

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»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Москва – 2024

Диссертация выполнена в Открытом акционерном обществе «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности» (ОАО «ВНИИКП»).

Научный руководитель: **Корякин Алексей Григорьевич**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией № 2/3 ОАО «ВНИИКП»

Официальные оппоненты: **Семёнов Сергей Львович**, доктор физико-математических наук, руководитель «Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова Российской академии наук – обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИЦВО ИОФ РАН)

Сазонкин Станислав Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры РЛ-2 ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Баумана)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»)

Защита диссертации состоится "29" мая 2024 г. в 15 часов 00 мин на заседании диссертационного совета 75.1.059.01 в ОАО «Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности» по адресу: 111024, г. Москва, шоссе Энтузиастов, д. 5, ауд. 908.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ОАО «ВНИИКП» по адресу: <https://www.vniikp.ru/dissertation-board/dissertacii-avtoreferaty-otzyvy-i-resheniya/Dissertation-DA-Tarasov/>.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2024 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 111024, г. Москва, шоссе Энтузиастов, дом 5, диссертационный совет 75.1.059.01 при ОАО «ВНИИКП». E-mail: p.semenov@vniikp.ru. Тел. для справок: (499) 670-97-00.

Учёный секретарь диссертационного совета 75.1.059.01,
кандидат экономических наук



Е.Б. Васильев

Актуальность темы исследования: Оптические кабели (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, с целью миниатюризации количество оптических волокон (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 ПЗП в обеспечении работоспособности ОВ, а также методам его испытаний посвящён ряд научных работ, имеются стандартизованные методы испытаний, которые охватывают геометрические и механические параметры ПЗП. Вместе с тем, ряд таких важных характеристик, как микроизгибные потери и совместимость материалов конструкции ОК к началу данной работы практически не имели удобных, надёжных и тем более стандартизованных методов контроля.

Технологические режимы нанесения ПЗП, а также плотного буферного покрытия на ОВ являются, по существу, элементами ноу-хау для каждой композиции и требуют тщательного подбора с целью обеспечения оптимальных характеристик ОВ и ОК.

Работы по миниатюризации конструкций ОК 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, направленных 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 разработка усовершенствованных методов оценки качества кварцевого ОВ, применяемого в кабельной технике.

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.
- Впервые исследовано влияние уменьшения диаметра ПЗП ОВ на свойства ОВ и ОК с применением такого ОВ.
- 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:

В ходе выполнения диссертационной работы:

- Освоено серийное производство отечественных УФ-отверждаемых полимерных композиций, применяемых для изготовления первого и второго слоёв двухслойного ПЗП кварцевых световодов.
- 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.
- Разработанная методика определения категории, производителя и марки кварцевого одномодового ОВ позволяет заказчикам кабельных изделий осуществлять верификацию производителя ОВ, заявленного в документации на ОК 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.

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 водоблокирующими (ВБ) материалами.
- Методика определения микроизгибных потерь в ОВ при отрицательных температурах.
- Методика определения категории, производителя и марки кварцевого одномодового ОВ.

Степень достоверности и апробация результатов:

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались: на Всероссийских конференциях по волоконной оптике (ВКВО) в 2019, 2021 и 2023 гг. (Пермь); на международных научных конференциях «Системы генерации и обработки сигналов в области бортовых коммуникаций» (on Board) в 2019 и 2020 гг. (Москва); на международных конференциях «Электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» (МКЭЭЭ) в 2018 и 2020 гг. (Алушта); на международных научно-технических конференциях «Современные достижения в области клеев и герметиков: материалы, сырьё, технологии» (Адгезивы) в 2019 и 2023 гг. (Дзержинск); на международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника энергетика и автоматика» в 2023 г. (Москва).

Кроме того, Методика определения совместимости материалов, применяемых в конструкциях ОК, прошла апробацию в процессе общественного обсуждения стандарта ГОСТ Р 52266-2020 «Кабели оптические. Общие технические условия», разработанного при непосредственном участии автора диссертационной работы.

По теме диссертации опубликовано 10 работ, 6 из которых в изданиях перечня ВАК; 3 научных публикации по теме диссертации вошли в международные базы цитирования. Получены в соавторстве 2 патента на изобретение.

Работа [10] 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.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы её цели и задачи, научная новизна работы и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлены сведения об апробации результатов и о личном вкладе автора.

