

РАДИОФОТОННЫЙ СЕНСОР КОНСОЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА

А.А. Потанин

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

Аннотация. Представлен радиофотонный сенсор консольного типа для измерения расхода жидкости, основанный на использовании пары волоконно-брэгговских решёток, закреплённых на внутренней поверхности полой цилиндрической консоли. Рассмотрены возможности применения адресных волоконно-брэгговских структур для определения направления и неустойчивости потока, а также обозначена проблема измерения малых расходов.

Ключевые слова: радиофотонный сенсор, волоконная брэгговская решётка, расходомер.

Введение

Измерение расхода жидкости является важной задачей в различных отраслях промышленности. Существующие механические расходомеры часто обладают недостаточной точностью, подвержены износу и требуют сложного обслуживания. Волоконно-оптические расходомеры (ВОР) на основе волоконно-брэгговских решёток (ВБР) предлагают альтернативное решение, обладающее преимуществами высокой чувствительности, электромагнитной совместимости и возможности дистанционного измерения.

Материалы и методы

Для измерения расхода жидкости был предложен ВОР зондового типа, показанный на рисунке 1, а [1]. Полая цилиндрическая консоль (Рис. 1, б) была впервые использована для измерения силы, создаваемой жидкостью, без усилителя нагрузки. Пара ВБР, приклеенных к внутренней стенке, использовалась для измерения деформации консоли. Скорость потока можно получить, отслеживая разницу двух сдвинутых длин волн Брэгга, как изображено на рисунке 1, в.

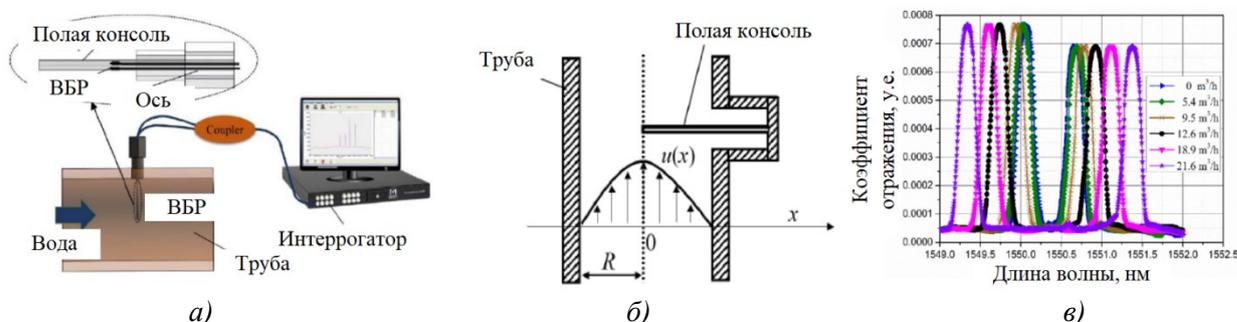


Рис. 1. Структура типового ВОР дифференциального давления: а) ВОР зондового типа, б) цилиндрическая консоль, в) спектр отражения ВБР

Результаты

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 передаётся 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:

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

где r – радиальный размер от центра трубопровода, V – средний расход, R – радиус трубопровода как показано на рисунке 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:

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

где ρ – плотность жидкости. Таким образом, сила, действующая на консоль с мишенью диаметра d может быть выражена как:

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

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

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

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 :

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

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

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

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

Кроме того, объёмный расход можно описать как:

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

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

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

Приведённое выше уравнение представляет собой теоретическое соотношение между разностью двух сдвинутых длин волн Брэгга и объёмным расходом. Проблема перекрёстной чувствительности датчиков ВБР также решалась с помощью дифференциального метода измерения. В отличие от предыдущего расходомера несимметричность по амплитуде и разные центральные длины волн ВБР, замена ВБР на АВБС, использования АВБС различного типа [2, 3] в схеме 4-х волоконного ортогонального типа позволяют определять направление и нестабильность потока. Однако, остаётся не решённой проблема малых расходов.

Заключение

В данной работе рассматривается конструкция ВОР зондового (консольного) типа, в которой полая цилиндрическая консоль с двумя симметрично закреплёнными ВБР используется для преобразования кинетической энергии потока в деформацию, регистрируемую по сдвигу брэгговских длин волн. Дифференциальный метод измерения позволяет компенсировать влияние температуры и повысить точность определения расхода.

Список литературы

1. Потанин, А.А. Волоконно-оптические дифференциальные расходомеры на двух волоконных брэгговских решетках. Определение направлений развития /А.А. Потанин // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2023. – Т. 3. – № 1. – С. 29-41.
2. 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.
3. Мисбахов, Р.Ш. Комбинированные двухкомпонентные многоадресные волоконные брэгговские структуры / Р.Ш. Мисбахов, Е.В. Куликов, В.И. Артемьев и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2024. – Т. 2. – № 62. – С. 57-73.

CANTILEVER TYPE MICROWAVE PHOTONICS SENSOR FOR FLOW MEASUREMENT

A.A. Potanin

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation

Abstract. A cantilever-type microwave photonics sensor for fluid flow measurement based on a pair of fiber Bragg gratings attached to the inner surface of a hollow cylindrical cantilever is presented. The potential use of addressed fiber Bragg structures for determining flow direction and instability is considered, and the problem of low flow rate measurement is highlighted.

Keywords: microwave photonics sensor, fiber Bragg gratings, flowmeter.

Статья представлена в редакцию 23 декабря 2025 г.