

ОПТОВОЛОКОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Федоров А.Н., Степанов М.А., Шевцов И.А. (ООО «Пролог», Обнинск, Россия),
Тимофеев С.В. (АО «НИКИЭТ», Москва, Россия)

Введение

В настоящее время волоконная оптика не ограничивается только лишь вопросами телекоммуникации. На основе волоконно-оптических технологий активно развивается и волоконная сенсорика, контрольно-измерительные и охранные системы. Одними из самых распространенных волоконно-оптических датчиков (ВОД) являются ВОД на основе решеток Брэгга и на основе волоконно-оптических интерферометров Фабри–Перо. ВОД обладают уникальными свойствами и характеристиками [1, 2], наиболее ценные из которых:

- абсолютная невосприимчивость к электромагнитным полям и помехам;
- возможность работы при температурах $>1400\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- устойчивость к нейтронному и гамма-излучению;
- устойчивость к агрессивным химическим средам;
- отсутствие необходимости в электрическом питании, заземления и гальванической развязке;
- абсолютная пожаробезопасность и взрывобезопасность;
- датчик может находиться на большом расстоянии (десятки километров) от считывающего устройства;
- малое время отклика датчика и малая тепловая инерционность;
- возможность последовательного соединения множества датчиков в одну цепочку;
- широкий измерительный диапазон с высоким разрешением и меньшей погрешностью по сравнению с классическими решениями;
- компактность и малый вес;
- срок службы 20 лет и более, первичная поверка может распространяться на весь срок службы.

ВОД успешно применяются для создания датчиков физических величин: деформации, перемещения, давления, уровня жидкости, температуры, ускорения, вибрации и угла наклона, показателя преломления.

В докладе будут освещены успехи коллектива ООО «Пролог» в применении волоконно-оптических технологий для создания измерительных систем, датчиков на основе Брегговских решеток и волоконных интерферометрах Фабри–Перо, а также вторичной измерительной аппаратуры для них.

1. Решетки Брэгга. Система ИПО-99

1.1. Решетки Брэгга

Волоконная решетка Брэгга (ВБР) представляет собой участок, как правило, одномодового волоконного световода, в сердцевине которого сформирована периодическая структура, образованная модуляцией показателя преломления вдоль оси распространения света (рис. 1).

Внешнее воздействие на решетку, будь то механические продольные деформации или температурные воздействия, будет влиять на ее параметры. В общем виде влияние этих двух факторов на изменение брегговской длины волны $\Delta\lambda_B$ можно представить формулой (1):

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\delta n}{\delta l} + n \frac{\delta \Lambda}{\delta l}\right)\Delta l + 2\left(\Lambda \frac{\delta n}{\delta T} + n \frac{\delta \Lambda}{\delta T}\right)\Delta T \quad (1)$$

Первое слагаемое в (1) учитывает изменения, обусловленные линейной, продольной деформацией Δl , второе – температурные изменения ΔT . Как правило, линейная деформация оказывает существенное влияние на период брегговской решетки, а температура в большей

степени влияет на показатель преломления материала, лишь незначительно меняя период брэгговской структуры.

Чувствительность ВБР к растягивающим/сжимающим силам и к измерению температуры используется для создания датчиков физических величин. Λ – период брэгговской структуры.

