

## **АННОТАЦИЯ**

диссертационной работы на тему:

**«ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ»**, представленной на соискание доктора философии (PhD) по специальности «8D06201 - Телекоммуникация»

**КӨШКІНБАЕВ СӘУЛЕТБЕК ЖОЛДЫҚАРАҰЛЫ**

### **Оценка современного состояния решаемой научно-технологической проблемы (задачи)**

В течение десятилетий основным способом измерения физических и механических явлений были электрические датчики (тензорезистивные, струнные, потенциометрические и т.д.). Несмотря на их повсеместное использование, электрические датчики имеют ряд недостатков, таких как: потери при передаче сигнала, восприимчивость к электромагнитным помехам, необходимость организации искробезопасной электрической цепи (если существует опасность взрыва). Эти присущие им ограничения делают электрические датчики непригодными или сложными для применения при выполнении ряда задач. Использование волоконно-оптических датчиков является отличным решением данных проблем. В волоконно-оптических датчиках сигналом является свет в оптическом волокне, вместо электричества в медном проводе у традиционных электрических датчиков.

За последние двадцать лет огромное количество инноваций в оптоэлектронике и в области волоконно-оптических телекоммуникаций привело к значительному снижению цен на оптические компоненты и к значительному улучшению их качества. Это позволило волоконно-оптическим датчикам перейти из разряда экспериментальных лабораторных приборов в разряд широко применяемых приборов в таких областях как мониторинг зданий и сооружений и т.д.

Существенный вклад в разработку, развитие теоретических основ, элементов и механизмов проектирования волоконно оптического датчика (ВОД) внесли такие российские и зарубежные ученые, как В.М. Бусурин, М.М. Бутусов, В.Д. Бурков, А.В. Гориш, Ю.А. Гуляев, Я.В. Малков, Т.И. Мурашкина, В.Т. Потапов, Окоси Т., Окамато К., Оцу М и другие.

Современные оптоволоконные датчики обладают следующими свойствами:

- могут использоваться во взрывоопасной среде ввиду абсолютной взрывобезопасности;
- имеют высокую механическую прочность, малые габариты, простую конструкцию и соответственно высокую надежность;
- химически инертны;
- изготавливаются из диэлектрических материалов, чем обеспечивается отсутствие путей прохождения через них электрического тока;

- имеют высокую стойкость к повышенным температурам, механическим ударам, вибрациям и другим воздействиям окружающей среды;

- позволяют производить бесконтактные и дистанционные измерения .

Некоторые ВОД могут использоваться в ситуациях, в которых электронные устройства либо вообще нельзя использовать, либо такое использование сопровождается значительными трудностями и расходами (например, измерение температуры в высоковольтных электрических аппаратах, таких как генераторы переменного тока, трансформаторы; измерение тока и напряжения в высоковольтных линиях электропередачи; быстрое измерение температуры небольших поверхностей, имеющих малую теплопроводность и переменную отражающую способность, в труднодоступных местах).

Элементы, используемые в волоконно-оптических датчиках, полностью пассивны по отношению к электричеству, что позволяет использовать их в различных отраслях, таких как космическая отрасль, горнодобывающая промышленность, нефтяная промышленность, мониторинг трубопроводов и т.д..

Практика измерений в космической отрасли показывает, что из всех измеряемых параметров в технике, промышленности и технологиях, является деформация (20–30) % и температура (10-20) % всех измерений. При этом, температура часто является лишь косвенным параметром, применяемым при основных измерениях других параметров.

Таким образом, на долю совокупного измерения деформаций и температуры приходится порядка 35-45 % измерений, поэтому создание измерительных преобразователей (ИП), одновременно измеряющих деформаций и температуру (как многофункциональный датчик) в экстремальных условиях эксплуатации, является очень актуальной темой.

Данной тематикой занимаются в основном зарубежные фирмы и научные коллективы и ученые, включая такие как P.J. Lemaire, R.M. Atkins (США), С.В. Варжель, О. И. Медведков, И. Г. Королев (Россия). К сожалению, в Казахстане нет собственного производства датчиков, поэтому используют только импортные.

