

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ РАСХОДОМЕРЫ НА ДВУХ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТКАХ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ

А.А. Потанин

АО «Казанское приборостроительное конструкторское бюро»
Российская Федерация, 420061, г. Казань, Сибирский тракт, 1

Аннотация: В работе проанализированы структуры и характеристики типовых и нетиповых расходомеров жидкостей, основанные на измерении дифференциального давления волоконными брэгговскими решетками и обработке информации оптико-электронными спектральными методами. Дана постановка задач определения направления и расхода потока с помощью радиофотонных подходов, как один из вариантов развития расходомеров. Рассмотрена универсальная математическая модель для радиофотонного решения задач определения расхода и направления потока, определены требования к выбору их элементной базы, отличной от классических ВБР. Обсуждены возможности применения как датчиков расходомеров ВБР с фазовым π -сдвигом и адресных волоконных брэгговских структур, которые на первый взгляд могли бы улучшить метрологические характеристики, но широко для этого не применяются. В заключении обсуждены полученные результаты и определены пути развития и совершенствования волоконно-оптических расходомеров.

Ключевые слова: расходомерия жидкостей; волоконно-оптический расходомер; волоконная брэгговская решетка; дифференциальный метод измерений; радиофотоника; волоконная брэгговская решетка с фазовым сдвигом; адресные волоконные брэгговские структуры; обработка в радиодиапазоне полученной в оптическом диапазоне информации о расходе и направлении потока жидкости.

Введение

Во многих приложениях, таких как скважинные нефтяные и наземные трубопроводные системы в газовой и нефтяной промышленности, системы канализации и водоснабжения в системах городской инфраструктуры мониторинг расхода жидкости на месте с помощью инновационных технологий высокой точности, надежности, экономичности и простоты установки и эксплуатации высоко востребован [1]. Однако в большинстве из этих приложений, реализуемых в условиях высоких электромагнитных помех, температуры, давления и вибраций или наличия коррозионных веществ традиционные электрические расходомеры не подходят. Волоконно-оптические сенсорные системы превзошли традиционные аналоги своими уникальными преимуществами, такими как невосприимчивость к электромагнитным помехам, компактностью размеров, потенциально низкой стоимостью чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков (ВОД) и возможностью распределенного измерения на больших расстояниях [2], в том числе при работе в агрессивных средах.

ВОД прошлых поколений можно разделить на три категории: ВОД потока на основе вихреобразования, лазерные доплеровские измерители скорости и интерферометрические волоконные датчики потока с модуляцией низкокогерентного или спекл-спектра [3]. Ни один из указанных датчиков не может дополнительно измерять направление потока, которое очень важно в ряде приложений [4]. С ростом интереса к полностью волоконным системам большое внимание в последнее время уделяется ВОД, использующим волоконные брэгговские решетки (ВБР). Датчики на ВБР обладают такими преимуществами, как прямой отклик с линейным преобразованием длины волны, пропускающий и/или отражающий

характер работы, высокая чувствительность, большой динамический диапазон и разрешение, самокалибровка, встроенная оптическая связь, совместимость с оптоволоконными сетями, волновое и временное мультиплексирование. К данной группе в основном относятся датчики дифференциального давления [5], тепловые анемометры [6], датчики консольного типа [4]. Данные типы датчиков в принципе приспособлены и для измерения направления потока, но измерительное преобразование в них связано не столько с обработкой параметров оптического излучения, сколько с зависимостью от отклика механической системы датчика на изменение направления потока [4]. Измерение самого потока связано с дорогостоящей, мало разрешающей и не всегда высокочувствительной процедурой оптоэлектронной интеррогации ВБР [7-9].

Целью работы является поиск научно-обоснованных принципов развития ВОД расхода и направления потока, с возможностью повышения разрешающей способности и точности измерений в области малых расходов, а также компенсации температуры.

Для достижения цели в первом разделе статьи рассмотрены типовые и нетиповые датчики расхода жидкостей, основанные на измерении дифференциального давления оптико-электронными методами, и дана постановка задач определения направления потока с помощью радиофотонных подходов, как один из вариантов их развития. Во втором разделе рассмотрена универсальная математическая модель для радиофотонного решения и определены требования к выбору элементной базы, отличной от классических ВБР. В третьем разделе обсуждены возможности применения в датчиках расходомеров ВБР с фазовым π -сдвигом и адресных волоконных брэгговских структур, которые на первый взгляд могли бы улучшить их метрологические характеристики, но широко для этого не применяются. В заключении обсуждены полученные результаты и определены направления дальнейших исследований.

1. Анализ характеристик волоконно-оптических расходомеров дифференциального давления

1.1. Принцип действия типового волоконно-оптических расходомера дифференциального давления с двумя одинаковыми ВБР

Схема консольного прототипа [10] предполагаемого к разработке волоконно-оптического расходомера (ВОР) показана на рис. 1,а, схема консоли – на рис. 1,б, схема для расчетной модели – на рис. 1,в.