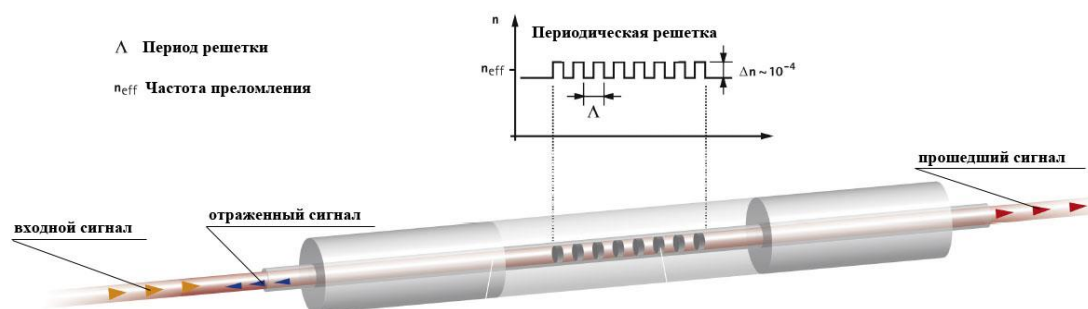


Рис.1. Схематическое изображение структуры ВБР

1.3. Технологии записи ВБР

В ООО «Пролог» созданы и эксплуатируются 2 установки для записи ВБР, работающих на различных принципах (рис. 2). Первой была освоена запись ВБР методом фазовой маски с помощью импульсного ультрафиолетового лазера [1]. Данный метод позволяет записывать решетки в специальные фоточувствительные волокна, которые способны изменять показатель преломления под влиянием ультрафиолетового облучения высокой плотности энергии. Установка эксплуатируется с 2013 года, за это время записано более 5000 ВБР для исследовательских и практических задач.

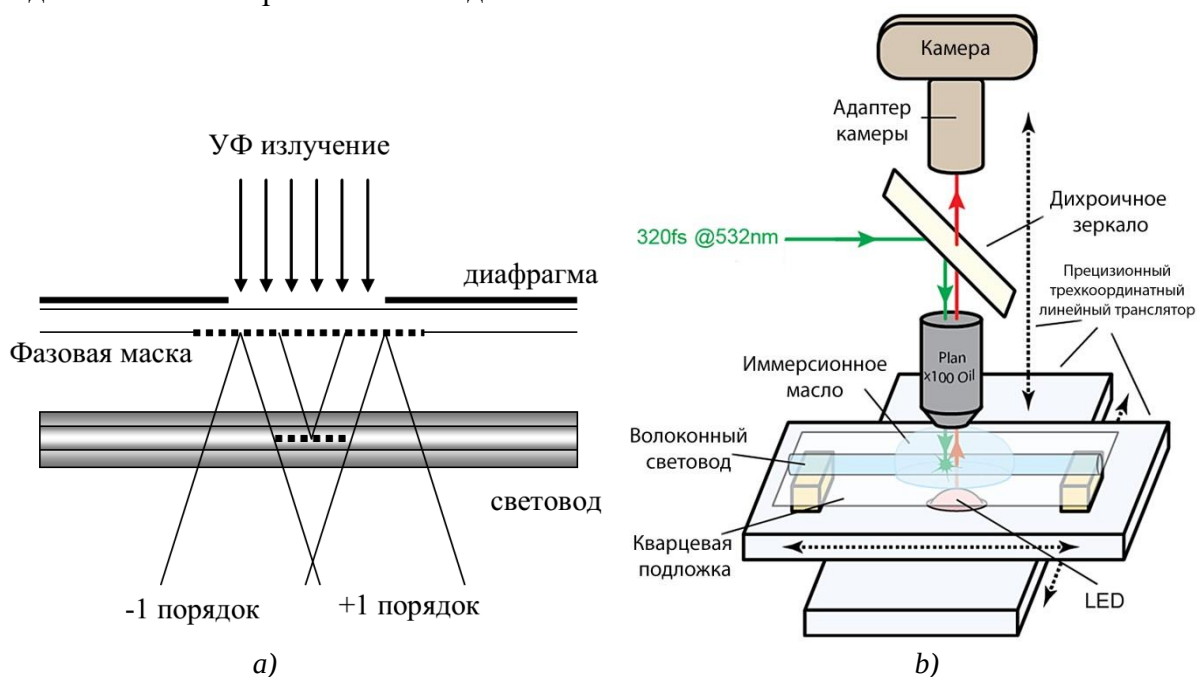


Рис 2. Схемы записи ВБР:

a) фазовая маска, УФ лазер, b) поточечная запись, фемтосекундный лазер.

Вторая установка создана совместно с коллегами из ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН в 2018 году и реализует поточечный метод записи с помощью фемтосекундного лазера [1]. Основным преимуществом данной установки является ее способность записывать ВБР в ОВ, не обладающие фоточувствительностью, что позволило по новому взглянуть на решение старых задач и открыло новые возможности для применения ВБР. В том числе, при помощи нее были записаны решетки для системы ИКС-49М (ИКС-49-2020.02) сохраняющие свою

работоспособность в условиях активной зоны (АЗ) при работе реактора РБМК-1000 на 100% мощности [3].