В первой главе рассмотрены основные виды ПЗП ОВ из кварцевого стекла, (акриловые, полиимидные, металлические, углеродные), описан состав акриловых композиций для двухслойного УФ-отверждаемого ПЗП, первый слой которого выполнен из материала, имеющего малый модуль Юнга (около 1 МПа), а второй – из более жёсткого материала (модуль Юнга равен сотням МПа), которые нашли наибольшее применение для ОВ, применяемого в кабельной технике. Описаны способы нанесения данного ПЗП методами «мокрое по сухому» – когда каждый слой наносится через отдельную фильеру и отверждается отдельным набором УФ-ламп, и «мокрое по мокрому» – нанесение обоих слоёв происходит через одну систему фильер с последующим отверждением одним набором УФ-ламп. Дан обзор методов определения степени полимеризации ПЗП. Приведён аналитический обзор требований и методов испытаний ОВ, относящихся к ПЗП (геометрические и механические – усилие снятия ПЗП) и характеристик ОВ, на которые непосредственно влияет ПЗП (механические – разрывное усилие, стойкость к коррозии в напряжённом состоянии, стойкость к воздействию микроизгибов; стойкость к воздействию условий окружающей среды – температура, влажность, совместимость с гидрофобными наполнителями). Исходя из приведённого в главе анализа сформулированы задачи исследования.

Во второй главе осуществлён выбор технологических режимов вытяжки ОВ, обеспечивающих оптимальное значение степени полимеризации ПЗП (более 90 %) при разработке отечественных композиций ПЗП. Показано, что степень полимеризации ПЗП влияет на срок службы ОВ, особенно в присутствии влаги, определяемый параметром n (стойкостью к коррозии в напряжённом состоянии). Согласно IEC TR 62048 если значение параметра n не менее 18, ОВ прослужит не менее 20 лет с вероятностью 99 %. Значение параметра n , ОВ с ПЗП с низкой степенью полимеризации после испытания влажным теплом по ГОСТ Р МЭК 60793-1-51-2015 значительно ниже ОВ, ПЗП которого имеет степень полимеризации не менее 90 %, что свидетельствует о гораздо большей вероятности обрыва ОВ с низкой степенью полимеризации ПЗП. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1

| Номер группы образцов | Степень полимеризации, % | Параметр n | |
|-----------------------|--------------------------|------------|-----------|
| | | до | после |
| 1 | 91,8 | 22,9 | 19,6 |
| 2 | 89,5 | 24,5 | 22,1 |
| 3 | 82,7 | 20,1 | 16,7 |
| 4 | 92,9 | 24,2 | 22,8 |
| Норма по ГОСТ | - | ≥ 18 | ≥ 18 |

Для оценки степени полимеризации ПЗП методом разделения гель-золь фракций были отобраны образцы ОВ 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 кварцевого стекла в образце ОВ ($P_{кв}$) учитывалась следующим образом:

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

где $d = 125$ мкм – диаметр световода;

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

Степень полимеризации (ξ) рассчитывалась по формуле:

$$\xi = \frac{P_2 - P_{кв}}{P_1 - P_{кв}} 100 \quad (2)$$

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 n и выходу его за пределы, установленные стандартом ГОСТ Р МЭК 60793-2-50-2022, что свидетельствует о более высокой вероятности разрушения ОВ до истечения двадцатилетнего срока службы.

На рисунке 1 приведены результаты испытаний трёх образцов ОВ, ПЗП которых имело различную степень полимеризации (Образец 1 – ниже 80 %, образец 2 – 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).

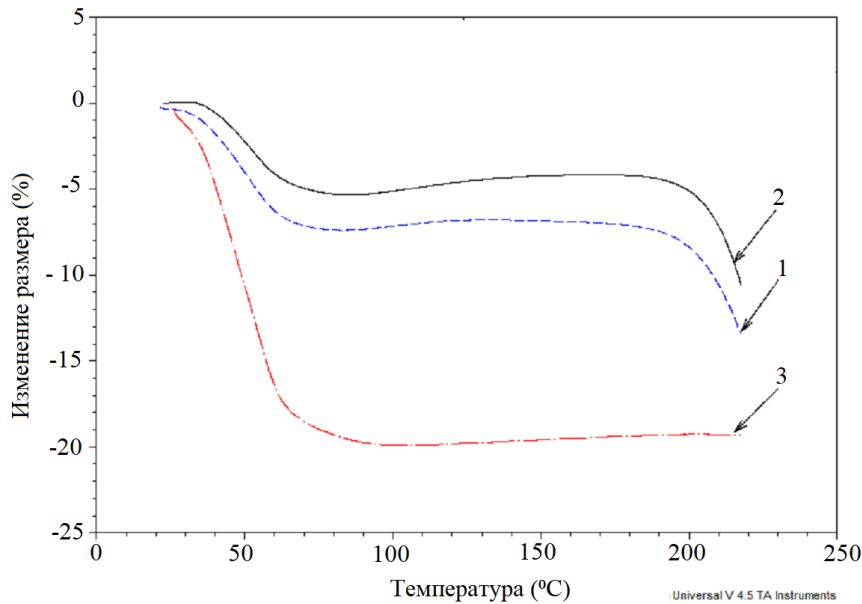


Рисунок 1 – Термомеханический анализ образцов оптического волокна, первичное защитное покрытие которых имеет различную степень полимеризации

Как видно из рисунка 1, 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. 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 образцов №1 и № 2.