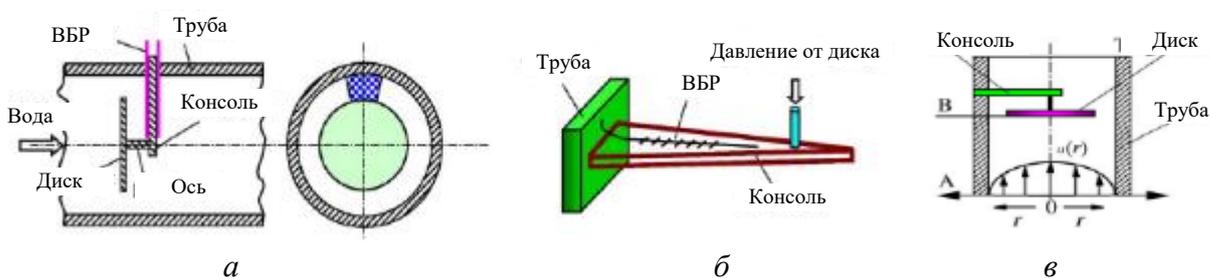


Рис. 1. Структура типового ВОР дифференциального давления (адаптировано из [10])

Расходомер состоит из полый цилиндрической консоли с цилиндрическим усилителем нагрузки, закрепленной на трубе через фиксирующий переход, двух ВБР, разветвителя 2×1 и оптико-электронного интеррогатора. Свободный конец консоли находится на оси трубы. Другой конец консоли закреплен в фиксирующем переходе. Длина фиксирующего перехода равна длине консоли минус радиус трубы.

Чтобы не влиять на деформацию консоли, внутренний диаметр фиксирующего перехода на порядок превышает диаметр консоли. Кроме того, консоль расположена перпендикулярно оси трубы.

Две ВБР с одинаковой брэгговской длиной волны симметрично заклеены вдоль внутренней стенки полой цилиндрической консоли. При этом плоскости двух ВБР перпендикулярны поперечному сечению трубопровода.

Под воздействием жидкости консоль изгибается, и изгиб передается двум ВБР. В результате брэгговские длины волн двух ВБР смещаются. Одна ВБР показывает «красное» смещение при растяжении, а другая показывает «синее» смещение при сжатии. Когда жидкость представляет собой ламинарный поток, его скорость в произвольном месте внутри трубопровода может быть описана как [10]:

$$u(r) = 2V \left[1 - (r/R)^2 \right], \quad (1)$$

где r – радиальный размер от центра трубопровода, V – средний расход, R – радиус трубопровода как показано на рис. 1,в.

При попадании части жидкости на поверхность полой цилиндрической консоли кинетическая энергия жидкости в зоне консоли преобразуется в приращение давления ΔP . По закону сохранения энергии P может быть описана как [10]:

$$\Delta P = \rho u(r)^2 / 2, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкости.

Таким образом, сила, действующая на консоль с мишенью диаметра d , может быть выражена как

$$F = \int_0^{d/2} \left[\rho u(r)^2 / 2 \right] 2\pi r dr = \frac{96\pi\rho V^2}{R^4} (48R^4 d^2 - 12R^2 d^4 + d^6), \quad (3)$$

Согласно теории механики материалов соотношение между деформациями места, находящегося на расстоянии x от свободного конца, и сила на консоли могут быть описаны как:

$$\varepsilon_x = kF, \quad (4)$$

где ε_x – деформация в направлении оси x , а k – коэффициент деформации, относящийся к параметрам консоли и расстоянию x от свободного конца.

Сдвиг брэгговской длины волны λ_B от деформации при изменении температуры ΔT может быть выражен как [7-9]:

$$\Delta\lambda_B / \lambda_B = (1 - P_e) \varepsilon + (\alpha + \xi) \Delta T, \quad (5)$$

где ε равно ε_x , P_e – коэффициент фотоупругости волокна, α – коэффициент теплового расширения материала волокна, ξ – термооптический коэффициент волокна.

В результате того, что две ВБР расположены близко друг к другу, сдвиги их длин волн, вызванных температурой, считаются идентичным. Однако сдвиги, вызванные деформацией консоли, направлены в противоположные стороны с одинаковыми значениями [10].

Разницу между двумя сдвинутыми брэгговскими длинами волн, зависящую от потока, можно описать как:

$$\Delta\lambda_{B12}/\lambda_B = (1 - P_e)\varepsilon_x = 1052(1 - P_e)kF(V^2/R^4)(48R^4d^2 - 12R^2d^4 + d^6), \quad (6)$$

где $F(V^2/R^4)$ – функция и ее ранее описанные параметры.

Кроме того, объемный расход можно описать как

$$Q = AV, \quad (7)$$

где Q – объемный расход, а A – площадь сечения трубопровода. Тогда разница между двумя смещенными длинами волн Брэгга может быть описана как функция Q :

$$\Delta\lambda_{B12}/\lambda_B = (1 - P_e)\varepsilon_x = 1052(1 - P_e)kF((Q/A)^2/R^4)(48R^4d^2 - 12R^2d^4 + d^6). \quad (8)$$

Приведенное выше уравнение представляет собой теоретическое соотношение между разностью двух сдвинутых длин волн Брэгга и объемным расходом.

Иллюстративно ситуацию измерения потока с изменением среднего расхода с помощью оптического анализатора спектра (ОАС) можно представить следующим образом (рис. 2).

