

УДК 621.372.8

## **ДАТЧИКИ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ И СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР**

**Гончаренко И.А., д.ф.-м.н., профессор, Рябцев В.Н.**  
**Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь**

**e-mail: mail@kii.gov.by**

*В работе проведен анализ конструкций волоконно-оптических датчиков контроля состояния инженерных и строительных конструкций, рассмотрены возможные пути повышения их эффективности. Рассмотрены основные физические эффекты, используемые для измерения деформаций и напряжений контролируемых объектов. Предложена структура и принципы функционирования распределенного векторного датчика изгибов и напряжений на основе микроструктурированного оптического волокна ленточной формы с тремя сердцевинами.*

*In the paper we performed the analysis of the structures of optical fiber sensors designed to control the state of engineering and building constructions, considered the probable means of increasing their efficiency. The basic physical effects, which are used for measurement of deformation and stresses of controlled structures, are reviewed. The structure and operation principles of distributed vectorial sensor of bends and stresses on the base of belt shape microstructured fiber with three cores are proposed.*

(Поступила в редакцию 22 июля 2013 г.)

### **ВВЕДЕНИЕ**

Неотъемлемой частью эксплуатации сложных инженерных сооружений и промышленных систем является мониторинг их состояния. Для обеспечения безопасного функционирования зданий, мостов, туннелей, дамб и других сооружений, необходимо осуществлять постоянный контроль их состояния, т.е. измерять напряжения, нагрузки, вибрации конструкций и материалов, изменение их температуры и т.д. В последнее время для этих целей активно используются волоконно-оптические датчики [1-3].

Волоконно-оптические датчики имеют ряд преимуществ над электронными устройствами. Благодаря использованию оптических волокон в качестве чувствительных элементов отсутствует влияние на результат измерения электромагнитных полей, побочного электромагнитного излучения, перекрестных помех каналов, отсутствуют проблемы, связанные с контурами заземления и с напряжениями смещения в местах соединения разнородных проводников, существенно повышается электрическая безопасность, отсутствуют проблемы дугообразования и искрения. Такие датчики имеют высокую стойкость к вредным воздействиям среды; малые габариты и вес; высокую механическую прочность; стойкость к повышенным температурам, вибрациям и др.; высокую скорость передачи данных. Кроме того, волоконно-оптические датчики могут использоваться во взрывоопасной среде ввиду их абсолютной взрывобезопасности. Они химически инертны, имеют простую конструкцию и высокую надежность.

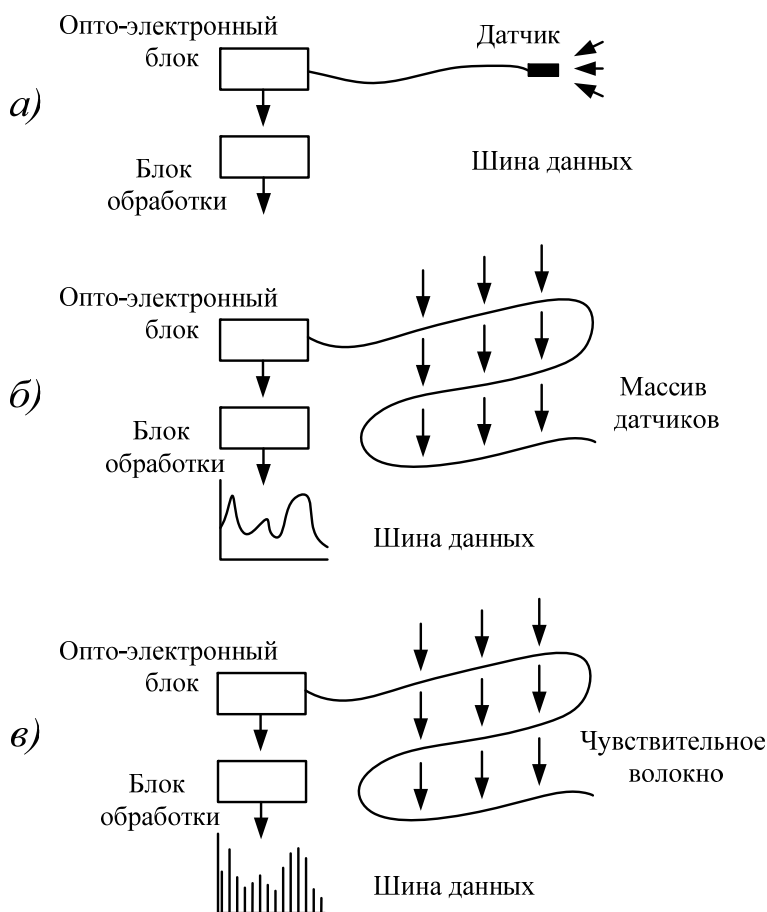
Некоторые волоконно-оптические датчики могут использоваться в ситуациях, в которых электронные устройства либо вообще нельзя использовать, либо такое использование сопровождается значительными трудностями и расходами: например, измерение температуры в высоковольтных электрических аппаратах, таких как 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.

Внедрив волоконно-оптические сенсоры в структуру сооружений, можно отслеживать изменение их состояния в течение времени, собирая на центральном пункте слежения большое число измерений.

Современные волоконно-оптические датчики позволяют измерять многие физические параметры: давление, температуру, расстояние, положение в пространстве, скорость вращения, скорость линейного перемещения, ускорение, колебания, массу, звуковые волны, уровень жидкости, деформацию, коэффициент преломления, напряженность электрического и магнитного поля, силу электрического тока, концентрацию газа, дозу радиационного излучения и т. д. С точки зрения безопасности строительных конструкций и сооружений наиболее востребованы такие параметры как изгибы и напряжения. Причем, помимо величины изгибов существует необходимость измерять также и их направление. Решить данную задачу позволяет разработка векторных датчиков.

### 1. Типы волоконно-оптических датчиков

Волоконно-оптические датчики можно условно разделить на три типа (рис. 1): точечные, распределенные и квазираспределенные [2,4,5].



а – точечные; б – распределенные; в – квазираспределенные

Рисунок 1 – Классификация волоконно-оптических датчиков

Точечные волоконно-оптические датчики (рис. 1а) позволяют проводить измерения и контролировать параметры в определенной точке объекта, как и большинство неволоконных датчиков. Как правило, такие датчики обладают малым размером и высокой точностью измерения. Они могут быть использованы в качестве локальных термометров, тензодатчиков, датчиков давления, акселерометров и т. п. В зависимости от типа сенсорного элемента локализация датчиков может достигать  $0,1 \text{ см}^2$ .