С целью определения зависимости степени полимеризации ПЗП от технологических режимов вытяжки была проведена серия экспериментальных работ по вытяжке ОВ. Покрытия наносились методом «мокрое по сухому». 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 приведены в Таблице 2.

Как видно из таблицы 2, на скоростях вытяжки до 95 м/мин более полной конверсии покрытий (полимеризации) можно добиться увеличением мощности ламп или увеличением потока азота нежели изменением самой скорости вытяжки. При производстве категорий телекоммуникационных ОВ оптимальным режимом будет являться режим, соответствующий образцу № 12, позволяющий достигнуть требуемой степени полимеризации ПЗП при бережной эксплуатации ламп УФ-отверждения, но при сохранении высокой производительности. В качестве альтернативного технологического режима наложения ПЗП (при производстве специальных типов ОВ, которое осуществляется на меньших скоростях вытяжки) можно рассматривать режим № 13.

Таблица 2

| Номер образ-ца | Скорость вытяжки, м/мин | Мощность ламп УФ-отверждения, % | Поток азота во второй лампе УФ-отверждения, л/мин | Степень полимеризации, % |
|----------------|-------------------------|---------------------------------|---|--------------------------|
| 1 | 18 | 90 | 15 | 96 |
| 2 | 40 | 90 | 15 | 92 |
| 3 | 40 | 72 | 15 | 88 |
| 4 | 55 | 90 | 15 | 93 |
| 5 | 55 | 72 | 15 | 87 |
| 6 | 55 | 62 | 15 | 84 |
| 7 | 55 | 52 | 30 | 90 |
| 8 | 55 | 52 | 15 | 77 |
| 9 | 95 | 90 | 12 | 96 |
| 10 | 95 | 51 | 12 | 74 |
| 11 | 95 | 51 | 25 | 79 |
| 12 | 95 | 75 | 20 | 94 |
| 13 | 60 | 65 | 20 | 93 |

Помимо этого, были проведены исследования влияния уменьшения диаметра (толщины) отверждаемого ультрафиолетом ПЗП на характеристики кварцевого ОВ и ОК на его основе. С этой целью были проведены испытания образцов ОВ с диаметром ПЗП 250 мкм и 200 мкм, а также оптических микрокабелей и ОК модульной конструкции, изготовленных с применением ОВ диаметром 200 мкм и 250 мкм.

Образцы ОВ диаметром 250 мкм и 200 мкм показали близкие результаты при испытаниях на стойкость к воздействию температурных циклов по ГОСТ Р МЭК 60793-1-52-2015, стойкость к погружению в воду по ГОСТ Р МЭК 60793-1-53-2015, а также механическую стойкость к воздействию изгибов.

Расчёт растягивающего усилия, воздействующего на ОВ, в зависимости от диаметра изгиба производился следующим образом:

$$\sigma(D) = E_0 \varepsilon_{si} (1 + 2,25 \cdot \varepsilon_{si}) \quad (3)$$

Где E_0 – модуль Юнга кварцевого стекла, равный 70,3 ГПа;

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

$$\varepsilon_{si} = \frac{d_{si}}{D + d_{\text{ПЗП}}} \quad (4)$$

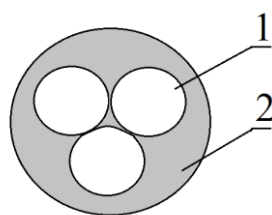
Подставив (4) в (3), получим:

$$\sigma(D) = E_0 \frac{d_{si}}{D + d_{\text{ПЗП}}} \left(1 + 2,25 \frac{d_{si}}{D + d_{\text{ПЗП}}} \right) \quad (5)$$

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 при воздействии 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 200 мкм он тоньше по сравнению с образцами ОВ с диаметром ПЗП 250 мкм, у образцов ОВ с диаметром ПЗП 200 мкм происходит более значительное снижение усилие снятия ПЗП. Данный факт необходимо учитывать при прогнозировании срока службы ОК, содержащих внутримодульный гидрофобный наполнитель.