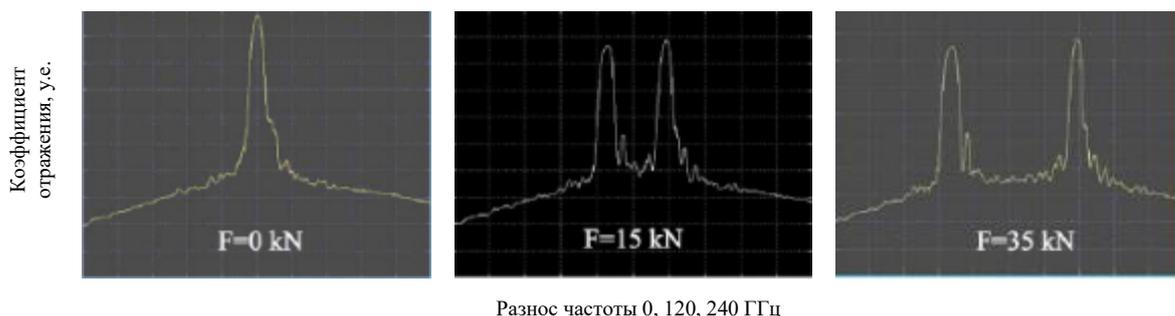


Рис. 2. Разнос центральных длин волн ВБР в зависимости от расхода, выраженного через параметры деформации консоли 0, 15 и 25 кН (адаптировано из [10])

Анализ рис. 1 и рис. 2 показывает, что представленный прототип не позволяет определить направление движение потока. Различия могут возникнуть только в отклике механической системы.

Предварительные экспериментальные результаты показывают, что этот датчик может быть использован для измерения расхода жидкости с расходом от 0 до 1000 см³/с. Как видно из рисунка 2 центральные длины волн ВБР совпадают, при больших расходах они четко различимы, а проблема перекрестной чувствительности датчиков ВБР при малых расходах решается дифференциальным методом, но не эффективно, поскольку разрешающая способность метода не может превысить ширину полосы отражения ВБР (0,2 нм) и разрешающую способность ОАС (0,02 нм).

Увеличить чувствительность датчика и диапазон измерения можно, изменив материал и размеры конструкции датчика.

Представленный принцип измерения и разработанная структура датчика имеют преимущества, заключающиеся в следующем:

- конфигурация датчика состоит из неэлектрического привода и отсутствия движущихся частей;

- принцип измерения, основанный на модуляции длины волны света ВБР, позволяет избежать влияния вариации интенсивности света;
- разработанная консоль равной толщины равнобедренного треугольника улучшает качество спектра ВБР, что приводит к повышению разрешающей способности измерений;
- дифференциальная структура и метод повышают чувствительность датчика.

1.2 Принцип действия типового волоконно-оптического расходомера дифференциального давления с двумя разными ВБР

Для измерения расхода жидкости был предложен небольшой волоконно-оптический расходомер зондового типа (рис. 3,а) [11]. Полая цилиндрическая консоль (рис. 3,б) была впервые использована для измерения силы, создаваемой жидкостью, без усилителя нагрузки. Пара волоконных брэгговских решеток (ВБР), приклеенных к внутренней стенке, использовалась для измерения деформации консоли. Скорость потока можно получить, отслеживая разницу двух сдвинутых длин волн Брэгга (рис. 3,в).

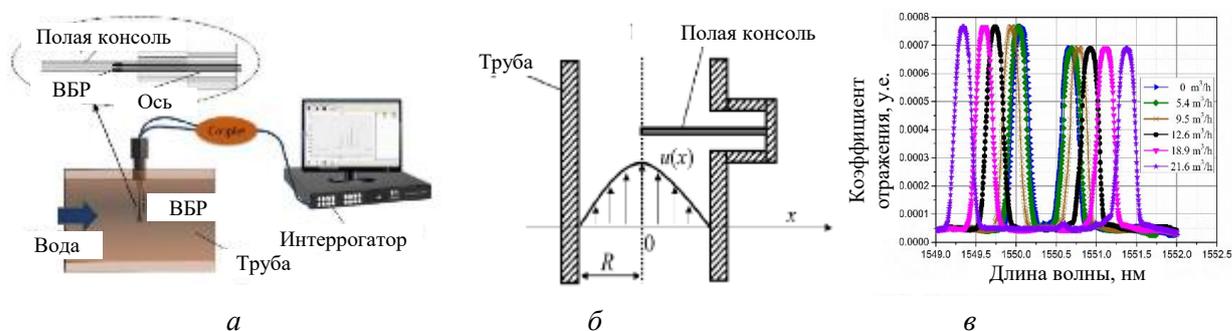


Рис. 3. Структура типового ВОР дифференциального давления (адаптировано из [11])

Теоретическая связь между разницей сдвига длины волны Брэгга и скоростью потока была установлена путем теоретического анализа, аналогичного приведенному в разд. 1.1. Были проведены эксперименты для проверки осуществимости и стабильности. Результаты моделирования и эксперимента показали, что разрешающая способность предлагаемого расходомера составляет $0,81 \text{ м}^3/\text{ч}$, а точность $3,6\%$ в диапазоне $0-22,5 \text{ м}^3/\text{ч}$. По сравнению с существующими эталонами расходомер, предложенный в этой статье, был более компактным, с хорошей чувствительностью, широким диапазоном измерения, простотой изготовления и низкими потерями давления.

Проблема перекрестной чувствительности датчиков ВБР также решалась с помощью дифференциального метода измерения. В отличие от предыдущего расходомера несимметричность по амплитуде и разные центральные длины волн ВБР позволяют, отслеживая динамику изменений положений каждой из ВБР, определять и направление потока. Однако, остается нерешенной проблема малых расходов.

