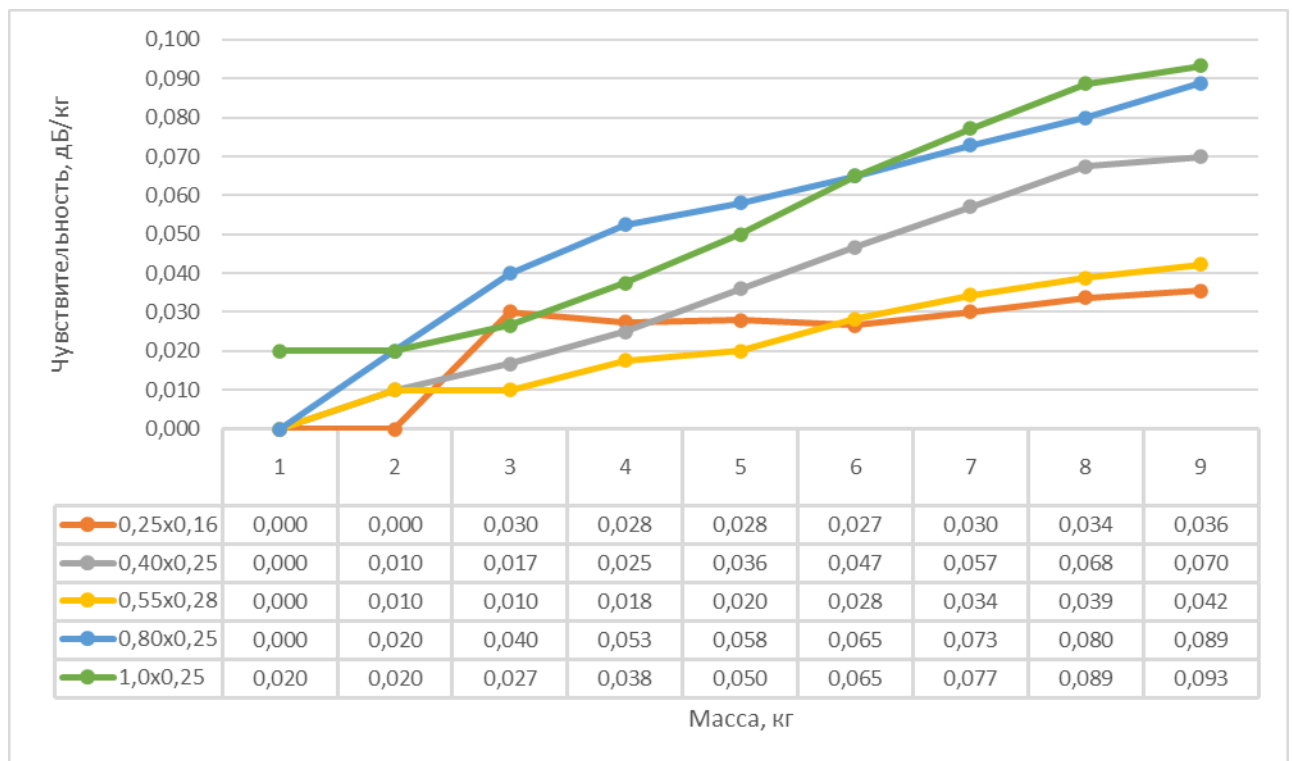


Рисунок 6.6 – Зависимость чувствительности от массы груза на длине волны 1310 нм

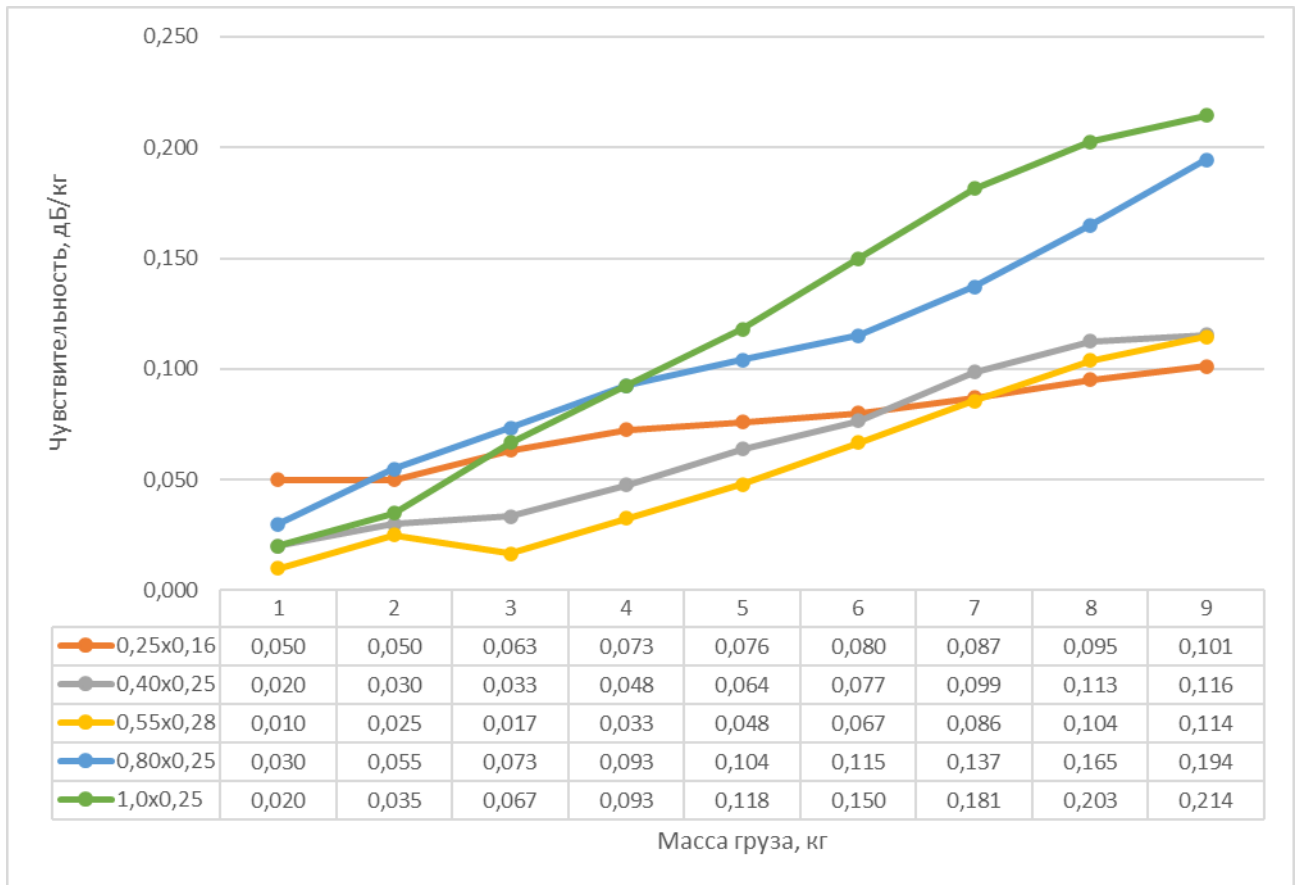


Рисунок 6.7 – Зависимость чувствительности от массы груза
на длине волны 1550 нм

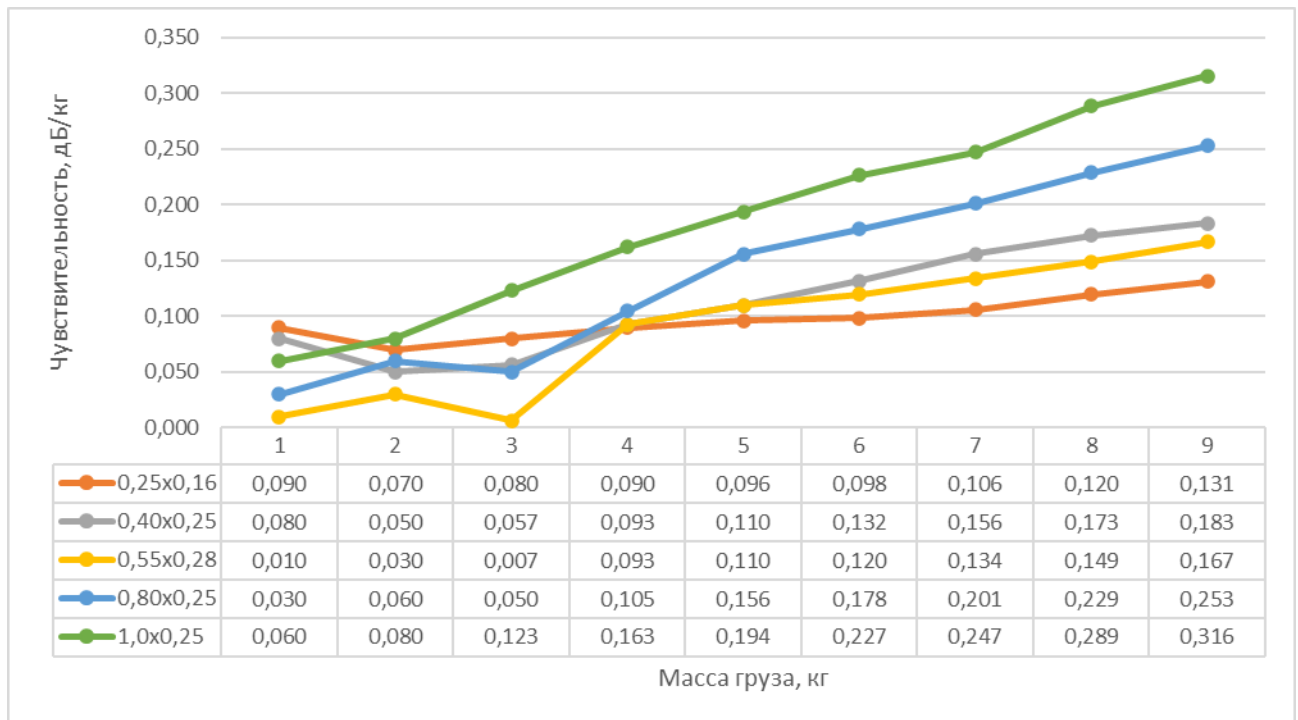


Рисунок 6.8 – Зависимость чувствительности от массы груза
на длине волны 1625 нм

Из графиков, приведённых на рисунках 6.6 – 6.8 прямой можно аппроксимировать лишь графики для сетки 0,25x0,16 мм. Но ОВ наименее чувствительно к микроизгибам вызванным воздействием данной сетки, а на длине волны 1310 нм и вовсе лежат в диапазоне шумов ($\pm 0,2$ дБ). Для всех остальных типоразмеров сеток формула (6.1) не отражает выявленный при экспериментах характер зависимости и не может применяться для оценки оптических потерь, вызванных микроизгибами ОВ.

6.2. Исследование возможности применения метода С для оценки оптических потерь в ОВ, вызванных микроизгибами при воздействии отрицательных температур

С целью оценки возможности применения метода С [91] для измерения потерь, вызванных воздействием микроизгибов при отрицательных температурах, был проведён эксперимент, суть которого заключалась в размещении установки, приведённой на рисунке 6.1 в климатическую камеру. Измерения прироста затухания в НКУ проводились на свободном ОВ – без воздействия грузов и со снятой верхней плитой установки. После выхода