

ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННЫЙ ГИДРОСТАТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК УРОВНЯ ЖИДКОСТИ МЕМБРАННОГО ТИПА С ДВУМЯ ВСТРОЕННЫМИ АДРЕСНЫМИ ВОЛОКОННЫМИ БРЭГГОВСКИМИ СТРУКТУРАМИ

*А.Д. Проскуряков, Л.Ю. Зайцев, А.Л. Бамбуркина, И.И. Нуреев,
Э.В. Белов, К.А. Липатников, Н.А. Петров*

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д.10

Аннотация. Предложен гидростатический датчик уровня жидкости с использованием двух адресных волоконных брэгговских структур волнового типа (2λ -АВБС), встроенных в мембрану, для повышения чувствительности и точности измерения давления. В целях компенсации влияния температуры предложены варианты датчика с записью сенсорных 2λ -АВБС в волокнах с разными легирующими добавками или включения в структуру датчика дополнительной 2λ -АВБС, показания которой не зависят от уровня жидкости. Этот инновационный датчик за счет радиофотонных методов опроса позволяет обеспечить чувствительность измерения уровня $0,26$ пм/мм при увеличении отношения сигнал/шум измерений до 7 раз. В максимальной конфигурации все три 2λ -АВБС имеют одну центральную длину волны покоя и разные адресные частоты, что позволяет идентифицировать их при интеррогации с одного объединяющего волокна и свидетельствует о возможности достижения более высокого уровня мультиплексирования как внутри одной контролируемой емкости, так и в нескольких.

Ключевые слова: адресная волоконная брэгговская структура волнового типа, гидростатическое давление, уровень жидкости, датчик давления, мультиплексирование, температурная компенсация, датчик температуры, метод двух волокон.

Введение

Среди волоконно-оптических датчиков, измеряющих уровень жидкости косвенно по величине гидростатического давления, выделяются интерферометрические датчики и датчики на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) [1]. Интерферометры используют интерференцию между двумя лучами, распространяющимися по разным оптическим путям одного или двух волокон [2], и классифицируются на четыре типа: Фабри-Перо, Маха-Цендера, Михельсона и Саньяка [3]. ВБР создается путем модуляции показателя преломления сердцевины волокна, когда последнее подвергается воздействию ультрафиолетового излучения, пропущенного, например, через маску периодической структуры [4]. ВБР работает как отражающий или пропускающий спектральный фильтр, который выделяет определенную длину волны (центральную длину волны Брэгга) и пропускает/отражает другие длины волн [3]. При приложении к ВБР внешнего воздействия центральная длина волны пропорционально изменяется по величине и знаку. Основное отличие, определяющее использование ВБР в этой статье, заключается в их способности мультиплексировать несколько датчиков в одном волокне, чего нельзя пока достичь с помощью волоконных датчиков на основе интерферометров [5].

Давление можно измерять с помощью ВБР без какого-либо покрытия или структуры, облегчающей измерение. Однако, чтобы сделать ВБР пригодными для этого применения,

поскольку их типичная чувствительность к давлению составляет около 3,04 пм/МПа, следует рассмотреть стратегии косвенного обнаружения. Это позволяет ВБР соответствовать требованиям к точности измерения давления на практике [6-8]. Чувствительность измерения давления можно улучшить, осуществляя косвенное обнаружение давления посредством обнаружения деформации, вызывающей изменение центральной длины волны ВБР [6,8,9]. Для этого ВБР в целях измерения уровня жидкости внедряются в диафрагменную структуру [10]. Такой датчик позволяет оценивать уровень жидкости по гидростатическому давлению, приложенному к диафрагме. Ограничение этого метода – работа только с одной жидкостью, которая должна иметь постоянную относительную плотность [5].

Следует отметить, что ВБР чувствительны к температуре и механическим напряжениям, поскольку эти эффекты смещают центральную длину волны Брэгга из-за термооптического эффекта с тепловым расширением и эффективной деформационно-оптической постоянной. Для ВБР, встроенных в диафрагму, механическое напряжение возникает из-за деформации последней, которая подвергается растяжению при изменении уровня жидкости [1]. Поэтому важно учитывать геометрию и характеристики материала диафрагмы, поскольку она не только деформируется под давлением жидкости, но и может подвергаться термическим изменениям от химического воздействия измеряемой жидкости. Таким образом, для создания датчиков на основе ВБР, встроенных в диафрагмы, были изучены различные типы материалов, такие как эпоксидная смола, нитриловая резина, углеродные композиты, графен и натуральный каучук [1].