1.4. Интеррогатор

Применение ВБР в качестве чувствительного элемента предполагает ее опрос при помощи специального устройства. Такие устройства в контексте ВБР обычно называют интеррогаторами (англ. interrogate – допрашивать). Интеррогаторы совмещают в себе источник оптического излучения и анализатор отраженного спектра, что позволяет определять Брегговскую длину волны опрашиваемой решетки.

ООО «Пролог» разработало и производит интеррогатор с узкополосным перестраиваемым источником света (рисунок 3). В состав прибора входит абсолютный эталон длины волны, позволяющий калибровать каждое измерение спектра. В текущей версии интеррогатора отсутствуют оптические компоненты, технологически зависимые от недружественных стран.

Основные характеристики интеррогатора: спектральный диапазон 1500–1600 нм, разрешение 5 пм, погрешность определения длины волны ВБР 1 пм, число одновременно опрашиваемых каналов – 4 с частотой 10Гц, оптический переключатель на 16 каналов.

Созданная оригинальная схема прибора позволила значительно снизить поляризационную зависимость результатов измерения длины волны, благодаря чему удалось значительно увеличить точность измерений систем ИКС-49, ИПО-99 и др.



Рис 3. Фотография интеррогатора ИКС-49.90

1.5 Система ИПО-99

Система контроля деформации корпуса реактора БРЕСТ-ОД-300 на основе ВБР предназначена для определения формы изгиба реперного канала РК, замоналиченного в бетоне №1 КБР РУ БРЕСТ-ОД-300 на стадиях пусконаладочных измерений и эксплуатации РУ.

Результатом определения формы являются измеренные координаты действительной оси реперного канала. Координаты отсчитываются от номинальной оси и представлены в виде массива, каждый элемент которого состоит из трех значений: X, Y и Z. Система будет функционировать на этапах заливки и твердения бетона в КБР, пусконаладочных работах совместно с системами специальных пусконаладочных измерений.

Применение традиционных средств контроля деформации, таких как тензорезистивные датчики, затрудняется условиями, в которых должны производиться измерения: температура

окружающей среды до +550 °С и ионизирующее излучение. Кроме того, срок службы системы должен составлять не менее 10 лет.

В качестве чувствительного элемента системы были выбраны ВБР, записанные в уникальный четырехсердцевинный световод диаметром 2 мм.

Схематично конструкция световода цельностеклянного датчика деформации с записанными ВБР и фотография его торца с подсвеченными зеленым лазером сердцевинами показаны на рисунке 4.

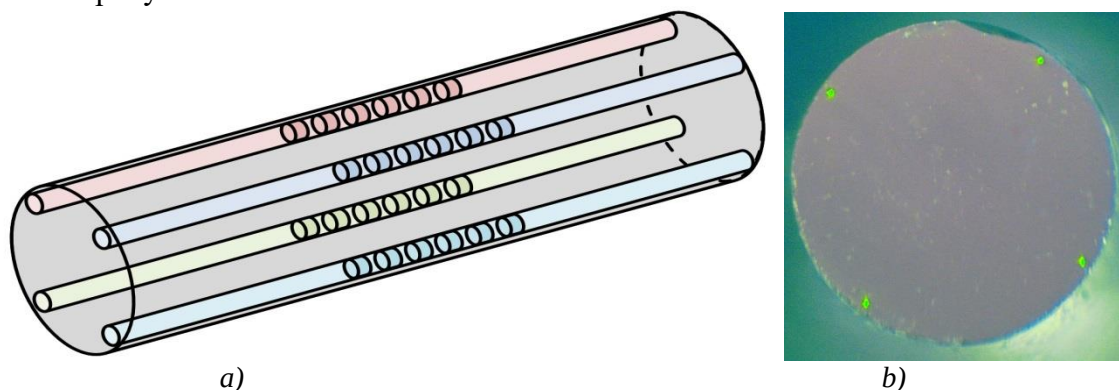


Рис. 4. Структурная схема участка волоконного световода с четырьмя сердцевинами и Брэгговскими решетками (а), фотография торца волоконного световода (б)

На рисунке 5 показан спектр отражения датчика деформации с дифференциальной схемой до приложения к нему изгиба и после. Видно, что растяжению и сжатию подверглись датчики 1 и 2 соответственно, откуда можно определить направление изгиба, если известно их пространственное положение в световоде.

