

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

О.Г. Бабаев,

Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва

Московское шоссе, 34,
г. Самара, Российская Федерация,
443086

orbaev@yandex.ru

В статье рассмотрены вопросы создания волоконно-оптического датчика давления для осуществления дистанционного мониторинга параметров пневмо- и гидромагистралей, предназначенных для транспортировки пожаро-взрывоопасных сред (горючих газов, жидкостей), или пневмогидравлических систем, эксплуатируемых в пожаро-взрывоопасных условиях. Предложенное решение не требует взрывозащищённого исполнения и использует наиболее простые в плане технологического процесса производства упругие чувствительные элементы и оптический модулятор поляризметрического типа. Описан принцип действия волоконно-оптического датчика давления, приведена структурная схема его первичного и вторичного преобразователей, разработана трёхмерная модель датчика, в соответствии с которой изготовлен экспериментальный образец датчика и разработан стенд для его исследования. Для экспериментального образца определен рабочий участок функции преобразования 3,5...6,5 бар, среднее значение чувствительности 0,061 мВт/бар (4,97 дБм/бар), при этом разброс регистрируемой оптической мощности между кривыми на рабочем участке не превышает 2,62 %. Для обеспечения более высоких метрологических характеристик датчика даны соответствующие конструкторские рекомендации.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик давления; пожаровзрывобезопасность; пневматика; гидравлика; упругий чувствительный элемент; поляризатор; градиентная линза; функция преобразования

1 Введение

В настоящее время происходит постепенное внедрение волоконно-оптических датчиков в системы контроля промышленных исполнительных механизмов, агрегатов и установок в авиационной и космической отрасли, в системы контроля целостности сооружений, а также в нефте- и газоперерабатывающей отраслях по причине их принципиальной искро-пожаро-взрывобезопасности, нечувствительности к электромагнитным помехам и, в ряде случаев, работоспособности в широком диапазоне температур и условиях повышенной радиации в отличие от широко распространенных датчиков, использующих полупроводниковую элементную базу и требующих взрывозащищённого

исполнения, бронирования подключаемых кабелей [1-5].

Однако большая часть существующих волоконно-оптических датчиков давления жидкостей и газов реализована на физических принципах, использующих волоконно-оптические решетки Брэгга или резонаторы Фабри-Перро, их производство представляет значительную технологическую сложность, поскольку требует использования дорогостоящего оборудования [6-13]. Кроме того, датчики подобного типа используют непосредственное механическое воздействие измеряемой физической величины на оптическое волокно, длительное напряженно-деформированное состояние оптического волокна, что повышает риск их выхода из строя по причине усталостного разрушения оптического волокна. В конечном счете волоконно-оптические датчики данных типов, основанных на

измерении спектра проходящего или отраженного оптического сигнала, значительно дороже датчиков на полупроводниковой элементной базе. Кроме того, оснащение такими датчиками предполагает использование в качестве вторичной измерительной аппаратуры дорогостоящих оптических спектрометров, интеррогаторов, имеющих значительные габариты, вес, чувствительных к внешним механическим воздействиям (ударные нагрузки, вибрации) и характеризующихся малым быстродействием и малым числом измерительных каналов.

В тоже время существуют сравнительно более простые в плане технологического процесса производства волоконно-оптические датчики поляризметрического типа, основанные на измерении интенсивности оптического излучения, проходящего через поляризаторы и/или оптически активные материалы, с изменяющимся под воздействием измеряемой физической величины (магнитное, электрическое поля, давление и т.п.) положением плоскости поляризации. Преимущество таких датчиков заключается в возможности использования упругого чувствительного элемента для преобразования измеряемой физической величины (давления) в поворот одного из поляризаторов, а соответственно и плоскости поляризации проходящего оптического излучения. Таким образом, осуществляется развязка между измеряемой физической величиной (давлением) и оптическим чувствительным элементом. В таких датчиках отсутствует деформирующее воздействие на оптическое волокно или иные оптические элементы измерительной системы, что значительно увеличивает надежность и срок службы датчика [1, 3, 4].