камеры на заданный температурный режим (минус 50 °С) на ОВ размещали верхнюю плиту, затем добавляли грузы. Для проведения каждой манипуляции требовалось открывать дверцу климатической камеры, что нарушало температурный режим – после размещения плиты или груза необходимо было восстановить температуру внутри камеры до заданного значения. Измерения проводили через час после размещения каждого груза. Результаты испытания приведены на рисунке 6.9.

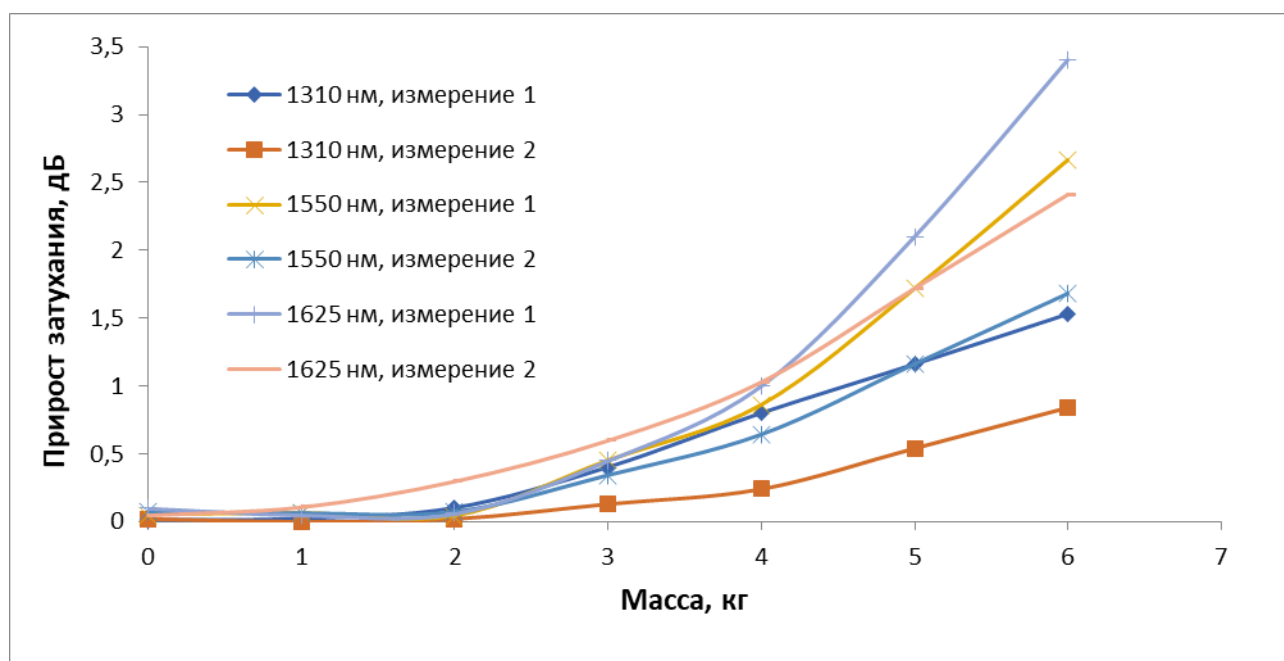


Рисунок 6.9 – Прирост оптических потерь, вызванных микроизгибами при температуре минус 50 °С

Анализ графиков, приведённых на рисунке 6.9, показал отсутствие воспроизводимости результатов измерений, что, по всей видимости, было вызвано необходимыми манипуляциями с образцом и установкой в климатической камере при изменении нагрузки (открытие и закрытие дверцы камеры, выход на необходимую температуру, что приводило к значительному увеличению вероятности изменения положения образца и подводющих оптических пигтейлов). Кроме того, было замечено, что при температуре минус 50 °С происходило изменение твёрдости резиновой подложки, т.е. возможный дополнительный прирост затухания при температуре минус 50 °С мог быть вызван не только возможным изменением свойств ПЗП, но и самой подложки. Следует отметить, что при удалении резиновой подложки отсутствовала воспроизводимость результатов в т.ч. и при НКУ.