Изменения, вызванные температурой, нежелательны для измерения уровня жидкости. Для систем с постоянной температурой это не вызовет ошибок измерения. Однако при изменяющихся температурах можно установить дополнительный датчик на ВБР, изолированный от колебаний давления, чтобы измерять только температуру, тем самым уменьшая перекрестную чувствительность. Однако влияние температуры на механические свойства диафрагмы также следует анализировать, чтобы найти компенсацию перекрестной чувствительности при высоких температурах [5]. Можно заметить, что использование двух ВБР в одной диафрагме мало изучено [1].

В [11] разработан датчик для измерения давления и уровня воды, построенный на ВБР, интегрированной в эпоксидную диафрагму, где было исследовано влияние толщины диафрагмы на чувствительность и точность датчика. Тем не менее, для практического применения этому датчику требовалась температурная компенсация, организованная на второй ВБР. В [12] представлен датчик уровня воды на двух ВБР, одна из которых прикреплена в области с изменяющимся давлением за счет изгиба диафрагмы, а вторая свободно расположена для измерения температуры в зоне с постоянным объемом. Однако форма датчика с двумя зонами достаточно объемна, чтобы говорить о полноценном исключении влияния давления на датчик температуры. В [5] разработан датчик, созданный из полиуретановой диафрагмы с двумя ВБР, встроенными таким образом, что они расположены в противоположных направлениях, принимая нейтральную линию изгиба диафрагмы за эталон. Таким образом, датчик показал высокую чувствительность и линейность во всех проанализированных случаях; также была возможность выполнить температурную компенсацию.

В [1] использована диафрагма из ПДМС (полидиметилсилоксан) с двумя ВБР, расположенными над и под ее центральной осью. Недостатком этого решения, как и всех предыдущих является необходимость применения оптоэлектронного интеррогатора высокой стоимости, низкой разрешающей способности измерений и скорости опроса мультиплексированных датчиков.

В данной работе за прототип выбрана схема мембраны на ПДМС с заменой чувствительных элементов на адресные волоконные брэгговские структуры (АВБС) [13, 14], определен их тип и показана возможность применения радиофотонного интеррогатора [15-19], который позволяет устранить недостатки оптоэлектронного.

Таким образом, целью данной работы является построение математической модели

термокомпенсированного гидростатического датчика уровня жидкости мембранного типа с двумя встроенными АВБС, описание конструкции и вариантов его реализации с дополнительным датчиком температуры или на базе двух волокон, доказывающих возможность повышения чувствительности и точности измерений.

1. Принцип работы гидростатического датчика уровня жидкости мембранного типа с двумя встроенными АВБС. Математическая модель

На рис. 1 показан изгиб диафрагмы с радиусом ρ под действием гидростатического давления P . На рис. 1,а изгиб детализирован для АВБС₁, расположенной на верхней поверхности диафрагмы, на рис. 1,б – для АВБС₂, расположенной на нижней поверхности диафрагмы. Диафрагма из ПДМС действует как твердая, но способная изгибаться, среда, плотно взаимодействующая с 2π -АВБС или 2λ -АВБС (АВБС фазового или волнового типа) при деформации с изменяющейся кривизной. При этом адресные частоты обеих АВБС различны.

