

АДРЕСНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ БРЭГГОВСКИЕ РЕШЕТКИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СКОРОСТИ ФРОНТА УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ТРУБОПРОВОДАХ

Е.В. Куликов

ФГБУ «3-й Центральный научно-исследовательский институт»
Министерства обороны Российской Федерации

Российская Федерация, 107564, г. Москва, Погонный проезд, д.10

Аннотация. В статье представлена малосенсорная радиофотонная система на основе адресных волоконных брэгговских структур (АВБС) для обеспечения контроля скорости движения ударной волны в трубопроводе в реальном масштабе времени. Данная система лишена недостатков, обусловленных применением в аналогичных системах дорогостоящих оптико-электронных интеррогаторов и широкополосных прямых детекторов видеоимпульсов, соответствующих кольцевому воздействию ударной волны на деформацию трубы в зоне установки датчика, как правило, волоконной брэгговской решетки (ВБР). Определены рекомендации по выбору метода измерения скорости – базного; конструкции датчика – петлеобразной, как наиболее рациональной с возможностью простой установки; обсуждены преимущества замены ВБР на ВБР с фазовым π -сдвигом или АВБС. Разработана структурная схема системы с измерениями по трем базам. Показано, что при использовании АВБС достигаемая погрешность измерения давления и времени составляет 0,01 %, а по скорости 0,08 м/с. Дополнительно проводится анализ применимости рассмотренных методов и средств для решения задач контроля скорости фронта в условиях шумовой, акустической и температурной нестабильностей, а также контроля давления, создаваемого ударной волной.

Ключевые слова: контроль скорости движения ударной волны в трубопроводе, волоконная брэгговская решетка, адресная волоконная брэгговская структура, трехбазная малосенсорная радиофотонная система, контроль давления в трубопроводе.

Введение

Природоохранные ведомства определяют процесс оценки состояния труб как «сбор данных и информации путем прямого осмотра, наблюдения и исследования, а также косвенного мониторинга и отчетности, а также анализа данных и информации для определения структурного, эксплуатационного и функционального состояния объектов капитальной инфраструктуры» [1]. Существующие методы контроля труб разнообразны и подробно рассмотрены в разных источниках [1-3]. Эти методы можно разделить на прямые и косвенные, при этом методы прямого зондирования включают визуальный осмотр, неразрушающий контроль и отбор проб труб, тогда как косвенные методы основаны на измерении различных параметров потока, распространяющегося в трубах.

Н. Е. Жуковский предложил определять места повреждений в трубопроводе с помощью ударной диаграммы (кривой зависимости давления от времени), записанной при гидравлическом ударе, созданном быстрым закрытием задвижки в конце участка трубы [4, 5]. В литературе данный метод называется методом сканирующих волн (методом ударной диаграммы Жуковского). Вывод о наличии утечки делается в результате сравнения модельного решения и тренда показаний датчика давлений в конце диагностируемого участка нефтепровода. Зная скорость распространения ударной волны в заданном трубопроводе, можно с достоверной точностью определить место повреждения трубопровода.

Основной недостаток метода – возможность обнаружения утечек при микроударах только на участках трубопровода небольшой протяженности – порядка нескольких сотен метров (при малых утечках) или нескольких километров (при больших утечках), что связано с низкой чувствительностью используемых датчиков к величине утечки, и ее большим снижением при последовательной перекачке различных нефтепродуктов. Вторым недостатком является высокая сложность и низкая точность определения скорости движения фронта ударной волны. Последняя проблема выбрана автором как предмет исследования в данной статье.

Таким образом, существует потребность в новых методах контроля, которые могут применяться к различным трубопроводам и могут обнаруживать дефекты с высокой чувствительностью, а скорость движения фронта ударной волны с высокой точностью в течение длительного периода времени. Потенциальными методами, отвечающими этим критериям, являются методы на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР).

ВБР широко используются в различных приложениях гражданского строительства, связанных с мониторингом состояния конструкций [6-8], включая некоторые гидравлические приложения, в основном в нефтегазовой промышленности [9]. Показано, что они в квазираспределенном включении способны обнаруживать небольшие утечки с точностью до 1-2 м в течение 10 с после возникновения течи [10]. Однако работа в сложных шумовых условиях и наличие ложных срабатываний требует применения сенсоров с компенсацией шумов, акустики и температуры. Вопросы измерения скорости фронта ударной волны с применением ВБР больше рассматриваются на примерах контроля износа стволов и скорости выстрела на срезе ствола для артиллерийских систем гражданского и военного назначения [11, 12].

Целью этой статьи является разработка процедур трансфера технологий контроля скорости снаряда на срезе ствола орудия и их преобразования для обеспечения возможности измерения не только скорости фронта, но и самого давления создаваемого ударной волной, а также компенсации температуры, по которым в дальнейшем по известным алгоритмам, может быть определено наличие утечек, либо их отсутствие (последний аспект в статье не рассматривается).

Структура статьи построена следующим образом. В первом разделе определены рекомендации по выбору метода измерения скорости. Во втором разделе речь идет о выборе конструкции датчика – петлеобразной, как наиболее рациональной с возможностью простой установки. В третьем разделе обсуждаются преимущества адресных волоконных брэгговских структур для замены в датчиках давления классических ВБР и структура радиофотонной малосенсорной системы на их основе. В четвертом разделе проводится анализ применимости рассмотренных методов и средств для решения задач контроля значения давления, шумовой, акустической и температурной нестабильностей.

1. Практические рекомендации по выбору метода контроля фронта ударной волны

Системы контроля фронта ударной волны по аналогии с системами контроля скорости выстрела, как правило, построены на основе двух датчиков, непосредственно закрепленных на трубе (стволе), на определенном расстоянии друг от друга, и блока измерения скорости снаряда [13-17].