1.3 Принцип действия нетиповых волоконно-оптических расходомеров дифференциального давления с двумя разными ВБР

Оптический датчик расхода перепада давления (ПД) был разработан для системы контроля гидравлического клапана с оптическим питанием и системы управления с обратной связью [12]. В датчике ПД используются две ВБР, которые устанавливаются по обе стороны от его чувствительной диафрагмы (рис. 4,а). Сигнал расхода жидкости получается в виде дифференциального оптического сдвига длин волн (рис. 4,б), при этом дополнительно обеспечивается температурная компенсация. Датчик был испытан при расходах жидкости от 0

до 800 см³/с при изменении температуры от 25 до 75°С. Гидравлический клапан с оптическим приводом, использующий в качестве системы контроля датчик расхода перепада давления, был испытан также гидравлическим маслом с расходом до 6 см³/с при давлении 700 кПа.

Предложена и продемонстрирована новая волоконно-оптическая сенсорная система, состоящая из кантилевера с волоконной брэгговской решеткой в качестве преобразователя для одновременного измерения скорости и направления потока жидкости (рис. 5,а) [4].

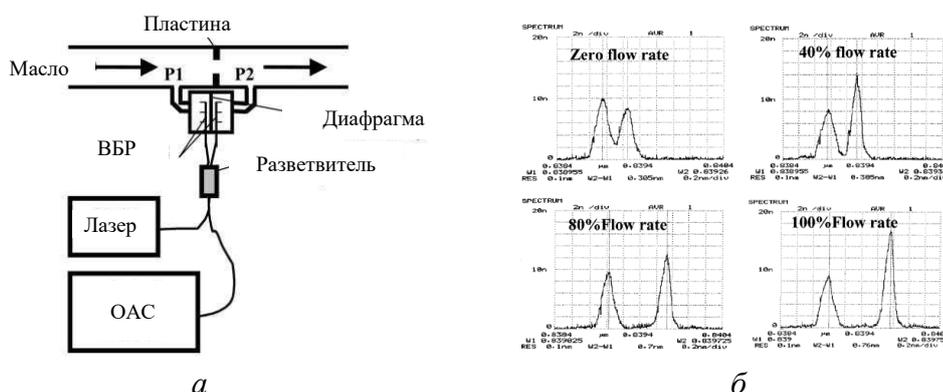


Рис. 4. Структура (а) и сигнал расхода масла (б) датчика ПД (адаптировано из [12])

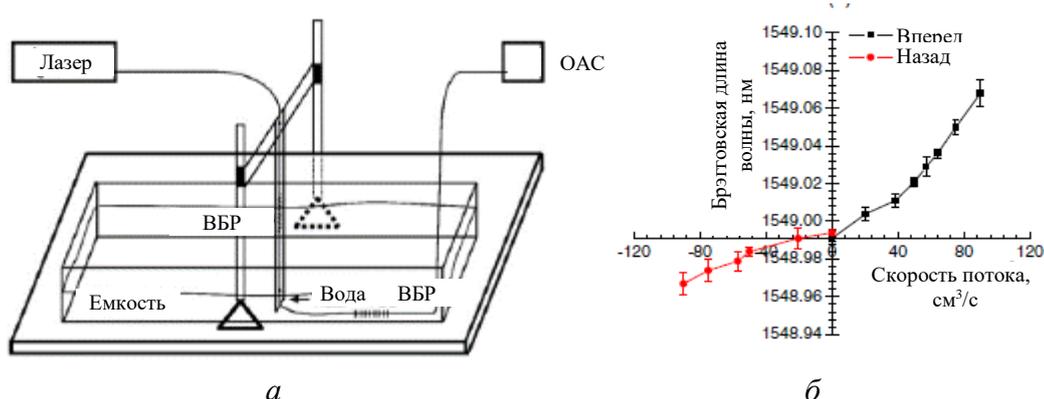


Рис. 5. Структура (а) и сигнал расхода воды (б) датчика (адаптировано из [4])

Для ВБР, установленной на подложке из нержавеющей или пружинной стали, изменение расхода воды приводит к монотонному сдвигу длины волны брэгговского резонанса решетки, в то время как направление потока приводит либо к красному, либо к синему смещению на длине волны Брэгга из-за растянутого или сжатого состояния решетки. Сдвиги длины волны брэгговского резонанса ВБР на 0,077 и 0,826 нм при расходе воды 90 см³/с были достигнуты с помощью консольных датчиков из нержавеющей стали и пружинной стали соответственно. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическим анализом.

Предложен и продемонстрирован датчик скорости потока жидкости на основе ВБР, установленных в трубе (рис. 6,а) [13]. Две ВБР прикреплены к дугообразной пластиковой детали на одинаковом расстоянии от обоих краев. Измеряемый поток жидкости давит на конструкцию, растягивая одну сторону и сжимая другую. Датчик был успешно проверен путем воздействия на устройство различных условий регулирования воздушного потока внутри трубы. На рис. 6,б показаны необработанные сигналы двух ВБР во время изменения скорости воздушного потока от почти 1 м/с до 0 м/с с семью промежуточными этапами.