По результатам проведённых испытаний образцов микрокабелей с ОВ 250 мкм (образец 1) и 200 мкм (образец 2), конструкция которых приведена на рисунке 2, можно сделать вывод, что образец 1 более подвержен влиянию отрицательных температур, чем образец 2, о чём свидетельствует большая деформация образца 1, приводящая к увеличенному по сравнению с образцом 2, приросту значений коэффициента затухания вследствие микроизгибов световода, возникающих из-за разницы ТКЛР кварца, из которого состоит световод, и полимера, из которого состоит ПЗП и плотное буферное покрытие (таблица 3).



- 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 – Конструкция микрокабелей

Таблица 3

| Параметр | Образец 1 | Образец 2 |
|---|--|--|
| Коэффициент затухания при воздействии минус 65 °С на длинах волн 1310 нм 1550 нм, дБ/км | ОВ1: 0,478/0,350 ОВ2: 0,443/0,334 ОВ3: 0,361/0,236 | ОВ1: 0,397/0,294 ОВ2: 0,399/0,257 ОВ3: 0,405/0,288 |
| Деформация при воздействии минус 65 °С, % | ОВ1: -0,143 ОВ2: -0,132 ОВ3: -0,150 | ОВ1: -0,073 ОВ2: -0,092 ОВ3: -0,098 |

Основное различие между образцами микрокабелей заключается в толщине ПЗП, площадь поперечного сечения которого в образце 1 в 1,9 раза больше, чем в образце 2 и составляет 1,335 мм² против 0,707 мм² соответственно, в то время как площадь кварцевых световодов у двух образцов равна (1,335 мм²). 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 (рисунок 2), оптимальным является применение ОВ с ПЗП диаметром 200 мкм.

Влияние уменьшения диаметра ПЗП на свойства *ОК модульной конструкции* было оценено в процессе испытаний ОК, конструкция которого представляла из себя 4 оптических модуля (ОМ) с внутренним диаметром 1,1 мм, скрученных вокруг стеклопластикового центрального силового элемента и покрытого полимерной оболочкой. Образец ОК имел разное число ОВ в каждом ОМ: ОМ1 – 8 ОВ диаметром 250 мкм; ОМ2 – 12 ОВ диаметром 200 мкм; ОМ3 – 4 ОВ диаметром 250 мкм; ОМ4 – 6 ОВ диаметром 200 мкм.

Число ОВ диаметром 250 мкм в ОМ подбиралось исходя из практики заполнения ОМ – 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 диаметром 200 мкм в ОМ применялся следующий подход: рассчитывалась суммарная площадь ОВ с ПЗП диаметром 250 мкм в ОМ1 и ОМ3; затем, исходя из полученных значений, площадей, подбиралось количество ОВ с ПЗП диаметром 200 мкм для ОМ2 и ОМ4 с учётом того, что ОВ диаметром 200 мкм должны занимать тот же объём внутреннего пространства ОМ, что и ОВ диаметром 250 мкм. По результатам испытаний на стойкость к воздействию температурных циклов от минус 60 °С до 85 °С по ГОСТ Р МЭК 60794-1-22-2017 (метод F1) не было выявлено различий в передаточных характеристиках ОВ, связанных с разницей в диаметрах ПЗП. Различия в характеристиках были обусловлены количеством ОВ в ОМ (рисунок 3).

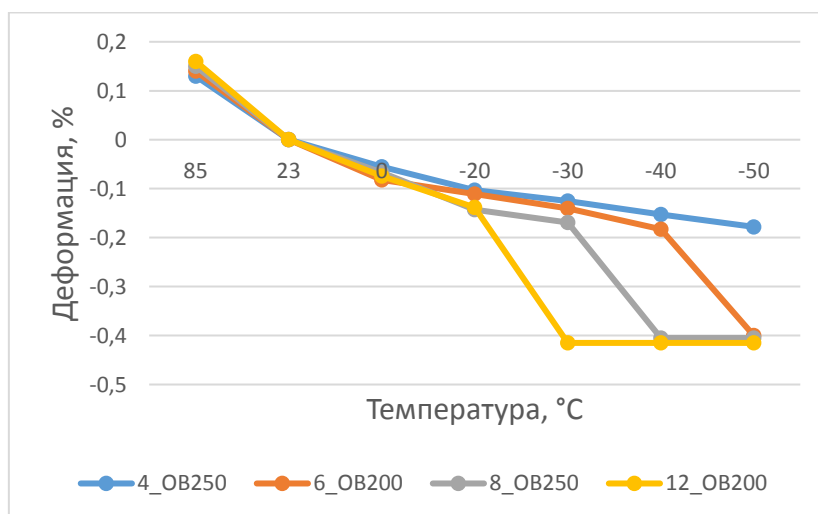


Рисунок 3 — Графики зависимости деформации в экспериментальном кабеле от температуры

В главе 3 была проведена оценка технологии наложения буферных покрытий на основе разработанной УФ-отверждаемой композиции для второго слоя ПЗП, при изготовлении микрокабеля (рисунок 2) 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.