Бесспорным преимуществом распределенных датчиков (рис. 1б) является возможность осуществления непрерывного контроля параметров по длине (объему) объекта в любой его точке, где установлен сенсорный световод. Принцип действия таких сенсорных систем основан на анализе изменения параметров по длине волновода и на нелинейных эффектах. Недостатком распределения измеряемого параметра по длине является относительно невысокая точность определения локализации возмущения (несколько метров по длине) и относительно невысокая точность измерения величины. Распределенные сенсорные системы могут быть использованы для контроля больших территорий в качестве датчиков радиации и температуры, позволяют анализировать градиенты температур на больших объектах, котлах и т. п.

Измерительные системы на основе квазираспределенных датчиков (рис. 1в) объединяют преимущества первых двух схем. Квазираспределенный датчик представляет собой массив точечных сенсорных элементов, например, на основе волоконных решеток, объединенных одним общим волноводом. Каждый элемент обладает своими уникальными характеристиками, что позволяет проанализировать его состояние независимо от других сенсорных элементов.

Точность таких систем определяется точностью отдельных датчиков, а массив может объединять более 100 элементов. Сенсорные массивы позволяют проводить мониторинг сложных объектов, инженерных сооружений, мостов, тоннелей, корпусов кораблей и летательных аппаратов, нефтяных скважин и т. п., анализировать градиент распределения температуры, нагрузок, давления, контролировать большое количество точечных объектов. Причем для этого используется только один волоконный световод и анализатор. Квазираспределенные системы по сравнению с электрическими аналогами обладают малым весом и размером, что особенно необходимо в некоторых областях их применения. Однако квазираспределенные датчики все же не позволяют проводить измерения в произвольной точке объекта. Кроме того, для передачи данных от набора датчиков по одному волокну необходимо использовать системы мультиплексирования сигналов и набор фотоприемников. При этом число сенсорных элементов ограничено числом каналов по длинам волн.

### **1.1. Точечные волоконно-оптические датчики**

#### *Датчики на основе волоконных брэгговских решеток*

Одним из основных видов волоконных датчиков являются датчики на основе волоконных брэгговских решеток [2,4,6-9]. Такая решетка представляет собой брэгговское зеркало, а именно, периодическую структуру показателя преломления, изготовленную непосредственно в сердцевине оптического волокна, длиной порядка 1 см. Подобная структура отражает свет в узком спектральном диапазоне. Запись решеток проводится в специальных фоточувствительных оптических волокнах благодаря так называемому фоторефрактивному эффекту [10,11].

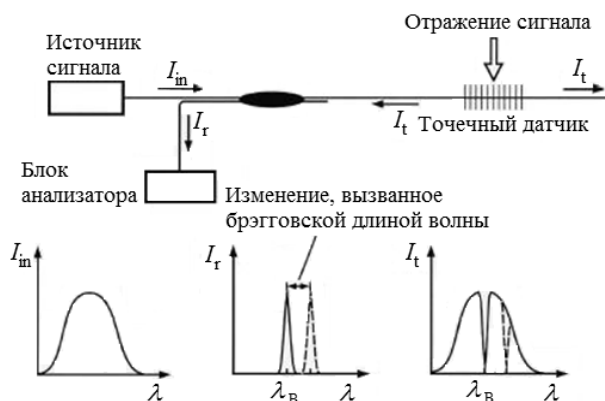
Существует множество различных способов построения сенсорных систем на основе брэгговских решеток. В простейшем случае (рис. 2) сенсорная система представляет собой точечный датчик, соединенный через оптический разветвитель с источником светового сигнала и блоком анализатора [2,4]. Сигнал от источника отражается сенсорным элементом. Длина волны отражения фиксируется блоком анализатора. Как правило, анализатор представляет собой узкополосный спектрометр. Существуют спектрометры различных типов: от стандартных дифракционных, где в качестве дисперсионного элемента используется дифракционная решетка, до анализаторов на основе интерферометра Фабри-Перо. Путем сканирования ширины интерферометра можно проанализировать оптический спектр отражения сенсора.

Брэгговская длина волны (центральная длина волны света, отраженного назад от брэгговской решетки) зависит от периода решетки, который может изменяться при смещениях или изменении температуры контролируемых конструкций:

$$\lambda_{бр} = 2n_{эф} d, \quad (1)$$

где  $n_{эф}$  – эффективный показатель преломления моды волокна для центральной длины волны;  
 $d$  – период решетки.

Таким образом, по изменению брэгговской длины волны можно определять величину изменения указанных физических величин и оценивать их воздействие на контролируемые конструкции.



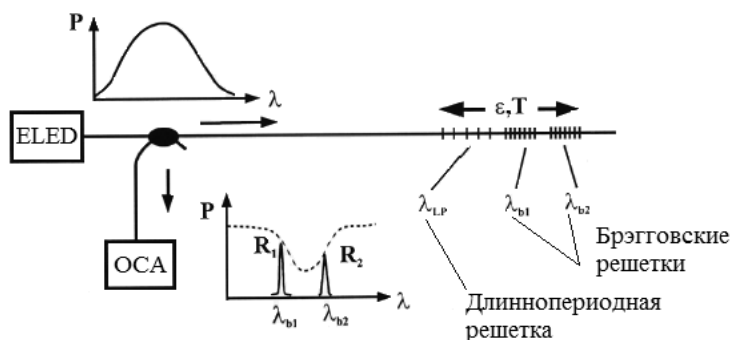
**Рисунок 2 – Схема построения сенсорных систем на основе брэгговских решеток**

Датчики на волоконных брэгговских решетках измеряют напряжения в определенной точке. Однако в одном волокне можно записать сотни волоконных брэгговских решеток, и один анализатор будет измерять все отражения. Это дает возможность создавать очень простые, но эффективные устройства, которые одновременно контролируют множество различных точек конструкций. Поскольку на длину волны отражения волоконной брэгговской решетки влияет как температура, так и деформации, то датчики часто размещают в паре, где один из них изолирован от движения конструкций [9]. Это позволяет независимо измерять и деформации, и температуру.

Существуют датчики, позволяющие одновременно определять температуру и деформацию (внутреннее напряжение) с использованием одной решетки [6]. В этом случае волоконно-оптическая решетка записывается на анизотропном волокне. Из-за анизотропии эффективные показатели преломления ортогонально поляризованных мод отличаются друг от друга. Поскольку брэгговская длина волны решетки зависит от  $n_{эф}$ , в анизотропном волокне брэгговские длины волн ортогонально поляризованных мод отличаются на определенную величину. Причем, это различие зависит от температуры, но не зависит от изменения напряжения. Таким образом, по смещению отдельной брэгговской длины волны измеряют изменение напряжения, а по изменению разности брэгговских длин волн ортогонально поляризованных мод – температуру.