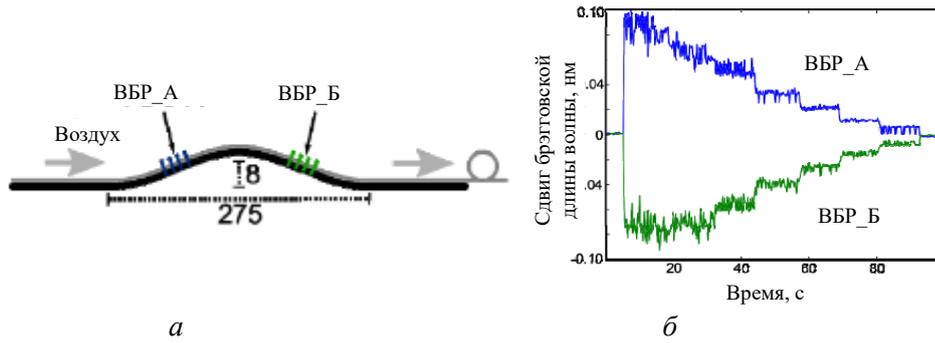


Рис. 6. Структура (а) и сигнал расхода воздуха (б) датчика (адаптировано из [13])

Первая ВБР, попадающая под действие воздушного потока (ВБР_А), растягивается, а вторая (ВБР_Б) сжимается. Возможный дисбаланс двух сигналов обычно вызван несимметричным размещением или неоднородным потоком.

2. Радиотонный подход к оценке показаний волоконно-оптических расходомеров дифференциального давления с двумя ВБР

Заменим ВБР на дельта-функцию и рассмотрим две ситуации: две одинаковые ВБР с одной центральной длиной волны и одинаковым температурным смещением (рис. 7,а), две разные ВБР с равным коэффициентом отражения и разным температурным смещением (рис. 7,б).

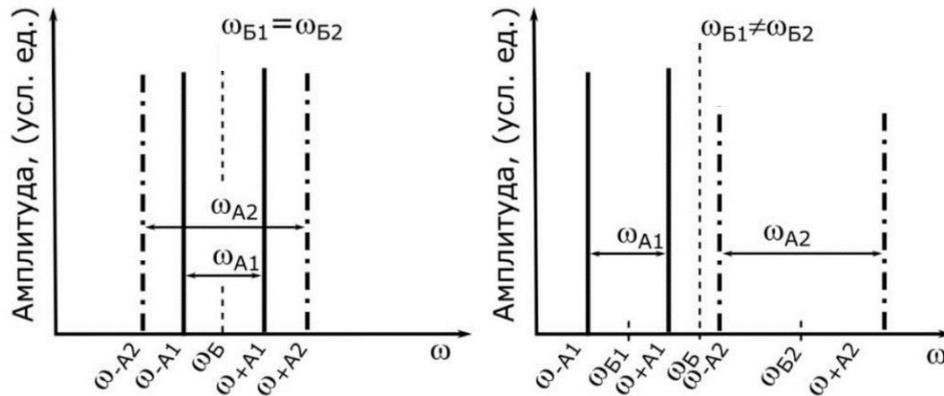


Рис. 7. Спектральные ситуации, аналогичные [10] (а) и [4] (б)

На рис. 7,а представлена ситуация, аналогичная измерительному преобразованию для типового волоконно-оптического расходомера дифференциального давления с двумя одинаковыми ВБР [10]: $\omega_Б$ – частота, соответствующая брэгговским частотам (длинам волн) обеих ВБР $\omega_{Б1}$ и $\omega_{Б2}$ при отсутствии потока; $\omega_{\pm A1}$ и $\omega_{\pm A2}$ – частоты ВБР1 и ВБР2 соответственно при потоке, определяющем сдвиг ω на $A1$ и на $A2$.

Пропустим их через оптический фильтр с наклонной линейной характеристикой. Спектральную характеристику оптического фильтра зададим в виде линейной зависимости [14, 15]:

$$L(\omega) = k\omega + b. \quad (9)$$

где k и b – параметры прямой, описывающей эту зависимость.

Получим следующее визуализированное представление (рис. 8,а).

Амплитуды $A_{\omega \pm A1}$ и $A_{\omega \pm A2}$ составляющих, сформированных ВБР₁ и ВБР₂, после прохождения оптического фильтра с линейной наклонной спектральной характеристикой изменятся в соответствии с их смещением по оси частот:

$$\begin{aligned} A'_{\omega \pm A1} &= A_{\omega \pm A1} [k(\omega'_{B1} \pm \Omega_{A1}) + b], \\ A'_{\omega \pm A2} &= A_{\omega \pm A2} [k(\omega'_{B2} \pm \Omega_{A2}) + b], \end{aligned} \quad (10)$$

где переменные Ω_{A1} и Ω_{A2} определены соотношениями

$$\Omega_{A1} = \omega_{A1}/2 \text{ и } \Omega_{A2} = \omega_{A2}/2. \quad (11)$$

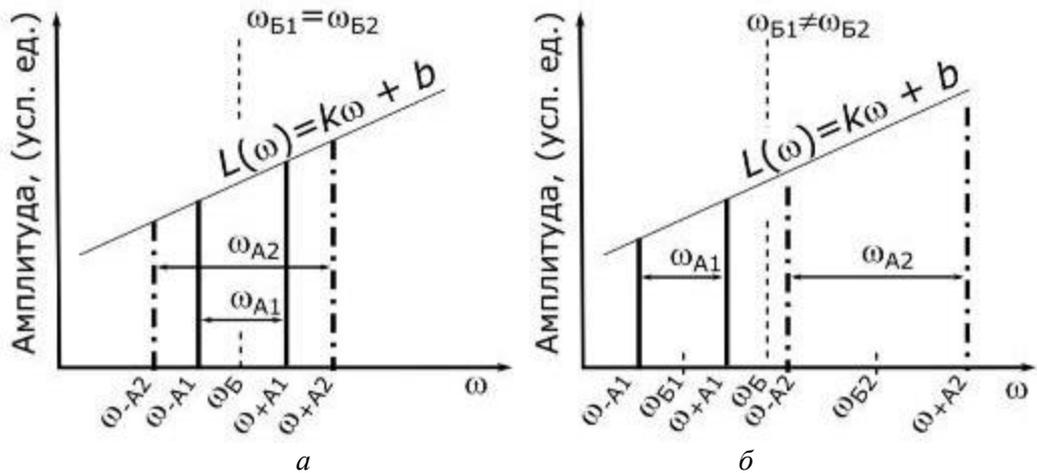


Рис. 8. Спектральная характеристика отклика двух ВБР, прошедших через оптический фильтр: (сплошная линия – ВБР₁, пунктирная – ВБР₂): в варианте типового расходомера [10] (а) и нетипового расходомера [4] (б)

