
ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 621.373.826:681.7.068

А. В. Поляков

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СКВАЖИННОЙ ТЕРМОМЕТРИИ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТИПА

Представлена структура квазираспределенного волоконно-оптического датчика температуры, предназначенного для скважинной термометрии при добыче высоковязкой нефти. Принцип действия датчика основан на регистрации частоты рециркуляции одиночных импульсов с их периодической регенерацией на различных длинах волн.

***Ключевые слова:** квазираспределенный волоконно-оптический датчик, температура, частота рециркуляции, спектральное разделение информационных каналов.*

В последние годы в связи с конструктивной сложностью информационно-измерительных систем, базирующихся на традиционных электронных измерительных технологиях, а также вследствие влияния различных дестабилизирующих факторов на погрешность измерений значительно возрос интерес к волоконно-оптическим датчикам. Наряду с такими достоинствами этих датчиков, как способность работать при воздействии интенсивных электрических и магнитных полей, стойкость к агрессивным средам, пожаро- и взрывобезопасность, не менее важным преимуществом является возможность создания на их основе распределенных (квазираспределенных) измерительных систем. Это означает, что один и тот же волоконно-оптический датчик может использоваться для выполнения измерений в различных (многочисленных) точках пространства. Полученные данные при этом передаются в виде пространственного распределения соответствующей измеряемой величины. В связи с этим весьма перспективным является применение таких датчиков в нефтяной и химической промышленности, в электроэнергетике, для контроля состояния турбин, котлов, дамб, мостов, плотин.

Практически безальтернативным является использование волоконно-оптических датчиков в нефтедобывающей промышленности при контроле физических параметров непосредственно в стволе шахты. Одним из примеров применения подобных систем может служить их использование в процессе добычи высоковязкой, тяжелой, так называемой битумной нефти. Добыча высоковязкой нефти связана с применением перегретого пара для локального разогрева нефтенасыщенного пласта. Такие тепловые методы целесообразно применять в пластах с вязкостью нефти более 50 мПа·с.

Используемая в процессе добычи нефти волоконно-оптическая система скважинной термометрии содержит волоконно-оптический кабель, который размещается в стволе скважины, и электронный блок обработки данных, устанавливаемый на поверхности. В данном случае

оптическое волокно является одновременно и датчиком температуры, и каналом передачи информации из ствола скважины на поверхность. Температурный мониторинг позволяет определить оптимальное время добычи разогретой вязкой нефти.

Современные технологии обеспечивают бурение под углом на глубину до нескольких километров и горизонтальное бурение на расстояние до 2 км. В частности, в Татарстане (Россия) и Гомельской области (Беларусь), которые обладают богатыми залежами битумной нефти, нефтеносные пласты располагаются на глубине от 1 до 3 км. Таким образом, волоконно-оптический датчик должен измерять температуру до 300 °С, при этом длина волоконно-оптического тракта должна достигать 5 км.

Для температурного мониторинга нефтяных скважин компаниями “Amoco” (США), “Alberta Research Council” (Канада), „Петролайт“ (Россия) разработаны распределенные волоконно-оптические датчики, основанные на эффекте комбинационного рассеяния (по зарубежной терминологии — рассеяние Рамана) в материале волоконно-оптического световода и применении технологии оптической рефлектометрии. К недостаткам таких датчиков можно отнести следующие особенности: 1) наряду с комбинационным в оптическом волокне возбуждается рассеяние Мандельштама — Бриллюэна, кроме того, полезный сигнал может маскироваться рэлеевским рассеянием; 2) вследствие малого значения коэффициента рамановского рассеяния требуется длительное накопление сигнала и использование импульсов большой мощности; 3) погрешность измерений температуры составляет 1 °С.

Для повышения точности измерений посредством волоконно-оптических датчиков необходимо отказаться от аналоговой модуляции одного из параметров потока излучения и перейти к неаналоговой (дискретной) модуляции, вводя новые, неоптические, параметры потока излучения. Одним из перспективных путей решения подобных задач является переход к частотному (временному) представлению измеряемой величины, при котором время задержки оптического излучения в световоде зависит от измеряемых физических величин. Высокая чувствительность частоты рециркуляции в замкнутой оптоэлектронной системе к малым внешним воздействиям на волоконный световод позволяет реализовать новый принцип частотного представления информации. При этом повышение точности измерений достигается за счет идентификации измеряемых физических величин по частоте рециркуляции одиночного оптического импульса с его периодическим восстановлением по амплитуде, форме и длительности на каждом цикле циркуляции [1, 2]. Поскольку для предлагаемого метода измерений не требуется информация о фазе и поляризации оптической волны, в схеме датчика могут быть использованы многомодовые инжекционные лазеры и волоконные световоды, что позволит значительно упростить стыковку между оптическими элементами. Известно, что применение многомодового инжекционного лазера в силу малой когерентности позволяет уменьшить уровень шумов.