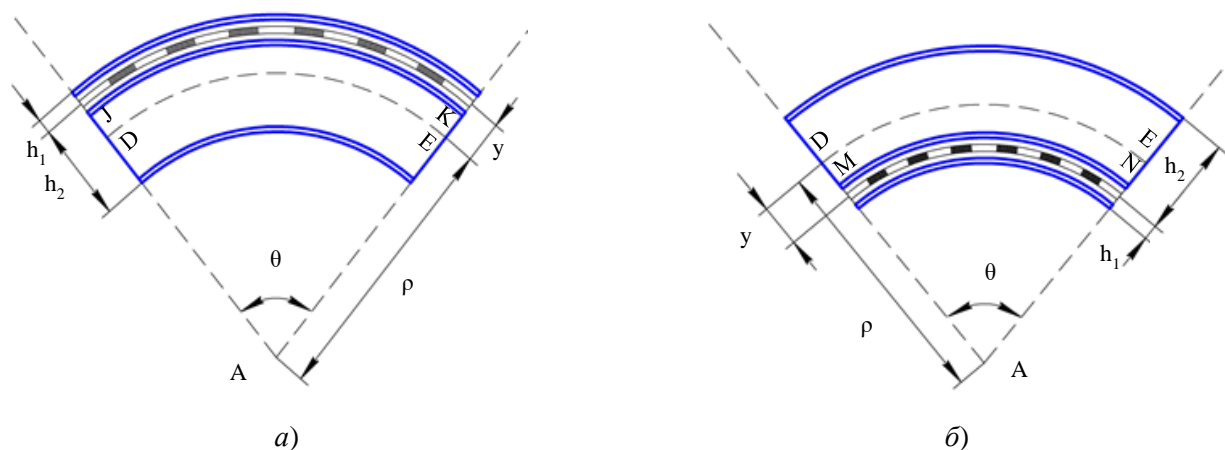


Рис. 1. К пояснению принципа работы диафрагмы: ситуация «положительного» изгиба для верхней поверхности с АВБС₁ (а); ситуация «отрицательного» изгиба» для нижней поверхности с АВБС₂ (б)

Рассмотрим принцип работы датчика на двух волновых АВБС (2λ -АВБС) – измерения уровня жидкости по гидростатическому давлению, вызывающего изгиб диафрагмы и регистрации, вызванной им величины продольной деформации чувствительного элемента. Когда встроенные чувствительные элементы на основе 2λ -АВБС размещаются сверху и снизу изгибаемой диафрагмы, изгиб происходит как для последней, так и для обеих АВБС.

До изгиба центральные длины волн $\lambda_{B1,2}$ 2λ -АВБС определяются периодами двух ее ВБР-компонент j и их полусуммой. Период ВБР-компонент можно записать в виде:

$$\lambda_{Bij} = 2n_{eff}\Lambda_{ij}, \quad (1)$$

где n_{eff} и Λ_{ij} – эффективный показатель преломления и период ВБР-компонент для АВБС-структур $i=1,2$ и ВБР компонент $j=1,2$ соответственно.

Эффект положительного изгиба диафрагмы будет растягивать 2λ -АВБС₁ и соответственно периоды ее ВБР-компонент Λ_{1j} , что приведет к изменению полусумм компонент для центральной длины волн $\Delta\lambda_{B1}$. Отметим, что эти изменения будут одинаковы по величине для обеих ВБР-компонент [13, 14]. Растянутые решетки будут иметь более длинный период, что приведет к смещению λ_{B1} в длинноволновую область (красное смещение).

Эффект отрицательного изгиба диафрагмы будет сжимать 2λ -АВБС₂ и соответственно периоды ее ВБР-компонент Λ_{2j} , что приведет к изменению полусумм компонент для центральной длины волн $\Delta\lambda_{B2}$. Отметим, что эти изменения будут одинаковы по величине для обеих ВБР-компонент [13, 14]. Растянутые решетки будут иметь более короткий период, что приведет к смещению λ_{B2} в коротковолновую область (синее смещение).

Расстояние от центральной оси 2λ -АВБС_{1,2} до центральной оси диафрагмы определяется как $h_2/2$ и показано на рис. 1,а,б.

Конструкция и анализ предлагаемого датчика основаны на модели изгиба [20], которая является классической и широко распространенной моделью в машиностроении для описания изгибающего момента. Таким образом, когда мембрана изгибается, как показано на рис. 1,а,б, соотношение между длиной нейтральной линии, радиусом изгиба и углом изгиба определяется выражением:

$$L_{DE} = \rho\theta, \quad (2)$$

где L_{DE} – длина нейтральной линии мембраны D-E, которая всегда является постоянной величиной при любой кривизне, согласно модели изгиба [20]; ρ и θ – радиус и угол раскрытия нейтральной линии соответственно.

В обоих случаях кривизна C и радиус изгиба ρ имеют обратную зависимость, так как:

$$C = 1/\rho = \theta/L_{DE}, \quad (3)$$

где раскрыт берется по диаметру диафрагмы и длина L_{DE} , соответствует ему.

Поскольку 2λ -АВБС_{1,2} очень тонкие и встроены в поверхность диафрагмы, их можно рассматривать как единый объект, подвергающийся одинаковому изгибу. Смещение y для 2λ -АВБС_{1,2} приводит к изменению радиуса изгиба.

Для 2λ -АВБС₁ оно вычисляется как $\rho + y$. Тогда можно получить длину 2λ -АВБС₁ L_{JK} , как сумму длин ее ВБР-компонент, при приложенной кривизне, как [21]:

$$L_{JK} = (\rho+y)\theta, \quad (4)$$

$$\Delta L = L_{JK} - L_{DE} = \theta y, \quad (5)$$

$$y = h_2 - (h_1 + h_2)/2, \quad (6)$$

где y – расстояние между нейтральной линией и осью 2λ -АВБС, фиксированное для конкретной конструкции датчика.