В настоящее время волокно с брэгговскими решетками (ВБР) рассматриваются как один из наиболее перспективных чувствительных элементов волоконно оптического датчика. Волоконно-оптические решетки Брэгга (ВРБ) находят широкое применение как в системах связи, так и в качестве датчиков температуры и деформации объектов. Поэтому изучению свойств ВРБ посвящено большое количество научных работ. Основные принципы работы, технология изготовления ВРБ отображены в работах А. Othonos [1], С. Е. Campanella [2], С. А. Васильев [3] , а возможные применения – в работах С.В. Варжель [4], Kun Yao, Qijing Lin, Zhuangde Jiang, Na Zhao, Bian Tian, Peng Shi and Gang-Ding Peng [5]. Обзор работ по свойствам чирпированных ВРБ и их применению дан в работе Daniele Tosi [6].

Использование ВБР в отраслях, в частности, в медицине рассматривается в обзорах работ А. Shadab[7], С. Massaroni [8], D.L. Presti [9]; в биохимии и фармации в работах А.М. Riza [10], С. Broadway, [11]; для экологических отраслей в работах D. Nadeem [12]; а также для других отраслей в работах А.С. Leal-Junior, [13].

**Обоснование необходимости проведения научно-исследовательской работы.** При разработке датчиков для ракетно-космической отрасли под воздействием основных факторов, характеризующих технические требования к разработке устройств, возникает сложная задача по обеспечению функционирования датчиков. Датчики, используемые в космической отрасли, наиболее подвержены воздействию внешних факторов. А также из-за экстремальных внешних температурных, ударных, вибрационных и особенно электромагнитных воздействий требования к стойкости металлического корпуса, стабильности измерений и функционированию двигателя первой ступени ракетно-космического аппарата высоки. В результате воздействия указанных дестабилизирующих факторов в металлическом корпусе космического аппарата происходят механические смещения и метрологические изменения. Поэтому для регистрации смещения и скоростей деформации объектов от вышеперечисленных воздействий в данной работе были использованы оптические методы, использующие оптические световоды для получения сигнала, зависящего от величины смещения объекта. Были рассмотрены технологии и конструкции волоконно-оптического многофункционального для космической инфраструктуры.

Учитывая все эти факты, актуально изучить создание и функциональные возможности объединенных оптоволоконных датчиков с высокой метрологической и эксплуатационной характеристикой.

### **Цель работы**

Целью работы является определение высокоскоростного смещения, температурного изменения металлических поверхностей от приложенных деформаций, температуры с помощью чувствительного элемента волоконно-оптического многофункционального датчика. Это даст возможность определить, насколько аппараты, применяемые в космической отрасли, деформируются под воздействием внешних дестабилизирующих факторов и найти необходимые материалы, способы защиты от них.

В процессе выполнения работы для решения указанной цели, исходя из новизны данного направления, необходимо исследовать теоретические вопросы генерации и распространения когерентного излучения через оптические среды, определить эффективные способы изменения параметров излучения под воздействием деформации и температуры. Кроме того, необходимо найти физически и технологически совместимые методы преобразования, осуществляемые одним датчиком. Исходя из полученных результатов, требуется исследовать ВОД, способные преобразовывать деформацию и температуру в электрическую или цифровую величину.

## **Задачи работы**

Для достижения заявленной цели работы необходимо решить следующие задачи:

- Изготовить чувствительный элемент волоконно-оптического датчика;
- Провести нагрузочные и температурные испытания ВОД, для проверки правильности выбранных конструктивно-технологических решений;
- Измерить высокоскоростные деформаций с использованием волоконных брегговских решеток;
- Разработать математические модели элементов и структур оптического многофункционального датчика;

## **Научная новизна и значимость работы.**

В данной работе впервые предлагается использовать экспериментальную установку импульсного магнитного поля с оптическими датчиками для определения высокоскоростных смещений, температурных изменений металлических поверхностей, что ранее не применялось в других исследованиях. И это является новизной данной работы.

Результаты исследования представляют практический интерес для Республики Казахстан в плане разработки инновационной высокотехнологичной продукции, востребованной в странах Евразийского Экономического Союза и за рубежом.

**Объектами исследования** являются многофункциональные датчики, предназначенные для космической инфраструктуры.

**Предметом исследования** является теоретический анализ и экспериментальные исследования создания и функционирования элементов МД для космической инфраструктуры.