По импульсам от первого и второго датчиков, вызванных волной кольцевой ударной деформации трубы, блок измерения скорости осуществляет измерения в соответствии с выражением $v_m = L/t$, где L – величина базы, расстояние между датчиками; t – время прохождения фронтом волны этого расстояния.

Использование волоконно-оптических датчиков для измерения скорости фронта позволяет применять эту хорошо протестированную концепцию без каких-либо отмеченных выше недостатков, присущих, например, фольговым тензодатчикам. Однако их широкое применение также ограничено [18-19]. Указанные ограничения с одной стороны определяются необходимостью применения вибрационно-неустойчивых и сверх дорогих оптико-электронных интеррогаторов датчиков на основе перестраиваемых оптических элементов или ПЗС с дифракционными решетками. С другой стороны – необходимостью применения простых волоконно-оптических и оптико-электронных устройств, но с необходимостью пороговой регистрации сверхкоротких видеоимпульсов, вызванных волной кольцевой деформации, что определяет их структуру как амплитудную, широкополосную с малым отношением сигнал/шум [13-15].

В связи с этим автором предложено использовать концепцию построения радиофотонных систем на основе адресных волоконных брэгговских структур (АВБС), лишенных указанных недостатков, в том числе с заменой амплитудных методов регистрации на частотные, что обеспечивается использованием радиофотонных интеррогаторов [20-23].

2. Практические рекомендации по выбору конфигурации оптоволоконна на трубе и конструкции датчика контроля фронта ударной волны

Существует множество подходов к установке оптоволоконных датчиков на трубопровод. Однако три конфигурации, показанные на рис. 1, представляются наиболее распространенными.

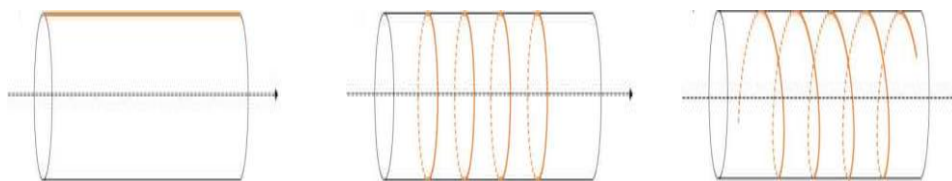


Рис. 1. Осевое, петлевое и спиральное расположение сенсорного оптоволоконна

Первая конфигурация – аксиальная, когда датчики в волокне устанавливаются на поверхность трубы вдоль главной оси трубы. Для этой конфигурации чаще используется внешняя поверхность трубы, но в некоторых исследованиях использовалась и внутренняя поверхность. Эта конфигурация является наиболее распространенной для приложений мониторинга состояния трубопровода. На рис. 1, слева показан оптоволоконный датчик, установленный вдоль венца трубы, но возможно и альтернативное расположение, например, сбоку или внизу трубы. Осевая геометрия датчика удобна при контроле состояния длинного трубопровода.

Вторая конфигурация является спиральной и показана на рис. 1, справа. Этот подход аналогичен описанному ранее, но вместо осевого расположения волокна оптическое волокно изгибается вокруг трубы по спирали.

Третьей популярной конфигурацией оптоволоконного датчика является кольцо или петля, показанная на рис. 1, в центре. В этой конфигурации оптическое волокно изгибается вокруг внешней поверхности трубы, образуя замкнутые петли. Этот метод часто используется для контроля внутреннего давления в трубах под давлением и является распространенным инструментом для обнаружения утечек и контроля фронта акустических и других волн, в том числе и ударных.

Следует отметить, что в дополнение к описанным выше трем конфигурациям в исследованиях используются и датчики с другой геометрией. Однако, поскольку эти геометрические формы уникальны, их детали описываются вместе с конкретикой задач, в которых они использовались.

Рассмотрим петлевую установку оптоволокну с датчиками (рис. 2) [24].

Волокно с ВБР заключено в защитную трубку, которая, в свою очередь, плотно прилегает к контролируемой трубе.

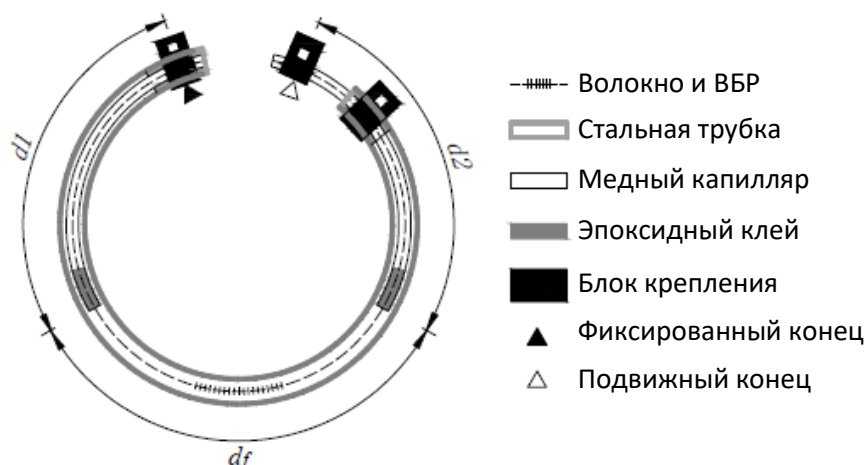


Рис. 2. Форма типового волоконно-оптического датчика в виде петли [24]

Для развития приведенной структуры можно сказать, что по петле может быть установлено не один, а несколько датчиков на ВБР.

3. Адресные волоконные брэгговские структуры и радиифотонная малосенсорная система для контроля фронта ударной волны

3.1. Прототип системы.