Положительное изменение длины 2λ -АВБС₁, вызванное изгибом при формировании обмотки, определяется по уравнению (5), что означает, что период решеток также изменяется пропорционально углу раскрытия θ_1 (или кривизне C_1), таким образом, получается сдвиг брэгговской длины волны 2λ -АВБС₁ согласно уравнениям (1) и (3), который может быть описан как

$$\Delta\lambda_{2\lambda\text{-АВБС}1} = \Delta\lambda_{B1} = n_{\text{eff}} C_1 L_{DE} (h_2 - h_1). \quad (7)$$

В уравнении (7) L_{DE} является постоянным значением в соответствии моделью изгиба [20], а h_1 и h_2 заранее определяются в процессе изготовления каждого датчика. Следовательно, величина сдвига длины волны определяется исключительно измеренной кривизной C . Стоит отметить, что датчик спроектирован тонким (единицы мм) при диаметре диафрагмы десятки мм и предназначен для измерения относительно больших радиусов кривизны (т.е. $\rho \gg y$).

Для 2λ -АВБС₂ радиус изгиба вычисляется как $\rho - y$. Тогда можно получить длину 2λ -АВБС₁ L_{MN} , как сумму длин ее укороченных ВБР-компонент, при приложенной кривизне, как [21]:

$$L_{MN} = (\rho - y)\theta, \tag{8}$$

$$\Delta L = L_{MN} - L_{DE} = -\theta y. \tag{9}$$

Отрицательное изменение длины 2λ -АВБС₂, вызванное изгибом при формировании обмотки, определяется по уравнению (9), что означает, что период решеток также изменяется пропорционально углу раскрыва θ_1 (или кривизне C_1), таким образом, получается сдвиг брэгговской длины волны 2λ -АВБС₂ согласно уравнениям (1) и (3), который может быть описан как

$$\Delta\lambda_{2\lambda\text{-АВБС}2} = \Delta\lambda_{B2} = -n_{\text{eff}}C_1L_{DE}(h_2 - h_1). \tag{10}$$

Как видно из уравнений (7) и (10) значение изменения центральных длин волн 2λ -АВБС_{1,2} одинаково, но имеет различный знак. Напомним, что для простоты регистрации смещения центральной длины волны чувствительных элементов в них сформированы разные адресные частоты. Это позволяет использовать разработанный нами радиофотонный подход [22-24] и интеррогатор для их опроса с помощью фильтров на адресных частотах 14 и 18 ГГц при изменении давления и температуры в эквивалентном их смещении в диапазоне до 3 нм. На рис. 2 показан измеренный сдвиг центральной длины волны для обеих 2λ -АВБС как отклик на различный уровень жидкости – верхняя ветвь для 2λ -АВБС₁, а нижняя – для 2λ -АВБС₂.

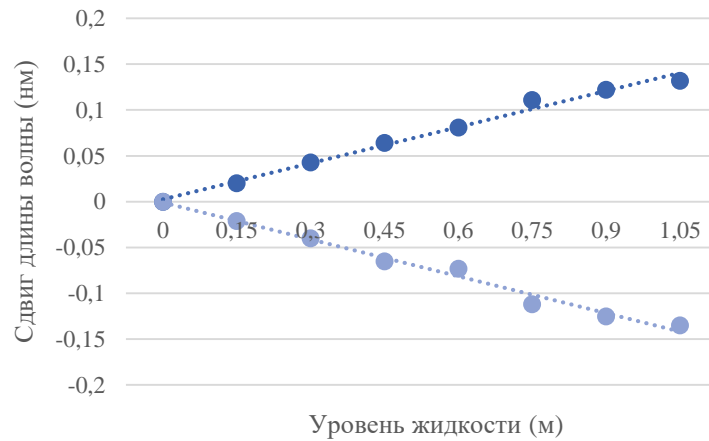


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований: зависимость длины волны от уровня жидкости

Напомним, что уровень или высота столба жидкости H может быть определена по гидростатическому давлению по формуле:

$$P = \rho_l g H, \tag{10}$$

где ρ_l – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения вблизи Земли, примерно равное $9,8 \text{ м/с}^2$, а каждые 10 см повышения уровня воды эквивалентны $0,981 \text{ кПа} \sim 1 \text{ кПа}$ гидростатического давления P .

Тестируемый датчик имеет две встроенные 2λ -АВБС длиной 40 мм. Как показано в ситуации с положительным изгибом на рис. 2 центральная длина волны 2λ -АВБС₁ постепенно смещается в сторону более длинных длин волн по мере увеличения кривизны мембраны с общим сдвигом длины волны 0,13 нм при уровне жидкости в 1 м. В ситуации отрицательного изгиба пик смещается в сторону меньшей длины волны с общим сдвигом длины волны на -0,129 нм при той же кривизне. Различие граничных цифр определяется погрешностью измерений. Чувствительность измерения составляет 0,26 пм/мм.