## **Методы исследования и этические вопросы**

*Описание научных методов, используемых в работе как обоснование способов достижения поставленных целей, обоснование выбранного подхода:*

В работе будет использован метод обобщения, метод прямого измерения, метод наблюдения и метод экспертных оценок. С использованием метода обобщения будет проводиться анализ состояния и тенденций развития комбинированных датчиков и космических систем на их основе. С помощью метода прямого измерения будут регистрироваться показания ВОД при их испытаниях на стендах. Метод наблюдения будет включать в себя моделирование элементов и структур ВОД. Метод экспертных оценок позволит оценить качество использованных в работе конструктивно-технологических решений и выбрать оптимальные.

При создании ВОД, основными направлениями научно-технических исследований и деятельности будут являться:

- разработка обобщенных технических требований по характеристикам, применяемым материалам и комплектующим, исходя из определенной предметной области;

- выявление и анализ физических принципов совместимого преобразования температуры и давления одним ВОД;
- анализ существующих конструкций и принципов действия ВОД для применения в космическом приборостроении и определение базовых;
- создание оригинальных конструктивно-технологических решений при разработке ВОД.

Обоснованием выбранного подхода является традиционная процедура разработки приборостроительной продукции, особенно для космической отрасли, которая включает в себя обязательное моделирование, конструирование и проведение испытаний по разработанным методикам и на аттестованном испытательном оборудовании.

*Критические точки, альтернативные пути реализации работы:*

С учетом современного технологического уровня, имеющейся элементной базы и авторского научного задела исполнителей по теме работы есть уверенность в успешной реализации данной работы. С высокой степенью достоверности можно утверждать о высокой конкурентоспособности и востребованности полученных в процессе реализации настоящей работы результатов. Способом повышения достоверности результатов функционирования каналов ВОД, является проведение факторного эксперимента, включающего, как раздельное подача давления и нагрев, так и совместное воздействие давления и температуры. Критическими точками работы является приобретение широкополосного спектроанализатора и изготовление испытательного стенда. Для снижения риска данные этапы будут проводиться с использованием аренды спектроанализатора и кооперации.

Для достижения достоверности результатов испытаний экспериментальных макетов ВОД, будут проведены испытания по стандартным методикам в сертифицированном испытательном центре.

*Используемые в рамках Работы способы обеспечения соблюдения принципов научной этики, т.е. этических процедур управления, в частности, поддержания высоких стандартов интеллектуальной честности и недопущения фабрикации научных данных, фальсификации, плагиата, ложного соавторства, использования отдельными участниками коллективных исследований, данных и выводов, полученных в исследованиях, без согласования с другими участниками.*

Владельцами объектов интеллектуальной собственности, используемых в работе, являются участники настоящей работы, что исключает нарушения научной этики на этапе выполнения работы и оформления заявочных документов по научной работе. Все созданные в процессе выполнения настоящей работы научные результаты и объекты интеллектуальной собственности будут оформлены с участием их авторов.

Детальный порядок и механизм проведения исследований, проводимых с участием людей и животных, описание соответствия планируемых исследований законодательству Республики Казахстан.

Условия оформления и разделения прав интеллектуальной собственности на результаты исследования.

Созданные в рамках настоящей работы объекты интеллектуальной собственности будут защищены инновационными патентами Республики Казахстан и Евразийскими патентами, а также статьями в изданиях с ненулевым импакт-фактором и в журналах, рекомендованных МОН РК.

#### **Актуальность темы.**

Как показывает практика, температурные и силовые измерения являются самыми распространенными в науке, технике, производстве, поэтому создание комбинированных, помехоустойчивых и энергоэффективных МД, к которым относятся ВОД с БГ является очень важной задачей. Исследуемые ВОД будут востребованы для вновь разрабатываемых и модернизируемых космической инфраструктуре, в полигонной инфраструктуре, а также для других стратегических отраслей РК. Кроме того, высокоскоростное деформирование металлов все более широко применяется в технике и производстве. Это объясняется тем, что скорости нагружения деталей существующих и проектируемых машин и механизмов, и соответственно, металла в процессе его обработки очень высоки, а сведений о сопротивлении металлов деформированию, пластичности и ударной вязкости в широком диапазоне скоростей деформации и температур, необходимых для расчетов, в достаточном объеме не имеется. Характеризующееся большими скоростями деформации, высокими давлениями на поверхностях обрабатываемого металла и значительными энергиями, высокоскоростное деформирование обеспечивает высокую производительность, дает возможность изготавливать изделия значительных размеров из прочных и малопластичных материалов, позволяет обрабатывать металл, находящийся в состоянии движения.