В качестве сенсоров также могут использоваться длиннопериодные волоконные решетки. Длиннопериодные волоконные решетки, в отличие от брэгговских, не отражают сигнал, однако также имеют свой уникальный спектр пропускания за счет спектрально-селективного рассеяния, зависящего от периода решетки и структуры световода. В длиннопериодной решетке расстояние между штрихами много больше длины волны, а ее спектр определяется интерференцией основной и оболочечных мод. Зависимость спектра пропускания от температуры длиннопериодной решетки по сравнению с брэгговской носит принципиально другой характер. Более того, в зависимости от структуры волокна изменение в спектре с ростом температуры может быть как положительным, так и отрицательным. На основе этого явления была разработана относительно простая сенсорная система,

позволяющая разделить вклады деформационной составляющей и температуры (рис. 3) [2,12]. Спектр отражения такой системы показан на этом же рисунке. Пунктирная огибающая представляет собой спектр пропускания длиннопериодной решетки. При механических воздействиях на систему изменяется только длина волны отражения брэгговских пиков при слабом изменении их интенсивности, поскольку спектры брэгговских и длиннопериодной решеток сдвигаются синхронно. Однако с изменением температуры наблюдаются значительные изменения относительных интенсивностей пиков отражения брэгговских решеток за счет разницы в воздействии температуры на спектры различных по периоду структур. Пики брэгговского отражения «плывут» вдоль огибающей. Таким образом, имея заранее калиброванную систему, можно разделить вклады температуры и механического воздействия на сенсоры, что затруднительно с использованием только брэгговских волоконных решеток.

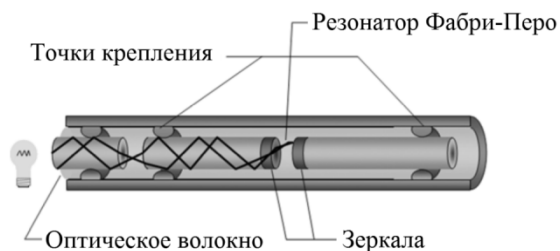


**Рисунок 3 – Сенсорная система на основе комбинации брэгговских и длиннопериодной решеток для раздельного анализа температурных изменений и механических деформаций**

#### *Датчики на основе интерферометров Фабри-Перо*

Другой разновидностью точечных датчиков являются датчики с использованием интерферометров Фабри-Перо [1,4,13]. Интерферометры Фабри-Перо состоят из двух отражателей, расположенных с каждой стороны оптически прозрачной среды. При соответствующем расстоянии между отражателями коэффициент пропускания интерферометра высок. Изменение расстояния приводит к падению коэффициента пропускания. При высокой отражательной способности отражателей коэффициент отражения очень чувствителен к изменениям длины волны или расстояния между отражателями.

Типичная конструкция точечного датчика на основе интерферометра Фабри-Перо описана в работе [4]. Сенсорный элемент датчика представляет собой стеклянную капиллярную трубку, в которой расположены два отрезка оптического волокна с нанесенными на торцы зеркалами. Торцы волокон с зеркалами обращены друг к другу, и между ними формируется резонансная полость размером в несколько микрон (рис. 4). Одно из зеркал делается частично пропускающим для вывода излучения в обратном направлении. В результате многолучевой интерференции входящего и отраженных лучей образуется интерференционная картина, имеющая форму концентрических колец с резкими максимумами интенсивности, положение которых зависит от длины волны. Таким образом, интерферометр Фабри-Перо разлагает сложное излучение в спектр. Перемещение одного из зеркал приводит к изменению интерференционной картины, что может быть измерено с помощью фотоприемника. Анализируя данные фотоприемника, можно оценить степень внешнего воздействия на датчик. Этот принцип широко используется для измерения длин объектов, их перемещений и напряжений.



**Рисунок 4 – Конструкция точечного датчика на основе интерферометра Фабри-Перо**

Интерферометры Фабри-Перо привлекательны для использования в датчиках, поскольку позволяют легко установить связь с измеряемыми физическими или химическими величинами [13]. Недостатком датчиков на основе интерферометров Фабри-Перо является нелинейность их характеристик. Поэтому в практических приложениях требуется применять специальные методы считывания.

#### *Датчики на основе интерферометров Маха-Цендера*

В датчиках на основе интерферометров Маха-Цендера [13] когерентное излучение одномодового (одновременно по отношению к поперечной и продольной модам) лазера вводится в одномодовое волокно и при помощи волоконно-оптического разветвителя разделяется на два пучка примерно равной интенсивности. Один пучок направляется на плечо с измерительным волокном, другой – проходит через опорное плечо. Два выходных сигнала после прохождения через измерительное и опорное волоконные плечи объединяются вторым волоконным разветвителем (рекомбинатором). Эти два луча интерферируют, образуя интерференционный сигнал, который регистрируется фотодетекторами.

Следует отметить, что этот вид датчика может работать при большой длине волокна (более 10 км) между модулем источника (детектора) и измеряющим интерферометром, сохраняя при этом высокую производительность. Подобное преимущество играет важную роль, например, при использовании датчиков для мониторинга состояния ветровых турбин, расположенных вдали от мест обитания человека, особенно на затапливаемых приливами участках морского побережья. Подобные системы мониторинга позволяют в режиме реального времени передавать данные на длительные расстояния о наиболее важных параметрах ветряных турбин. Операторы турбин могут также использовать измерения для настройки в реальном времени наклона (шага) лопастей для увеличения производительности и улучшения баланса.

#### *Датчики на основе интерферометров Майкельсона*

В отличие от интерферометров Маха-Цендера в датчиках на основе интерферометра Майкельсона [13] используется один разветвитель, который и разделяет, и соединяет проходящее излучение. Излучение, приходящее от источника, разделяется между измерительным и опорным плечами интерферометра. Пройдя по всей длине плеч, излучение отражается рефлектором и проходит обратно через те же плечи. После этого излучение воссоединяется на разветвителе и фиксируется фотодетекторами.

Разновидность датчика на интерферометре Майкельсона предложена компанией SOFO [14,15]. Свет от источника с помощью разветвителя делится в равном соотношении и направляется по двум оптическим волокнам (плечам), опорному и измерительному (рис. 5). Измерительное волокно прикреплено к контролируемой конструкции и следует за всеми ее деформациями. Опорное волокно проложено в трубке и служит для определения внешнего воздействия на контролируемую конструкцию путем сравнения параметров распространения света в опорном и измерительном волокнах. Пройдя по волокнам, свет отражается зеркалами на концах волокон или набором зеркал, расположенных по длине волокна парами (в этом случае применяются методы мультиплексирования сигналов). Отражательные элементы,

волокна и разветвители образуют интерферометр Майкельсона с подвижными зеркалами, что позволяет довольно точно определять разницу оптического пути света между опорным и измерительным волокнами. Интерференционный сигнал подается на второй интерферометр, длина одного из плеч которого изменяется с помощью подвижного зеркала. Сигнал со второго интерферометра регистрируется фотодетектором и передается на микроконтроллер, где анализируется. Для каждой пары отражателей наблюдается интерференционная картина с тремя пиками когерентности. Центральный пик образуется при равновесии двух плеч интерферометра Майкельсона, т. е. при отсутствии разности оптического пути. Боковые пики соответствуют положению подвижного зеркала, когда разность оптического пути соответствует оптической разности хода в первом интерферометре. Таким образом, разность между положением центрального и боковых пиков соответствует разности плеч первого интерферометра, т. е. смещению измеряемого объекта. Положение пиков может быть определено с точностью до 2 мкм по длине волокна. Используя разветвители можно подключить к контрольному прибору большое количество датчиков, и тем самым контролировать состояние больших площадей (объемов).