Исходя из изложенного выше, был сделан вывод о невозможности применимости описанной методики для исследования оптических потерь, вызванных микроизгибами ОВ, что привело к необходимости её доработки. С целью снижения количества манипуляций с ОВ было принято решение понижать

температуру до 0 °С, затем до минус 20 °С и до минус 40 °С при полностью собранной установке на микроизгиб, т.е. с расположенной поверх ОВ верхней плитой. Для сохранения температурного режима камеры во время размещения грузов был изготовлен механизм их подачи через конструктивное отверстие климатической камеры, состоящий из тросика (1), перекинутого через блок (2), с закреплённой ёмкостью (3), в которую помещаются грузы (4). Ёмкость с грузами опускается на верхнюю плиту испытательной установки (5), размещённой в климатической камере (6). Схема установки приведена на Рисунке 6.10.

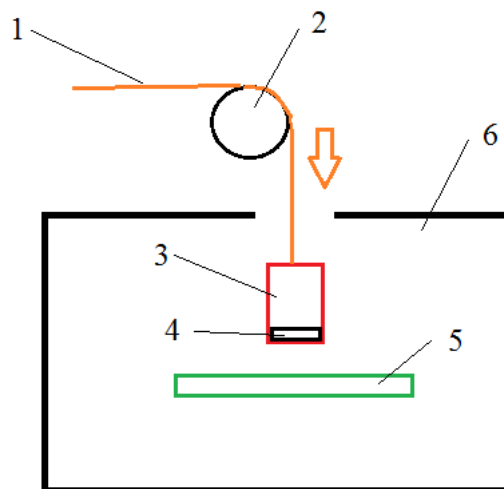


Рисунок 6.10 – Схема испытательной установки по определению оптических потерь, вызванных микроизгибами оптического волокна

Результаты измерений при нагрузке 6 кг приведены в таблице 6.2. Доработанный метод демонстрирует хорошую воспроизводимость результатов измерений.

Сравнение оптических потерь, вызванных микроизгибами при температуре минус 40 °С, для образца ОВ типа В-652.D одного из поставщиков, представленного на рынке РФ, приведены на рисунке 6.11. Результат подтверждает известный из литературных источников [68, 74, 76, 85] факт – оптические потери в ОВ повышаются с понижением температуры окружающей среды.

Таблица 6.2 – Прирост оптических потерь (дБ), вызванных микроизгибами ОВ (доработанный метод, масса нагрузки 6 кг)

Температура, °С	Серия измерений	Длина волны, нм		
		1310	1550	1625
0	1	0,37	0,85	1,24
	2	0,38	0,83	1,20
-20	1	0,45	1,05	1,30
	2	0,44	0,88	1,24
-40	1	0,90	1,57	1,90
	2	0,83	1,47	1,95

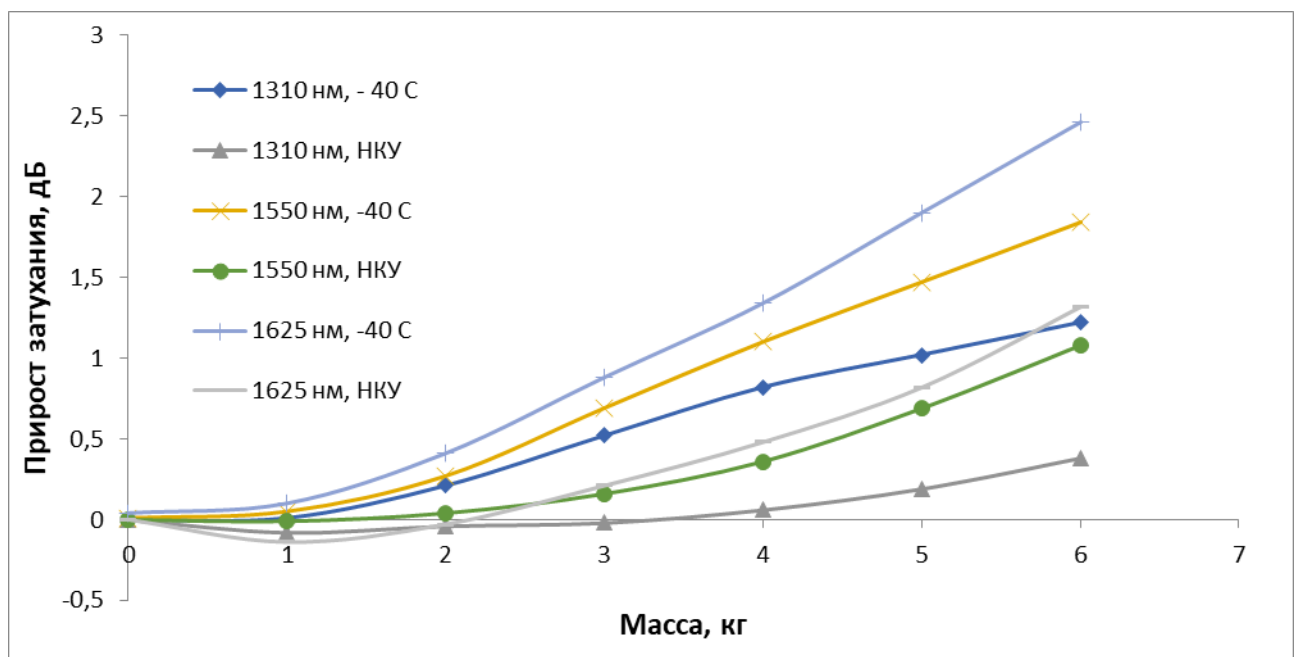


Рисунок 6.11 – Оптические потери в оптическом волокне типа В-652.D, вызванные микроизгибами

6.3. Выводы по главе 6

1. Проведены исследования зависимости прироста оптических потерь, вызванных микроизгибами ОВ образцов одномодовых ОВ G.652.D при различных нагрузках и использовании сеток различных типоразмеров. Установлено, что для рассматриваемой испытательной установки наибольшие приросты значений оптических потерь и лучшая воспроизводимость результатов измерений наблюдаются при использовании сеток с наибольшим из представленных размером ячеек и диаметром проволоки (0,8x0,25 мм или 1,0x0,25 мм) при нагружающих массах не менее 4 кг.

2. Воспроизводимость результатов измерений прироста оптических потерь одномодовых ОВ типа В-652.D, вызванных микроизгибами, при применении рассматриваемой установки, наблюдается при нагрузке не менее 4 кг.

3. Вследствие возможности повреждения ПЗП в ходе эксперимента при приложении нагрузок (добавлении грузов), рекомендуется ограничить верхний предел нагрузки (массы грузов и верхней плиты установки) значением 7 кг.

4. Вследствие нелинейной зависимости прироста оптических потерь от массы груза с помощью параметра чувствительности ОВ к воздействию микроизгибов, выраженного в дБ/кг, нет возможности прогнозирования величины прироста оптических потерь при воздействии отличных от использованных непосредственно во время измерений нагрузок.

5. Произведена доработка установки с целью обеспечения возможности измерения оптических потерь, вызванных микроизгибами, при воздействии отрицательных температур. Воспроизводимые результаты получены вплоть до температуры минус 40 °С. При температурах, превышающих данное значение наблюдается отсутствие воспроизводимости результатов измерений вследствие потери эластичных свойств резиновой прокладки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Освоено серийное производство отечественных УФ-отверждаемых полимерных композиций, применяемых для изготовления первого и второго слоёв двухслойного ПЗП кварцевых световодов. Разработанные УФ-отверждаемые полимерные композиции применяются для изготовления кварцевых ОВ с двухслойным ПЗП, в т.ч. одномодового радиационностойкого оптического волокна марки ОВ-Ер по КЖИБ.636570.518 ТУ [140] и многомодового оптического волокна с градиентным профилем показателя преломления марки ОВ-МГ1-01 по КЖИБ.636570.540 ТУ [141], а также ОВ для волоконных гироскопов. При этом, УФ-отверждаемая полимерная композиция для второго слоя ПЗП пригодна для изготовления плотного буферного покрытия ОВ и оптических микрокабелей, эксплуатирующихся при температурах до минус 40 °С.