Основная задача процесса проектирования заключалась в создании системы минимальной сложности и стоимости, которая отвечала бы требованиям, описанным выше. Для достижения этой цели конструкция-прототип обладает двумя существенными функциями: мультиплексированием двух узкополосных ВБР и демодуляцией схемы с использованием широкополосного режекторного фильтра на основе ВБР. При этом две ВБР должны по ширине спектра практически полностью закрывать по площади окно режекторного фильтра. Мультиплексирование ВБР и фильтра в единое волокно приводит к одноканальной системе, в которой ВБР интегрированы независимо, тем самым уменьшая потребность в двух каналах демодуляции датчика – оптическом и электронном. Использование узкополосного режекторного фильтра на основе ВБР дает очень простую конфигурацию, в которой резкий нарастающий фронт ударной волны может быть обнаружен на остром пике выходного сигнала интенсивности света [13-15].

Спектр режекторного фильтра показан на рис. 3 и используется следующим образом. Во-первых, рассмотрим случай, когда нет деформации на любом из датчиков. Свет от источника проходит через разветвитель, и часть его отражается от каждой из брэгговских решеток. Спектры интенсивности отражений показаны также на рис. 3. Два пика на слегка различных длинах волн характеризуют спектры, по одному для каждого из датчиков. Затем отраженный свет проходит через режекторный фильтр и попадает в фотодетектор (ФД). Фотодетектор на выходе выдает сигнал тока, который линейно пропорционален оптической

мощности, получаемой им. Таким образом, две ВБР блокируют передачу оптической мощности на своих длинах волн. Поэтому ни один световой сигнал не достигает фотодетектора, и на выходе мы имеем его уровень в состоянии покоя.

Когда распространение фронта ударной деформации достигает датчика на базе первой решетки, он подвергается растягивающей деформации, увеличивающей λ_B . По мере того, как λ_B увеличивается и спектр решетки выходит за пределы режекторного фильтра световой сигнал передается через режекторный фильтр и попадает в фотодетектор. Этот эффект показан на рис. 4.

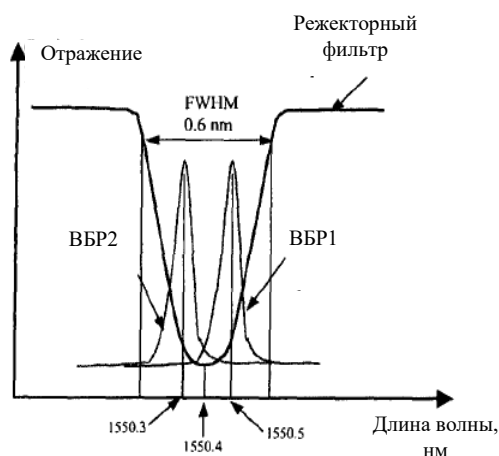


Рис. 3. Датчик состояние покоя

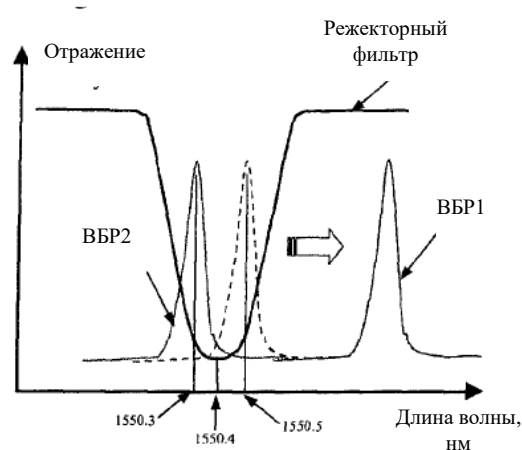


Рис. 4. Выход первой ВБР

Из-за крутых наклонов кривой спектра пропускания режекторного фильтра и спектра отражения решетки Брэгга даже небольшое смещение λ_B приводит к значительному изменению сигнала света, достигающего фотодетектора. Поэтому, когда распространение ударной деформации достигает первой решетки, в выходном сигнале тока фотодетектора наблюдается резкое смещение. По мере того как распространение кольцевой деформации от ударной волны достигает датчика на базе второй решетки, он также испытывает увеличение λ_B и возникает еще одна ступень увеличения мощности света, достигающего фотодетектора. Этот эффект показан на рис. 5. Кривая временного отклика, ожидаемая от сенсорной системы по мере того, как распространение кольцевой деформации трубы проходит оба датчика, показана на рис. 6.

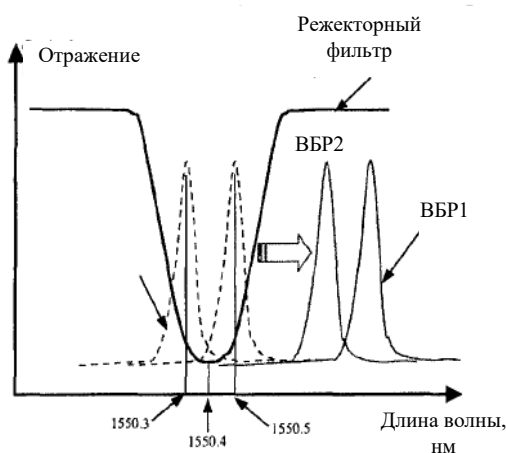


Рис. 5. Выход второй ВБР

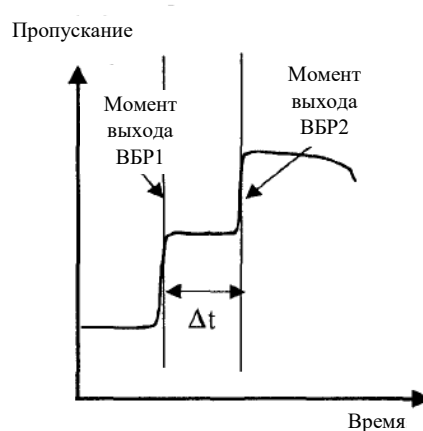


Рис. 6. Оптическая мощность на входе ФД

Развитие новой концепции АВБС и создание на основе указанных брэгговских структур принципиально новых измерительных систем требует решения ряда существенных вопросов в приложении нашей задачи. АВБС уже завоевали популярность для решения малосенсорных задач с 1-3 датчиками. Решение многосенсорных задач с их помощью анонсировано, проиллюстрировано [20-23], но пока не вышло за рамки лабораторных исследований.