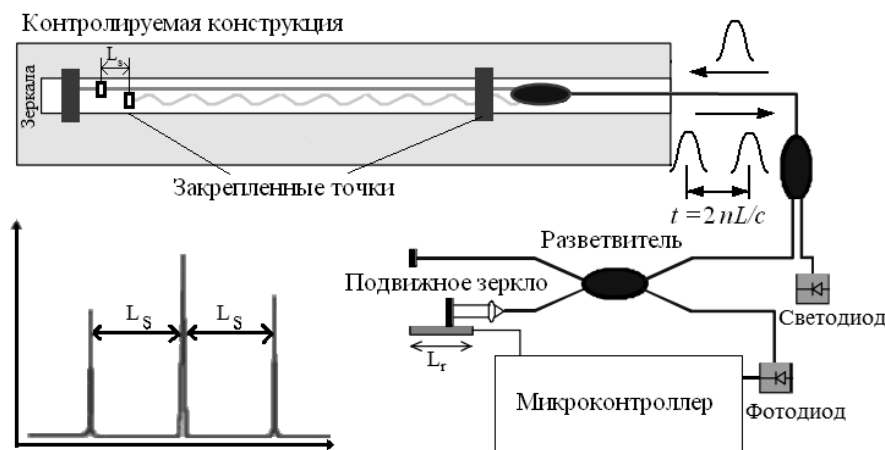


Рисунок 5 – Конструкция датчика SOFO на базе интерферометра Майкельсона

### 1.2. Распределенные волоконно-оптические датчики

В построении распределенных волоконно-оптических датчиков используются эффекты, возникающие при распространении света в волокне: обратное рэлеевское рассеяние света, рассеяние Мандельштама-Бриллюэна, комбинационное (рамановское) рассеяние [1,13,16-24].

Использование распределенных датчиков с оптическим волокном в качестве чувствительного элемента особенно привлекательно в тех приложениях, где требуется отслеживание единственной измеряемой величины в большом количестве точек или непрерывно по всей длине волокна [13]. Примерами таких приложений могут служить: мониторинг напряжений в объемных структурах, таких как здания, мосты, плотины, резервуары-хранилища и пр., а также морские суда, нефтепромысловые платформы, самолеты и т. д.; наблюдение за профилем температуры в электрических силовых трансформаторах, генераторах, реакторных системах, печах, системах управления технологическими процессами или в системах для обнаружения пожара; определение утечки в трубопроводах, диагностика неисправностей и обнаружение аномалий магнитного (электрического) поля в энергораспределительных системах и системах охранной сигнализации; встроенные датчики в композитных материалах, используемые в реальном времени для оценки напряжения, вибрации и температуры в структурах и корпусах, особенно в аэрокосмической промышленности.

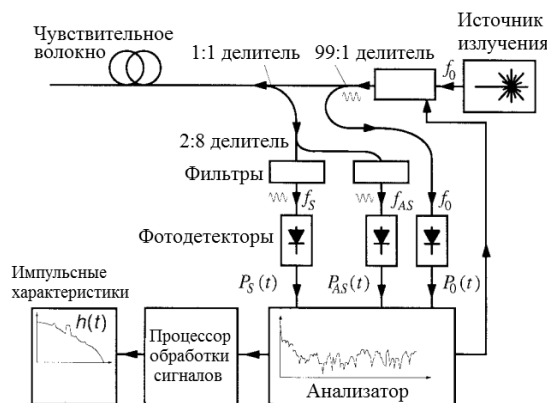
*Датчики на основе рэлеевского рассеяния*

При распространении света в оптическом волокне возникают потери из-за рэлеевского рассеяния, обусловленного случайными микроскопическими изменениями показателя преломления сердцевинки оптического волокна. Часть излучения, которая рассеивается под углом  $180^\circ$  к направлению распространения (обратное рассеяние), удовлетворяет числовой апертуре волокна и возвращается к источнику. Подавая импульсный входной оптический сигнал в оптическое волокно и отслеживая изменения интенсивности возвращаемого из-за обратного рассеяния сигнала, можно определить профиль изменения коэффициента рассеяния волокна или затухание. На этом основана оптическая рефлектометрия во временной области (OTDR – Optical Time-Domain Reflectometry) – хорошо зарекомендовавший себя метод для определения мест повреждений (дефектов) и диагностики в волоконных системах коммуникаций [1,13,16]. В измерительных системах оптическая рефлектометрия может использоваться для обнаружения обусловленных измеряемой величиной локальных изменений потерь или коэффициента рассеяния в измерительном волокне.

В распределенных датчиках с оптическим волокном в качестве чувствительного элемента, основанных на рэлеевском обратном рассеянии, для измерений используется зависимость потерь или рассеяния света от измеряемой величины на отрезке оптического волокна, образующем протяженный датчик. Самый распространенный вид распределенных датчиков с оптическим волокном в качестве чувствительного элемента основывается на регистрации областей, в которых локализованы избыточные потери, вызванные, например, микроизгибами.

*Датчики на основе вынужденного комбинационного рассеяния*

В работах [1,4,13,17-19] рассмотрен принцип действия распределенных волоконно-оптических датчиков на основе температурной зависимости комбинационного рассеяния (рис. 6). Комбинационное рассеяние света вызвано молекулярными колебаниями, на которые влияет температура. Следовательно, обратное рассеяние несет информацию о локализации температуры, указывая на места, где произошло рассеивание. Рамановское рассеяние содержит две частотные составляющие: стоксову и антистоксову компоненты. Интенсивность антистоксовой компоненты строго зависит от температуры, тогда как интенсивность стоксовой компоненты от температуры не зависит. Поэтому измерительные приборы на основе рамановского рассеяния отслеживают частоты соответствующих компонент и регистрируют отношения между их интенсивностями. Таким образом, по интенсивности антистоксовой компоненты определяют величину температуры, а по времени прихода сигнала – местоположение оказываемого температурного воздействия. Основным недостатком датчиков подобного типа в том, что из-за низкого коэффициента рамановского рассеяния – примерно на три порядка более слабого по величине, чем рэлеевское – возникает необходимость использования входного сигнала большой мощности и длительного усреднения регистрируемого сигнала обратного рассеяния.



