

Распределенные волоконно-оптические датчики давления и температуры для применения в нефтегазовой сфере и их самокалибровка

А.А. Вишнеvский

Факультет авионики, энергетики и
инфокоммуникаций

Уфимский государственный авиационный
технический университет

Уфа, Россия

e-mail: host_of_peace@list.ru

В.Х. Ясовев

Факультет авионики, энергетики и
инфокоммуникаций

Уфимский государственный авиационный
технический университет

Уфа, Россия

e-mail: yasov@mail.ru

Аннотация¹

Приведен обзор существующих современных волоконно-оптических измерительных систем (ВОИС), актуальность изучения которых подтверждена в мировой практике. Выделено внедрение волоконно-оптических систем распределенных манометрии и термометрии в связи с высокой информативностью показателей давления и температуры. Приведена классификация ВОД, исходя из их структурных и физических характеристик, в том числе по принципам кодирования измеряемой информации, по характеру использования оптических волокон. Рассмотрены возможности и особенности использования самокалибровки при проектировании волоконно-оптических датчиков давления и температуры для использования в нефтегазовой сфере.

1. Введение

Развитие современной техники во многом определяется возможностями использования различных типов датчиков. Среди них волоконно-оптические датчики и системы измерения занимают важное место. Однако отдельным аспектам проектирования и применения таких датчиков и систем в литературе уделяется недостаточно внимание. Поэтому целью данной статьи был комплексный анализ публикаций по данной тематике и выявление таких недостаточно изученных направлений.

2. Обзор существующих волоконно-оптических систем измерения

Использование волоконно-оптических технологий в автоматизированных системах управления составляет основу не только для средств передачи

информации, но и для разнообразных устройств измерения и контроля.

В условиях ужесточения требований к точности, стабильности и термостойкости, стремления свести к минимуму влияние магнитных и электрических полей, необходимости увеличения вибро- и ударостойкости устройств волоконно-оптические датчики (далее - ВОД) находят широкое применение в нефтяной и газовой промышленности, особенно - в геофизике и при эксплуатации добывающих скважин нефти и газа (рис. 1).

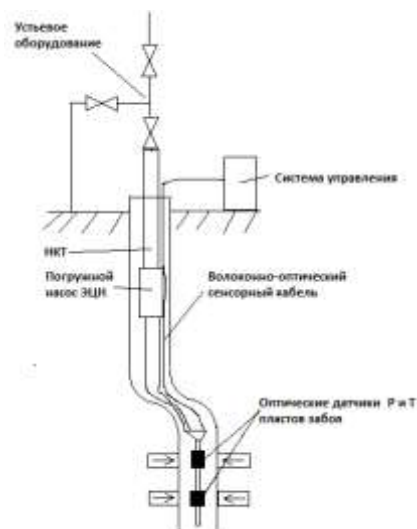


Рис. 1 Структура нефтяной скважины с волоконно-оптической измерительной системой [1]

Предотвращение и ликвидация нештатных и аварийных ситуаций на технологических объектах автоматизации добывающих комплексов нефтяных и газовых месторождений базируется на мониторинге многочисленных параметров, зависящих от количества контролируемых зон и этапа разведки/эксплуатации этих комплексов.

В. Smith, М. Hall (Nixen Petroleum, Великобритания) в [6] доказали на практике, что ВОД позволяют с высокой точностью проводить измерения

Труды третьей международной конференции "Интеллектуальные технологии обработки информации и управления", 10 - 12 ноября, Уфа, Россия, 2015

Третья международная конференция "Интеллектуальные технологии обработки информации и управления", Уфа, Россия, 2015

многочисленных параметров в зависимости от локаций и времени. Актуальность оптического мониторинга как развивающейся области инновационных технологий в настоящее время поддерживается отказом от различных комплексов предварительных тестирований, - заказчики все чаще решаются на быстрый ввод в эксплуатацию данных систем без испытаний.

Затраты на применение ВОД по стоимости сопоставимы с расходами на использование электронных датчиков с барьерами искрозащиты во взрывоопасных зонах определенных классов взрывоопасности. Факт отсутствия внутреннего искрового разряда, в том числе при повреждениях конструктива датчика, дополняет совокупность преимуществ ВОД.