Для одновременного измерения температуры в нескольких требуемых точках контролируемого объекта автором разработана структура квазираспределенного волоконно-оптического датчика температуры (ВОДТ) со спектральным разделением каналов [3]. Принцип измерений основан на том, что изменение температуры приводит к изменению длины волокна и его показателя преломления, в результате чего изменяется частота рециркуляции. Сущность функционирования волоконно-оптического датчика, схема которого представлена на рис. 1, заключается в организации рециркуляции одиночных оптических импульсов с периодической регенерацией одновременно на нескольких длинах волн.

Устройство работает следующим образом. По сигналу блока управления, обработки и отображения данных (БУО) блок регенерации (БРГ) генерирует стандартные по амплитуде, длительности и форме начальные импульсы и запускает процесс циркуляции. Данные импульсы тока накачки после усиления модулятором тока (МТ) поступают на входы инжекционных лазеров линейки излучателей (ИЛ). Для уменьшения задержки между импульсами тока

— возможность работы при больших плотностях световой энергии, поскольку излучение в дихроичных зеркалах практически не поглощается;

— возможность работы при достаточно высоких температурах окружающей среды (до 500 °С) без расплавления и деформации зеркал;

— возможность долговременной эксплуатации зеркал без ухудшения спектрально-селективных свойств благодаря их конструкции;

— отсутствие необходимости применения специальных мер по стабилизации спектральных характеристик полупроводниковых лазеров благодаря тому, что дихроичные зеркала имеют широкую спектральную полосу отражения.

Анализ современного состояния технологий формирования дихроичных зеркал на основе тонких (порядка 100 мкм) AlGaAs/AlxOy волноводов и слоев прозрачных диэлектрических материалов, таких как оксид титана и оксид кремния, наложенных на термостойкое боросиликатное стекло, показал (см. например, [4, 5]), что коммерчески доступные дихроичные зеркала при нормальном падении излучения в области ближнего ИК-диапазона обладают шириной спектра отражения 40—50 нм, коэффициент отражения при этом составляет 93—99 %, коэффициент пропускания 85—90 %. В качестве мультиплексора предлагается использовать волоконные сплавные разветвители типа 2×2 с сильно выраженными спектральными характеристиками с интервалом (по уровню 3 дБ) порядка 40 нм. По результатам измерений [6] отклонения центральных длин волн каналов от номинальных значений не превышает 2—3 нм, изоляция каждого канала от всех соседних каналов не менее 25 дБ, собственные вносимые потери по любому каналу составляют 0,5—1 дБ.

Относительная долговременная нестабильность (χ) частоты рециркуляции является одним из основных факторов, определяющих метрологические характеристики волоконно-оптических датчиков рециркуляционного типа: величина ОДН χ — есть результат наложения целого ряда как взаимосвязанных, так и не связанных между собой фундаментальных (обусловленных физическими принципами функционирования оптоэлектронных элементов) и технических (нестабильность питающих напряжений, температуры окружающей среды и т. п.) источников флуктуаций. Один из традиционных способов повышения метрологических характеристик измерительных устройств — увеличение времени измерений. Известно [7], что погрешность измерения случайной величины линейно уменьшается при увеличении времени измерения (t_n) пропорционально \sqrt{N} , где $N=t_n/t_{n0}$. На рис. 2 это проиллюстрировано зависимостью 1 при $t_{n0}=10^{-3}$ с; кривая 2 представляет собой экспериментальную зависимость относительной долговременной нестабильности χ от времени измерения t_n . Как следует из анализа графиков, нарастающее отклонение величины χ от линейного закона при увеличении времени измерения свидетельствует о том, что волоконно-оптические датчики рециркуляционного типа обладают свойством накапливать флуктуации в процессе циркуляции. Следовательно, оптимальное время измерения при использовании подобных датчиков составляет 1 с.