**Рисунок 6 – Схема датчика для распределенных измерений температуры на основе вынужденного комбинационного рассеяния**



В датчиках подобного типа в основном используются одномодовые оптические волокна. В работе [21] описана конструкция датчика на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния на многомодовом волокне, который позволяет измерять температуру с точностью до 1 °С и пространственным разрешением менее одного метра при радиусе измерения до 10 км.

*Датчики на основе вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна*

Одним из эффектов, широко используемых в измерительной технике, является рассеяние Мандельштама-Бриллюэна [1,4,19,20]. Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна является результатом взаимодействия оптических и звуковых волн в среде. Свет рассеивается на флуктуациях плотности среды, возникающих из-за наличия в среде упругих возмущений (звуковых волн). Свет на этой движущейся решетке дифрагирует назад, что приводит к смещению его частоты, аналогично доплеровскому сдвигу. Поскольку изменение частоты рассеянного света происходит вследствие эффекта Доплера, оно определяется величиной скорости звуковых волн. Так как скорость звука в среде зависит от температуры, то, измеряя изменение частоты в рассеянии Мандельштама-Бриллюэна, можно производить измерения температуры вдоль волокна. Поскольку при растяжении или сжатии волокна изменяется плотность материала, это также приводит к изменению скорости звуковых волн и, тем самым, к изменению частоты рассеянного излучения. Поэтому на основе эффекта Мандельштама-Бриллюэна можно создавать волоконно-оптические датчики давления или деформации.

В рассмотренной в работе [19] конструкции распределенного датчика температуры на основе рассеяния Мандельштама-Бриллюэна вместо отраженного или рассеянного оптического сигнала, вернувшегося из волокна, анализируются сигнал накачки и сигнал зондирующего излучения. Установка содержит два лазера, один из которых создает излучение накачки, а второй (зондирующий) – излучение на частоте стоксовой линии спектра бриллюэновского рассеяния. Измерения сдвига частоты после прохождения излучением исследуемого волокна позволяют судить о величине механического напряжения вдоль волокна по величине частотного сдвига, напрямую связанного с частотой звуковых колебаний в волокне.

При использовании рефлектометрии во временной области точность пространственного разрешения места воздействия внешнего возмущения ограничена шириной импульса накачки. Использование более коротких импульсов лимитировано временем жизни фотонов 10 нс (это соответствует пространственному разрешению 1 м). Обойти это ограничение можно, используя методы математической обработки сигналов, как это было сделано в работах [20,22].

Акустические волны можно генерировать при возбуждении в волокне двух встречно распространяющихся оптических волн с разностью частот равных бриллюэновскому сдвигу. Из-за электрострикции эти две волны вызывают бегущую акустическую волну, что усиливает населенность фононов. По интенсивности отраженного оптического импульса и времени его прохождения можно определить профиль бриллюэновского сдвига частоты по длине волокна. Такие датчики имеют преимущество перед рамановскими датчиками, поскольку используют более мощный сигнал. Но для получения такого сигнала требуется синхронизация двух лазерных источников. В работе [4] описана схема распределенной сенсорной системы на бриллюэновском рассеянии с использованием только одного источника излучения и интегрально-оптического модулятора. Лазерный источник в этом случае одновременно генерирует две волны, что обеспечивает устойчивое различие их частот.

Измерение профиля температуры и напряжений по длине волокна в частотном домене на основе бриллюэновского рассеяния описано в работах [23,24]. В этом случае оценивается изменение амплитуды и фазовые сдвиги лазерного сигнала, синусоидально модулированного по интенсивности, на эквидистантных частотах модуляции. Такой подход позволяет уменьшить влияние шумовой составляющей на результаты измерения.

В качестве чувствительного элемента в распределенных датчиках может быть использовано микроструктурированное волокно. В работе [25] описан распределенный датчик, позволяющий одновременно измерять температуру и напряжения на основе измерения групповой скорости и дисперсии световых импульсов в микроструктурированном волокне. Интерферометрические датчики температуры и напряжения на основе микроструктурированного волокна с двумя сердцевинами с высоким двулучепреломлением описаны в работах [26,27]. Датчики на основе микроструктурированного волокна с двумя сердцевинами могут быть использованы также для измерения величины изгиба или напряжения контролируемых объектов в одной плоскости [28]. Однако волокно с двумя сердцевинами не позволяет получить информацию о направлении деформации объекта, что бывает существенно для ряда конструкций, таких как, например, мосты, лопасти ветровых турбин или строительные краны.

### **1.3. Квазираспределенные волоконно-оптические датчики**

Для создания систем квазираспределенных датчиков в волоконно-оптическую линию включается ряд специально создаваемых дискретных чувствительных элементов, в которых под действием внешних условий осуществляется модуляция интенсивности, фазы или спектра излучения. Такими чувствительными элементами могут быть брэгговские дифракционные решетки, интерферометры Маха-Цендера, интерферометры Фабри-Перо и т. д. [2,4,13,16,29,30].

В простейшем случае квазираспределенный датчик – это модифицированные фрагменты волокна, встроенные непосредственно в длинное волокно через определенные интервалы для создания локальных изменений потерь, интенсивности обратного рассеяния, поляризации, интенсивности свечения и т. д. Например, для создания квазираспределенного датчика температуры в протяженное волокно в некоторых местах включают фрагменты волокна, активированного редкоземельными элементами [4]. В другом варианте в протяженное волокно могут быть включены фрагменты волокна, оболочка которых модифицирована так, что позволяет измерять изменения внешнего показателя преломления через изменения затухающего поля [13]. Этот метод может применяться для измерения множества параметров, таких как температура, утечка жидкостей, или в качестве химического индикатора. Другим примером использования механизма потерь для квазираспределенных измерений различных параметров, таких как сила, давление и смещение, могут служить микроизгибы [29]. В этом случае потери могут быть созданы в любом требуемом месте волокна, если пропустить волокно через подходящее зажимное приспособление, деформирующее его [16]. Такие устройства, основанные на квазираспределенных измерениях, отличаются от распределенных датчиков с волокном в качестве чувствительного элемента только тем, что измеряемая величина в них может быть определена только в конечном количестве позиций, а не непрерывно вдоль всей длины волокна. Однако дополнительным преимуществом такого подхода по сравнению с распределенными измерениями является большая гибкость: чувствительные элементы различной длины и/или активированные различными примесями и/или различными концентрациями примесей могут встраиваться в систему в различных местах, что обеспечит различные диапазоны, уровни чувствительности или разрешения, в зависимости от того, что требуется для данного конкретного приложения.