В данной работе мы строим малосенсорный канал из трех плеч на двух АВБС, которые будут дополнены режекторным и другими фильтрами, компенсаторами температуры, которые также используют технологии ВБР и АВБС.

3.2. Замена ВБР на ВБР с фазовым π -сдвигом и АВБС.

Общая концепция замены ВБР на ВБР с фазовым π -сдвигом и АВБС заключается в изменении принципа амплитудной регистрации скачков выходного тока ФД, соответствующего потоку света, показанного на рис. 6, на частотный и перенос регистрации сигнала в область минимальных шумов фотоприемника с повышением точности определения момента выхода решетки из зоны режекторного фильтра по одному-двум периодам разностной частоты, формируемой окнами прозрачности нового типа решеток.

Замена ВБР на ВБР с фазовым π -сдвигом приведет к тому, что в состоянии покоя (рис. 6) на выходе ФД – первая ступень будет формироваться не постоянным током, а разностной частотой, определяемой частотным разномом между окнами прозрачности двух разных ВБР с фазовым π -сдвигом. При достижении фронтом первой решетки колебание пропадает. При этом передний фронт начала счета времени определяется в области минимальных шумов ФД с выигрышем по отношению сигнал/шум до 3-7 раз и соответствующим повышением точности.

Замена ВБР на АВБС приведет к тому, что в состоянии покоя (рис. 6) на выходе ФД – первая ступень будет определяться не постоянным током, а двумя разностными частотами, определяемыми разными адресными частотами АВБС. При достижении фронтом первой решетки одно из колебаний пропадает и в дальнейшем средняя ступень (рис. 6) формируется адресной частотой второй АВБС. При выходе второй решетки из окна режекторного фильтра колебание второй решетки также пропадает. При этом передний и задний фронты начала и конца счета времени определяются в области минимальных шумов фотоприемника с выигрышем по отношению сигнал/шум до 3-7 раз и соответствующим повышением точности в два раза больше, чем в случае замены ВБР на ВБР с фазовым π -сдвигом.

Вариантов выбора АВБС и их адресных частот множество, но рассмотрение каждого из них не входит в предмет рассмотрения статьи.

3.3. Требования к системе.

Требования к проектированию системы включали: максимальную скорость ударной волны более 800 м/с; погрешность измерения скорости менее 0,1% от максимальной скорости 1400 м/с; устойчивость к ударным, температурным и вибрационным нагрузкам.

В дополнение к этим требованиям ожидаемые уровни деформаций и интенсивность деформаций, создаваемые во время распространения ударной волны, важны для проектирования волоконно-оптической системы. Исходя из результатов реальных испытаний, максимальные уровни деформаций в предполагаемых местах расположения датчиков для некоторых трубопроводов оцениваются как 1000 $\mu\epsilon$ при скорости деформации до 500 $\mu\epsilon/\mu\text{с}$.

Следовательно, требование по разрешающей способности измерения деформации для системы, с тем чтобы соответствовать 0,1% погрешности измерения скорости, как указано выше, было установлено равным 1 $\mu\epsilon$.

В процессе проектирования были оценены несколько системных конфигураций для достижения приемлемой конструкции системы, которая должна крепиться к трубе. Оптимально конструкция состоит из: двух АВБС; ВБР режекторного фильтра и фильтра с наклонной характеристикой для измерения температуры и изменений давления, меньше давления ударного фронта; узкополосного лазерного источника, обеспечивающего диапазон засветки АВБС и фильтра, и учитывающего также максимальноехождение температуры в зоне эксплуатации трубопровода. Конструкция может быть выполнена и на волноводных решетках, и в интегральном исполнении.

Преимущества такой конструкции – отсутствие необходимости использования спектрального оптико-электронного интеррогатора, который не приспособлен к работе в полевых условиях, и пороговых устройств регистрации видеоимпульсов, требующих широкополосной обработки видеосигналов в радиодиапазоне.

ВБР режекторного фильтра и ширина полосы излучения лазерного диода с учетом диапазона возможных уходов температуры и импульса волны давления должны составлять 4-6 нм. В отличие от прототипа скорость изменения деформации будет отслеживаться методом контроля коэффициента модуляции огибающей биений [20-23] на разностной частоте каждой АВБС. При этом изменение в 0,5 нм/мкс не оказывает влияния на разностную частоту, которая постоянна, а, следовательно, не требует широкополосного приемника с необходимостью контроля постоянного тока.

3.4. Структурная схема системы.

На рис. 7 приведена оптико-электронная схема системы контроля скорости распространения фронта ударной волны в трубопроводе (СКСФ), включающая в себя внешний модуль и натрубную часть зондов с датчиками.