Как видно из результатов испытаний (таблица 4), 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 4. При температуре минус 50 °С деформация образца с буферным покрытием из отечественной композиции выходит за 0,2 % – значение, при котором, согласно расчётам ИЕС TR 62048, 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.

Таблица 4

| Температура, °С | Коэффициент затухания на длине волны 1310 нм / 1550 нм, дБ/км | | Деформация, % | |
|--------------------|---|-----------------------|---------------|-----------------------|
| | Квант-409 | Импортное покрытие | Квант-409 | Импортное покрытие |
| НКУ | 0,345/0,214 | 0,366/0,184 | 0,000 | 0,000 |
| -40 | 0,404/0,383 | 0,309/0,183 | -0,180 | -0,091 |
| -50 | 0,602/0,730 | 0,322/0,192 | -0,210 | -0,109 |
| -65 | 0,523/0,564 | 0,478/0,350 | -0,246 | -0,143 |
| НКУ | 0,327/0,195 | 0,328/0,185 | 0,004 | 0,002 |

В главе 4 описаны результаты проведённых исследований с целью разработки методики по определению совместимости ОВ с двухслойным ПЗП с внутримодульным гидрофобным наполнителем и водонабухающими материалами.

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

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

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. 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.

У всех подвергнутых испытаниям образцов отсутствовали трещины, разрывы и деламинация. Результаты испытаний по усилию снятия ПЗП по ГОСТ Р МЭК 60793-1-32-2010 приведены в таблице 5.

Таблица 5

| Усилие снятия первичного защитного покрытия, Н | До испытаний | Метод А | Метод В | Метод С | ГОСТ |
|--|--------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| 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 / - |

Как видно из таблицы 5, 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 наполнителя, 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.

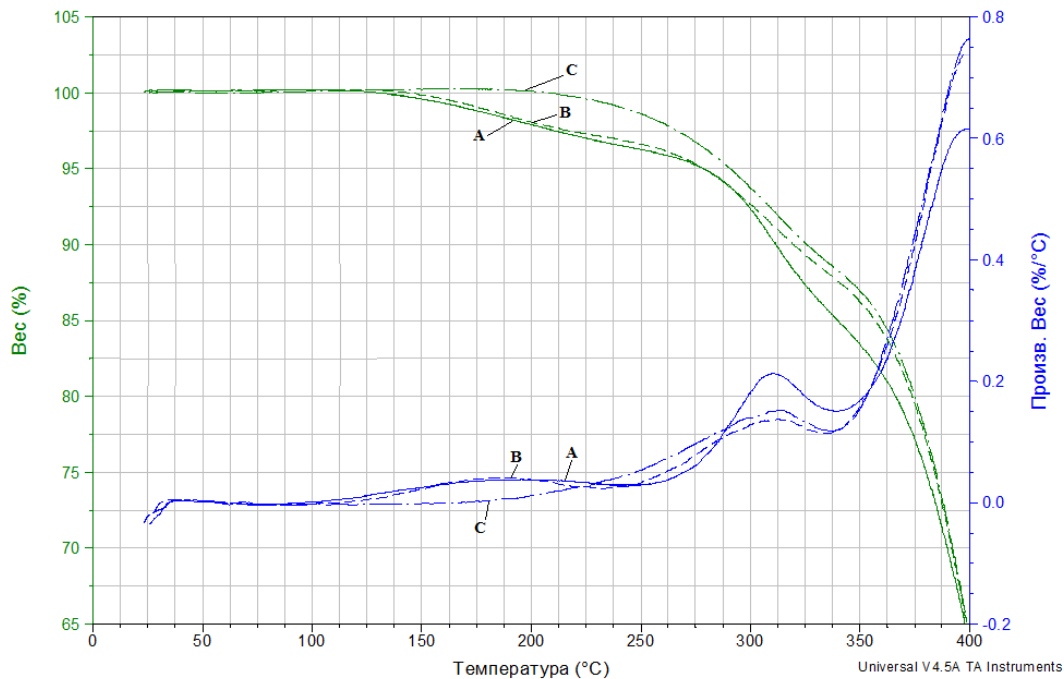


Рисунок 4 – ТГА-анализ образцов после их испытания по методам А, В и С

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.