Большее количество датчиков на базе 2λ -АВБС на одинаковой центральной длине волны, но разными адресными частотами можно каскадировать и объединять в единую волоконно-оптическую сенсорную сеть (ВОСС), нагруженную на один интеррогатор.

Таким образом, описан принцип действия и построена математическая модель термокомпенсированного гидростатического датчика уровня жидкости мембранного типа с двумя встроенными 2λ -АВБС. В отличие от обычного датчика на паре ВБР, предлагаемый датчик имеет встроенные 2λ -АВБС, равно смещенные от нейтральной линии диафрагмы. Датчик не требует времени на формирование или релаксацию во время измерения, что позволяет определять кривизну практически в реальном масштабе времени. Взаимосвязь между центральной длиной волны 2λ -АВБС и чувствительностью датчика определяется с помощью модели изгиба [20] и проверена экспериментально. Величина сдвига длины волны имеет линейную зависимость от кривизны изгиба. Может быть построена ВОСС с последовательно соединенными несколькими датчиками на 2λ -АВБС как для внутри емкостного контроля, так и паркового контроля разных емкостей.

2. Анализ вариантов термокомпенсации и улучшения метрологических характеристик гидростатического датчика уровня жидкости мембранного типа с двумя встроенными 2λ -АВБС

С учётом анализа научно-технической информации показано, что наиболее простым и технологичным оптическим методами одновременного контроля деформации и температуры диафрагмы и конструкций с помощью встроенных в мембрану датчиков на основе 2λ -АВБС в настоящее время являются метод использования дополнительной 2λ -АВБС₃ компенсации температуры (рис. 3) и метод двух волокон [25], заключающийся в использовании для записи 2λ -АВБС_{1,2} волокон, обладающих существенно различной чувствительностью к деформации и/или температуре или к одному из этих параметров за счёт различных легирующих добавок.

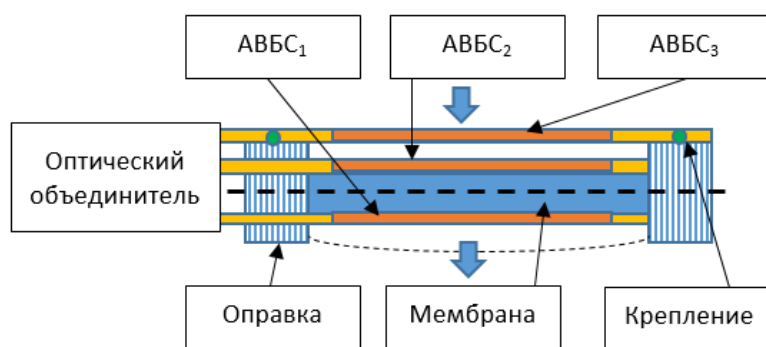


Рис. 3. Иллюстративная схема мембраны с двумя встроенными волновыми двухкомпонентными АВБС_{1,2} и третьей АВБС₃, закрепленной на оправке (воздействию гидростатического давления отмечено стрелкой)

Как следует из рис. 3, закрепленное на оправке мембраны волокно с третьей 2λ -АВБС₃ не подвержено влиянию гидростатического давления в силу очень малой поперечной площади. Дополнительно следует обеспечить такое преднапряжение волокна, которое позволяет считать воздействия давления (верхняя широкая стрелка) на 2λ -АВБС₃ ничтожно малым или не требующим учета. Таким образом, 2λ -АВБС₃ служит для измерения температуры в зоне мембраны, которая получает изгиб только вниз (нижняя широкая стрелка), и конструктивно не может быть повреждена. Полученные радиофотонным интеррогатором, который подключен к оптическому объединителю, значения с 2λ -АВБС₃ используются для компенсации температуры при измерении давления и уровня жидкости.

Метод двух волокон с записанными в каждом из них 2λ -АВБС для одновременного измерения температуры и деформации некоторого материала, в который они встроены, основан на двух предположениях. Первое – волокна обладают существенно различной чувствительностью к деформации и/или температуре. Второе – реакция обеих 2λ -АВБС на температуру и деформацию может быть описана суммой независимых функций отклика [25].

Первое определяет конструктивные решения для выбора оптимальной чувствительности волокон и волоконных брэгговских решеток к температуре и деформации, а второе – программные – для прецизионной обработки сигналов о центральных длинах 2λ -АВБС, из которых извлекается информация о физических воздействиях.