2 Принцип действия волоконно-оптического датчика давления

Общая структурная схема волоконно-оптического датчика давления (ВОДД) представлена на рисунке 1. ВОДД состоит из

первичного и вторичного преобразователей, которые могут быть разнесены на значительное расстояние и соединяются посредством волоконно-оптической линии связи (ВОЛС). Первичный преобразователь (ПП) осуществляет непосредственное преобразование давления жидкости или газа в линии в модуляцию интенсивности оптического излучения. Вторичный преобразователь (ВП) осуществляет преобразование выходной интенсивности оптического излучения первичного преобразователя в электрический аналоговый сигнал.

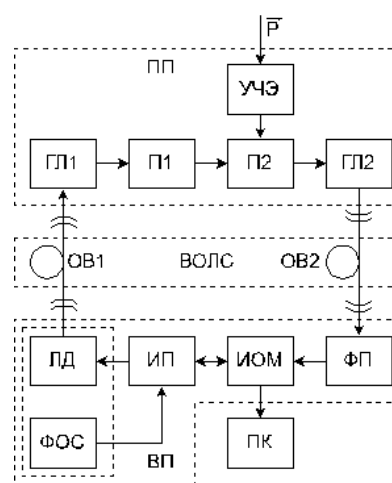


Рисунок 1. Структурная схема ВОДД

ПП заключен в отдельный корпус и включает в себя следующие элементы: излучающая градиентная линза (ГЛ1), формирующая на выходе отрезка входного оптического волокна (ОВ1) коллимированный пучок света; неподвижный поляризатор (П1) для селекции из входного оптического излучения составляющей с углом наклона плоскости поляризации, обеспечивающим наибольшую мощность излучения на выходе П1; вращающийся поляризатор – анализатор (П2), модулирующий интенсивность проходящего через него оптического излучения и приводимый во вращение упругим чувствительным элементом (УЧЭ); приемная градиентная линза (ГЛ2) для ввода модулированного оптического излучения в отрезок выходного оптического волокна

(ОВ2). Для преобразования гидростатического давления в поворот поляризатора используется упругий чувствительный элемент (УЧЭ) в виде трубки Бурдона с передаточно-множительным механизмом, на оси которого закреплен анализатор П2, модулирующий интенсивность проходящего оптического излучения. Выбором конфигурации УЧЭ (чувствительности трубки Бурдона) осуществляется изменение чувствительности ВОДД и диапазона измеряемых им давлений с целью обеспечения максимальной чувствительности и/или максимального динамического диапазона, в пределах которого изменяется интенсивность выходного оптического излучения. Стоит также отметить, что поляризаторы П1 и П2 могут быть переставлены местами без изменения функции преобразования датчика.

ВП также заключен в отдельный корпус и включает в себя следующие элементы: лазерный диод (ЛД) со встроенным фотодиодом обратной связи (ФОС) и волоконным выводом, питающий ПП; источник питания (драйвер) лазерного диода (ИП), обеспечивающий стабилизацию выходной оптической мощности ЛД по сигналу ФОС; фотоприемник (ФП), регистрирующий интенсивность оптического излучения на выходе ПП; измеритель оптической мощности (ИОМ), в качестве которого может использоваться отдельный измерительный блок, либо микроконтроллер с аналогово-цифровым преобразователем, который может также осуществлять регулирование обратной связи для стабилизации входной оптической мощности ЛД. В случае лабораторного стенда могут использоваться цифровой вольтметр или осциллограф. Полученные ИОМ измерения записываются в оперативную память персонального компьютера (ПК) или могут использоваться промышленным логическим контроллером (ПЛК) для дальнейшей обработки и

принятия на их основе решений по управлению контролируемым объектом.

ВОЛС состоит из двух длинных отрезков оптического волокна типа патч-корд, оконцованных с обеих сторон оптическими разъемами, которые подключаются к ОВ1, ОВ2. ОВ1 служит для ввода излучения ЛД в первичный преобразователь, ОВ2 – для вывода модулированного оптического излучения в ФП вторичного преобразователя.