2. Результаты исследований ОВ с различной степенью полимеризации ПЗП показали, что степень полимеризации ПЗП оказывает влияние на критически важные и практически значимые свойства ОВ, такие как усилие снятия ПЗП и параметр n (стойкость к коррозии в напряжённом состоянии). В ходе исследований определены технологические операции, влияющие на полимеризацию ПЗП при вытяжке ОВ. Определены оптимальные для исследованного процесса и применяемых материалов технологические режимы нанесения композиций двухслойного УФ-отверждаемого ПЗП при вытяжке кварцевых световодов. Оформлен акт об использовании результатов диссертационной работы (Приложение А).

3. Результаты исследований ОВ с уменьшенным диаметром ПЗП (200 мкм) показали возможность их применения в конструкциях ОК, где отсутствует контакт этих ОВ с гидрофобным наполнителем или с ВБ-материалом. При наличии контакта у ОВ с диаметром ПЗП 200 мкм происходит значительно более существенная деградация покрытия по сравнению с ОВ с диаметром ПЗП 250 мкм.

Благодаря преимуществу в массогабаритных размерах ОВ с диаметром ПЗП 200 мкм и идентичности остальных свойств, подобные ОВ позволяют существенно снизить диаметр ОК и увеличить его строительную длину. В результате исследований была создана конструкция оптического микрокабеля, защищённая патентом RU 2772554 C1 [127].

4. Разработана методика определения совместимости материалов, применяемых в конструкциях ОК, [120] для осуществления обоснованного выбора материалов для ОК и элементов их конструкции. Разработанная методика была применена для оценки качества разработанных отечественных УФ-отверждаемых полимерных композиций, применяемых для изготовления первого и второго слоёв двухслойного ПЗП кварцевых световодов, а также в ходе исследований ОВ с диаметром ПЗП 200 мкм и 250 мкм, что позволило рекомендовать ОВ с ПЗП на основе разработанных УФ-отверждаемых композиции к применению и гарантировать надёжность и долговечность ОВ и ОК, на основе вышеуказанного ОВ, в течение необходимого срока службы, а также выявить значительно большее влияние внутримодульного гидрофобного заполнителя на ОВ с диаметром ПЗП 200 мкм в сравнении с ОВ с диаметром ПЗП 250 мкм. Разработанная методика определения совместимости материалов, применяемых в конструкциях ОК, [120] согласована с ПАО «Ростелеком» и вошла в приложение Г ГОСТ Р 52266-2020 «Кабели оптические. Общие технические условия» [116].

5. С применением разработанной методики по определению микроизгибных потерь в ОВ при отрицательных температурах осуществлена оценка влияния ПЗП на оптические потери в условиях механических и температурных воздействий, характерных для типовых условий эксплуатации.

6. Разработана методика определения категории, производителя и марки кварцевого одномодового ОВ, которая позволяет заказчикам кабельных изделий осуществлять верификацию производителя, заявленного в документации на ОК ОВ на соответствие указанным в ТЗ на объект, что препятствует применению в ОК менее качественного ОВ, что, в свою очередь, ведёт к повышению качества и

срока службы ОК и ВОЛС в целом. В то же время разработанная методика способствует защите ответственных поставщиков ОБ и ОК от необоснованных претензий заказчиков. Разработанная методика [138] согласована с ПАО «Ростелеком». На методику оформлен патент № RU 2 803 977 С1 «Способ идентификационных испытаний оптических волокон» [139].

Автор выражает благодарность и признательность:

- Коллективу отделения «Кабели, провода и арматура для систем телекоммуникаций и информатизации» ОАО «ВНИИКП» за помощь в изготовлении образцов ОК, а также проведении испытаний.

- Корякину А.Г. под руководством которого выполнена данная работа за неоценимую помощь, оказанную при написании данной работы.

- Васильеву Е.Б. и Боеву М.А. за мотивацию к написанию данной работы.

- Крючкову А.А. и Степановой Т.А., оказавшим большую помощь в проведении испытаний по термическому и спектральному анализу образцов ОБ с различными ПЗП.

- АО «НИИ полимеров» (Хамидуловой З.С., Ароновичу Д.А. и Синеековой О.А.) авторов УФ-отверждаемых композиций, без разработки которых не мог быть написан ряд глав данной работы.

- АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (Унтилову А.А., Реуцкому А., Щеглову А.) за помощь в изготовлении образцов ОБ.

- ФГБУН ИРЭ РАН (Чаморовскому Ю.К.) за помощь в проведении испытаний по определению степени полимеризации ПЗП.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- ВЗП – вторичное защитное покрытие
- ВОЛС – волоконно-оптические линии связи
- ВРМБ – вынужденное рассеяние Манделъштамма-Бриллюэна
- ДСК – дифференциальная сканирующая калориметрия
- ИК – инфракрасный
- МСЭ-Т – Международный союз электросвязи (сектор стандартизации электросвязи)
- МЭК – Международная электротехническая комиссия
- НКУ – нормальные климатические условия
- ОВ – оптическое волокно
- ОК – оптический кабель
- ПЗП – первичное защитное покрытие
- ПМД – поляризационная модовая дисперсия
- ППП – профиль показателя преломления
- ТМА – термомеханический анализ
- ТКЛР – температурный коэффициент линейного расширения
- УФ – ультрафиолетовый

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мещанов Г.И. Кабельная промышленность мира и СНГ в 2017 году / Г.И. Мещанов // Кабели и провода. – 2018. – № 2. – С. 3-9.
2. Шавкунов С.В. Цифровая экономика и необходимость модернизации магистральных волоконно-оптических сетей России в период 2020–2030 годов / С.В. Шавкунов // Кабели и провода. – 2021. – № 3. С. 11-18.
3. Тарасов Д.А. Развитие волоконной оптики в условиях быстро растущего трафика // Труды XVI Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» (МКЭЭЭ-2016). – М.: Знак, 2016. С. 66-67.
4. Тарасов Д.А. Исследование оптического волокна с новыми УФ-отверждаемыми акриловыми защитными покрытиями / Д.А. Тарасов, И.А. Овчинникова, Д.А. Аронович, З.С. Хамидулова // Клеи, герметики, технологии. – 2019. – № 3. С. 34-38.
5. Schmid S.R., Toussaint A.F. Optical fiber coatings. Chapter 4 (pp. 95-122) of Specialty optical fibers handbook edited by Mendez A. and Morse T.F. 2007. Academic Press. 841 p.
6. Тарасов Д.А. Первичные защитные покрытия и их влияние на характеристики оптических волокон // Труды XVII Международной конференции «Электротехника, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». – М.: Знак, 2018. С. 79-81.
7. Tarasov D.A., Ovchinnikova I.A., Meschanov G.I., Gordienko V.N. and Tsym A.Y., Effect of Deviation from Standard Test Procedure for Evaluation Optical Fibres Compatibility with Filling Compounds // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, DOI: 10.1109/SOSG.2019.8706749.
8. Семёнов С.Л. Физические процессы, определяющие прочность и долговечность волоконных световодов: дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.10 / Семёнов Сергей Львович. – М., 1997. 125 с.

9. Теснер П.А. Кинетика образования пироуглерода. Итоги науки и техники, серия Кинетика и катализ, Вып. 16. / П.А. Теснер – М., ВНИИТИ, 1987. 29 с.

10. DiMarchello F.V., Huff R.G., Lemaire P.J., Walker K.L. Hermetically sealed optical fibers // Патент по заявке 413,514 от 27.09.1989 № US 5000541 А, опубл. 19.03.1991.