Наиболее распространенным типом квазираспределенных датчиков являются датчики с использованием волоконных брэгговских решеток [30]. Волоконные решетки являются практически единственным типом сенсорных элементов, которые легко могут быть объединены в массивы путем мультиплексирования по длине волны [2]. Для этого каждый сенсорный элемент записывается со своим уникальным периодом, что позволяет различать их по спектру при анализе и, соответственно, фиксировать показания каждого сенсора отдельно. Количество сенсоров в массиве, в основном, ограничивается спектральной

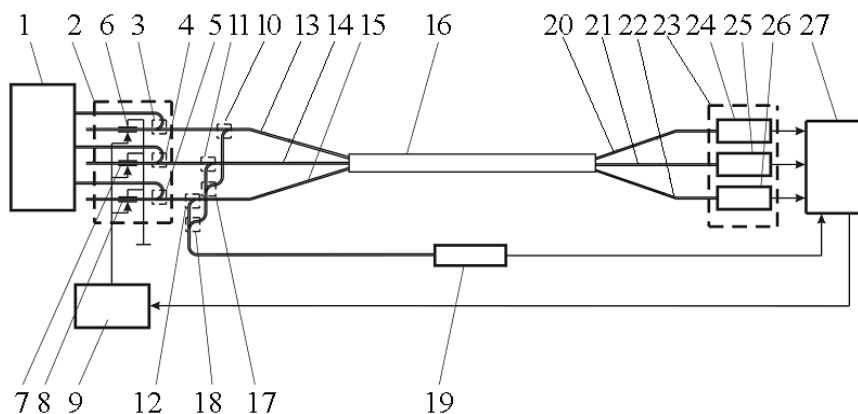
шириной источника, числом каналов по длинам волн и динамическим диапазоном анализатора.

Основным недостатком существующих датчиков является отсутствие возможности определения направления изгиба. Направление изгиба играет важную роль, например, при использовании датчиков для мониторинга состояния ветровых турбин, расположенных вдали от мест обитания человека, особенно на затопляемых приливами участках морского побережья, строительных кранов, мостов, путепроводов. Подобные системы мониторинга позволяют в режиме реального времени передавать данные на длительные расстояния о наиболее важных параметрах.

## **2. Распределенный оптический векторный датчик изгибов и напряжений**

Нами предложен оптический датчик, позволяющий измерять направление, величину и локализацию изгибов и напряжения в строительных конструкциях на основе микроструктурированного волокна с тремя сердцевинами [31]. Устройство состоит из широкополосного источника излучения в виде матрицы светодиодов, подводящих оптических волокон, микроструктурированного волокна с тремя сердцевинами, выводящих оптических волокон, спектрометра, Y-образных разветвителей, волоконно-оптических брэгговских решеток (ВБР), блока управляющего напряжения, блока фотоприемников и измеряющего устройства (рис. 7).

В режиме измерения, по команде измеряющего устройства с блока управляющего напряжения на электроды волоконно-оптических брэгговских решеток подается управляющее напряжение. Под его воздействием происходит изменение показателя преломления в электрооптическом материале, что приводит к изменению длины световой волны, при которой отражение от волоконно-оптических брэгговских решеток максимально. Свет от широкополосного источника излучения одновременно поступает на входы управляемого спектрального фильтра. С выходов Y-образных разветвителей свет поступает на волоконно-оптические брэгговские решетки, которые одновременно отражают излучение с одной и той же длиной волны в обратном направлении. Отраженное излучение, пройдя одновременно Y-образные разветвители, поступает на входы сердцевин микроструктурированного волокна ленточной формы. Изгиб микроструктурированного волокна приводит к перераспределению оптической мощности световых мод между сердцевинами [32,33]. Разность между амплитудами мод в различных сердцевинах возрастает с уменьшением радиуса изгиба, а относительная доля оптической энергии в каждой из трех сердцевины зависит от направления изгиба. Таким образом, сравнивая измеренную мощность в сердцевинах микроструктурированного волокна ленточной формы, можно определить величину радиуса изгиба волокна. Направление изгиба определяется по соотношению амплитуд излучения отдельных диапазонов длин волн в сердцевинах микроструктурированного волокна. Ленточная форма микроструктурированного волокна и размещение его в прозрачном полимерном материале оболочке совместно с контрольной нитью, позволяет располагать его на протяженных поверхностях на больших расстояниях без перекручивания. Контрольная нить расположена с одной стороны прозрачного полимерного материала, что позволяет контролировать укладку волокна одной и той же стороной на поверхности измеряемого объекта. Таким образом, расположение сердцевины микроструктурированного волокна ленточной формы однозначно связано с поверхностью измеряемого объекта, и распределение оптической мощности по сердцевинам однозначно определяет место, направление и величину изгиба. С выходов сердцевины микроструктурированного волокна ленточной формы свет поступает на входы блока фотоприемников, где и регистрируется. Электрические сигналы пропорциональные амплитудам световых мод с выхода блока фотоприемников поступают в измеряющее устройство для определения необходимых параметров.

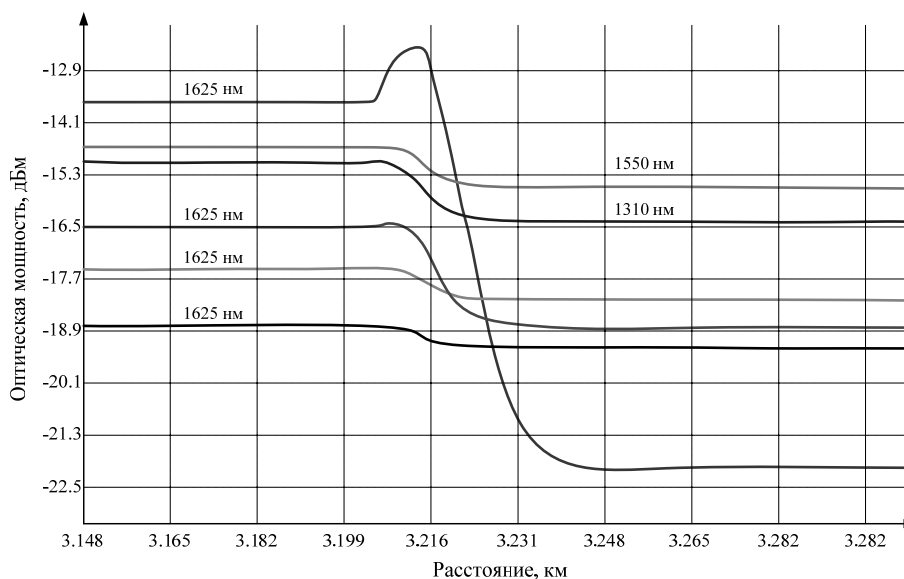


1 – широкополосный источник излучения; 2 – управляемый спектральный фильтр; 3–5, 10–12, 17–18 – Y-образные разветвители; 6–8 – волоконно-оптические брэгговские решетки; 9 – блок управляющего напряжения; 13–15 – входящие оптические волокна; 16 – микроструктурированное волокно (чувствительный элемент); 19 – фотоприемник излучения обратного хода; 20–22 – выводящие оптические волокна; 23 – блок фотоприемников; 24–26 – фотоприемники; 27 – измеряющее устройство