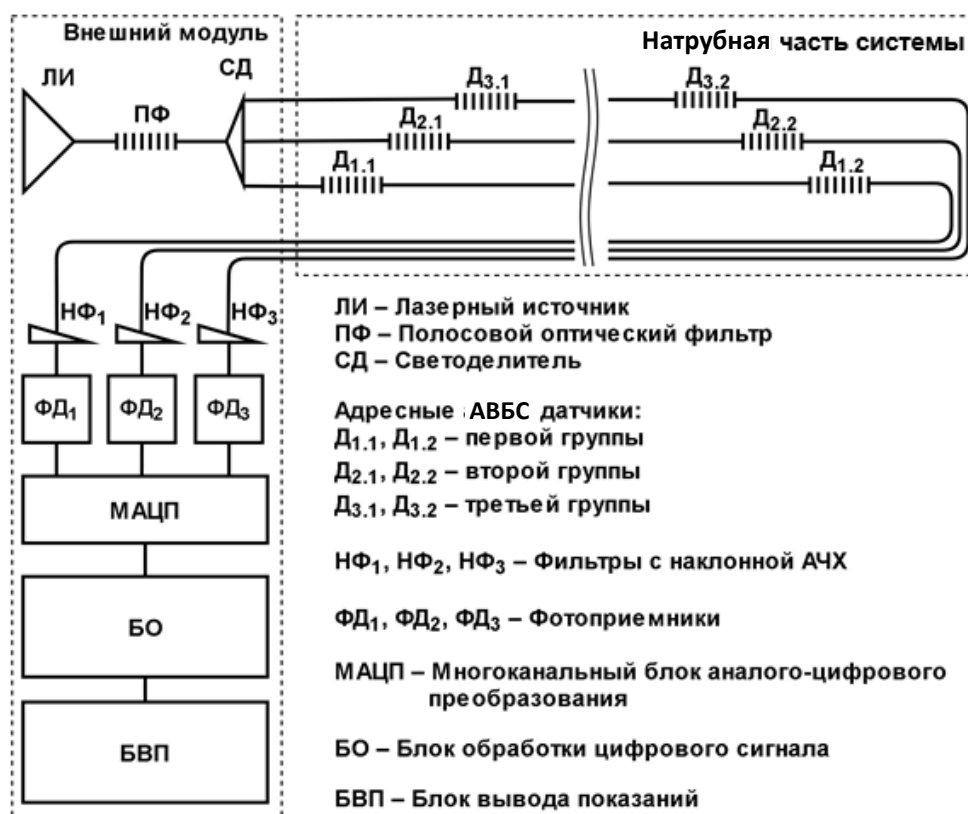


Рис. 7. Оптико-электронная схема системы контроля фронта ударной волны

Датчики разделены на три группы по месту их расположения на различных направляющих трубы и с различными базами измерений L_1 , L_2 и L_3 . Известно, что многобазовые измерения позволяют повысить итоговую точность определения СКФС.

Определим диапазон изменения центральной длины волны датчика, вызванного прохождением фронта, в 1 нм, получим, что требуемая разрешающая способность определения центральной длины волны составит 1 пм или 120 МГц. Это свидетельствует о том, что адресная частота АВБС должна быть на порядок выше указанной величины, т.е. более 1,2 ГГц, и является вполне достижимой величиной для решеток, используемых в радиофотонных методах измерений. При этом центральная длина волны всех АВБС может быть одинакова, а ширина окон прозрачности, сформированных в зонах π -сдвигов, не превышает 60 МГц. Широкополосное излучение от лазерного источника (ЛИ), рис. 7, проходя через полосовой фильтр ПФ, формирует излучение, эквивалентное частотным диапазонам смещения центральных частот, входящих в измерительную систему АВБС датчиков. Сформированное излучение делится СД на три оптических канала, в каждом из которых располагаются по две АВБС, формирующие базу измерений. На выходе каждой АВБС образуются два излучения с равными амплитудами после прохождения окон прозрачности датчиков.

Далее лазерное излучение проходит через фильтр с наклонной АЧХ, который асимметрично меняет амплитуды частотных компонент, формирующих адресные частоты в зависимости от приложенного воздействия ударной деформации ствола при прохождении снаряда, после чего принимается на фотоприемнике. Электрический сигнал с каждого фотоприемника независимо оцифровывается на многоканальном АЦП (МАЦП) и поступает в блок обработки, где осуществляется фильтрация сигналов в каждом канале на известных адресных частотах АВБС. После фильтрации сигнала на адресных частотах в режиме реального времени производится определение центральных частот АВБС датчиков согласно методике измерительного преобразования по коэффициенту модуляции их огибающей биений, и вычисление показаний деформаций с выводом данных на монитор исследователя СКФС.

Центральные и адресные частоты АВБС датчиков в каждом оптическом канале подбираются таким образом, чтобы, во-первых, исключить совпадение адресных частот, во-вторых, исключить пересечение спектров АВБС, так, чтобы их можно было включать последовательно вдоль одного участка волокна и одновременно избежать возникновения после фотоприемника частот, совпадающих с адресными. Поскольку прием, обработка и анализ данных в каждом оптическом канале производится независимо, адресные и центральные частоты АВБС в каждом из оптических каналов могут быть выбраны одинаковыми, чтобы унифицировать элементную базу. То есть, можно допустить, а еще лучше потребовать, совпадения центральных длин волн у всех датчиков, или первой адресной частоты у множества датчиков $D_{1.1}$, $D_{2.1}$, $D_{3.1}$ или второй адресной частоты у множества датчиков $D_{1.2}$, $D_{2.2}$, $D_{3.2}$.

В исходном состоянии при одинаковых центральных длинах волн и температуре для каждого из датчиков запоминается его коэффициент модуляции огибающей биений адресных частот. При прохождении фронта происходит смещение центральной длины волны одной из решеток на 0,6-1 нм по очереди $D_{1.1}$, $D_{2.1}$, $D_{3.1}$ и далее $D_{3.2}$, $D_{2.2}$, $D_{1.2}$. Таким образом, учитывая скорость изменения деформации в 0,5 нм/мкс, выбор баз измерений L_1 , L_2 и L_3 должен разрешать регистрацию каждого сдвига центральных длин волн.