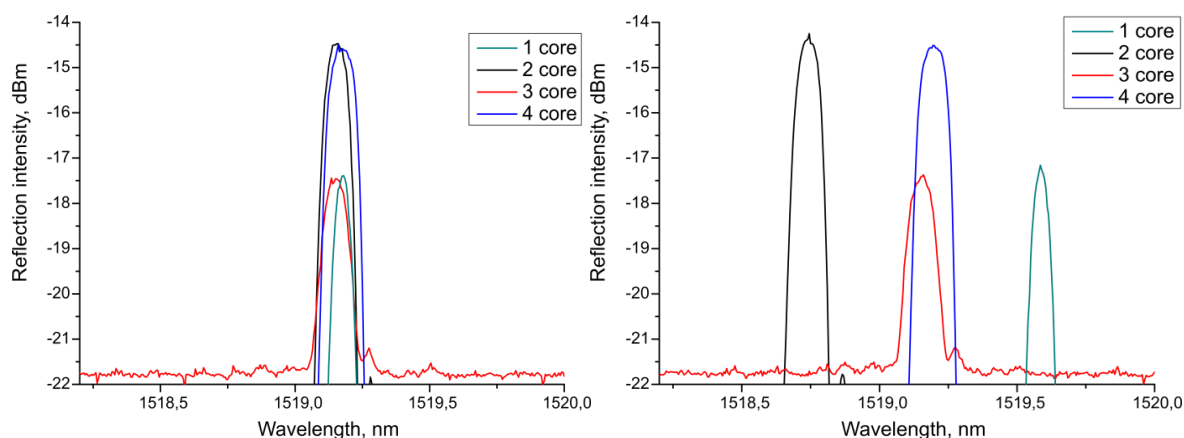


Рис. 5. Спектр датчика по четырем каналам: а) прямой датчик, б) изогнутый датчик

Структурная схема системы представлена на рисунке 6. Основными составными частями системы являются измерительные штанги и измерительно-управляющий блок (ИУБ).

Штанга представляет собой устройство, погружаемое измерительной частью в реперный канал в бетоне КБР. В измерительной части находится оптический световод с четырьмя сердцевинами, в которых при помощи технологии поточечной записи нанесены 104 ВБР – по 26 в каждой из 4 сердцевин. Общая длина измерительной части 13 770 мм. Погрешность определения стрелы прогиба РК ± 5 мм. Световод защищен кожухом по всей длине. На верхней части штанги расположен оптический разъем. ИУБ предназначен для опроса нескольких измерительных штанг, обработки сигнала, сохранения результатов и формирования протокола измерений как в графическом, так и в табличном виде.

Метрологические характеристики системы подтверждены приемочными испытаниями и испытаниями в целях утверждения типа средства измерения.