3 Параметры первичного преобразователя

Основными элементами, параметры которых влияют на чувствительность ВОДД, являются УЧЭ и оптического чувствительного элемента (ОЧЭ), состоящего из пары скрещивающихся поляризаторов П1, П2. В общем случае УЧЭ представляет собой трубку Бурдона и передаточно-множительный механизм, закрепленные на общем основании. Передаточно-множительный механизм представляет собой трибосекторную передачу, в состав которой входят зубчатый сектор и ось, изготовленная заодно с малым зубчатым колесом (триб) [14, 15]. Статическая характеристика этого механизма, т.е. зависимость угла поворота оси от угла поворота сектора, представляющего собой одно целое с кривошипом, является линейной (1):

$$\varphi = i_{з.п.} \cdot \alpha, \quad (1)$$

где: φ и α – углы поворота оси поляризатора и сектора, соответственно;

$i_{з.п.}$ – передаточное отношение зубчатой передачи.

Для проектирования зубчатого механизма необходимо знать начальный угол поворота поляризатора относительно анализатора φ , который зависит от конструкции ОЧЭ и метрологических требований, предъявляемых к ВОДД.

Интенсивность света на выходе оптического чувствительного элемента в общем виде определяется зависимостью (2):

$$I_{\text{вых}} = c \cdot I_{\text{ex}} \cdot \sin^2(\varphi_{n.a.} + \theta), \quad (2)$$

где c – коэффициент, учитывающий оптические потери в поляризаторе и анализаторе П1 и П2, а также потери на отражение; I_{ex} – интенсивность падающего на поляризатор излучения; $\varphi_{n.a.}$ – начальное угловое отклонение от положения погасания в системе поляризатор-анализатор; θ – угол поворота анализатора относительно поляризатора [4, 5].

Максимальная чувствительность ОЧЭ достигается при $\varphi_{n.a.} = 45^\circ$, но при этом возможный диапазон угловых перемещений уменьшается в 2 раза и составляет 45° (рисунок 2). Однако, необходимо учитывать, что зона от 80° до 90° имеет низкую чувствительность. В случае ее исключения возможный диапазон угловых перемещений составляет 35° .



Рисунок 2. Зависимость интенсивности выходного оптического сигнала от угла поворота анализатора при $\varphi_{n.a.} = 45^\circ$

С целью увеличения данного диапазона, начальный угол между поляризатором и анализатором можно уменьшить до 10° , а максимальное значение ограничить 80° (рисунок 3).

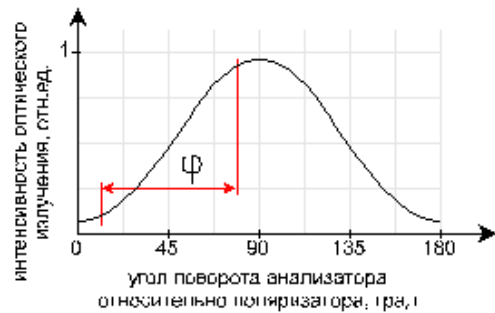


Рисунок 3. Зависимость интенсивности выходного оптического сигнала от угла поворота анализатора при $\varphi_{n.a.} = 10^\circ$

Это позволит исключить зону от 0° до 10° и от 80° до 90° с низкой чувствительностью. При этом диапазон угловых перемещений увеличивается с 35° до 70° , и функция преобразования на данном участке будет представлять собой практически прямую линию. Таким образом, для обеспечения максимальной чувствительности при измерении давления устанавливается начальное угловое отклонение в 45° от положения погасания в системе поляризатор-анализатор, а для обеспечения максимального диапазона измерений угловое отклонение ограничивается в пределах от 10° до 80° , которые достигаются при минимальном и максимальном измеряемом давлении, соответственно. У варианта конструкции с максимальной чувствительностью динамический диапазон меньше в 2 раза, чем у варианта с максимальным диапазоном измерений, а чувствительность (на участке в 5° в начале диапазона измерений) в 2,36 раз выше:

$$\left| \frac{\sin^2(45^\circ) - \sin^2(50^\circ)}{\sin^2(10^\circ) - \sin^2(15^\circ)} \right| \approx 2,36. \quad (3)$$

Однако в конце диапазона измерений чувствительность ОЧЭ у обоих вариантов будет одинаково минимальной. Кроме того, УЧЭ широко распространённых в промышленности манометрических датчиков давления на основе трубок Бурдона имеют невысокую чувствительность и вносят значительно большую погрешность в конечный результат измерений, чем ОЧЭ, поскольку в основных

задачах промышленности не требуется измерять гидравлическое давление с высокой точностью, но есть необходимость в широком диапазоне измеряемых давлений.