С целью выбора оптимального метода испытаний на *совместимость* ПЗП с водонабухающими 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 по ГОСТ Р МЭК 60793-1-32-2010 после 30 и 45 дней выдержки. Результаты испытаний приведены в таблице 6.

Таблица 6

| 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 |
| После выдержки при 85 °С | | | | |
| 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 |
| После выдержки в НКУ | | | | |
| 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 испытаний 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 главе 2 при испытаниях на совместимость с внутримодульным гидрофобным наполнителем.

В главе 5 проведены исследования с целью разработки методики по определению типа и производителя одномодового ОВ. Образцы ОВ, являвшиеся предметом исследования, представляли собой отрезки волоконного световода, который состоит из световедущей сердцевины и светоотражающей оболочки, покрытый двухслойным полимерным ПЗП. Для испытаний было отобрано 15 образцов ОВ 8 различных производителей. Исследуемые образцы ОВ согласно стандарту ГОСТ Р МЭК 60793-2-50-2022 отнесены к пяти подкатегориям: В-652.В, В-652.С, В-652.Д, В-657.А1 и В-657.А2. С целью поиска метода для определения производителя и подкатегории ОВ предложена программа испытаний, которая включает определение геометрических (диаметры сердцевины, оболочки, первого и второго слоёв ПЗП) и оптических (спектральное затухание в диапазоне длин волн от 1100 нм до 1650 нм, определённое с шагом 10 нм, диаметр модового поля, волоконная длина волны отсечки, оптические потери, вызванные макроизгибами, хроматическая дисперсия, бриллюэновская частота, профиль показателя преломления (ППП)) параметров ОВ, а также ИК-спектр ПЗП.

При анализе геометрических характеристик ОВ наибольшие отличия среди образцов различных производителей или подкатегорий можно наблюдать в геометрии ПЗП (разница соотношения толщин первого и второго слоёв). Вместе с тем, геометрические параметры ПЗП не могут с должной точностью свидетельствовать об отнесении испытуемого образца ОВ к той или иной подкатегории и/или производителю, т.к. один и тот же производитель ОВ для наложения ПЗП может применять композиции от различных производителей ПЗП. Также для обеспечения необходимых требований потребителя по стойкости ОВ к воздействию макроизгибов, производитель ОВ даже при применении одних и тех же композиций для изготовления ПЗП может изменять соотношение толщин первого и второго слоёв ПЗП.

Исключительно по геометрическим параметрам ОВ определить подкатегорию и производителя ОВ представляется технически очень сложной задачей. Оптические параметры в гораздо большей степени подходят для решения поставленной задачи. Наиболее характерные отличия наблюдались при анализе ППП и спектрального затухания. У тех же образцов, у которых ППП был схож, отличались другие оптические параметры (спектральное затухание, хроматическая дисперсия или длина волны отсечки) за исключением нескольких образцов, которые были произведены одним и тем же производителем ОВ или преформ, т.е. и должны были обладать схожими характеристиками.

С целью оценки возможности определения производителя ОВ по ИК-спектру ПЗП проведена инфракрасная спектроскопия образцов ОВ подкатегории В-652.D от ряда производителей (рисунки 5 и 6).