На выходе фотоприемника будут сформированы колебания биений на составляющих всех частот, указанных на рис. 7,а, из которых с помощью радиочастотных фильтров будут выделены составляющие только на ω_{A1} и ω_{A2} .

Итоговое выражение, связывающее мощность электрического сигнала после фотоприемника с попадающим на него оптическим излучением и электронных фильтров, примет вид:

$$P(t) \sim 2A'_{-A1}A'_{+A1} \cos(\omega_{A1}t + \varphi_{A1}) + 2A'_{-A2}A'_{+A2} \cos(\omega_{A2}t + \varphi_{A2}), \quad (12)$$

где φ_{A1} и φ_{A2} – результирующие фазовые компоненты электрических сигналов биений.

На рис. 7,б представлена ситуация аналогичная измерительному преобразованию для нетипового волоконно-оптического расходомера дифференциального давления с двумя разными ВБР [4]: ω_B – частота, соответствующая центральной длине волны устройства (точка отсчета); ω_{B1} и ω_{B2} брэгговские частоты обеих ВБР при отсутствии потока; $\omega \pm A1$ и $\omega \pm A2$ – частоты ВБР1 и ВБР2 соответственно при максимальном расходе и максимальном изменении температуры, определяющие сдвиг ω_{B1} и ω_{B2} на $\pm A1$ и на $\pm A2$ соответственно

при разнонаправленном изменении температуры и направлении движения жидкости. Поскольку к ВБР1 прикладывается только температура, то и разнос ω_{A1} меньше чем разнос для ВБР2, в котором учитывается еще и расход - ω_{A2} . При этом ни ω_{+A1} , ни ω_{-A2} никогда не перейдут границу, определенную осью системы ω_B .

В данном случае определение частоты биений и суждение по ней о величине и направлении расхода не применимо, поскольку определяемая частота биений может лежать произвольно в диапазоне от ω_{-A1} до ω_{+A2} .

Поэтому введем коэффициент модуляции для огибающей биений адресных составляющих в виде [14, 15]:

$$M_1 = \frac{2A'_{\omega B1}A'_{\omega B2}}{A'^2_{\omega B1} + A'^2_{\omega B2}}, \quad M_2 = \frac{2A'_{\omega A1}A'_{\omega A2}}{A'^2_{\omega A1} + A'^2_{\omega A2}}. \quad (13)$$

При этом решение неравенств $M_1 < M_2$ или $M_1 > M_2$ дает возможность определить величину расхода и направление потока. Если выполняется первое неравенство, ускорение «положительное», движение вперед, если второе – ускорение «отрицательное», движение назад. Данная функция была невозможна при обработке сигналов ВОР на ОАС.

Рассмотрим величины разностных частот для ВОР, приведенные в разд. 1. Для схемы типового ВОР [10] в соответствии рис. 2 разностные частоты составляют 120 и 240 ГГц при силе воздействия потока на консоль 15 и 30 кН соответственно. Для схемы типового ВОР [11] в соответствии рис. 3 разностные частоты составляют 120 и 240 ГГц при потоке 5,4 и 18,9 м³/ч соответственно. Для схемы нетипового ВОР [12] в соответствии рис. 4 разностные частоты составляют 40 и 120 ГГц при потоке 2,4 и 6 см³/с соответственно. Сдвиги длины волны брэгговского резонанса на 12 и 120 ГГц достигнуты в нетиповом ВОР [4] при расходе воды 90 см³/с в прямом и обратном направлениях. Сигналы двух ВБР во время изменения скорости воздушного потока от почти 1 м/с до 0,12 м/с составили в нетиповом ВОР [13] от 24 до 1,5 ГГц.

Приведенные данные показывают, что радиотонные методы могут быть применены для измерения расхода жидкостей, однако следует существенно снизить их чувствительность, чтобы разностная частота при измерении максимального потока не выходила за диапазон 40 ГГц, для которого существует отработанная элементная база. В этом случае еще более актуальной становится задача – повысить разрешающую способность измерений и разработать методы для измерения малых расходов.

3. Развитие концепции ВОР с повышением разрешающей способности и точности измерений на основе радиотонных подходов

Волоконно-оптические технологии предоставляют многочисленные возможности для различных промышленных и муниципальных систем, в том числе мониторинга расхода жидкостей. В разд. 2 показана возможность радиотонных подходов, что позволит повысить точность измерений, которые будут проводиться по оптической информации, но в радиодиапазоне, где погрешность на несколько порядков ниже. При этом поставлена задача повышения разрешающей способности.