Для каждой из двух АВБР, входящей в один оптический канал, может быть использован как собственный фильтр с наклонной АЧХ, так и один общий фильтр с наклонной АЧХ. Также в качестве фильтра с наклонной АЧХ можно использовать специальным образом синтезированную ВБР, каждый из склонов которой будет использован в качестве

наклонных фильтров отдельно для контроля рабочих температур трубопровода. Как указывалось, предельная температура трубопровода, при которой проходят измерения, определена условиями его эксплуатации.

На рис. 8,а представлена синтезированная АЧХ НФ, которая обеспечивает прием на фотодетекторе светового потока, спектр которого представляет собой четырехчастотное излучение, приведенное на рис. 8,б. В этом случае фаза огибающей биений адресных частот для АВБР₁ будет иметь альтернативный знак фазе огибающей биений адресных частот для АВБР₂. При рабочих температурах фазы огибающих будут иметь один знак, т.е. располагаться на одном склоне.

Точка перегиба фильтра с наклонной АЧХ определяет положение центральных длин волн всех датчиков, на которое они сместятся от исходного положения при достижении максимальной рабочей температуры. Заметим, что дополнительно контролируемые функции наклонного фильтра могут быть обеспечены и АЧХ ПФ, входящего в измерительную систему. Для этого может быть использована специальным образом структурированная классическая или chirпированная ВБР [25-26].

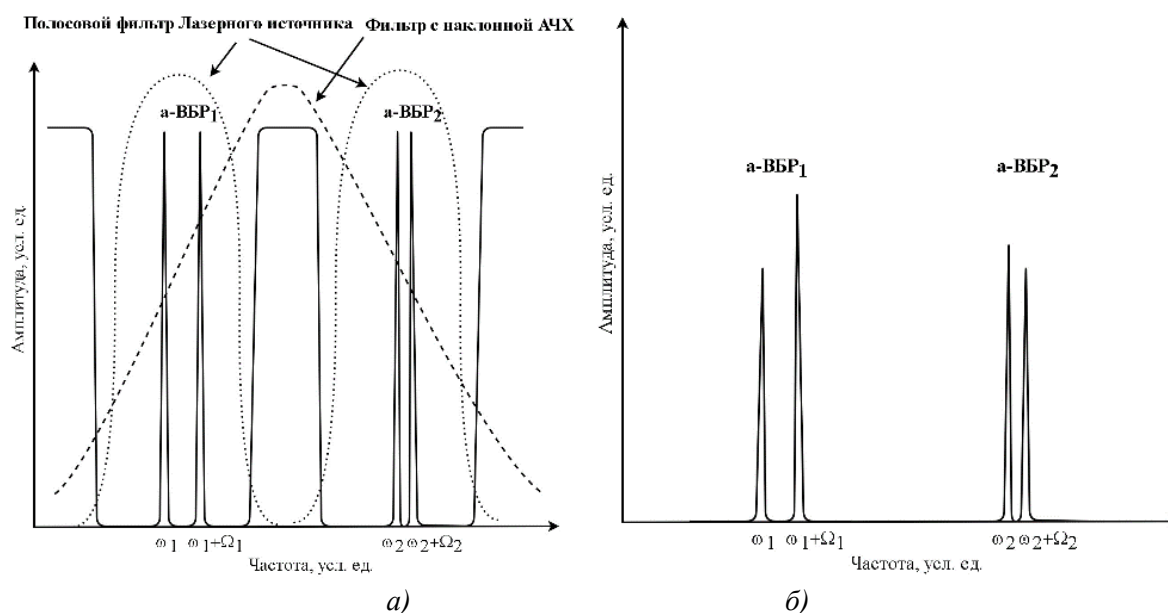


Рис. 8. – Спектральная картина прохождения широкополосного лазерного излучения через две АВБС, фильтр с наклонной АЧХ и полосовой входной фильтр с зоной контроля критической температуры трубопровода

Требование унификации параметров датчиков в каждом из трех оптических каналов, автоматически ведет к тому, что и фильтры с наклонной АЧХ (НФ₁, НФ₂ и НФ₃, рис. 7) должны быть одинаковы. Что не только упрощает требования к их созданию, но и упрощает задачу их температурной стабилизации. Кроме того, считается, что температура трубопровода одинакова в зоне установки датчиков, т.е. на участке с длиной, равной самой большой измерительной базе.

Выполнение требования исключения совпадения перекрестных частот адресным частотам АВБР обеспечивается выбегом центральных длин волн на величину до 1 нм. Это гарантирует и то, что расстояние между ними всегда будет больше любой из адресных частот АВБР, входящих в оптический измерительный канал.

Отметим, что в данной системе организована возможность не использовать режекторный фильтр для блокировки выбега ВБР. Полосовой режекторный фильтр используется во всем диапазоне для прямого контроля давления в трубопроводе, как показано на рис. 8.

4. Анализ преимуществ разработанной системы

Очевидно, что преимуществом данной системы является возможность измерения различных физических величин, оценки которых получают путем прямого преобразования изменения величины центральной длины волны АВБС. Данный аппарат используется и для термостабилизации системы, и для термокомпенсации ее элементов. Аппарат данных измерений хорошо разработан и представлен в [20-23].

Дополнительно следует отметить, что использование волоконно-оптических технологий позволяет производить одновременно три измерения на 1 измерение. Можно предположить и увеличение числа измерительных каналов. Тогда ССВС можно определить как

$$v_m = \sum_{i=1}^N v_{mi} / N$$
, где $v_{mi} = L_i / t$, что позволит получать усредненные измерения и повысить их точность.

Замена ВБР на АВБС приведет к тому, что передний и задний фронты начала и конца счета времени определяются в области минимальных шумов фотоприемника с выигрышем по отношению сигнал/шум до 3-7 раз и соответствующим повышением точности до 6-14 раз и в два раза больше, чем в случае замены ВБР на ВБР с фазовым π -сдвигом.