4 Конструкция экспериментального образца ВОДД

С учетом вышеприведенных выводов была разработана трёхмерная модель ВОДД (рисунок 4), в соответствии с которой был изготовлен экспериментальный образец датчика (рисунок 5). В качестве УЧЭ используется наиболее распространенная в манометрических измерительных приборах бронзовая одновитковая трубка Бурдона плоскоовального сечения, впаянная в латунный штуцер и оснащенная передаточно-множительным механизмом, обеспечивающая у стрелочных манометров измерение давления до 8 бар и класс точности 2,5. На штуцере через два крепежных отверстия М4х1,0 закреплен вынос, на котором в свою очередь смонтирован подковообразный держатель градиентных линз. В паз держателя со стороны приемной ГЛ2 установлен неподвижный поляризатор П2. На оси триба закреплена оправа вращающегося поляризатора П1, состоящая из основания, в которое уложен поляризатор, и прижимной крышки. В крышке предусмотрен открытый паз для подстройки начального углового положения П1. ГЛ1 приклеена к торцу одномодового ОВ с диаметром сердцевины 9 мкм для формирования узкого пучка оптического излучения, ГЛ2 – к торцу многомодового ОВ с диаметром сердцевины 62,5 мкм для приема максимальной мощности излучения. Поляризаторы выполнены из полимерной поляризационной пленки марки P100 толщиной 0,3 мм. Для измерения мощности оптического излучения используется измеритель оптической мощности FOD 1202. В качестве источника излучения используется лазерный диод Laserscom LDI-FP-650-30-H-3-SM1-FA-CW, установленный на алюминиевый радиатор и

питаемый током 40мА от драйвера лазерных диодов Nolatech DLC-200.

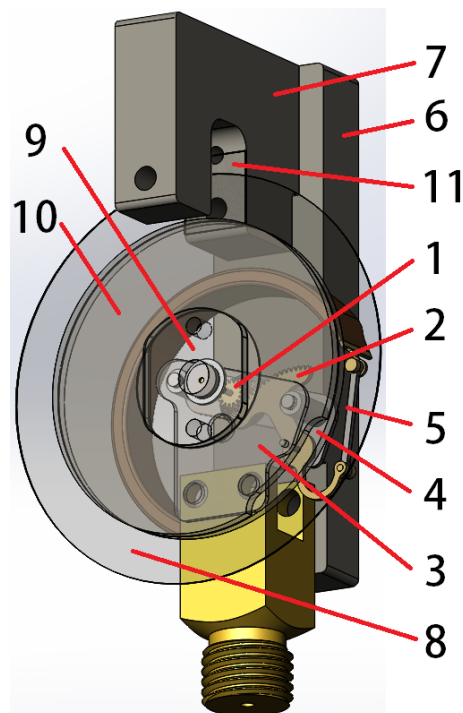


Рисунок 4. 3D-модель экспериментального образца ВОДД: 1 – триб, 2 – сектор, 3 – плата верхняя, 4 – плата нижняя, 5 – тяга, 6 – вынос, 7 – держатель градиентных линз, 8 – вращающийся поляризатор, 9 – основание вращающегося поляризатора, 10 – прижимная крышка вращающегося поляризатора, 11 – неподвижный поляризатор