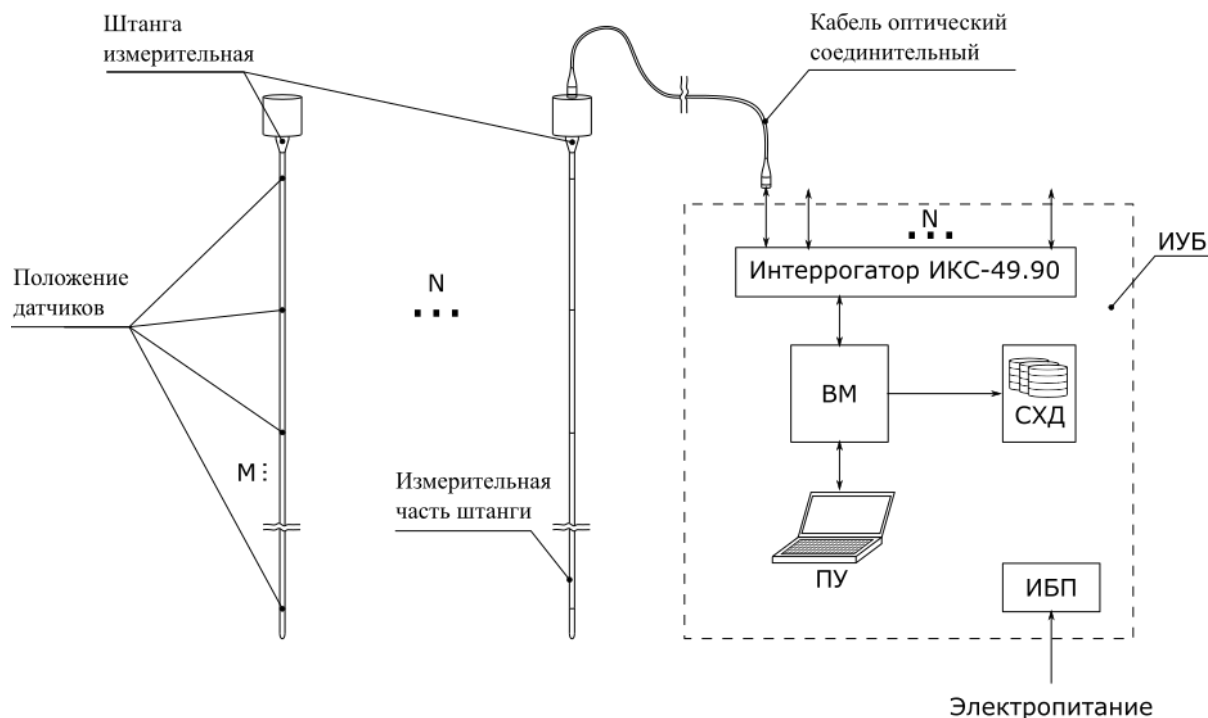


Рис. 6. Структурная схема системы

2. Интерферометр Фабри–Перо. Акселерометр ВД-81

2.1. ВОД на основе интерферометра Фабри–Перо

Не менее интересными представляются чувствительные элементы на основе волоконно-оптических интерферометров Фабри–Перо (ИФП), сформированных двумя зеркалами, одно из которых является торцом волокна, и зазором между ними. Зазор подобных чувствительных элементов измеряется с точностью до единиц нанометров, относительное изменение зазора – с точностью до пикометров. На основе интерферометра Фабри–Перо можно создавать датчики для измерения расстояния, деформации, температуры, показателя преломления и т. д.

2.2. Скоростной демодулятор. 2 способа определения длины зазора

Для опроса ВОД на основе интерферометра Фабри–Перо можно использовать интеррогатор. Интеррогатор позволяет определить абсолютную величину зазора ФП с точностью до единиц нм [1]. К сожалению, частота опроса в таком случае ограничена единицами кГц, что в сочетании с высокой ценой интеррогаторов, определило необходимость создания специального прибора для опроса ВОД ИФП. ООО «Пролог» разработало скоростной прибор ДВО-120 (Демодулятор волоконно-оптический), рисунок 7.



Рис. 7. ДВО-120 Демодулятор волоконно-оптический

Основные характеристики демодулятора: частота измерения зазора ФП до 50 кГц, внешний стандартный выход $\pm 10\text{В}$, возможность работать через оптический переключатель. Более высокая чувствительность к изменению зазора и низкая цена по сравнению с интеррогатором. Режим абсолютного измерения зазора.

2.3 Акселерометр ВД-81, совмещенный со средством доставки

Высокотемпературный акселерометр ВД-81 был создан для измерения величины виброускорения колебаний трубных пучков на стенде парогенератора БРЕСТ-ОД-300.

Устройство доставки и позиционирования обеспечивает позиционирование головки зонда в трубе, вывод кабельных линий, разжатие головки зонда в контролируемом участке трубы с внутренним диаметром 12 мм с заданным усилием, обеспечивающим измерение параметров вибрации трубы. Внешний вид зонда, совмещенного с устройством доставки и позиционирования, показан на рисунке 8.