К существующим конструктивным решениям можно отнести следующие:

- использование 2λ -АВБС, записанных в двух разных волокнах с разными диаметрами;
- использование различных видов записи 2λ -АВБС различных типов – в сердцевине, в оболочке, в сердцевине и оболочке круглого волокна, а также на поверхности шлифованного D-волокна;
- использование германосиликатных и боросиликатных волокон при записи 2λ -АВБС в каждом отдельно.

Однако эти подходы требуют много времени и высокого уровня квалификации специалистов для их реализации.

Существующие программные решения основаны на том, что точность определения температуры и деформации прямо пропорциональна погрешности в определении положения резонансных пиков 2λ -АВБС и обратно пропорциональна разнице их температурных коэффициентов чувствительности [25]. По данному утверждению можно оценивать нижний предел по точности определения температуры и деформации. Он определяется точностью нахождения положения центральных длин волн решеток, составляющих 2λ -АВБС, которая, в свою очередь, обеспечивается применяемым интеррогатором. К известным решениям относятся применение полуэмпирической теории Гоша, линейной, линейной с учётом перекрестного коэффициента чувствительности и квадратичной моделей для получения соотношения для расчёта погрешности одновременного определения деформации и температуры методом двух оптических волокон. При использовании нелинейной модели получено повышение точности измерений в два раза выше для результатов, полученных с использованием оптико-электронного интеррогатора и ВБР [25-27]. Для 2λ -АВБС и радиофотонных интеррогаторов, такие оценки не проводились, что является направлением дальнейших исследований по данной тематике.

Суть метода двух волокон удобно рассмотреть на примере подбора параметров пары волокон. Примем, что изменение центральной длины волны 2λ -АВБС вследствие изменения температуры и деформации можно представить в виде суммы независимых функций [25-27]. Введем относительные сдвиги центральных длин волн каждой из 2λ -АВБС: $\Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1}$ и $\Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2}$ относительно изменения температуры ΔT и деформации $\Delta\epsilon$ (относительное удлинение).

Составим систему уравнений, описывающую изменения резонансных длин волн 2λ -

АВБС с учетом коэффициентов линейного расширения по температуре и деформациям $K_{T1,2}$; $K_{\varepsilon1,2}$ для двух различных волокон:

$$\begin{cases} \Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} = K_{T1}\Delta T + K_{\varepsilon1}\Delta\varepsilon \\ \Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2} = K_{T2}\Delta T + K_{\varepsilon2}\Delta\varepsilon \end{cases} \quad (11)$$

и получим матрицу коэффициентов чувствительности в виде:

$$M = \begin{pmatrix} K_{T1} & K_{\varepsilon1} \\ K_{T2} & K_{\varepsilon2} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

Все коэффициенты чувствительности можно описать через оптические и оптомеханические свойства материалов, из которых изготовлены волокна, и которые известны. Таким образом, выбор пары волокон с 2λ -АВБС заключается в вариации типа волокна и спектрального диапазона работы системы опроса, используемого на практике. Для радиофотонных интеррогаторов это может быть узкополосная система (3-5 нм) по сравнению с широкополосной (100 нм) оптоэлектронных. В результате, подобрав пару волокон с 2λ -АВБС можно определить и деформацию, и температуру одновременно, с высокой чувствительностью и точностью.

Точность измерений температуры и деформации с использованием любого из этих вариантов в основном зависит от обусловленности системной матрицы, которая формируется чувствительностью датчика к деформации и температуре, а также разрешением по длине волны интеррогатора [25-27]. К сожалению, 2λ -АВБС сами по себе не образуют хорошо обусловленную системную матрицу, поскольку чувствительность их ВБР компонент к деформации и температуре на стандартных рабочих длинах волн изменяется очень мало, что приводит к большим числам состояний, которые, в свою очередь, вносят большие ошибки в измеренные значения. Однако можно частично компенсировать ошибки в плохо обусловленной системе датчиков с помощью методов измерения длины волны с высоким разрешением. К таким методам относятся радиофотонные [13, 14, 22], которые мы и применили, поскольку они обусловлены применением 2λ -АВБС.