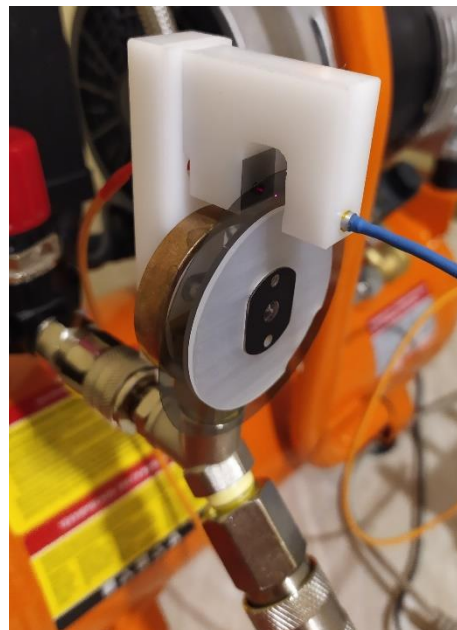


Рисунок 5. Экспериментальный образец ВОДД

5 Экспериментальное исследование ВОДД

Цель эксперимента – определить динамический диапазон и чувствительность экспериментального образца ВОДД. В экспериментальной установке используется компрессор с ресивером для создания давления и пневмопистолет для сжатия воздуха до фиксированных значений по контрольному стрелочному манометру ресивера. Пневматическая принципиальная схема экспериментального стенда приведена на рисунке 6. Для каждого показания стрелочного манометра записывается соответствующее значение мощности выходного оптического сигнала ВОДД. По полученным данным строится кривая функции преобразования «давление – мощность» оптического сигнала. Проводится 5 серий эксперимента, по результатам которых на одном графике строится 5 кривых. Затем определяется разброс измеряемой величины между 5 кривыми и его соответствие заявленному классу точности 2,5 для используемого в датчике УЧЭ. Фотография стенда приведена на рисунке 7.

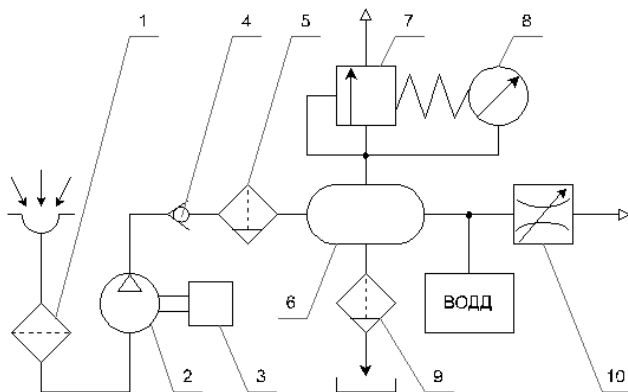


Рисунок 6. Пневматическая принципиальная схема экспериментального стенда, где: 1 – фильтр; 2 – компрессор; 3 – двигатель; 4 – обратный клапан; 5 – фильтр-водоотделитель; 6 – ресивер; 7 – предохранительный клапан; 8 – манометр; 9 – вентиль; 10 – пневмопистолет

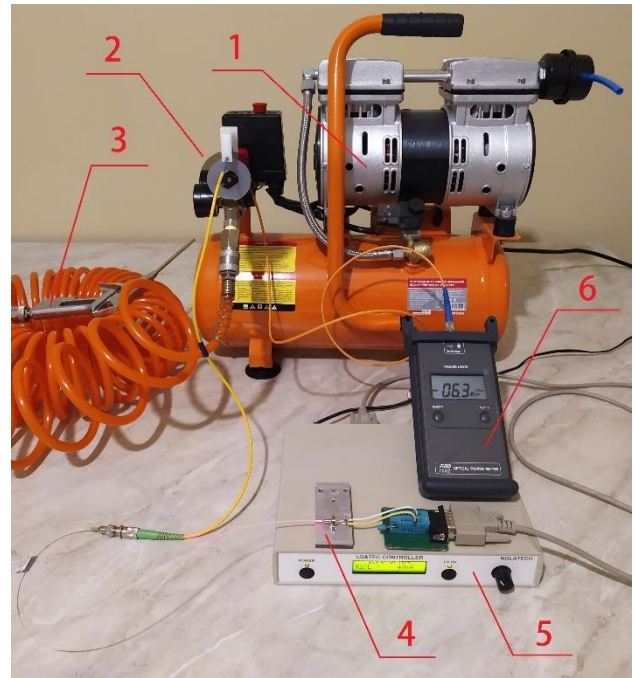


Рисунок 7. Экспериментальный стенд для исследования ВОДД, где: 1 – воздушный компрессор с ресивером; 2 – ВОДД; 3 – пневмопистолет; 4 – ЛД, закрепленный на радиаторе; 5 – драйвер ЛД; 6 – измеритель оптической мощности

На рисунке 8 приведены результаты эксперимента. Согласно экспериментальным данным, рабочий участок функции преобразования, соответствующий максимальному диапазону измерений (углы поворота поляризатора в пределах $10^\circ \dots 80^\circ$, $100^\circ \dots 170^\circ$), составляет 3,5...6,5 бар, среднее значение чувствительности на рабочем участке функции преобразования составляет 0,061 мВт/бар (или 4,97 дБм/бар), при этом разброс регистрируемой оптической мощности между кривыми на рабочем участке не превышает 2,62%, что незначительно больше заявленных 2,5% для используемого в датчике УЧЭ.