11. Lemaire P.J., Lindholm E.A. Hermetic optical fibers: carbon coated optical fibers Chapter 14 (pp. 453-490) of Specialty optical fibers handbook edited by Mendez A. and Morse T.F. 2007. Academic Press. 841 p.

12. Bogatyrev V.A., Semjonov S. Metal-coated fibers Chapter 15 (pp. 491-512) of Specialty optical fibers handbook edited by Mendez A. and Morse T.F. 2007. Academic Press. 841 p.

13. Кэттрон У.У., Шмид С.Р., Мерфи Э.Д., Циммерман Д.М., Торторелло Э.Д. Вторичные покрытия D1364 ВТ на оптическом волокне // Патент на изобретение по заявке 2011136326/05 от 13.12.2007, № RU 2472831 С1, опубл. 20.01.2013, бюл. № 2.

14. Стеман П., У С., Шмид С., Мерфи Э., Циммерман Д., Торторелло Э. Отверждаемые излучением первичные покрытия D1363 ВТ на оптическом волокне // Патент на изобретение по заявке 2009117461/05 от 13.12.2007, № RU 2435814 С2, опубл. 10.12.2011, бюл. № 34.

15. Норлин Т.Д., Шмид С.Р., Мерфи Э.Д., Циммерман Д.М., Торторелло Э.Д. Отверждаемое излучением первичное покрытие D1365 ВJ для оптического волокна // Патент на изобретение по заявке 2009117459/05 от 13.12.2007, № RU 2436824 С2, опубл. 20.12.2011, бюл. № 35.

16. Кэттрон У.У., Шмид С.Р., Мерфи Э.Д., Циммерман Д.М., Торторелло Э.Д. Вторичные покрытия D1364 ВТ на оптическом волокне // Патент на изобретение по заявке 2009117460/05 от 13.12.2007, № RU 2436823 С2, опубл. 20.12.2011, бюл. № 35.

17. Кэттрон У.У., Шмид С.Р., Мерфи Э.Д., Циммерман Д.М., Торторелло Э.Д. Отверждаемое излучением вторичное покрытие D1370 СR для оптического

волокна // Патент на изобретение по заявке 2009117454/05 от 13.12.2007, № RU 2436822 С2, опубл. 20.12.2011, бюл. № 35.

18. Кэттрон У.У., Шмид С.Р., Мерфи Э.Д., Циммерман Д.М., Торторелло Э.Д. Отверждаемое излучением вторичное покрытие D1369 CR для оптического волокна // Патент на изобретение по заявке 2009117453/05 от 13.12.2007, № RU 2434915 С2, опубл. 27.11.2011, бюл. № 33.

19. У С., Шмид С.Р., Бишоп Т.Э., Циммерман Д.М., Кэттрон У.У., Мерфи Э.Д., Шах П. Отверждаемые облучением суперпокрытия одномодового оптического волокна // Патент на изобретение по заявке 2013132677/03 от 08.10.2010, № RU 2539444 С1, опубл. 20.01.2015, бюл. № 2.

20. Konstantinidis K., Garner H., Haslov P., Kim J., Simoff D., Vaidya D., Arashitani Y. Optical fiber coatings for reducing microbend losses // Патент по заявке 10162551.5 от 11.05.2010, № EP 2354820 А1, опубл. 10.08.2011, бюл. № 2011/32.

21. Szum D.M., Chawla Ch.P., Bishop T.E. Radiation-curable optical fiber coatings having reduced yellowing and fast cure speed // Патент по заявке 09/099,198 от 18.06.1998, № US 6187835 В1; опубл. 13.02.2001.

22. Khudyakov I.V., Overton B.J., Purvis M. Radiation curable coating composition with hydrophobic properties for optical fibers and optical fibers coated thereby // Патент по заявке 09/361,377 от 27.07.1999 № US 6316105 В1, опубл. 13.11.2001.

23. Шмид С., Нильс П., Стеман П., У С., Кэттрон У., Норлин Т., Мерфи Э., Циммерман Д., Торторелло Э. Суперпокрытия D1381 для оптического волокна // Патент на изобретение по заявке 2009117457/05 от 13.12.2007, № RU 2439113 С2, опубл. 10.01.2012, бюл. № 1.

24. У С., Шмид С.Р., Мерфи Э.Д., Циммерман Д.М., Торторелло Э.Д. Отверждаемое излучением первичное покрытие D1378 СА для оптического волокна // Патент по заявке 2009117455/05 от 13.12.2007 № RU 2439112 С2, опубл. 10.01.2012, бюл. № 1.

25. Лихтшайдл В. Системы для нанесения покрытий на оптическое волокно. / В. Лихтшайдл // Кабели и Провода, – 2009. – № 2. – С. 18-23.

26. ГОСТ Р МЭК 60793-2-10-2018. Волокна оптические. Часть 2-10. Технические требования к изделию. Групповые технические требования к многомодовым оптическим волокнам категории А. – М.: Стандартинформ, 2018. – 45 с.

27. ГОСТ Р МЭК 60793-2-50-2022. Волокна оптические. Часть 2-50. Технические требования к изделию. Групповые технические требования к одномодовым оптическим волокнам класса В. – М.: Стандартинформ, 2022. – 34 с.

28. ГОСТ Р МЭК 60793-1-21-2012. Волокна оптические. Часть 1-21. Методы измерений и проведение испытаний. Геометрия покрытия. – М.: Стандартинформ, 2014. – 14 с.

29. Тарасов Д.А. Влияние степени полимеризации первичного защитного покрытия на механические характеристики оптического волокна / Д.А. Тарасов, Э.Я. Геча, В.Н. Гордиенко, И.А. Овчинникова // Кабели и Провода, – 2019. – № 5. – С.19-25.

30. ГОСТ Р МЭК 60793-1-32-2010. Волокна оптические. Часть 1-32. Методы измерений и проведение испытаний. Снятие покрытия. – М.: Стандартинформ, 2011. – 11 с.

31. ГОСТ Р МЭК 60793-1-50-2015 Волокна оптические. Часть 1-50. Методы измерений и проведение испытаний. Испытание влажным теплом (установившийся режим). – М.: Стандартинформ, 2015. – 10 с.

32. ГОСТ Р МЭК 60793-1-53-2015 Волокна оптические. Часть 1-53. Методы измерений и проведение испытаний. Испытание погружением в воду. – М.: Стандартинформ, 2015. – 7 с.

33. Ritter Jr. J.E. Stress corrosion susceptibility of polymeric-coated soda-lime glass // Journal of the American chemistry society, Vol. 56, № 7. 1973. pp. 402-403.

34. Wang T.T., Vazirani H.N., Schonhorn H., Zupko H.M. Effects of water and moisture on strengths of optical glass (silica) fibers coated with a UV-cured epoxy acrylate // J. Applied polymer science, Vol. 23, 1979. pp. 887-892.