Заключение

Данное исследование успешно продемонстрировало новый метод опроса двух 2λ -АВБС в структуре термокомпенсированного датчика гидростатического давления и уровня жидкости мембранного типа. Данный датчик разработан для повышения чувствительности и точности измерения давления и компенсации влияния температуры. Чувствительность измерения уровня жидкости составляет 0,26 пм/мм при увеличении отношения сигнал/шум измерений до 7 раз. Последний фактор отдельно не обоснован в работе, поскольку хорошо освещен в работах [15-19] и свойственен практически любым радиофотонным методам, которые используют обработку информации в радиодиапазоне на частоте биений двухчастотных сигналов. Интеррогатор для гидростатического датчика уровня жидкости может содержать только фотоприемник с установленным перед ним фильтром с линейной АЧХ, что повышает его экономическую эффективность по сравнению с другими известными вариантами датчиков мембранного типа регистрирующих спектральные характеристики их брэгговских элементов по постоянному току. Рассмотренные варианты компенсации температуры позволяют определить направления дальнейших исследований по теме работы.

Работа выполнена за счет предоставленного в 2025 году Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и поисковых исследований в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

Список литературы

1. Morais, E. Liquid Level Sensor with Two FBGs Embedded in a PDMS Diaphragm: Analysis of the Linearity and Sensitivity / E. Morais, M.J. Pontes, C. Marques, et al. // *Sensors*. – 2022. – 22. – 1268. <https://doi.org/10.3390/s22031268>
2. Lee, B.H. Interferometric fiber optic sensors / B.H. Lee, Y.H. Kim, K.S. Park et al. // *Sensors*. – 2012. – 12. – 2467-2486.
3. Diaz, C.A.R. Optical fiber sensing for sub-millimeter liquid-level monitoring: A review. / C.A.R. Diaz, A. Leal-Junior, C. Marques et al. // *IEEE Sens. J.* – 2019. – 19. – 7179-7191.
4. Hill, K.O. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview / K.O. Hill, G. Meltz // *J. Light. Technol.* – 1997. – 15. – 1263-1276.
5. Leal-Junior, A. A fiber Bragg gratings pair embedded in a polyurethane diaphragm: Towards a temperature-insensitive pressure sensor / A. Leal-Junior, A. Frizzera, C. Marques // *Opt. Laser Technol.* – 2020. – 131. – 106440.
6. Liang, M.F.; Fang, X.Q.; Wu, G.; Xue, G.Z.; Li, H.W. A fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation based on diaphragm-cantilever structure / M.F. Liang, X.Q. Fang, G. Wu et al. // *Optik*. – 2017. – 145. – 503-512.
7. Liang, M. Temperature compensation fiber Bragg grating pressure sensor based on plane diaphragm / M. Liang, X. Fang, Y. Ning // *Photonic Sens.* – 2018. – 8. – 157-167.
8. Huang, J. A diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation. / J. Huang, Z. Zhou, X. Wen, D. Zhang // *Measurement*. – 2013. – 46. – 1041-1046.
9. Leal-Junior, A.G. Thermal and mechanical analyses of fiber Bragg gratings-embedded polymer diaphragms / A.G. Leal-Junior, A. Frizzera, C. Marques / *IEEE Photonics Technol. Lett.* // 2020. – 32. – 623-626.
10. Song, D. Liquid-level sensor using a fiber Bragg grating and carbon fiber composite diaphragm / D. Song, J. Zou, Z. Wei et al. // *Opt. Eng.* – 2011. – 50. – 014401.
11. Her, S.C. Fiber Bragg Grating Pressure Sensor Integrated with Epoxy Diaphragm / S.C. Her, S.Z. Weng // *Sensors*. – 2021. – 21. – 3199.
12. Lipatnikov K.A. The concept of constructing liquid level control systems based on addressable fiber Bragg structures / K.A. Lipatnikov, A.A. Kuznetsov, P.E. Denisenko, A.D. Proskuryakov // *Proc. SPIE 11793, Optical Technologies for Telecommunications 2020, 117930S* (22 June 2021). doi: 10.1117/12.2593198
13. Мисбахов Р. Ш. Комбинированные двухкомпонентные многоадресные волоконные брэгговские структуры / Р. Ш. Мисбахов, В. И. Артемьев, О. Г. Морозов и др. // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. – 2024. – № 2(62). – С. 57-73. – DOI: 10.25686/2306-2819.2024.2.57. – EDN: DCIMOА.
14. 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(46). – С. 24. – EDN: ZWZEGR.
15. Il'in G.I. Theory of symmetrical two-frequency signals and key aspects of its application / G.I. Il'in, O.G. Morozov and A.G. Il'in // *Proc. of SPIE*. – 2014. – Vol. 9156. – P. 91560M.
16. Morozov O.G. Two-frequency analysis of fiber-optic structures / O.G. Morozov, D.L. Aibatov, G.I. Il'in et al. // *Proc. of SPIE*. – 2006. – Vol. 6277. – P. 62770E.