Увеличение разрешающей способности [16] достигается использованием для анализа характерных сверхузкополосных особенностей спектра отражения ВРБ, применением узкополосных ВБР, построением интерферометров Фабри-Перо со сверхузкой полосой пропускания и т.д. Следует отметить, что в ВОР практически не используется такая структура, как ВБР с фазовым π -сдвигом, отличающаяся наличием сверхузкополосной зоной пропус-

кания, размещенной при определенных условиях на центральной длине волны решетки. Реально достижимая полуширина резонансного спектра ВОР в конфигурации ИФП составляет по данным [16] 0,025 нм, а для ВБР – 0,5 нм. Это значит, что разрешающая способность ИФП ВОР в 20 раз лучше, чем у датчика на одной ВБР.

Развивая данный подход можно использовать для создания ВОР ВБР с фазовым π -сдвигом, которая представляет собой простейший ИФП с длиной резонатора, не превышающей λ_B . Полуширина резонансного пика такого типа решеток может достигать 0,005 нм, что свидетельствует о возможном увеличении разрешающей способности измерений на два порядка по сравнению с датчиком на одной ВБР [16].

Кроме того, нами было найдено новое решение, основанное на применении вместо известных типов ВБР адресных волоконных брэгговских структур (АВБС) [14, 15]. Основными их преимуществами являются: возможность работы с 64 датчиками на одной длине волны; наличие в их структуре сверузкополосных окон прозрачности, разностная частота между которыми соответствует уникальному адресу каждой АВБС; возможность радиофотонного опроса каждой АВБС на частоте своего адреса и обработка информации в радиочастотной области, что существенно повышает метрологические характеристики разрабатываемого ВОР.

При этом ширина полосы пропускания окна прозрачности на 2-3 порядка уже полосы пропускания/отражения ВБР, что говорит о высокой разрешающей способности измерительного преобразования по оценке сдвига центральной длины волны АВБС [17-24].

В то же время применение АВБС является новой концепцией для исследователей и инженеров-электриков. Несмотря на то, что были предприняты значительные усилия в области измерения с помощью АВБС температуры, влажности и др., по-прежнему остаются нераскрытые области их применения. Кроме того, основные работы, выполняемые в лабораториях по малым и упрощенным моделям, далеки от реальных полевых условий. Таким образом, исследования стабильности волоконно-оптической сенсорной системы на АВБС в реальном ВОР должны быть сосредоточены на полевых исследованиях. Методы применения АВБС в ВОР следует оценивать с учетом высокого уровня электрических помех, способных вызвать нелинейные эффекты в волокне, а также существенных изменений температур жидкостей, которые могут превышать 300 °С. Кроме того, ВОР обычно требуют длительной работы в жидкости, таким образом, старение материала волокна является еще одной важной проблемой, которую следует учитывать.

Заключение

В этой работе мы проанализировали и оценили работу типовых и нетиповых ВОР на базе двух ВБР и дифференциальных методов измерений давления на них с компенсацией температуры. Как было показано, они обладают малой разрешающей способностью и точностью измерений, особенно в области малых расходов. Большие точность и разрешающую способность можно получить, если использовать в измерительном преобразовании радиофотонные подходы. Однако и в этом случае разрешающая способность остается проблемой.

Учитывая разработанные в Казанской школе радиофотоники методы измерений, предложено использовать в ВОР либо ВБР с фазовым сдвигом, либо АВБС. Поскольку и первые, и последние продолжают развиваться, могут быть найдены новые и более совершенные пути повышения эффективности мониторинга расхода жидкостей, в том числе с адресным радиофотонным подходом по матрице датчиков, расположенных в поперечном сечении трубы, что позволит обрабатывать не только ламинарные, но и турбулентные потоки.

Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки РФ в рамках программы "Приоритет 2030".

Список литературы

1. Baker R.C. Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications / R.C. Baker // Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
2. Kuzyk M.G. Polymer Fiber Optics: Materials, Physics, and Applications / M.G. Kuzyk // Boca Raton: CRC, 2006.
3. Peng W. Self-compensating fiber optic flow sensor system and its field application / W. Peng, G.R. Pickrell, J. Xu, et al. // Appl. Opt. - 2004. - V. 43. - P. 1752-1760.
4. Ping, Lu. Fiber Bragg grating sensor for simultaneous measurement of flow rate and direction / Lu Ping and Chen Qiying // Meas. Sci. Technol. - 2008. - V. 19. - P. 125302.
5. Lim, J. DP flow sensor using optical fiber grating / J. Lim, Q.P. Yang, B.E. Jones and P.R. Jackson // Sensors Actuators A. - 2001. - V. 92. - P. 102-108.
6. Cashdollar, L. Active fiber optical flow sensor / L. Cashdollar and K. Chen // IEEE Sensors Journal. - V. 5. - P. 1327-1331.
7. Нуреев И.И. Радиофотонные полигармонические системы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных брэгговских решеток. Часть 1. Радиофотонные полигармонические методы зондирования / И.И. Нуреев // Прикладная фотоника. - 2016. - Т. 3. - № 3. - С. 193-220.
8. Нуреев И.И. Радиофотонные полигармонические системы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных брэгговских решеток. Часть 2. Единое поле комплексированных датчиков / И.И. Нуреев // Прикладная фотоника. - 2016. - Т. 3. - № 3. - С. 221-251.
9. Нуреев И.И. Радиофотонные полигармонические системы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных брэгговских решеток. Часть 3. Полигармонические системы интеррогации комплексированных волоконно-оптических датчиков / И.И. Нуреев // Прикладная фотоника. - 2017. - Т. 4. - № 2. - С. 139-170.
10. Zhao, Yong. Novel target type flowmeter based on a differential fiber Bragg grating sensor / Zhao Yong, Kun Chen, Jian Yang // Measurement. - 2005. - V. 38. - P. 230-235.
11. Zhao, Yong. Small Probe-Type Flowmeter Based on the Differential Fiber Bragg Grating Measurement Method / Zhao Yong, Ya-Fei Gu, Ri-Qing Lu, and Yang Yang // IEEE transactions on instrumentation and measurement A. - 2017. - V. 66(3). - P. 502-507.
12. Lima J. DP flow sensor using optical fibre Bragg grating / J. Lima, Q.P. Yang, B.E. Jones, P.R. Jackson // Sensors and Actuators A. - 2001. - V. 92. - P. 102-108.
13. Rodriguez-Cobo, L. Pipe flow speed sensor based on Fiber Bragg Gratings / L. Rodriguez-Cobo, M.A. Quintela, M. Lomer, A. Cobo, J.M. Lopez-Higuera // Proc. of SPIE. - V. 8421.- P. 84214E.
14. Морозов О.Г. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределённых радиофотонных сенсорных системах / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов // Компьютерная оптика. - 2019. - Т. 43, № 4. - С. 535-543.
15. Аглиуллин Т.А. Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах / Т.А. Аглиуллин, В.И. Анфиногентов, Р.Ш. Мисбахов, О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов // Труды учебных заведений связи. - 2020. - Т. 6, № 1. - С. 6-13.
16. Морозов О.Г. Модуляционные методы измерений в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе волоконных решеток Брэгга с фазовым сдвигом / О.Г. Морозов, О.А. Степущенко, И.Р. Садыков // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2010. - № 3 (10). - С. 3-13.
17. Морозов О.Г. Трехкомпонентные адресные волоконные брэгговские структуры - новый элемент радиофотонных многосенсорных сетей / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов,