Датчики ВБР все чаще используются в исследованиях трубопроводов [1-2]. В дополнение к преимуществам, которыми обладают любые волоконно-оптические датчики, ВБР имеют разумную стоимость на канал, хорошую линейность, возможность мультиплексирования длины волны и возможности самокалибровки, которые предлагают абсолютный метод измерения. Однако здесь следует отметить, что существует верхний предел количества ВБР на канал, который зависит от метода опроса, что может быть недостатком при удаленном мониторинге трубопроводов. Зарегистрированное максимальное количество ВБР составляет от 20 до 100 решеток на канал в зависимости от технологии, но недавно было подсчитано, что это число может быть увеличено до 192 решеток [27]. Для АВБС решеток указывается 256 датчиков [26]. Обычно верхний предел количества волоконных решеток Брэгга зависит от блока опроса, и при использовании минимального спектрального интервала между последовательными решетками можно использовать всю доступную полосу пропускания, увеличивая количество точек измерения. В [27] авторы воздерживаются от определения максимального количества решеток как фиксированного числа, а вместо этого определяют его как функцию ширины профиля источника и рабочей ширины полосы для каждой решетки. В случае замены на АВБС полоса является самой узкой.

В ряде проведенных вычислительных экспериментов, абсолютная погрешность определения положения центральных частот спектральных компонент АВБС составляет не более 10-15 МГц, что соответствует величине ошибки определения брэгговской длины волны в диапазоне 0,1 пм, что свидетельствует об очень высокой точности измерений для таких систем.

Сама система является радиофотонной и не требует сложного, дорогостоящего интеррогатора с низкой скоростью опроса. Скорость регистрации спектрограммы на выходе фотоприемника определяется быстродействием АЦП, которая при современных технологиях лежит в диапазоне 100 МГц (десятки наносекунд).

Таким образом, сформированный массив АВБС позволяет измерять давление, скорость фронта распространения ударной волны в диапазоне хождения температур, определяемым условиями окружающей среды; отказаться от волнового мультиплексирования, из чего следует существенное снижение практически в шесть раз полосы излучения лазера и возможности обеспечения равномерного по мощности излучения; снизить стоимость лазерного источника. Определенное усложнение системы в этом случае может быть обосновано сложностью изготовления АВБС, но это вопрос времени и развития технологий их записи.

Заключение

Разработана малосенсорная радиофотонная система на основе АВБС для обеспечения контроля скорости распространения фронта ударной волны в реальном времени. Данная система лишена недостатков, обусловленных применением в аналогичных системах дорогостоящих оптико-электронных интеррогаторов и широкополосных прямых детекторов видеоимпульсов, соответствующих кольцевой деформации трубы, возникающей в процессе распространения ударной волны.

Представлена структурная схема трехканальной системы, синтезированная в процессе макетных экспериментальных исследований. Преимуществом данной системы является возможность измерения различных физических величин, оценки которых получают путем прямого преобразования изменения величины центральной длины волны АВБР. Данная система используется как для измерения скорости фронта ударной волны, так и параметров кольцевой деформации трубы при измерении давления, а также для термостабилизации системы в целом и термокомпенсации ее отдельных элементов. Дополнительным преимуществом является возможность проведения нескольких параллельных измерений и получение усредненных данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РФ по программе Приоритет-2030.

Список литературы

1. Liu, Z. State of the Art Review of Inspection Technologies for Condition Assessment of Water Pipes / Z. Liu, Y. Kleiner // Measurement. – 2013. – V. 46. – P. 1-15.
2. Rizzo, P. Water and Wastewater Pipe Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: A Review / P. Rizzo // Advances in Civil Engineering. – 2010. - Article ID 818597.
3. Yu, Y. Acoustic and ultrasonic techniques for defect detection and condition monitoring in water and sewerage pipes: A review / Y. Yu, A. Safari, X. Niu, B. Drinkwater, K.V. Horoshenkov // Applied Acoustic. – 2021. – 183. - 108282.
4. Кутуков С. Е. Проблема повышения чувствительности, надежности и быстродействия систем обнаружения утечек в трубопроводах / С. Е. Кутуков // Нефтегаз. дело. - 2004. - Т. 2. - С. 29-45.
5. Гольянов А. А. Анализ методов обнаружения утечек на нефтепроводах / А.А. Гольянов // Транспорт и хранение нефтепродуктов. - 2002. - № 10. - С. 5-14.
6. Li, H.N.; Li, D.S.; Song, G.B. Recent Applications of Fiber Optic Sensors to Health Monitoring in Civil Engineering / H.N. Li, D.S. Li, G.B. Song // Engineering Structures. - 2004, 26. - 1647-1657. DOI: 10.1016/j.engstruct.2004.05.018.
7. Ferdinand, P. The Evolution of Optical Fiber Sensors Technologies During the 35 Last Years and Their Applications in Structure Health Monitoring. In Proceedings of the 7th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM), Nantes, France, 8-11 July 2014; P. 914-929.