Согласно ГОСТ 31610.28-2012, взрывоопасная среда может воспламениться оптическим излучением при условии, что интенсивность пучка оптического излучения превышает искробезопасный уровень, и в пучке присутствует твердое тело. Совокупность таких факторов может вызвать появление места перегрева и, соответственно, источника воспламенения. Другой причиной может быть присутствие разрыва волокон – как показано на рис. 2.

Таким образом, для воспламенения взрывоопасной среды недостаточно открытого излучения, превышающего уровень искробезопасности.

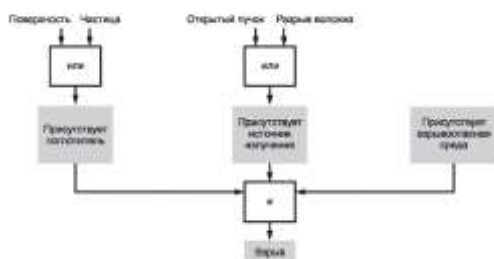


Рис. 2 Оценка опасности воспламенения

Недостатками являются необходимость проверки при пропадании оптического сигнала, а также стоимость по сравнению с электрическими аналогами.

Спрос на волоконно-оптические датчики во многом определяется двумя факторами: стоимостью и количеством. Минимальную стоимость определяет производитель, тогда как количество датчиков в каждой конкретной зоне определяется нормативной документацией либо технологией.

Из практики известно, что, например, канадская компания-заказчик предполагает установить в определенной зоне один датчик согласно своей нормативной документации с высоким качеством эксплуатационных характеристик. Фактически данный датчик имеет весьма высокую стоимость. В то же время российская нормативная документация, в большой мере фактически пренебрегая качеством

исполнения датчика, увеличивает их количество. Исходя из данных моментов и формируются спрос и предложение.

В связи с высокой информативностью показателей давления и температуры (далее - ДиТ) внедрение волоконно-оптических систем именно распределенных манометрии и термометрии, безусловно, является перспективным решением применительно к нефтегазодобывающей промышленности, в частности к области безопасности эксплуатации нефтяных и газовых месторождений.

По локализации измеряемого параметра ВОД могут быть:

- 1) точечными;
- 2) квазираспределенными;
- 3) распределенными.

Согласно рис. 3 можно поставить в соответствие следующие категории ВОД:

- 1) Точечный – 1 датчик;
- 2) Квазираспределенные – массив (больше одного) датчиков;
- 3) Распределенные – чувствительное волокно – число контролируемых зон стремится к бесконечности.

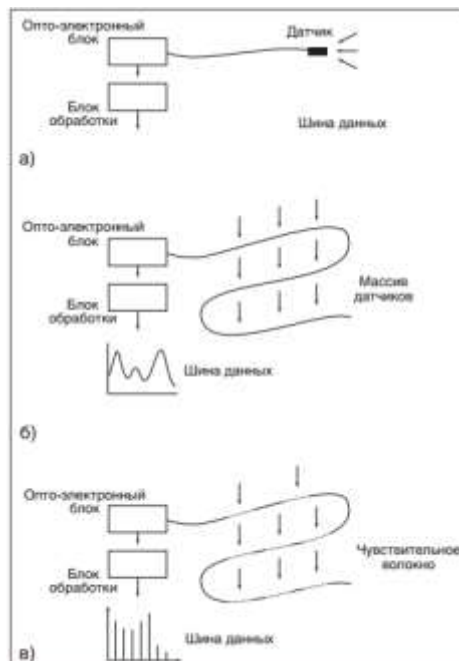


Рис. 3 Типы волоконно-оптических датчиков

Распределенные датчики, объединяемые в систему измерения, выходят на опережающее развитие в связи с тем, что физические величины могут локально воздействовать на оптическое волокно и менять свойства световодов в определенном месте. Вследствие гашения света в оптических волокнах за счет рассеивания может быть точно определено место внешнего физического воздействия.

ВОД, исходя из принципа кодирования измеряемой информации, можно условно разделить на следующие большие группы:

1. Фазовые (интерферометрические) – датчики, в которых используется высококогерентный источник излучения и производится измерение фазы световой волны, изменяющейся под влиянием внешнего параметра, наиболее чувствительные;
2. Со спектральным кодированием – датчики, в которых используется источник излучения с широким спектром с возможностью анализа всего спектра;
3. Амплитудные – датчики, в которых измеряемый параметр модулирует интенсивность проходящей или отраженной световой волны.
4. Поляризационные – датчики, использующие информацию о поляризации световой волны.