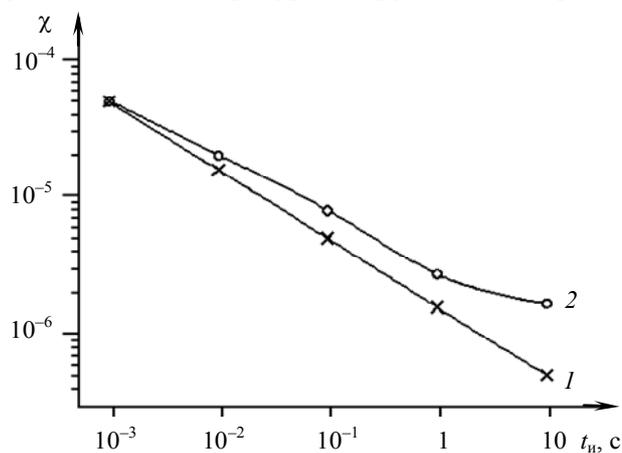


Рис. 2

Увеличение температуры $\Delta\theta$ волоконного световода приводит к увеличению его геометрической длины L (продольная деформация), изменению показателя преломления n и соответственно к изменению частоты рециркуляции. Одновременно с продольной деформацией световода происходит изменение его диаметра, т.е. возникает поперечная деформация. Этим

объясняется эффект фотоупругости, который также приводит к изменению показателя преломления. В результате появляется дополнительная задержка ΔT во времени распространения оптического сигнала по ВС. В общем случае зависимость изменения ΔT при изменениях температуры может быть представлена следующим образом [8]:

$$\Delta T = \frac{L^0 n}{c} \left[\left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})] \right\} \alpha + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial \theta} \right] \Delta \theta, \quad (1)$$

где $p_{11} = 0,121$ и $p_{12} = 0,27$ — коэффициенты Поггеля; $\mu = 0,164$ — коэффициент Пуассона; $\partial n / \partial \theta$ — температурный коэффициент изменения показателя преломления ВС; L^0 — длина участка ВС, подвергающегося температурному воздействию, при этом если импульс излучения распространяется в прямом и обратном направлениях, то L^0 увеличивается в два раза; α — результирующий коэффициент линейного теплового расширения ВС с металлическим покрытием; c — скорость света.

В датчиках температуры, как правило, используются волоконные световоды с металлическим покрытием, нанесенным методом намораживания [9], который заключается в протягивании уже остывшего после вытяжки из заготовки волокна через слой жидкого металла конечной толщины. Это, во-первых, повышает чувствительность датчика, а, во-вторых, металлическое покрытие толщиной 15—20 мкм обеспечивает практически полную нечувствительность датчика к давлению [10]. В этом случае результирующий коэффициент линейного теплового расширения рассчитывается как

$$\alpha = \sum_i S_i E_i \alpha_i / \sum_i S_i E_i, \quad i=1, 2, 3, \quad (2)$$

где S_i — площадь сечения волокна; E_i — модуль Юнга; индекс $i=1$ соответствует сердцевине волокна, $i=2$ — его оболочке, $i=3$ — покрытию.

Для многомодового световода диаметр сердцевины $D_1 = 50$ мкм, диаметр оболочки $D_2 = 125$ мкм, толщина металлического покрытия $h_3 = 15$ мкм. Следовательно,

$$S_1 = \pi D_1^2 / 4, \quad S_2 = \pi(D_1 + h_2)h_2, \quad S_3 = \pi(D_2 + h_3)h_3. \quad (3)$$

В формуле (2) физические величины имеют следующие значения: $\alpha_1 = 9 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_2 = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_3 = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $E_1 = 73$ ГПа, $E_2 = 62$ ГПа, $E_3 = 82$ ГПа.

Погрешность волоконно-оптического датчика температуры рециркуляционного типа определяется условием, что дополнительное приращение (уменьшение) времени задержки циркулирующего импульса при изменении температуры должно превышать максимальную величину нестабильности χ_{\max} частоты рециркуляции, обусловленную не связанными с измеряемой температурой внешними и внутренними дестабилизирующими факторами. Выражение для оценки погрешности ВОДТ в широком температурном диапазоне имеет следующий вид:

$$\Delta \theta_{\min} = \frac{\chi_{\max}}{\left(1 - \frac{n^2}{2} [p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})] \right) \alpha + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial \theta} \left(\frac{L - L_0^0}{L_0^0} \frac{n_0}{n} + 1 \right)}, \quad (4)$$

$$L^0 = L_0^0 [1 + \alpha(\theta - \theta_0)], \quad n = n_0 \left[1 + \frac{1}{n_0} \frac{\partial n}{\partial \theta} (\theta - \theta_0) \right],$$

где n_0 и L_0^0 фиксируются при температуре θ_0 калибровки датчика.