17. Morozov O.G. Two-frequency scanning of FBG with arbitrary reflection spectrum / O.G. Morozov, D.L. Aybatov // Proc. of SPIE. – 2007. – Vol. 6605. – P. 660506.
18. Morozov O.G. Methodology of symmetric double frequency reflectometry for selective fiber optic structures / O.G. Morozov, O.G. Natanson, D.L. Aybatov et al. // Proc. of SPIE. – 2008. – Vol. 7026. – P. 70260I.
19. Morozov O.G. Metrological aspects of symmetric double frequency and multi frequency reflectometry for fiber Bragg structures / O.G. Natanson, D.L. Aybatov, V.P. Prosvirin et al. // Proc. of SPIE. – 2008. – Vol. 7026. – P. 70260J.
20. Borese A. P. Advanced Mechanics of Materials / A. P. Borese and R. J. Schmidt // New York, NY, USA: Wiley, 1993. – Vol. 5. – P. 6-7.
21. Ge J. Bidirectional Soft Silicone Curvature Sensor Based on Off-Centered Embedded Fiber Bragg Grating / J. Ge, A. E. James, L. Xu et al. // IEEE Photonics Technology Letters. – 2016. – Vol. 28. – no.20. – P.2237-2240. – doi: 10.1109/LPT.2016.2590984.
22. Морозов О.Г. Амплитудно-фазовая модуляция в системах радиофотоники / О.Г. Морозов, Г.И. Ильин // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2014. - №1(20). - С. 6-42.
23. Morozov O.G. External amplitude-phase modulation of laser radiation for generation of microwave frequency carriers and optical poly-harmonic signals: an overview / O.G. Morozov, G.I. Il'in, G.A. Morozov et al. // Proc. of SPIE. – 2016. – Vol. 9807. – P. 980711.
24. Morozov O.G. RZ, CS-RZ, and soliton generation for access networks applications: problems and variants of decisions / O.G. Morozov // Proc. of SPIE. – 2012. – Vol.8410. - P. 84100P.
25. Федотов, М. Ю. Теоретические исследования встроенной волоконно-оптической системы контроля деформации и температуры полимерных композитов / М. Ю. Федотов // Контроль. Диагностика. – 2023. – Т. 26, № 5(299). – С. 14-25. – DOI 10.14489/td.2023.05. – P.014-025.
26. Федотов, М. Ю. Особенности создания системы одновременного встроенного контроля деформации и температуры композитных конструкций волоконно-оптическими датчиками / М. Ю. Федотов // Космические аппараты и технологии. – 2023. – Т. 7, № 1(43). – С. 24-34. – DOI 10.26732/j.st.2023.1.03.
27. Федотов М.Ю. Теоретические аспекты калибровки и оценки погрешностей волоконно-оптической системы диагностики полимерных композитов // Конструкции из композиционных материалов. – 2023. – № 2(170) . – С. 43-51. – DOI 10.52190/2073-2562_2023_2_43.

A THERMOCOMPENSATED HYDROSTATIC MEMBRANE-TYPE LIQUID LEVEL SENSOR WITH TWO INTEGRATED ADDRESS FIBER BRAGG STRUCTURES

*A.D. Proskuryakov, L.Yu. Zaitsev, A.L. Bamburkina, I.I. Nureyev,
E.V. Belov, K.A. Lipatnikov, N.A. Petrov*

10, K. Marx str., Kazan, 420111, Russian Federation

Abstract. A hydrostatic liquid level sensor is proposed using two addressable wave-type fiber Bragg structures (2λ -AFBS) embedded in a membrane to improve the sensitivity and accuracy of pressure measurement. To compensate the temperature effects, sensor variants are proposed that incorporate 2λ -AFBS sensor data into fibers with different doping additives or incorporate an additional 2λ -AFBS into the sensor structure, providing readings independent of liquid level. This innovative sensor, using microwave photonic interrogation methods, provides a level measurement sensitivity of 0.26 pm/mm while increasing the signal-to-noise ratio by up to 7 times. In the maximum configuration, all three 2λ -AFBS have a single central Bragg wavelength and different address frequencies, enabling their identification when interrogated from a single combining fiber and demonstrating the potential for achieving a higher level of multiplexing both within a single monitored vessel and across multiple ones.

Keywords: wave-type addressable fiber Bragg structure, hydrostatic pressure, liquid level, pressure sensor, multiplexing, temperature compensation, temperature sensor, dual-fiber method.

Статья представлена в редакцию 26 декабря 2025 г.