Согласно [3] при измерении ВОД параметров температуры и давления используют пьезооптический эффект (фотоупругость), термооптические явления, термолюминесценцию. При этом изменяется коэффициент преломления, коэффициент поглощения света, линейные размеры.

Наиболее распространена классификация ВОД ДиТ по характеру использования оптических волокон [8]:

- 1.ВОД ДиТ с оптическим волокном (далее - ОВ) в качестве линии передачи (типа «линии передачи»);
- 2.ВОД ДиТ с ОВ в качестве чувствительного элемента (сенсорный – типа «сенсорные»).

3. Волоконно-оптический датчик с самокалибровкой

Применение волоконно-оптических датчиков (ВОД) в рамках использования различных информационно-измерительных систем имеет ряд преимуществ перед другими типами датчиков. Однако, для получения правильных результатов необходим корректный учет особенностей ВОД. Особенно перспективным можно считать использование ВОД, относящихся к классу интеллектуальных (способных самостоятельно подстраиваться под изменяющиеся условия систем).

При рассмотрении вопроса интеллектуализации каких бы то ни было датчиков важно понимать различие термина «адаптивность» и «интеллектуальность». Для этого создана классификация, основанная на возможности изменений параметров и/или алгоритмов работы в процессе эксплуатации:

1. Адаптивный режим означает, что параметры и/или алгоритмы работы датчиков в процессе эксплуатации могут изменяться в зависимости от сигналов, поступающих от находящихся в нем преобразователей.

2.«Константный» режим - параметры и/или алгоритмы работы датчиков в процессе эксплуатации не могут изменяться.

Согласно [4] интеллектуальный датчик – это адаптивный датчик с функцией метрологического самоконтроля, который вносит в метрологические характеристики датчика методы и средства обеспечения проверки достоверности измерительной информации, полученной от собственных чувствительных элементов (ЧЭ). В частности, использование методов и средств метрологического самоконтроля при разработке структуры волоконно-оптических интерферометров Фабри-Перо (ВОИФП) обеспечивает уникальную способность самокалибровки устройств – это позволяет отнести их к классу интеллектуальных датчиков (рисунок 4). Функциональная схема такого датчика приведена на рисунке 5.

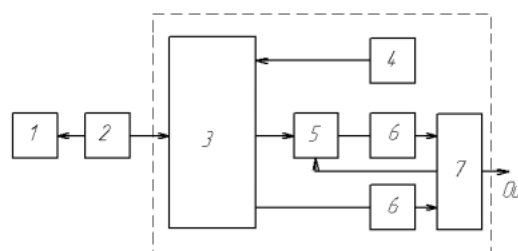


Рис. 4 Структурная схема интеллектуального датчика давления

Обозначения: 1 –ВОИФП; 2 – оптический кабель; 3 – оптический разветвитель; 4 – свето-излучающий диод; 5 –перестраиваемый спектральный оптический фильтр; 6 –фотодетектор; 7 – микроконвертер/микроконтроллер

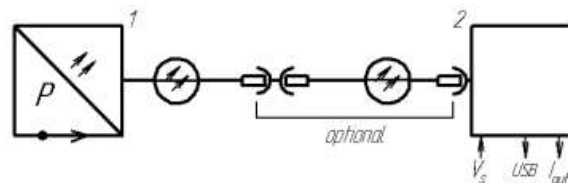


Рис. 5 Функциональная схема интеллектуального датчика давления

Обозначения: 1 – ЧЭ; 2 – оптико-электронный блок передатчика; Vs – напряжение питания электронной части; Iout – сигнальный выход; optional – оптический кабель (при необходимости увеличения расстояния между ЧЭ и трансивером)

Расстояние между ЧЭ и трансивером может достигать 3 км при условии применения оптического кабеля. Это практически позволяет отказаться от импульсных трубок для монтажа приборов измерения давления.

Температурная зависимость длины резонаторной полости такого датчика выражается формулой [2]:

$$\Delta G = (\alpha_0 L_0 - \alpha_1 L_1 - \alpha_2 L_2) \Delta T \quad (1)$$

где: ΔT – изменение температуры; α_0 , α_1 , α_2 – коэффициенты температурного расширения соответственно кварцевых стекол капиллярной оболочки, входного и выходного волокон; L_0 , L_1 , L_2 – длины измерительной полости датчика, входного и выходного оптических волокон интерферометра.