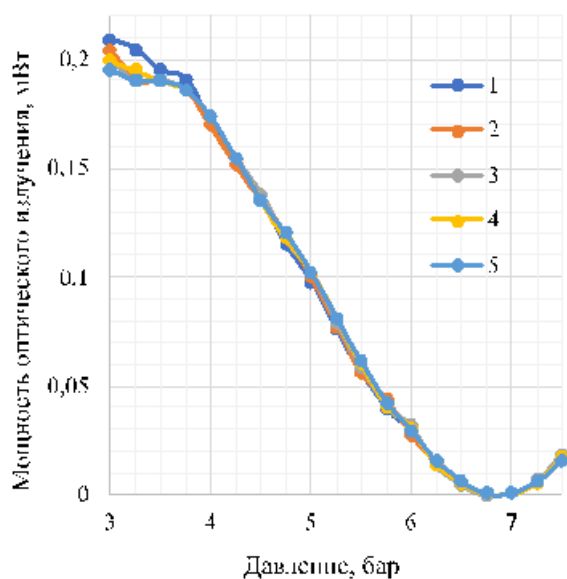


Рисунок 8. Функция преобразования ВОДД, где 1, 2, 3, 4, 5 – серии эксперимента

Данная погрешность обусловлена рядом факторов: сложностью осуществления точного ручного регулирования давления с помощью пневмопистолета и контрольного манометра с классом точности 2,5; слабой повторяемостью углового положения вращающегося поляризатора из-за его значительных габаритов, массы, и недостаточного значения момента, создаваемого волоском передаточно-множительного механизма, что существенно увеличивает инерционность ВОДД. Предполагается, что в дальнейших исследованиях задание точных значений давления будет осуществляться с помощью регулирующей арматуры с электронным управлением. Конструктивный недостаток ВОДД может быть устранен за счет использования вращающегося поляризатора без оправы, однако, в таком случае повышаются требования к плоскостности пленочного поляризатора. Более приемлемый вариант – использование спиральных и винтовых трубок Бурдона без передаточно-множительного механизма либо сильфонов, мембран, мембранных коробок, обеспечивающие прямую передачу момента. В случае реализации дифференциальной схемы измерений с двумя параллельными оптическими

каналами с разными начальными углами между анализатором и поляризатором (0° и 90°) можно минимизировать температурную составляющую погрешности, проявляющуюся главным образом в нестабильности выходной оптической мощности лазерного диода. Данная схема подходит для промышленных условий эксплуатации с изменяющимся вследствие перепадов температуры окружающей среды тепловым режимом работы ВП, и позволяет использовать в качестве источников излучения более простые и дешевые ЛД без ФОС.

5 Заключение

Представленные в статье данные подтверждают возможность создания пожаро-взрывобезопасных датчиков давления для удалённого мониторинга объектов (пневно- и гидромагистралей, предназначенных для транспортировки горючих газов, жидкостей, или пневмогидравлических систем, эксплуатируемых в пожаро-взрывоопасных условиях) на основе известных решений с упругими чувствительными элементами. Выбором конструктивных параметров УЧЭ (тип УЧЭ, материал, из которого изготовлен УЧЭ, геометрические параметры УЧЭ) и ОЧЭ (начальное угловое отклонение от положения погасания в системе поляризатор – анализатор) осуществляется изменение чувствительности ВОДД и диапазона измеряемых ВОДД давлений с целью обеспечения максимальной чувствительности и/или максимального динамического диапазона.

Согласно экспериментальным данным, рабочий участок функции преобразования ВОДД, соответствующий максимальному диапазону измерений (углы поворота поляризатора в пределах $10^\circ \dots 80^\circ$, $100^\circ \dots 170^\circ$), составляет 3,5...6,5 бар, среднее значение чувствительности на рабочем участке функции преобразования составляет 0,061 мВт/бар (или 4,97 дБм/бар), при этом разброс регистрируемой