35. Armstrong J.L., Matthewson M.J., Juarez M.G., Chou C.Y. The effect of the diffusion rates of optical fiber polymer coatings on aging // Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., vol. 3848, 1999, pp. 62-69.
36. Mrotek (Armstrong) J.L., Matthewson M.J., Kurkjian C.R., Diffusion of moisture through optical fiber coatings // Journal of Lightwave Technology, vol. 19, № 7, 2001, pp. 988-993.
37. ГОСТ Р МЭК 60793-1-52-2015 Волокна оптические. Часть 1-52. Методы измерений и проведение испытаний. Испытание на воздействие смены температур. – М.: Стандартинформ, 2015. – 7 с.
38. ГОСТ Р МЭК 60793-1-31-2010 Волокна оптические. Часть 1-31. Методы измерений и проведение испытаний. Прочность при разрыве. – М.: Стандартинформ, 2011. – 20 с.
39. ГОСТ Р МЭК 60793-1-33-2014 Волокна оптические. Часть 1-33. Методы измерений и проведение испытаний. Стойкость к коррозии в напряженном состоянии. – М.: Стандартинформ, 2015. – 34 с.
40. ГОСТ Р МЭК 60793-1-30-2010 Волокна оптические. Часть 1-30. Методы измерений и проведение испытаний. Проверка прочности оптического волокна. – М.: Стандартинформ, 2011. – 11 с.
41. ТУ 16.К71-381-2007 Кабель оптический внутриобъектовый. – М.: ВНИИКП, 2007.
42. КЖИБ.3587.517 ТУ Кабели оптические специального назначения бортовые радиационностойкие. – М.: ВНИИКП, 2019.
43. Mazzaresse D., Kinard M., Konstadinidis K. Long-term cable reliability design criteria // J. Euro Wire, March 2015. pp. 86-88.
44. КЖИБ.27.31.11.527 ТУ Кабель оптический комбинированный грузонесущий специального назначения марки ОКЦТ-01. – М.: ВНИИКП, 2020.
45. ГОСТ Р 56292-2014 Кабели для сигнализации и блокировки. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2015. – 30 с.
46. ГОСТ ИЕС 60811-604-2016 Кабели электрические и волоконно-оптические. Методы испытаний неметаллических материалов. Часть 604.

Физические испытания. Определение отсутствия коррозионно-активных компонентов в компаундах наполнителей. – М. Стандартинформ, 2017. – 11 с.

47. Нестерко В.А. Оценка стойкости оптических кабелей к радиальному воздействию воды: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.02 / Нестерко Виктория Александровна. – М., 2005. 190 с.

48. ITU-T L.100. Series L: Environment and ICTS, climate change, E-waste, energy efficiency; Construction, installation and protection of cables and other elements of outside plant. Optical fibre cables for duct and tunnel application. 2015. 24 p.

49. ITU-T L.101. Series L: Environment and ICTS, climate change, E-waste, energy efficiency; Construction, installation and protection of cables and other elements of outside plant. Optical fibre cables for buried application. 2015. 24 p.

50. ITU-T L.102. Series L: Environment and ICTS, climate change, E-waste, energy efficiency; Construction, installation and protection of cables and other elements of outside plant. Optical fibre cables for aerial application. 2015. 24 p.

51. IEC 60793-2-10 ed. 7.0 Optical fibres – Part 2-10: Product specification for category A1 multimode fibres. 2019. 112 p.

52. IEC 60793-2-50 ed. 6.0 Optical fibres – Part 2-50: Sectional specification for class B single-mode fibres. 2018. 84 p.

53. IEC 60794-3-11 ed. 2.0 Optical fibre cables – Part 3-11: Outdoor cables – Product specification for duct, directly buried and lashed aerial single-mode optical fibre telecommunication cables. 2010. 32 p.

54. IEC 60794-4 ed. 2.0 Optical fibre cables – Part 4: Sectional specification – Aerial optical cables along electrical power lines. 2018. 46 p.

55. IEC 60794-1-21 ed. 1.0 Optical fibre cables – Part 1-21: Generic specification – Basic optical cables test procedures – Mechanical test methods. 2015. 82 p.

56. IEC 60811-604 ed. 1.0 Electric and optical fibre cables – Test methods for non-metallic materials – Part 604: Physical tests – Measurement of absence of corrosive components in filling compounds. 2012. 16 p.

57. ICEA S-87-640-2006: Standard for optical fibre outside plant communications cable. 2006. 97 p.

58. Тарасов Д.А. Анализ различных методов оценки совместимости компонентов оптических кабелей с гидрофобным наполнителем / Д.А., Тарасов И.А. Овчинникова // Фотон-Экспресс. – 2019. – № 6. С. 126-127.
59. Gardner W.B. Microbending Loss in Optical Fibers // Bell System Technical Journal, 1975, Volume 54, Issue 2, pp. 457-465.
60. Gloge D. Optical-fiber packaging and its influence on fiber straightness and loss // Bell System Technical Journal, 1975, Volume 54, Issue 2, pp. 245-262.
61. Shiue S.-T., Shen T.-Y. Design of double-coated optical fibers to minimize long-term axial-strain-induced microbending losses // Optical and Quantum Electronics, 2002, Vol. 34, pp.1219-1229.
62. Hsueh Y.-C., Lai L.-H., Tseng T.-F., Wu J.-Y., Shiue, S.-T. Microbending losses in double-coated optical fibers caused by axial strain-induced creep deformation of polymeric coatings // Journal of Applied Physics, 2010, Vol. 108, Issue 5, article № 053519.
63. Shiue S.-T. Axial strain-induced microbending losses in double-coated optical fibers // Journal of Applied Physics, 1993, Vol. 73, Issue 2, pp. 526-529.
64. Shimba H., Yoshimura K., Seikai Sh., Uchida N. Study on coating system of optical fiber // Jt Am Chem Soc/Chem Soc of Jpn Chem Congr Polym for Opt Fiber Syst, Honolulu, HI, USA, 1979, Vol. 40, p. 979.
65. Skutnik B.J. How coating/polymer properties affect fiber/cable performance // Polymer Engineering & Science, 1989, Vol. 29, Issue 17, pp. 1159-1164.
66. Shiue S.-T. The spring constant in the buckling of tightly jacketed double-coated optical fibers // Journal of Applied Physics, 1997, Vol. 81, Issue 8, pp. 3363-3368.
67. Shiue S.-T., Chen K.-Y., Tseng S.-D. Axial strain induced microbending losses in tightly-jacketed double-coated optical fibers // Journal of Applied Communications, 1997, Vol. 18, Issue 1, pp.10-14.
68. Shiue S.-T. Design of double-coated optical fibers to minimize thermally and mechanically induced microbending losses // Journal of Optical Communications, 1995, Vol. 16, Issue 4, pp. 152-155.

69. Hsueh M.-L., Lu B.-Y., Chong F.-C., Shiue S.-T. Design of double-coated optical fibers to minimize microbending losses caused by hydrostatic-pressure-induced creep deformation of polymeric coatings // *Optical Engineering*, 2010, Vol. 49, Issue, 6, article № 065006.

70. Shiue S.-T., Shen T.-Y. Design of tightly jacketed double-coated optical fibers to minimize long-term hydrostatic-pressure-induced microbending losses // *Optical Engineering*, 2002, Vol. 41, Issue 6, pp. 1313-1316.

71. Shiue S.-T. Design of double-coated optical fibers to minimize long-term hydrostatic-pressure-induced microbending losses // *Optics Letters*, 2001, Vol. 26, Issue 3, pp. 128-130.

72. Shiue S.-T. Hydrostatic pressure-induced microbending losses in tightly-jacketed double-coated optical fibers // *Journal of Optical Communications*, 1994, Vol. 15, Issue 4, pp. 144-149.

73. Shiue S.-T. Design of double-coated optical fibers to minimize hydrostatic pressure induced microbending losses // *IEEE Photonics Letters*, 1992, Vol. 4, Issue 7, pp. 746-748.

74. Yoshizawa N, Ohnishi M., Kawata O., Ishihara K., Negishi Y. Low temperature characteristics of UV-curable resin coated optical fiber // *Journal of Lightwave Technology*, 1985, Vol. 3, Issue 4, pp. 779-784.

75. Shiue S.-T., Tu Y.-K. Relaxation of thermal stresses in double-coated optical fibers // *Journal of Applied Physics*, 1999, Vol. 86, Issue 8, pp. 4085-4090.

76. Shiue S.-T., Hsu C.-S. Thermally induced microbending losses in double-coated optical fibers during temperature cycling // *Journal of Applied Physics*, 2000, Vol. 88, Issue 7, pp. 3840-3847.