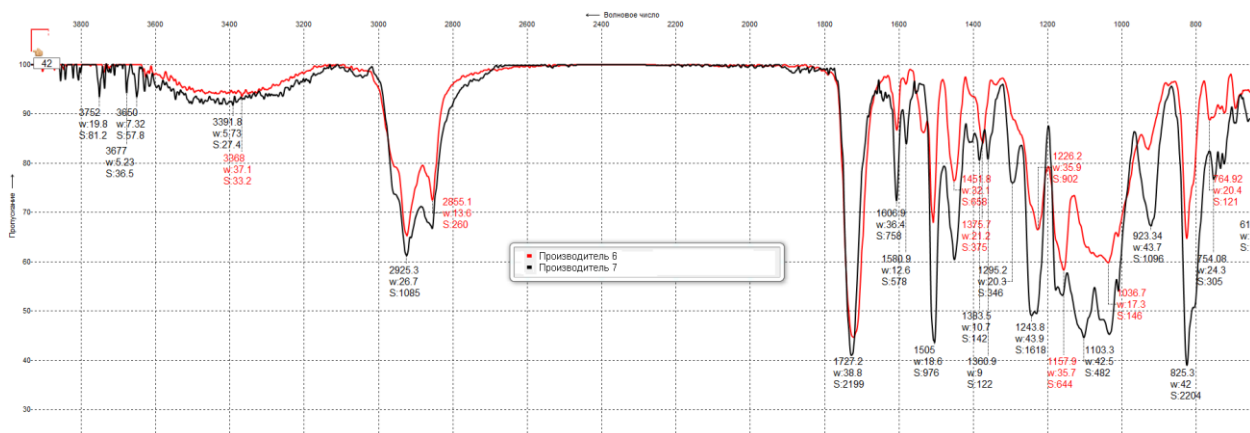


Рисунок 5 – Графики ИК-спектров ПЗП образцов ОВ от производителей 6 и 7

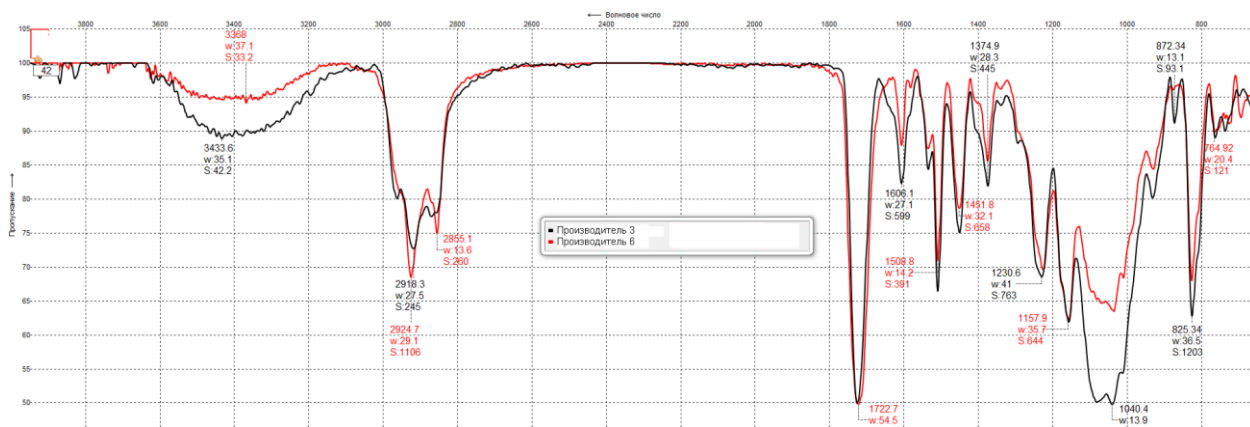


Рисунок 6 – Графики ИК-спектров ПЗП образцов ОВ от производителей 3 и 6

Наименьшее совпадение графиков наблюдается у производителей 6 и 7 (60,6 %), свидетельствующее об отличиях в составе и пропорции компонентов, применяемых при нанесении ПЗП при изготовлении ОВ, (рисунок 5). Наибольшее совпадение графиков (81,4 %) наблюдается у производителей 3 и 6 (рисунок 6). Исходя из анализа графиков, приведённых на рисунке 6, можно сказать, что эти графики имеют идентичный характер. Различия, заключающиеся в величине роста интенсивности поглощения на волнах спектра длиной 1000-1100 cm^{-1} и 3250-3550 cm^{-1} , можно объяснить разной степенью полимеризации ПЗП у сравниваемых образцов.

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

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. 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, а также с помощью анализа ПЗП, имеется возможность определить производителя преформы, тем самым сузив круг потенциальных производителей ОВ.

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.

В главе 6 приведены результаты исследований *влияния геометрических размеров ячейки сетки и массы грузов* при проведении испытаний оптического волокна на воздействие микроизгибов. Испытания проводились по ИЕС TR 62221 (метод С) на установке, 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, набора сеток из нержавеющей стали, параметры которых приведены в таблице 7, верхней плиты массой 1 кг и набора калиброванных гирь массой от 1 кг до 8 кг.

Таблица 7

| № 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 |

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

Согласно IEC TR 62221 (метод С) требуется произвести расчёт чувствительности (S) – зависимости прироста оптических потерь от массы, по формуле:

$$S = \frac{\alpha}{W} \text{ (дБ/кг)} \quad (6)$$

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 рисунке 7 должны представлять собой прямые линии, параллельные оси абсцисс. Но 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 результаты измерений и вовсе лежат в диапазоне шумов ($\pm 0,2$ дБ). Для всех остальных типоразмеров сеток формула (6) не отражает выявленный при экспериментах характер зависимости и не может применяться для оценки оптических потерь, вызванных микроизгибами ОВ.