**Рисунок 7 – Структурная схема волоконно-оптического векторного датчика изгибов**

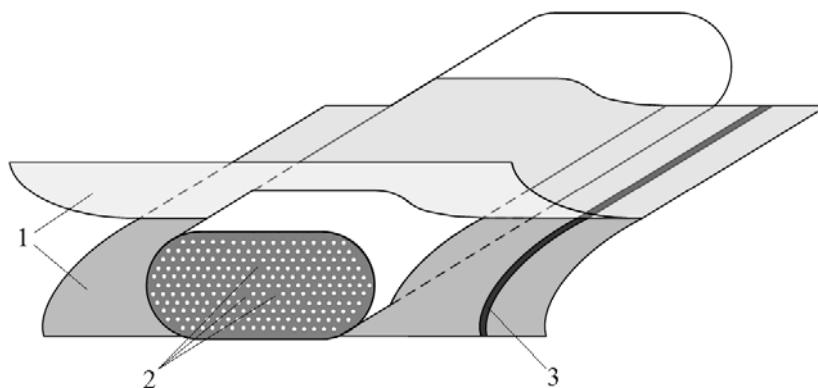
Таким образом, подавая переменное управляющее напряжение на электроды волоконно-оптических брэгговских решеток, можно последовательно сканировать спектр сигнала, приходящего на фотоприемники. Сравнивая выходящие из чувствительного элемента сигналы на разных длинах волн, можно определять направление и величину изгиба с большей точностью.

При распространении оптического излучения по микроструктурированному волокну по всей длине волокна возникает обратное излучение. Световые импульсы обратного хода поступают из микроструктурированного волокна на фотоприемник излучения обратного хода, где регистрируется временная зависимость уровня интенсивности светового потока обратного хода, которая поступает в измеряющее устройство для определения необходимых параметров. Рефлектограмма отраженного от изгиба излучения на разных длинах волн представлена на рис. 8. Как видно из рисунка, месту изгиба волокна соответствует резкое увеличение обратного излучения. Полученная временная зависимость уровня интенсивности светового потока обратного хода позволяет рассчитывать место изгиба.



**Рисунок 8 – Рефлектограмма обратно рассеянного излучения в изогнутом волокне**

Поперечный профиль микроструктурированного волокна ленточной формы представлен на рис. 9. Волокно выполнено в виде оптической структуры с тремя сердцевинами из диэлектрического материала (в частности, плавленного кварца  $\text{SiO}_2$ ), прозрачного для выбранной длины волны излучения, с периодическим набором воздушных отверстий по длине волокна [34]. Дефекты в структуре (отсутствие одного или нескольких отверстий) образуют сердцевинны микроструктурированного волокна, в которых локализуется оптическое излучение, оставшаяся часть периодической структуры образует оболочку. Такие волокна проводят свет на основе двух различных эффектов: эффекта фотонной запрещенной зоны или из-за разности эффективных показателей преломления между областью дефекта, которая формирует сердцевину, и остальной периодической областью, которая действует как оболочка. Расстояние между сердцевинами выбрано одинаковым и равным  $4\div 8$  периодов структуры  $\Lambda$ . Соотношение между диаметром отверстий  $d$  к расстоянию между отверстиями  $\Lambda$  выбрано из условия существования одномодового режима в широком спектральном диапазоне: для плавленного кварца  $d/\Lambda \leq 0,15$ . Расстояние между отверстиями (период структуры)  $\Lambda = 3,2$  мкм. Толщина поперечного профиля микроструктурированного волокна ленточной формы минимум в 2 раза меньше его ширины, а две из трех сердцевины расположены по линии, параллельной его основанию. При изготовлении микроструктурированного волокна ленточной формы производится параллельное размещение его и непрозрачной контрольной нити 3 внутри оболочки, состоящей из двух слоев прозрачного полимерного материала.



1 – свариваемые слои прозрачного полимерного материала; 2 – сердцевинны волокна; 3 – контрольная нить