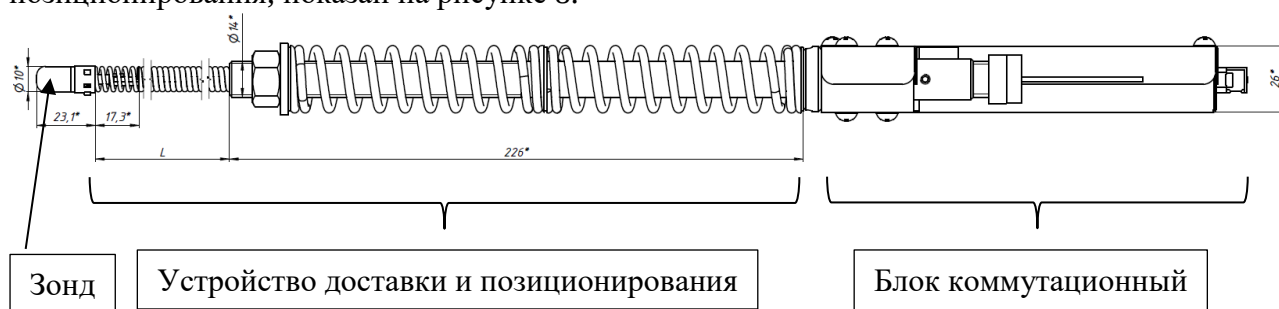


Рис. 8. Внешний вид зонда совмещенного с устройством доставки и позиционирования

Виброизмерительный зонд представляет собой маятник, состоящий из стержневого элемента и гравитационной массы, помещенный в герметичный корпус. Перемещение маятника под действием внешнего вибрационного воздействия вызывает изменение расстояния между маятником и торцом оптического волокна. Зазор между маятником и волокном образует оптический интерферометр Фабри-Перо. Внутреннее устройство зонда поясняет рисунок 9.

Оптическое волокно закрепляется в ферулы, которые располагаются радиально на равном расстоянии вокруг стержневого элемента маятника. Собственная частота маятника 2,5 кГц.

Зонд ВД-81 способен работать при температуре до 650 °С, диапазон измерения ускорения от 0,1 до 50 м/с² в частотном диапазоне от 10 до 500 Гц с нелинейностью не более 10 %. Характеристики подтверждены испытаниями в целях утверждения типа средства измерения.

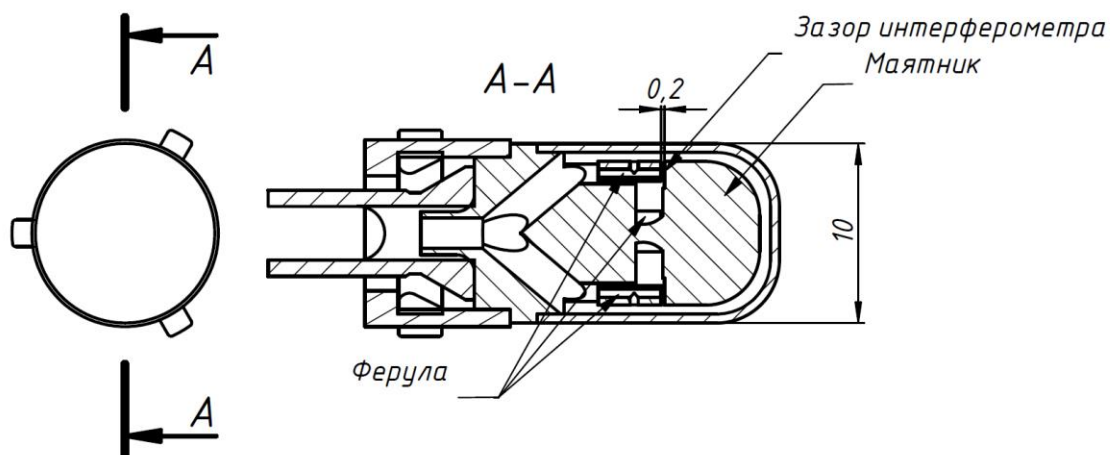


Рис. 9. Внутреннее устройство зонда

3. Тензометр волоконно-оптический ТВО-122

3.1 Постановка задачи

Для системы мониторинга статической нагруженности корпуса блока реакторного РУ БРЭСТ-ОД-300 необходим тензометр бетона с характеристиками, превосходящими существующие промышленные датчики. Рабочий диапазон температур до 500 °С, длина базы датчика ~100 мм, диапазон относительного удлинения/сжатия 2%, погрешность 0,5% от диапазона, погрешность измерения температуры ± 1 °С. Датчики должны иметь возможность объединения в группу из трех шт. Кабельная линия датчиков или группы датчиков должна быть совместима с устройством герметичной проходки.