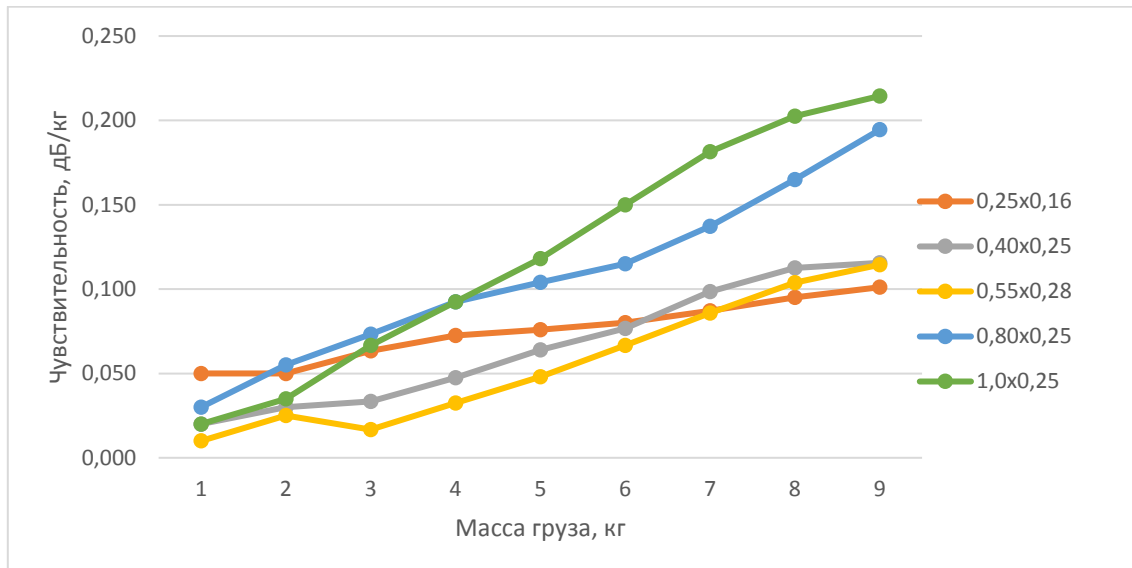


Рисунок 7 – Зависимость чувствительности от массы груза на длине волны 1550 нм

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 *потерь, вызванных микроизгибами ОВ при отрицательных температурах*, проводились с применением сетки с размером ячеек 1,0x0,25 мм и нагрузкой 6 кг, включая массу плиты.

Для сохранения температурного режима климатической камеры (исключения необходимости открытия дверцы для производства манипуляций с грузами) 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 8.

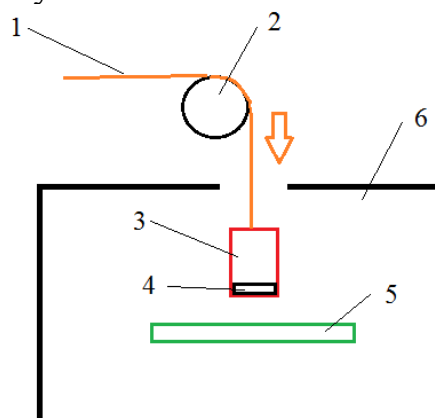


Рисунок 8 – Схема испытательной установки по определению оптических потерь, вызванных микроизгибами оптического волокна при отрицательных температурах

Результаты измерений при нагрузке 6 кг приведены в таблице 8. Метод демонстрирует хорошую воспроизводимость результатов измерений.

Таблица 8

| Температура, °С | Серия измерений | Оптические потери, дБ | | |
|-----------------|-----------------|-----------------------|---------|---------|
| | | 1310 нм | 1550 нм | 1625 нм |
| 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 |

В заключении приведены основные выводы по работе.

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 ОВ марки ОВ-Ер по КЖИБ.636570.518 ТУ и многомодового ОВ с градиентным

профилем показателя преломления марки ОВ-МГ1-01 по КЖИБ.636570.540 ТУ, а также ОВ для волоконных гироскопов.

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.

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 такого 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 [11].

4. Разработана методика определения совместимости материалов, применяемых в конструкциях ОК, 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 наполнителя 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, согласована с ПАО «Ростелеком» и вошла в ГОСТ Р 52266-2020 «Кабели оптические. Общие технические условия».

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 ОВ, заявленного в

документации на ОК 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 ОВ и ОК от необоснованных претензий заказчиков. Разработанная методика согласована с ПАО «Ростелеком». На методику оформлен патент № RU 2 803 977 С1 [12].

Основные статьи по теме диссертации, опубликованные в журналах и научных изданиях, отвечающих требованиям ВАК:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

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

6. 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.

7. 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

8. 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.

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

10. 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.

11. 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.

12. 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.