**Рисунок 9 – Поперечный профиль микроструктурированного волокна ленточной формы**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ типов конструкций волоконно-оптических датчиков контроля состояния инженерных и строительных конструкций. Рассмотрены возможные пути повышения их эффективности. Предложена структура и принципы функционирования распределенного оптического векторного датчика изгибов и напряжений на основе микроструктурированного волокна ленточной формы с тремя сердцевинами. Датчик имеет более высокую точность по сравнению с существующими распределенными датчиками. Это достигается измерением на нескольких длинах волн и последующим усреднением регистрируемого сигнала, что обеспечивается применением в качестве чувствительного элемента микроструктурированного волокна, имеющего широкий спектральный диапазон одномодового режима работы. Использование волокна с тремя сердцевинами дает возможность определения направления деформаций, а измерение обратного рассеяния – определения их локализации по длине волокна.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев, Ю.В. Волоконно-оптические технологии, устройства, датчики и системы / Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, В.Т. Потапов, Ю.К. Чаморовский // «Фотон-экспресс». – 2005. – № 6. – С. 114-127.
2. Гармаш, В.Б. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении / В.Б. Гармаш, Ф.А. Егоров, Л.Н. Коломиец, А.П. Неугодников, В.И. Поспелов // «Фотон-экспресс». – 2005. – № 6. – С. 128-140.
3. Connolly, C. Structural monitoring with fibre optics / C. Connolly // Europhotonics. – 2009. – No. 2-3. – P. 16-18.
4. Inaudi, D. Fiber optic sensors for structural control / D. Inaudi, A. del Grosso // Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering. – October 12-17, 2008. – Beijing, China. – Paper No. S 25-013.
5. Соколов, А.Н. Волоконно-оптические датчики и системы / А.Н. Соколов, В.А. Яцеев // Lightwave Russian Edition. – 2006. – № 4. – С. 44-46.
6. Chen, G. Simultaneous strain and temperature measurements with fiber Bragg grating written in novel Hi-Bi optical fiber / G. Chen, L. Liu, H. Jia, J. Yu, L. Xu, W. Wang // IEEE Photonics Technology Letters. – 2004. – Vol. 16, № 1. – P. 221-223.
7. Sheng, H.-J. A lateral pressure sensor using a fiber Bragg grating / H.-J. Sheng, M.-Y. Fu, T.-C. Chen, W.-F. Liu, S.-S. Bor // IEEE Photonics Technology Letters. – 2004. – Vol. 16, № 4. – P. 1146-1148.
8. Madhav, K.V. Spectrum estimation by wavelength shift time-stamping in a fiber Bragg grating sensor / K.V. Madhav, S. Asokan // IEEE Photonics Technology Letters. – 2004. – Vol. 16, № 5. – P. 1355-1357.
9. Goncharenko, I. Optical fibre sensors for structural monitoring / I. Goncharenko // Proceedings of Humboldt-Kolleg «Philosophy of Science», September 8–11, 2010. – Odessa, Ukraine. – P. 64-66.
10. Hill, K.O. Photosensitivity in optical fibers / K.O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D.C. Johnson // Annual Review of Material Science. – 1993. – Vol. 23. – P. 125-157.
11. Morey, W.W. Photoinduced Bragg gratings in optical fibers / W.W. Morey, G.A. Ball, G. Meltz // Optics & Photonics News. – 1994. – Vol. 5. – P. 8-14.
12. Allsop, T. Spectral characteristics of tapered LPG device as a sensing element for refractive index and temperature / T. Allsop, F. Floreani, K.P. Jdrzejewski, P.V.S. Marques, R. Romero, D.J. Webb, I. Bennion // J. Lightwave Technology. – 2006. – Vol. 24, № 2. – P. 870-878.
13. Удд, Э. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Э. Удд. // Москва: Техносфера, 2008 – 520 с.
14. Glisic, B. Monitoring a subterranean structure with the SOFO® system / B. Glisic, M. Badoux, J.P. Jaccoud, D. Inaudi // Proceedings of the 1st International Conference Long Road and Rail Tunnels. – 2000. – Basel, Switzerland. – P. 127-136.
15. Sumitro, S. Long-gage optical fiber sensors monitoring on deteriorated structure deformational properties / S. Sumitro, Y. Okada, K. Saitoh, S. Takanashi, D. Inaudi // Proceedings of the 1st International conference on structural health monitoring and intelligent infrastructure. – November 13-15, 2003. – Tokyo, Japan. – P. 49-52.
16. Мамедов, А.М. Одноволоконные распределенные волоконно-оптические датчики физических величин и полей / А.М. Мамедов, В.Т. Потапов, Т.В. Потапов, Е.К. Смуреев // «Фотон-экспресс». – 2005. – № 6. – С. 141-151.
17. Farahani, M.A. Spontaneous Raman scattering in optical fibers with modulated probe light for distributed temperature Raman remote sensing / M.A. Farahani, T. Gogolla // J. Lightwave Technology. – 1999. – Vol. 17, № 8. – P. 1379-1391.
18. Park, J. Raman-based distributed temperature sensor with simplex coding and link optimization / J. Park, G. Bolognini, D. Lee, P. Kim, P. Cho, F.D. Pasquale, N. Park // IEEE Photonics Technology Letters. – 2006. – Vol. 18, № 17. – P. 1879-1881.
19. Inaudi, D. Long-range pipeline monitoring by distributed fiber optic sensors / D. Inaudi, B. Glisic // ASME Journal of Pressure Vessel Technology. – 2010. – Vol. 132, № 1. – P. 011701-01 – 011701-09.
20. Bernini, R. Accuracy enhancement in Brillouin distributed fiber-optic temperature sensors using signal processing techniques / R. Bernini, A. Minardo, L. Zeni // IEEE Photonics Technology Letters. – 2004. – Vol. 16, №4. – P. 1143-1145.

21. Dakin, J.P. Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector / J.P. Dakin, D. Pratt, G.W. Bibby // *Electronics Letters*. – 1985. – Vol. 21. – P. 569-570.
22. Hotate, K. Distributed fiber Brillouin strain sensing with 1-cm spatial resolution by correlation-based continuous-wave technique / K. Hotate, M. Tanaka // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2002. – Vol. 14. – P. 179-181.
23. Gogolla, T. Distributed beat length measurement in single-mode optical fibers using stimulated Brillouin-scattering and frequency-domain analysis / T. Gogolla, K. Kribber // *J. Lightwave Technology*. – 2000. – Vol. 18, No. 3. – P. 320-328.
24. Bernini, R. Frequency-domain approach to distributed fiber-optic Brillouin sensing / R. Bernini, L. Grosso, A. Minardo, F. Soldovieri, L. Zeni // *Optics Letters*. – 2002. – Vol. 27, No. 5. – P. 288-290.
25. Rothwell, J.H. Photonic sensing based on variation of propagation properties of photonic crystal fibres / J.H. Rothwell, D.A. Flavin, W.N. MacPherson, J.D.C. Jones, J.C. Knight, P.St.J. Russell // *Optics Express*. – 2006. – Vol. 14, № 25. – P. 12445-12450.
26. Ju, J. Temperature sensitivity of a two-mode photonic crystal fiber interferometric sensor / J. Ju, Z. Wang, W. Jin, M.S. Demokan // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2006. – Vol. 18, № 20. – P. 2168-2170.
27. Ju, J. Two-mode operation in highly birefringent photonic crystal fiber / J. Ju, W. Jin, M.S. Demokan // *IEEE Photon. Technol. Letters*. – 2004. – Vol. 16, No. 11. – P. 2472-2474.
28. Goncharenko, I.A. Analysis of propagation of orthogonally polarized supermode in straight and curved multicore microstructured fibres / I.A. Goncharenko, M. Marciniak // *J. Telecommunications and Information Technology*. – 2007. – No. 4. – P. 63-69.
29. Mickelson, A. Backscatter readout from serial microbending sensors / A. Mickelson, O. Klevhus, M. Eriksrud // *J. Lightwave Technology*. – 1984. – Vol. 2, Issue 5. – P. 700-709.
30. Giles, C.R. Lightwave applications of fiber Bragg gratings / C.R. Giles // *J. Lightwave Technology*. – 1997. – Vol. 15, № 8. – P. 1391-1404.
31. Гончаренко, И.А. Волоконно-оптический векторный датчик изгиба / И.А. Гончаренко, В.Б. Залесский, А.И. Конойко, А.Г. Иваницкий, В.Н. Рябцев // Патент Республики Беларусь на полезную модель № 8715. Заявлено 13.04.2012 г. Опубликовано 31.10.2012 г.
32. Гончаренко, И.А. Излучение и потери на изгибе в микроструктурированных волокнах с несколькими сердцевинами / Гончаренко И.А. // *Вестник Фонда фундаментальных исследований*. – 2006. – № 3. – С. 91-98.
33. Goncharenko, I.A. Analysis of propagation of orthogonally polarized supermode in straight and curved multicore microstructured fibres / I.A. Goncharenko, M. Marciniak // *J. Telecommunications and Information Technology*. – 2007. – No. 4. – P. 63-69.
34. Goncharenko, I. Optimizing the structure of vector bend and strain sensor on the base of three-core microstructured fiber / I. Goncharenko, M. Marciniak, A. Konojko, V. Reabtsev // *J. Telecommunications and Information Technology*. – 2012. – No. 4. – P. 63-69.