И.И. Нуреев, Р.Ш. Мисбахов, А.А. Кузнецов // Фотон-экспресс. - 2021. - № 6 (174). - С. 166-167.

18. Губайдуллин Р.Р. Моделирование многоадресной волоконной брэгговской структуры с помощью гаусс подобной функции / Р.Р. Губайдуллин, О.Г. Морозов // Фотон-экспресс. - 2021. - № 6 (174). - С. 363-364.

19. Морозов О.Г. Поляризационный волоконно-оптический датчик контроля силы сжатия обмоток трансформатора с радиофотонным адресным опросом / О.Г. Морозов, Р.Ш. Мисбахов, Р.Ш. Мисбахов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2022. - № 4 (56). - С.38-50.

20. Аглиуллин А.Ф. Метод уточнения значения частотного сдвига спектра, полученного в условиях малой разрешающей способности анализатора / А.Ф. Аглиуллин, Т.А. Аглиуллин, Б.И. Валеев и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2022. - № 4 (56). - С.63-74.

21. Кувшинов Н.Е. Квазираспределенная 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, Г.А. Морозов, О.Г. Морозов // Электроника, фотоника и киберфизические системы. - 2022. - Т. 2. - № 2. - С. 56-81.

22. Салихова М.А. Система сбора информации о положении пациента в инвалидной коляске на основе линейно-чирпированных волоконных брэгговских решеток с фазовым π -сдвигом / М.А. Салихова, О.А. Степущенко, Р.А. Эшпай, О.Г. Морозов // Научно-технический вестник Поволжья. - 2020. - № 5. - С. 30-33.

23. Салихова М.А. Радиофотонная система сбора информации о положении пациента в инвалидной коляске на основе адресных линейно-чирпированных волоконных брэгговских решеток с двумя фазовыми π -сдвигами / М.А. Салихова, О.А. Степущенко, Р.А. Эшпай и др. // Научно-технический вестник Поволжья. - 2020. - № 5. - С. 34-37.

24. Губайдуллин Р.Р. Алгоритм зондирования высокодобротных волоконно-оптических структур / Р.Р. Губайдуллин, В.А. Заболотный, Т.Р. Сахбиев и др. // Научно-технический вестник Поволжья. - 2020. - № 6. - С. 16-19.

FIBER-OPTIC DIFFERENTIAL FLOWMETER ON TWO FIBER BRAGG GRATINGS. DETERMINATION OF DIRECTIONS FOR DEVELOPMENT

A.A. Potanin

JSC "Kazan instrument-making design bureau"
1, Siberian tract, 420061, Kazan, Russian Federation

Abstract: The paper analyzes the structures and characteristics of typical and non-typical liquid flowmeters based on the measurement of differential pressure by fiber Bragg gratings and information processing by optoelectronic spectral methods. The formulation of the problems of determining the direction and flow rate using radiophoton approaches is given as one of the options for the development of flowmeters. A universal mathematical model for the radiophoton solution of the problems of determining the flow rate and flow direction is considered, the requirements for choosing their element base, different from the classical FBGs, are determined. The possibilities of using FBG flowmeters with a phase π -shift and addressable fiber Bragg structures as sensors, which at first glance could improve the metrological characteristics, but are not widely used for this, are discussed. In conclusion, the obtained results are discussed and the ways of development and improvement of fiber-optic flowmeters are determined.

Key words: flow measurement of liquids; fiber optic flowmeter; fiber Bragg grating; differential measurement method; radio photonics; fiber-optic Bragg grating with a phase shift; targeted fiber Bragg structures; processing in the radio range of information received in the optical range about the flow rate and direction of the fluid flow.

Статья представлена в редакцию 28.03.2023