Из выражения (4) следует, что погрешность ВОДТ зависит от длины L^0 участка ВС, подвергающегося температурному воздействию. Как показывают проведенные расчеты для комнатной температуры (рис. 3), при использовании традиционных телекоммуникационных воло-

кон, легированных, например, оксидом германия или алюминия, с небольшим температурным коэффициентом изменения показателя преломления ($dn/d\theta = 2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), для получения наименьшей температурной погрешности необходимо уменьшать величину χ , при этом длина световода L^0 должна составлять 80—95 % от общей длины волоконной секции L (кривые 1 и 2 на рис. 3). Кривая 1 рассчитывалась для $\chi = 4 \cdot 10^{-6}$, что соответствует $L = 25 \dots 50$ м, для кривых 2 и 3 $\chi = 2 \cdot 10^{-6}$ при $L > 100$ м. Для того чтобы уменьшить влияние величины L^0 на значение $\Delta\theta_{\min}$, необходимо использовать специальные световоды с повышенным температурным коэффициентом изменения показателя преломления ($dn/d\theta = 2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ — кривая 3), что достигается, например, в световодах с эллиптической сердцевиной, легированной оксидом бора. В работах [2, 8] показано, что использование B_2O_3 позволяет повысить (по сравнению с Al_2O_3) чувствительность датчика на 27 % при комнатной температуре и на 45 % при $\theta = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$. Однако здесь имеются ряд трудностей и ограничений. Легирование кварцевого стекла примесью B_2O_3 приводит к уменьшению показателя преломления сердцевины волокна. В то же время для возникновения эффекта полного внутреннего отражения показатель преломления оболочки ВС должен обладать еще более низким значением (разница должна составлять 1—4 %). В этом случае оболочку ВС необходимо легировать, например, фтором. Изготовление таких волокон технологически является достаточно сложной задачей. Температурный предел функционирования боросиликатных волокон составляет приблизительно $500 \text{ } ^\circ\text{C}$.

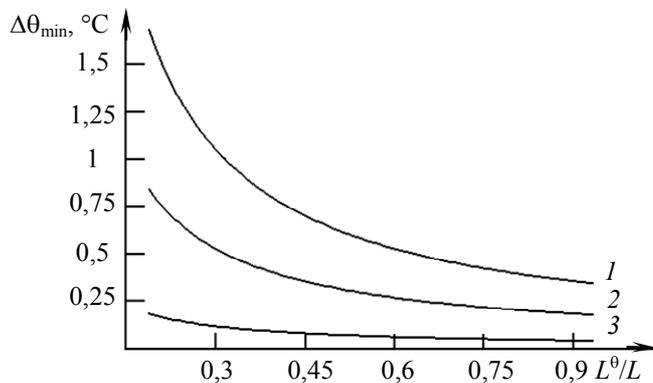


Рис. 3

Проведенные в соответствии с выражениями (2)—(4) расчеты показали, что для $L > 100$ м величина $\chi_{\max} < 3 \cdot 10^{-6}$ при условии, что температурному воздействию подвергается до 90 % волоконной секции стандартного световода, погрешность измерений не превышает $0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Наряду с информационными импульсами в системе могут возникать паразитные сигналы, связанные с шумовыми процессами. Проведенные исследования показали, что во избежание ложного срабатывания и для устойчивого функционирования датчика минимальный уровень сигнала на входе компаратора должен составлять не менее 4 мВ. Порог срабатывания компаратора соответствует половине амплитуды входного сигнала, что обеспечивает наибольшую стабильность частоты рециркуляции. При этом уровень составляющих излучения, связанных с рэлеевским рассеянием, спонтанным рассеянием Мандельштама — Бриллюэна и комбинационным рассеянием Рамана, существенно меньше информационных сигналов.