оптической мощности между кривыми на рабочем участке не превышает 2,62%, что незначительно больше заявленных 2,5% для используемого в датчике УЧЭ и обусловлено конструктивными недостатками экспериментального стенда и образца ВОДД, которые будут устранены в дальнейших исследованиях. Следует также отметить, что экспериментальный образец ВОДД малоприспособен для измерений давления в быстротекущих динамических процессах из-за значительных габаритов, массы и обусловленной этим инерционности вращающегося поляризатора. Поэтому при реализации следующих вариантов ВОДД предлагается использовать облегченную конструкцию вращающегося поляризатора без оправы, а в качестве УЧЭ – спиральные и винтовые трубки Бурдона без передаточно-множительного механизма либо сильфоны, мембраны, мембранные коробки, обеспечивающие прямую передачу момента. Для обеспечения более высоких метрологических характеристик ВОДД рекомендуется дифференциальная схема измерений с двумя параллельными оптическими каналами. Для задания точных значений давления в экспериментальном стенде необходимо использовать регулируемую арматуру с электронным управлением.

Список использованных источников

[1] Udd, E., Spillman, W.B. (2011), *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 512 p.

[2] Fraden, J. (2016), *Handbook of modern sensors: Physics, designs, and applications*, 5th ed., Springer, San Diego, CA, 758 p.

[3] Окоси Т., Окамото К., Оцу М. и др. (1990), *Волоконно-оптические датчики: Пер. с япон.*, 256 с.

[4] Matyunin, S.A., and Babaev, O.G. (2015), “Contactless fiberoptic vibration sensors for explosive manufacturings”, *Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2015, Florence, Italy, July 12-16, 2015*.

[5] Рандошкин, В.В., Червоненкис, А.Я. (1990), *Прикладная магнитооптика*, М.: Энергоатомиздат, 320 с.

[6] Hegde, G., Prasad, M.V.N. and Asokan, S. (2021), “Temperature compensated diaphragm based Fiber Bragg

Grating (FBG) sensor for high pressure measurement for space applications”, *Microelectronic Engineering*, Vol. 248, paper No. 111615.

[7] Liu, L., Li, Y., He, Y., Li, F. and Liu, Y. (2009), “Membrane-based fiber bragg grating pressure sensor with high sensitivity”, *Microwave and Optical Technology Letters*, 51 (5), pp. 1279-1281.

[8] Huang, J., Zhou, Z., Wen, X. and Zhang, D. (2013), “A diaphragm type fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation”, *Measurement*, 46 (3), pp. 1041-1046.

[9] Urban, F., Kadlec, J., Vlach, R. and Kuchta, R. (2010), “Design of a pressure sensor based on optical fiber Bragg grating lateral deformation”, *Sensors*, 10 (12), pp. 11212-11225.

[10] Han, Z., Xin, G., Nan, P., Liu, J., Zhu, J. and Yang, H. (2021), “Hypersensitive high-temperature gas pressure sensor with Vernier effect by two parallel Fabry-Perot interferometers”, *Optik*, 241, paper No. 166956

[11] Pan, R., Yang, W., Li, L., Yang, Y., Zhang, L., Yu, X., Fan, J., Yu, S. and Xiong, Y. (2021), “A High-Sensitive Fiber-Optic Fabry-Perot Sensor with Parallel Polymer-Air Cavities Based on Vernier Effect for Simultaneous Measurement of Pressure and Temperature”, *IEEE Sensors Journal*, 21 (19), pp. 21577-21585.

[12] Yu, Q. and Zhou, X. (2011), *Pressure sensor based on the fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometer* *Photonic Sensors*, 1 (1), pp. 72-83.

[13] Aref, S.H., Latifi, H., Zibaii, M.I. and Afshari, M. (2007), “Fiber optic Fabry-Perot pressure sensor with low sensitivity to temperature changes for down-hole application”, *Optics Communications*, 269 (2), pp. 322-330.

[14] Андреева, Л. Е., *Упругие элементы приборов: 2-е изд.*, М.: Машиностроение, 1981, 392 с.

[15] Усманов, Х.Г., *Проектирование пружинного манометра*, М.: МИИТ, 1972, 31 с.