77. Shen T.-Y., Shiue S.-T. Long-term thermally interfacial-shear-stress-induced delamination of polymeric coatings from glass fibers in double-coated optical fibers // *Optical Engineering*, 2003, Vol. 42, Issue 5, pp. 1456-1459.

78. Shiue S.-T. Thermal stresses in hermetically double-coated optical fibers // *Journal of Applied Physics*, 1999, Vol. 85, Issue 6, pp. 3044-3050.

79. Shiue S.-T. Thermally induced microbending losses in double-coated optical fibers at low temperature // *Materials Chemistry and Physics*, 1994, Vol. 38, Issue 2, pp. 187-190.

80. Shiue S.-T. Minimization of low temperature microbending losses in initially curved tightly jacketed double-coated optical fibres // *Optical and Quantum Electronics*, 1996, Vol. 28, pp. 1379-1394.

81. Shiue S.-T. The effects of polymeric coatings on the low-temperature microbending losses in initially curved double-coated optical fibers // *Journal of Applied Physics*, 1995, Vol. 78, Issue 11, pp. 6384-6388.

82. Shiue S.-T. Thermal stresses in tightly jacketed double-coated optical fibers at low temperature, *Journal of Applied Physics*, 1994, Vol. 76, Issue 12, pp. 7695-7703.

83. Hsueh Y.-C., Chiou S.-C., Shiue S.-T. Minimization of thermally induced microbending losses in dual coated optical fibres caused by viscoelastic behavior of commercial polymeric coatings // *IET Optoelectronics*, 2015, Vol. 9, Issue 3, pp. 141-144.

84. Cocchini F. Double coated optical fibers undergoing temperature variations: The influence of the mechanical behavior on the added transmission losses // *Polymer Engineering and Science*, Vol. 34, Issue 5, 1994, pp. 414-419.

85. Yabuta T., Yoshizawa N., Ishihara K. Excess loss of single-mode jacketed optical fiber at low temperature // *Applied Optics*, Vol. 22, Issue 15, 1983, pp. 2356-2362.

86. Lenahan, T.A. Thermal Buckling of Dual-Coated Fiber // *AT&T Technical Journal*, 1985, Vol. 64, Issue 7, pp.1565-1584.

87. Suhir E. Effect of Initial Curvature on Low Temperature Microbending in Optical Fibers // *Journal of Lightwave Technology*, 1988, Vol. 6, Issue 8, pp.1321-1327.

88. Suhir E. Mechanical approach to the evaluation of the low temperature threshold of added transmission losses in single-coated optical fibers // *Journal of Lightwave Technology*, 1990, Vol. 8, Issue 6, pp. 863-868.

89. Suhir E., Mishkevich V., Anderson J.M. How large should a periodic external load be to cause appreciable microbending losses in a dual-coated optical fiber? //

Proceedings of the 1995 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, San Francisco, CA, USA, 1995, pp. 59-66.

90. Suhir E. Calculated stress in dual-coated optical fibers // *Polymer Engineering and Science*, 1990, Vol. 30, Issue 2, pp. 108-117.

91. IEC/TR 62221 ed. 2.0 Optical fibres – Measurement methods – Microbending sensitivity. 2012. 28 p.

92. Han L., Shan P., Zhao J., Wu X., Schmid S.R. Improvement of the precision (repeatability and reproducibility) of a test method to characterize microbending performance of optical fibers // *Proc. 6-th IWCS Conference*, 2011, pp. 6-10.

93. Anelli P., Cuomo D., Esposito F., Ferri I., Brandi S.D., and Gouvea D. Measurement of Some Physical characteristics of the Coating for Optical Fibers // *Proceeding papers 7-th European Fiber Optic Communications and Local Area Networks*. Munich. 1990. paper 1.3.5, pp. 254-257.

94. Nicolais L., Apicella A., Grimaldi P. Calorimetric quality control of UV cured optical fiber-coating // *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 33, № 6 1987, pp. 2077-2086.

95. Рабек Я.Ф., Экспериментальные методы в химии полимеров / Я.Ф. Рабек – М.: Мир, 1983, – 420 с.

96. Katsuta T. et al., In-situ measurement of primary coating modulus on optical fiber by pull-out-modulus technique // *Proceedings of the 49-th International Wire and Cable Symposium, Focus*, 2000.

97. Overton B.J., Taylor C.R. Time temperature dependence of dual coated lightguide pullout measurements // *Polymer Engineering and Science*, Vol. 29, № 17, 1989, pp. 1169-1171.

98. Liu R., Liang D. Interface study of smart composite material with optical fiber by single fiber pull-out test // *Chinese Journal of Lasers*, Vol. 36, № 2, 2009, pp. 387-390.

99. Маковецкий А.А. Разработка технологических процессов формования специального вида волокон и капилляров из кварцевого стекла для

оптоэлектроники и лазерной медицины: дисс. ...доктора технических наук: 05.17.11 / Маковецкий Александр Андреевич. – Фрязино., 2016. 280 с.

100. Gan K., Schmid S.R., Anderson T. Recent results from draw tower simulator as a tool for new coating development // Proceedings of the 56-th International Wire and Cable Symposium, 2007, pp. 106-111.

101. Длютров О.В. Исследование механического состояния оптического волокна неразрушающими методами контроля относительного удлинения в процессе производства оптических кабелей: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.02 / Длютров Олег Вячеславович. – М., 2004. 185 с.

102. Гречанов А.В., Наумов А.Н., Солодянкин М.А., Авдеев Б.В., Алексейчук И.М. Комбинированный волоконно-оптический сенсор // Патент на полезную модель по заявке 2015112150/28 от 03.04.2015, № RU 159893 U1, опубл. 20.02.2016, бюл. № 6.

103. Nureev I.I. et al. Combined Brillouin sensor system for simultaneous local and distributed temperature and strain measurements for downhole telemetry // 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 734 012135.

104. Овчинникова И.А. Исследования и разработка оптических кабелей специального назначения: дисс. ... доктора техн. наук: 05.09.02 / Овчинникова Ирина Александровна. – М., 2021. 276 с.

105. Тарасов Д.А., Овчинникова И.А., Семёнов П.А., Игнатиков И.С. Способ определения срока сохраняемости оптического кабеля // Патент на изобретение по заявке 2020105884 от 07.02.2020, № RU 2735910 C1, опубл. 10.11.2020, бюл. № 31.

106. Тарасов Д.А., Овчинникова И.А., Семёнов П.А., Игнатиков И.С. Способ испытания оптических кабелей на долговечность // Патент на изобретение по заявке 2020105885 от 07.02.2020, № RU 2747598 C1, опубл. 11.05.2021, бюл. № 14.

107. Овчинникова И.А. Определение надёжности оптических кабелей / И.А. Овчинникова // Технологии и средства связи. – 2009. – № 3. – С. 39-41.

108. IEC 60794-1-1 ed. 4.0 Optical fibre cables – Part-1: Generic specification – General. 2015. 28 p.

109. Mechanical reliability: applied stress design guidelines. Corning, WP5053, 2002.

110. Богачков И.В., Иниватов Д.П., Киреев А.П., Горлов Н.И. Определение разновидностей оптических волокон по бриллюэновским рефлектограммам, // II Всероссийская конференция «Оптическая рефлектометрия – 2018». Сборник тезисов докладов. 2018 г., – Пермь: ООО «М'Арт», С. 74-77.

111. Микилев А.И. Волокно 200 мкм позволяет проектировать новые конструкции кабелей / А.И. Микилев // Фотон-Экспресс. – 2013. – № 4, – С.34-36.

112. Sajima Y., Murata A., Tsujimoto Y., Yamashiro K., Osato K. Development of ultra-high density and fiber-count cable using 200- μ m-coated bend insensitive optical fiber complying with G.652.D and G.657.A1 // Wire Journal International. April 2021, pp.54-57.