В связи с этим исследование поведения современных конструкционных и строительных материалов при высокоскоростном деформировании и разрушении является крайне значимой и актуальной проблемой.

Результаты настоящей работы представляют практический интерес для Казахстана в плане разработки инновационной высокотехнологичной продукции, востребованной в странах Евразийского Экономического Союза и зарубежом.

*Социальный спрос и экономическая заинтересованность в реализации работы.*

Импортозамещение, разработка и освоение производства высокотехнологичной продукции для многих отраслей промышленности и науки, являются важными государственными задачами. Создание новых квалифицированных рабочих мест в условиях малых и средних предприятий, при этом не требуется больших капитальных вложений и сложного дорогостоящего оборудования.

*Влияние полученных результатов на развитие науки и технологий.*

В процессе выполнения настоящей работы будут получены научные результаты, которые найдут применение в иных областях, например, в

контрольно – измерительных технике, автоматике и машиностроении. Планируется защита результатов работы несколькими патентами РК, Евразийскими патентами и публикациями статей в изданиях с ненулевым импакт-фактором, выпуском учебных пособий и монографий.

*Ожидаемый социальный и экономический эффект:*

- импортозамещение, экономия государственных средств на закупку импортной продукции;
- повышение безопасности эксплуатации и работы опасных объектов;
- освоение производства новой инновационной продукции
- создание на базе разработанных ВОД лабораторных стендов для учебных заведений и промышленности.

**Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами.**

Работа выполнялась как часть научно-исследовательской работы ИРН АР08052850 по теме «Разработка конструкций и технологий создания малогабаритных оптоволоконных совмещенных датчиков давления и температуры для космической инфраструктуры», финансируемой МОН Республики Казахстан.

**Сведения о материальном обеспечении диссертации.**

В работе были использованы два оптических светочувствительных волокна с нанесёнными на них методом фазовой маски брэгговскими решётками и анализатор оптического спектра MS9740B (Япония) для получения спектра отражения от брэгговской решетки. Также было использовано экспериментальное устройство импульсного магнитного поля. Для температурного воздействия на оптическое волокно с решеткой Брэгга использовался универсальный сушильный шкаф СНОЛ 38/350.

Основные законы оптики, аналитической геометрии были руководствованы при построении математической и физической модели чувствительного элемента оптического датчика.

**Положения, выносимые на защиту**

Выдвигаемая гипотеза:

- определение высокоскоростного смещения, температурного изменения металлических поверхностей космического аппарата (РКТ) с применением оптических решеток Брэгга оптического многофункционального датчика.

На основе выдвинутой гипотезы разработаны положения, выносимые на защиту:

- методы, использующие оптические световоды для получения сигнала, зависящего от величины смещения объекта;
- технологии и конструкции волоконно-оптического многофункционального датчика;
- математические модели элементов и структур оптического многофункционального датчика;

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 научных статей, в том числе 1 с ненулевым импакт-фактором, 4 статьи в научных изданиях, рекомендованных ККСОН МОН РК.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах кафедры «Радиотехника, электроника и космические технологии» КазНУ имени К.И.Сатпаева (Казахстан, Алматы); Международная конференция "Сатпаевские чтения-2021", Satbayev University, (РК, Алматы, 2021); 2<sup>nd</sup> international Joldasbekov symposium, Kazakhstan, «Development of a Mathematical Model of Combined Optical Pressure and Temperature Sensors for the Space Industry», (РК, Алматы, 2021) ; ; 2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (Russia, St. Petersburg, 2022) ; EExPolytech-2022: 2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics, (Russia, St. Petersburg, 2022) ;

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованной литературы. Основной текст работы изложен на 125 страницах машинописного текста, содержит 53 рисунок, 5 таблиц, список использованных источников состоит из 115 наименований.