FIBER-OPTIC SENSOR FOR PRESSURE MEASUREMENT IN PNEUMATIC-HYDRAULIC SYSTEMS

The article discusses the issues of creating a fiberoptic pressure sensor for remote monitoring of the parameters of pneumatic and hydraulic highways intended for the transportation of fire and explosive media (flammable gases, liquids), or pneumatic-hydraulic systems operated in fire and explosive conditions. The proposed solution does not require explosion-proof design and uses elastic sensitive elements and polarimetric optical modulator, which are the simplest in terms of the production process. The principle of operation of a fiber-optic pressure sensor is described, a block diagram of its primary and secondary converters is given, a three-dimensional model of the sensor is developed, according to which an experimental sample of the sensor is made and a stand for its study is developed. For the experimental sample, the working section of the conversion function is 3.5 ...6.5 bar, the average sensitivity value is 0.061 mW/bar (4.97 dBm/bar), the spread of the recorded optical power between the conversion curves in the working section does not exceed 2.62%. To ensure higher metrological characteristics of the sensor, corresponding design recommendations are given.

Keywords: fiber-optic pressure sensor; fire and explosion safety; pneumatics; hydraulics; elastic sensitive element; polarizer; gradient index lens; conversion function

O.G. Babaev

Samara National Research University

34, Moskovskoeshosse, Samara,
443086, Russian Federation

orbavev@yandex.ru

References

- [1] Udd, E., Spillman, W.B. (2011), Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 512 p.
- [2] Fraden, J. (2016), Handbook of modern sensors: Physics, designs, and applications, 5th ed., Springer, San Diego, CA, 758 p.
- [3] Okosi T., Okamoto K., Ocu M. et al. (1990), Fiber Optic Sensors: Transl. from Japan. [Volokonno-opticheskie datchiki: Per. s Yapon.], Jenergoatomizdat, Leningrad, 256 p.
- [4] Matyunin, S.A., and Babaev, O.G. (2015), "Contactless fiber-optic vibration sensors for explosive manufacturings", Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2015, Florence, Italy, July 12-16, 2015.
- [5] Randoshkin, V.V. and Chervonenkis, A.YA. (1990), Applied magneto-optics [Prikladnaya magnitooptika], Energoatomizdat, Moscow, 320 p.
- [6] Hegde, G., Prasad, M.V.N. and Asokan, S. (2021), "Temperature compensated diaphragm based Fiber Bragg Grating (FBG) sensor for high pressure measurement for space applications", Microelectronic Engineer-ing, Vol. 248, paper No. 111615.
- [7] Liu, L., Li, Y., He, Y., Li, F. and Liu, Y. (2009), "Membrane-based fiber bragg grating pressure sensor with high sensitivity", Microwave and Optical Technology Letters, 51 (5), pp. 1279-1281.
- [8] Huang, J., Zhou, Z., Wen, X. and Zhang, D. (2013), "A diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation", Measurement, 46 (3), pp. 1041-1046.
- [9] Urban, F., Kadlec, J., Vlach, R. and Kuchta, R. (2010), "Design of a pressure sensor based on optical fiber Bragg grating lateral deformation", Sensors, 10 (12), pp. 11212-11225.
- [10] Han, Z., Xin, G., Nan, P., Liu, J., Zhu, J. and Yang, H. (2021), "Hypersensitive high-temperature gas pressure sensor with Vernier effect by two parallel Fabry-Perot interferometers", Optik, 241, paper No. 16695.
- [11] Pan, R., Yang, W., Li, L., Yang, Y., Zhang, L., Yu, X., Fan, J., Yu, S. and Xiong, Y. (2021), "A High-Sensitive Fiber-Optic Fabry-Perot Sensor with Parallel Polymer-Air Cavities Based on Vernier Effect for Simultaneous Measurement of Pressure and Temperature", IEEE Sensors Journal, 21 (19), pp. 21577-21585.
- [12] Yu, Q. and Zhou, X. (2011), Pressure sensor based on the fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometer Photonic Sensors, 1 (1), pp. 72-83.
- [13] Aref, S.H., Latifi, H., Zibaii, M.I. and Afshari, M. (2007), "Fiber optic Fabry-Perot pressure sensor with low sensitivity to temperature changes for downhole application", Optics Communications, 269 (2), pp. 322-330.
- [14] Andreeva, L. E. (1981), Elastic elements of instruments: 2nd ed. [Uprugie elementy priborov: 2-e izd.], Mashinostroenie, Moscow, 392 p.
- [15] Usmanov, H.G. (1972), Development of a spring pressure gauge [Proektirovanie pruzhinnogo manometra], MIIT, Moscow, 31 p.