113. Bosch T. Prysmian installs world's first ever 180 μ m fibre [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://www.prysmiangroup.com/en/insight/telecoms/nexst/prysmian-installs-world-s%20first-ever-180um-fibre>, дата обращения 20.09.2021.

114. Аверина, Л.М. Рефрактометрический метод определения усадки полимеров при УФ отверждении / Л.М. Аверина, Ю.С. Милявский // Оптический журнал, Том 71, № 2, 2004. С. 63-64.

115. Tarasov, D.A., Ovchinnikova, I.A., Aronovich, D.A. et al. Studying the Properties of Optical Fiber with Developed UV-Curable Acrylic Protective Coatings. Polym. Sci. Ser. D 13, 2020, pp. 189-192.

116. ГОСТ Р 52266-2020 Кабели оптические. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2020. – 65 с.

117. ГОСТ Р МЭК60793-1-40-2012. Волокна оптические. Часть 1-40. Методы измерений и проведение испытаний. Затухание. – М.: Стандартинформ, 2013. – 40 с.

118. ГОСТ Р МЭК 60793-1-51-2015 Волокна оптические. Часть 1-51. Методы измерений и проведение испытаний. Испытания сухим теплом (установившийся режим). – М.: Стандартинформ, 2015. – 7 с.

119. ГОСТ Р МЭК 60794-1-22-2017 Кабели оптические. Часть 1-22. Общие технические требования. Основные методы испытаний оптических кабелей. Методы испытаний на воздействия внешних факторов. – М.: Стандартинформ, 2017. – 27 с.

120. Методика определения совместимости материалов, применяемых в конструкциях оптических кабелей № 16.K00-201-2019 МИ. – М.: ВНИИКП, 2019. – 10с.

121. Тарасов Д.А., Овчинникова И.А. Исследования свойств защитных покрытий кварцевого оптического волокна из разработанных УФ-отверждаемых акриловых композиций // Сборник трудов III Международной научно-технической конференции «Современные достижения в области клеев и герметиков. Материалы, сырьё, технологии», Нижний Новгород.: «Издательский салон» ИП Гладкова О.В., 2019, С. 229-230.

122. ГОСТ 15150-69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М.: Стандартинформ, 2010. – 58 с.

123. Тарасов Д.А. Зависимость степени полимеризации двухслойного отверждаемого ультрафиолетом первичного защитного покрытия оптического волокна от технологических режимов его вытяжки / Д.А. Тарасов // Кабели и Провода. – 2022. – № 1. – С.27-30.

124. Tarasov D.A., Ovchinnikova I.A., Meschanov G.I., Gordienko V.N., Tsym A. Y. Quartz-glass Optical Fibre Time to Fracture at Small Bending Radiuse // Conference: 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications, March 2020, DOI: 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078607.

125. Sato H., Miyata M., Murata A., Tsujimoto Y., Yamashita N., Yamashiro K., Matsuo Sh., Osato K. 160- μm Coating Optical Fiber with 80- μm Cladding for 1,728-Fiber Cable // 70th International Wire and Cable Symposium, October 2021.

126. Тарасов Д.А. Разработка и исследование конструкций кабелей с применением оптических волокон с уменьшенным диаметром защитного покрытия / Д.А. Тарасов // Фотон-Экспресс. – 2023. – № 6. – С. 40-41.

127. Тарасов Д.А., Овчинникова И.А., Семёнов П.А., Корякин А.Г., Овчинникова В.А., Лепёшкин М.В., Пьянков Б.А. Оптический кабель для систем дистанционного управления // Патент на изобретение по заявке 2021108640 от 30.03.2021 № RU 2772554 С1, опубл. 23.05.2022, бюл. № 15.

128. Тарасов Д.А., Оптический микрокабель с УФ-отверждаемым покрытием из отечественных материалов / Д.А. Тарасов // Фотон-Экспресс. – 2021. – № 6. – С. 225-226.

129. ГОСТ Р МЭК 60793-1-20-2022. Волокна оптические. Часть 1-20. Методы измерений и проведение испытаний. Геометрия волокна. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 36 с.

130. ГОСТ Р МЭК 60793-1-44-2013 Волокна оптические. Часть 1-44. Методы измерений и проведение испытаний. Длина волны отсечки. – М.: Стандартиформ, 2014. – 36 с.

131. ГОСТ Р МЭК 60793-1-45-2013 Волокна оптические. Часть 1-45. Методы измерений и проведение испытаний. Диаметр модового поля. – М.: Стандартиформ, 2014. – 24 с.

132. ГОСТ Р 70144-2022 Волокна оптические. Часть 1-47. Методы измерений и проведение испытаний. Потери, вызванные макроизгибами. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 36с.

133. ГОСТ Р МЭК 60793-1-42-2013 Волокна оптические. Часть 1-42. Методы измерений и проведение испытаний. Хроматическая дисперсия. – М.: Стандартиформ, 2014. – 26 с.

134. ГОСТ Р 57941-2017 Композиты полимерные. Инфракрасная спектроскопия. Качественный анализ. – М.: Стандартиформ, 2017. – 27 с.

135. Тарасов Д.А. Разработка метода распознавания производителя оптического волокна // Тезисы докладов 29-й Международной научно-

технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», – М, НИУ «МЭИ», 2023, С. 383.

136. Тарасов Д.А. Идентификация производителей по характеристикам одномодового оптического волокна / Д.А. Тарасов, М.А. Боев, Д.В. Павлов // Вестник МЭИ. – 2023. – № 4. – С. 16-27.

137. Brown K.A. Characterization for optical fibres for high speed communication systems: B.Sc. Thesis, University of New Brunswick. 2000. 113 p.

138. Методика определения категории, производителя и марки кварцевого одномодового оптического волокна № МИ 16.К00-211-2022 – М.: ВНИИКП, 2022. – 12 с.

139. Тарасов Д.А., Овчинникова И.А., Корякин А.Г., Короткина Г.Э., Терехов Е.Д., Микилев А.И., Хахичев А.С., Куриленко Н.В. Способ идентификационных испытаний оптических волокон // Патент на изобретение по заявке 2022134992 от 28.12.2022, № RU 2803977 С1, опубл. 25.09.2023, бюл. № 27.

140. КЖИБ.636570.518 ТУ Волокно оптическое одномодовое радиационностойкое. – М.: ВНИИКП, 2020.

141. КЖИБ.636570.540 ТУ Волокно оптическое многомодовое с градиентным профилем показателя преломления. – М.: ВНИИКП, 2023.

Приложение А

Акт об использовании результатов диссертационной работы



ЭЛЕКТРО
ПРИБОР

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
АО «Концерн «ЦНИИ
«Электроприбор»

А.В. Соколов

« 16 » ноября 2023 г.

АКТ

от 16.11.2023

№ 305/084

об использовании результатов диссертационной работы
Тарасова Дмитрия Анатольевича

Комиссия в составе:

Председатель	Начальник лаборатории, к.т.н.	Унтилов А.А.
Члены комиссии:	Ведущий инженер	Егоров Д.А.
	Старший научный сотрудник, к.т.н.	Кулеш А.Ю.

Составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Тарасова Д.А. «Исследование влияния первичного защитного покрытия на свойства телекоммуникационных оптических волокон и разработка методов оценки их параметров», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, в части исследования влияния степени полимеризации двухслойного отверждаемого ультрафиолетом первичного защитного покрытия на характеристики кварцевого оптического волокна (гл. 2) были использованы при разработке технологии нанесения УФ-отверждаемых композиций в технологическом процессе вытяжки радиационностойкого оптического волокна марки ОВ-Ер КЖИБ.636570.518ТУ и при выполнении НИР «Смола-ОВ».

Председатель комиссии

Унтилов А.А.

Члены комиссии

Егоров Д.А.

Кулеш А.Ю.