3.2 Описание устройства датчика

Относительное удлинение 2% – для многих материалов это величина, находящаяся за пределами пластической деформации, тем более, при высоких температурах. Таким образом, создаваемый тензометр волоконно-оптический (ТВО-122) фактически является абсолютным датчиком перемещения с диапазоном $\pm 2,5$ мм. В качестве чувствительного элемента этого датчика был выбран ИФП, дополненный ВБР для измерения температуры. Оба чувствительных элемента используют одно общее оптическое волокно. Подобная конструкция позволила использовать лучшие свойства обеих технологий.

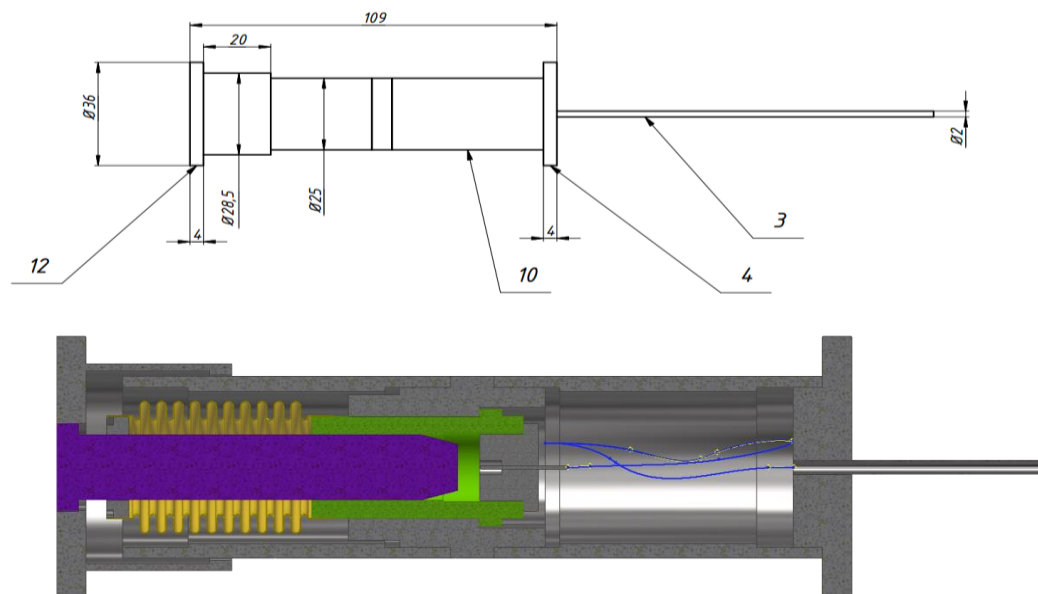


Рис. 10. Габаритный размер и внутреннее устройство ТВО-122

В качестве устройства опроса датчиков ТВО-122 используется интеррогатор ИКС-49.90 с многоканальным переключателем 4x40 для опроса 160 датчиков. Полное обновление значений всех датчиков происходит с частотой 0,25 Гц.

На сегодняшний день макет датчика прошел предварительные заводские испытания, готовится комплект РКД и документы для испытаний УТСИ.

3.3 Экспериментальные данные

Опытный образец датчика ТВО-122 был закреплен в оснастке для задания перемещения. Величину перемещения задавали с помощью микрометрической подвижки с ценой деления 10 мкм. Результат измерения абсолютной величины зазора ФП от величины перемещения подвижки ожидаемо имеет строгую линейную зависимость с отличной повторяемостью. СКО выборки 0,003 мкм.