Компоненты схемы представленного волоконно-оптического датчика температуры имеют следующие параметры: мощность излучения AlGaAs/GaAs и InGaAsP/InP инжекционных лазеров — 5 мВт (типа EG&G Optoelectronics SG2004A, NEC NX6306 и NX8562); спектральная чувствительность Ge-ЛФД и InGaAs-ЛФД — 8,8...9,4 А/Вт для полосы 1 ГГц и коэффициента лавинного умножения $M=10$ (типа NEC NR4210, EG&G Optoelectronics J16A и C30645E); нагрузочное сопротивление фотоприемника — 50 Ом; потери на каждом дихроичном зеркале — 1,6 дБ (при прохождении излучения в двух направлениях); суммарные потери на мультиплексоре, демультиплексоре, направленном ответвителе и всех соединениях — 9 дБ.

Увеличение общих потерь в световоде с металлическим покрытием в основном связано с микроизгибными потерями, увеличение которых наблюдается при росте температуры до $+250 \text{ } ^\circ\text{C}$. Согласно [11] наименьшее приращение оптических потерь в волокне при нагревании наблюдается в световоде с медным покрытием, но и оно может возрастать в 4—5 раз по

сравнению с комнатной температурой. Несмотря на это рассмотренное измерительное устройство с указанными параметрами позволяет обеспечить работу с волоконно-оптическим преобразователем требуемой длины. Максимальная измеряемая температура ограничивается динамической прочностью волокна, сроком эксплуатации датчика и может достигать +400 °С.

Таким образом, предложенная структура квазираспределенного волоконно-оптического датчика температуры, принцип действия которого основан на регистрации частоты рециркуляции одиночного импульса с его периодической регенерацией на разных длинах волн в спектральном интервале 850—1610 нм, позволяет одновременно проводить измерения в нескольких (до десяти) точках. Погрешность измерений температуры не превышает 0,2 °С при времени измерения 1 с в диапазоне температур от 0 до +100 °С, при этом максимальная измеряемая температура составляет +400 °С для длины волоконно-оптического измерительного преобразователя в несколько километров при использовании многомодовых градиентных волоконных световодов с металлическим покрытием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин К. Г., Малевич И. А., Поляков А. В., Чубаров С. И. Прецизионный волоконно-оптический датчик на основе оптоэлектронной рециркуляционной системы // Измерительная техника. 1999. № 7. С. 32—35.
2. Поляков А. В. Частотная волоконно-оптическая измерительная система // Датчики и системы. 2008. № 1. С. 29—32.
3. Поляков А. В. Рециркуляционный волоконно-оптический датчик температуры // Измерительная техника. 2002. № 4. С. 40—43.
4. Hideyuki Takada, Masayuki Kakehata, Kenji Torizuka. High-energy dichroic chirped mirror for an ultrashort pulse amplification system // Jpn. J. Appl. Phys. 2003. Vol. 42. P. L760—L762.
5. Dichroic mirror embedded in a submicrometer waveguide for enhanced resonant nonlinear optical devices / Luigi Scaccabarozzi, M. M. Fejer, Yijie Huo et al. // Optics Lett. 2006. Vol. 31. P. 3285—287.
6. Прокофьев Л. П., Сахаров В. К., Щербаков В. В. Мультиплексоры на одномодовых разветвителях для техники CWDM // Радиотехника. 2004. № 12. С. 50—53.
7. Купер Дж., Макгиллем К. Вероятностные методы анализа сигналов и систем: Пер. с англ. М.: Мир, 1989.
8. Поляков А. В. Чувствительность рециркуляционных волоконно-оптических датчиков температуры // Оптич. журн. 2004. Т. 71, № 9. С. 84—87.
9. Бирюков А. С., Богатырев В. А., Хитун А. Г. Моделирование метода намораживания металлического покрытия на волоконный световод // ЖТФ. 1997. Т. 67, № 1. С. 100—109.
10. Окоси Т. Волоконно-оптические датчики: Пер. с япон. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
11. Влияние металлического покрытия на оптические потери при отжиге волоконных световодов / В. В. Волошин, И. Л. Воробьев, Г. А. Иванов и др. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, № 8. С. 41—47.

Сведения об авторе

Александр Владимирович Поляков — канд. физ-мат. наук, доцент; Белорусский государственный университет, кафедра физики и аэрокосмических технологий, Минск;
E-mail: polyakov@bsu.by

Рекомендована кафедрой
физики и аэрокосмических технологий

Поступила в редакцию
02.03.11 г.