8. Lu, P. Distributed Optical Fiber Sensing: Review and Perspective / P. Lu, N. Lalam, M. Badar, B. Liu, et al. // *Applied Physical Review*. – 2019. – 6. – 041302.
9. Baldwin, C.S. Brief History of Fiber Optic Sensing in the Oil Field Industry. In *SPIE Sensing Technology + Applications* / Du, H.H., Pickrell, G., Udd, E., Baldwin, C.S., Benterou, J.J., Wang, A., Eds. // International Society for Optics and Photonics: Bellingham, WA, USA. – 2014. – P. 909803.
10. Tanimola, F. Distributed Fibre Optic Sensors for Pipeline Protection / F. Tanimola, D. Hill // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2009. – 1. – 134-143.
11. Сахабутдинов А.Ж. Система контроля скорости снаряда на выходе ствола с использованием многоадресных волоконных брэгговских решеток / А.Ж. Сахабутдинов, Р.Ш. Мисбахов, Е.В. Куликов и др. // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. – 2020. – № 2 (46). – С. 55-69.
12. Куликов Е.В. Система для оценок износа ствола по данным изменения его деформаций с использованием адресных волоконных брэгговских решеток / Е.В. Куликов, А.Ж. Сахабутдинов, К.А. Липатников и др. // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. – 2020. – № 1 (45). – С. 78-89.
13. LaVigna C. Performance enhancement and health monitoring of a medium caliber gun system using optical fiber Bragg grating sensors / C. LaVigna, J. Bowlus, H. Kwatny et al. // *10th U.S. Army Gun Dynamics Symposium Proceedings*. ADP012481. – P. 406-417.
14. Bin Wu. Strain-based health monitoring and remaining life prediction of large caliber gun barrel / Bin Wu, Bang-jun Liu, Jing Zheng et al. // *Measurement*. – 2018. – Vol. 122. – P. 297-311.
15. Underwood J.H. Critical fracture processes in army cannons: A review / J.H. Underwood, E. Troiano // *Journal of Pressure Vessel Technology*. – 2003. – Vol. 125. – P. 287-292.
16. Хайков В.Л. Развитие методов инструментального контроля и визуализации состояния каналов стволов артиллерийских орудий / В.Л. Хайков // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2013. – Т. 3. – № 7(63). – С. 52-56.
17. Вытришко Ф.М., Ашурков П.А., Ефанов В.В. Устройство для определения износа канала ствола артиллерийского оружия // Патент РФ 2494368. G01N3/56. Оpubл. 27.09.2013.
18. Муслимов Э.Р. Спектрографы с высокой дисперсией для радиофотонных сенсорных систем / Э.Р. Муслимов, И.И. Нуреев, О.Г. Морозов и др. // *Фотон-экспресс*. – 2019. – № 6 (158). – С. 318-319.
19. Muslimov E. Spectrographs with high angular dispersion: design and optimization approach / E. Muslimov, I. Nureev, O. Morozov et al. // *Optical Engineering*. – 2018. – Vol. 57. – № 12. – P. 125104.
20. Мисбахов Р. Ш. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей / Р. Ш. Мисбахов, Р. Ш. Мисбахов, О.Г. Морозов и др. // *Инженерный вестник Дона*. – 2017. – № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4343.
21. Морозов О.Г. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределенных радиофотонных сенсорных системах / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов // *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43. – № 4. – С. 535-543.
22. Аглиуллин Т.А. Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах / Т.А. Аглиуллин, В.И. Анфиногентов, Р.Ш. Мисбахов и др. // *Труды учебных заведений связи*. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 6–13.
23. Morozov O. Multi-Addressed Fiber Bragg Structures for Microwave-Photonic Sensor Systems / O. Morozov, A. Sakhabutdinov, V. Anfinogentov et al. // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20. – P. 2693.

24. Prisutova, J. Use of fibre-optic sensors for pipe condition and hydraulics measurements: a review / J. Prisutova, A. Krynkin, S. Tait, et al. // Civil Engineering. - 3 (1). - P. 85-113.

25. Сахабутдинов А.Ж. Иерархический классификатор задач построения радиофотонных сенсорных систем на основе адресных волоконных брэгговских структур / А.Ж. Сахабутдинов // Инженерный вестник Дона. - 2018. - № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5141.

26. Сахабутдинов А.Ж. Адресные волоконные брэгговские структуры на основе двух идентичных сверхузкополосных решеток / А.Ж. Сахабутдинов // Инженерный вестник Дона. - 2018. - № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5142.

27. Кувшинов Н.Е. Кзираспределенная волоконно-оптическая сенсорная сеть для контроля распределения интенсивности ЭМП и температуры в закрытой рабочей СВЧ-камере модернизированным калориметрическим методом / Н.Е. Кувшинов, Р.Ш. Мисбахов, Р.Ш. Мисбахов и др. // Электроника, фотоника и киберфизические системы. - 2022. - Т. 2. - № 2. - С. 56-81.

TO CONTROL THE SHOCK WAVE FRONT VELOCITY IN PIPELINES

E.V. Kulikov

FSBI "3rd Central Research Institute" Ministry of Defense
of the Russian Federation

Russian Federation, 107564, Moscow, Pogonny proezd, 10

Annotation. The article presents a low-sensor radio-photon system based on addressable fiber Bragg structures (AFBS) for real-time control of the shock wave velocity in a pipeline. This system is devoid of disadvantages caused by the use in similar systems of expensive optoelectronic interrogators and broadband direct video pulse detectors corresponding to the annular effect of a shock wave on the pipe deformation in the sensor installation area, as a rule, a fiber Bragg grating (FBG). Recommendations for choosing the method of measuring the speed - the base one, the design of the sensor - loop-shaped, as the most rational with the possibility of simple installation, are determined, the advantages of replacing the FBG with the FBG with a phase π -shift or AFBS are discussed. A block diagram of the system with measurements on three bases has been developed. It is shown that when using AGBS, the achieved error in measuring pressure and time is 0.01%, and in terms of velocity 0.08 m/s. Additionally, an analysis is made of the applicability of the considered methods and means for solving the problems of front speed control under conditions of noise, acoustic and temperature instabilities, as well as control of pressure generated by a shock wave.

Keywords: shock wave speed control in a pipeline, fiber Bragg grating, addressable fiber Bragg structure, three-base low-sensor radiophotonic system, pressure control in a pipeline.

Статья поступила в редакцию 30.03.2023