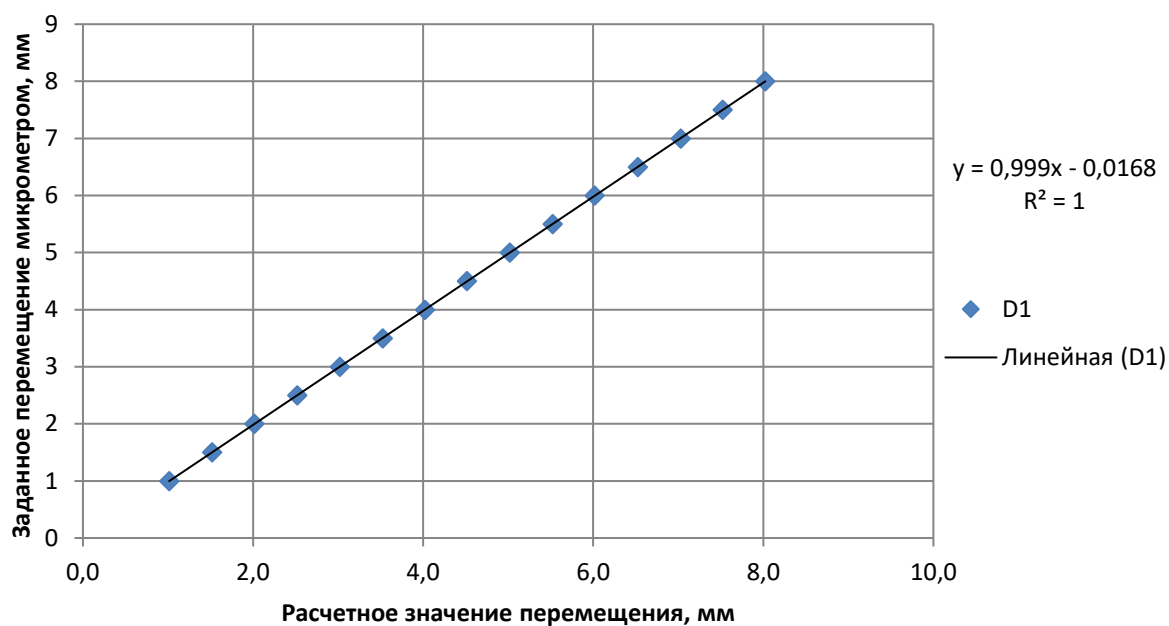
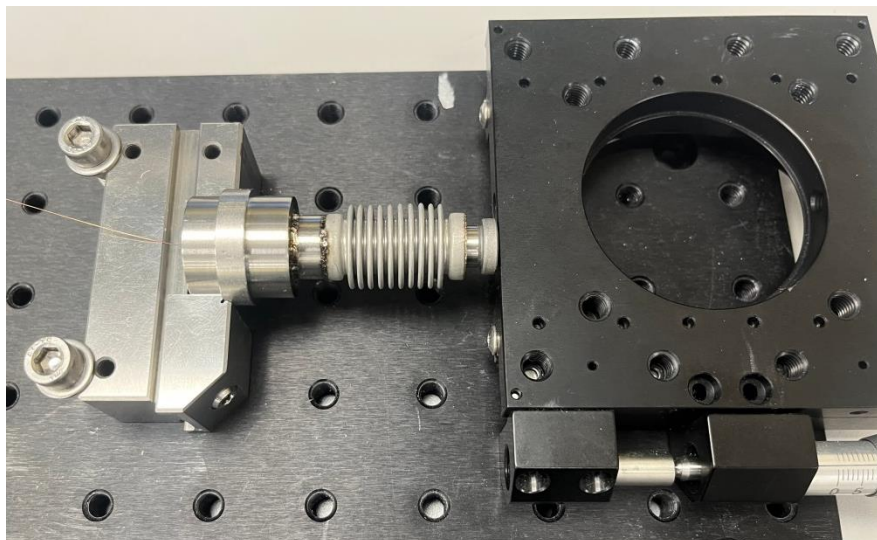


Рис 11. График зависимость заданного от измеренного перемещения

Заключение

Накопленный опыт и технологическая оснащенность ООО «Пролог» в сочетании с характеристиками радиационностойкого оптического волокна позволяет создавать измерительные датчики и системы с уникальными свойствами, работающие в экстремальных условиях высоких температур и полей излучения. Наличие мотивации двигаться вперед помогает решить любые задачи.

Список литературы

1. Udd E. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. – 2nd ed. – 2011.
2. Варжель С.В. Волоконные брэгговские решетки. – СПб: Университет ИТМО, 2015
3. Бутов О.В., Базакуца А.П., Федоров А.Н., Шевцов И.А., Никитов С.А. Создание радиационно стойких волоконно-оптических средств контроля режимов работы и диагностики состояния энергетического ядерного реактора // Фотон-экспресс. 2021. № 6 (174).