Для того, чтобы температурную погрешность свести к минимуму, необходимо подобрать такие значения α_0 , α_1 , α_2 , L_1 , чтобы выражение в скобках формулы (1) было практически равно нулю, т.е

$$\alpha_0 L_0 - \alpha_1 L_1 - \alpha_2 L_2 = 0$$

На рисунке 6 приведены градуировочные характеристики ВОД давления с самотермокомпенсацией для рабочих температур 24 °C и 250 °C [2].

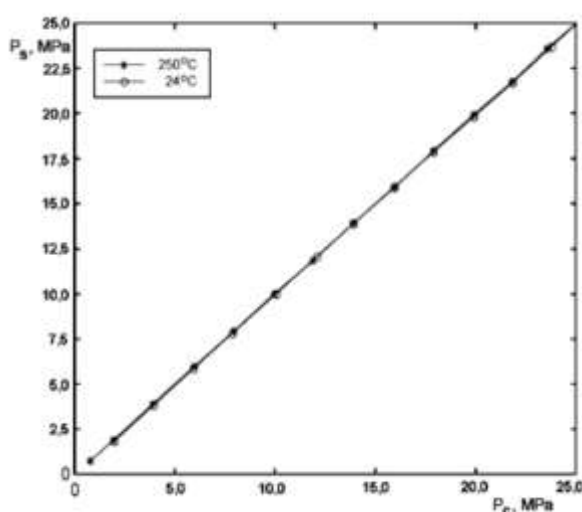


Рис. 6 Градуировочные характеристики ВОД с самотермокомпенсацией на базе интерферометра Фабри-Перо для температур 250°C и 24°C

Обозначения: P_s – давление при 24°C; P_c – давление при 250°C.

При изменении температуры измеряемой среды (ΔT) длина полости резонатора Фабри-Перо в соответствии с формулой (1) изменится на величину, которая будет ниже предела чувствительности. Поэтому влияние температуры на погрешность измерения ВОИФП ничтожно (два графика на рис. 2 фактически слились в один). Термокомпенсация обеспечивается практически во всем рабочем диапазоне температур – об этом говорит строго линейный характер графиков по рис. 7.

Аналогично рассматриваемый интеллектуальный подход к построению ВОД может быть применен и к волоконно-оптическим измерительным системам в целом.

4. Заключение

Внедрение систем искусственного интеллекта позволило производить самокалибровку ВОД в реальном масштабе времени без остановки

контролируемых процессов, без использования поверочных эталонов с заданной пользователем частотой; выполнять самодиагностику датчиков; обеспечивать выдачу сообщений пользователю в случае обнаружения неисправностей.

Применение оптического волокна в интеллектуальных датчиках позволило довольно сильно сузить круг источников погрешностей и практически обнулить их ранги. Иными словами – уменьшить риски не обнаружения вовремя опасного изменения измеряемой величины.

Проведенный анализ позволил установить требования к ВОИД, обеспечивающие эффективность информационной поддержки разработки месторождений:

- возможность внутрискважинного мониторинга параметров давления и температуры с функцией беспроводной передачи информации о работе двух и более пластов на поверхность в режиме реального времени;

- достаточная пропускная способность и функциональность бескабельного канала связи приемника и передатчика оптического сигнала.

Список используемых источников

1. Буймистряк Г.Я., Рогов А.М. “Интеллектуальный волоконно-оптический датчик для измерений в экстремальных условиях“. Paper #284, ANIMMA International Conference, 7-10 June 2009, Marseille, France
2. Буймистряк Г.Я., Рогов А.М. Интеллектуальный волоконно-оптический датчик для измерений в экстремальных условиях Paper #284 - ANIMMA International Conference, 7-10 June 2009, Marseille, France
3. Бусурин, В.И., Носов, Ю.Р. Волоконно-оптические датчики. Физические основы, вопросы расчета и применения. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. ГОСТ Р 8.673-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения.
5. Смит, Б., Холл, М., и др. Преимущества использования на месторождениях оптоволоконных измерительных систем / Смит, Б., Холл, М., и др. // Нефтегазовые технологии. – 2008. – N 10. – С.23-29.
6. Мурашкина, Т.И., Волчихин, В.И. Амплитудные волоконно-оптические датчики автономных систем управления. – Пенза: Издательство Пенз. Гос. Ун-та, 1999.
7. Окоси Т. и др. Волоконно-оптические датчики; под ред.Т. Окоси ; пер. с яп. Г. Н. Горбунова. — Ленинград : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. — 255 с. : ил.