

# ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ДАВЛЕНИЯ

В. Григорьев, к.т.н., Научно-Исследовательский Телевизионный Институт, Москва, [www.mniti.ru](http://www.mniti.ru)

На производственных предприятиях системы водоснабжения значительно удалены от контроллера и находятся в условиях повышенной пожаро-взрывоопасности, в тесном соседстве с электромагнитными помехами. Так что без волоконно-оптических датчиков давления в таких случаях не обойтись. Конструкция датчика имеет одноволоконный оптический приемо-передающий канал, поэтому уровнемер обладает высокой чувствительностью и позволяет осуществить температурную стабилизацию измерительного канала.

Система водоснабжения производственных предприятий содержит несколько соединенных трубопроводами промышленных резервуаров достаточного внушительного объема. Рациональное расходование водных ресурсов обязательно предполагает наличие информации о количестве воды в каждом из резервуаров. Качество информационно-измерительной системы, получающей такую информацию и представляющую ее пользователю, определяется возможностями первичных преобразователей. Для этого не подходят концевые точечные датчики, дающие информацию или о полностью пустом, или о полностью заполненном резервуаре. Резервуар может быть практически заполнен водой, но при этом нет контакта воды с концевым датчиком, и система выдает сигнал об отсутствии воды в резервуаре. На основе таких сведений пользователь принимает неверные решения. Очевидно, что для получения адекватной информации необходимо иметь надежный первичный преобразователь, непрерывно передающий сведения о текущем уровне жидкости и формирующий управляющий сигнал. Поэтому не вызывает сомнений актуаль-

ность решения задачи получения информации о непрерывном текущем распределении воды в промышленных резервуарах.

В 1998 году для энергетических комплексов промышленных предприятий были начаты работы по разработке и созданию первичных преобразователей для систем диспетчеризации с целью визуального представления информации о текущем уровне воды в резервуарах.

Практика показывает, что существует особая необходимость в уровнемерах для проведения непрерывного измерения уровня жидкости в наиболее распространенных промышленных резервуарах высотой 3 м в условиях наличия электромагнитных помех и повышенной пожаро-взрывоопасности при температуре окружающей среды от -40 до 40°C, когда расстояние между резервуаром и зданием контрольно-измерительного пункта составляет 800–1000 м. Такие условия определили требования для построения уровнемера на основе волоконно-оптического преобразователя с внешней модуляцией.

Метрологические параметры уровнемера зависят от мембранного и волоконно-оптичес-

кого преобразователей, которые определяют функцию преобразования датчика. Мембранный преобразователь является наиболее простым и надежным чувствительным элементом. Исходные условия эксплуатации определили использование мембраны с малой величиной прогиба. Для преобразования малых прогибов мембраны в информационный сигнал используют волоконно-оптический кабель на основе одного волоконного световода. Кабель через оптический наконечник, закреплённый в корпусе чувствительного элемента уровнемера, оптически связан с мембраной. Другой конец кабеля через оптический вход связан с оптоэлектронным модулем (рис.1).

Рассмотрим оптическое взаимодействие мембраны и приемо-передающего световода кабеля с точки зрения взаимодействия двух стыкуемых световодов. Главным является то, что взаимодействие мембраны с приемо-передающим световодом можно заменить взаимодействием двух световодов. Приемо-передающий световод принимает излучение от источника и направляет его на мембрану. Изображение на мембране излучающего торца приемо-передающего световода

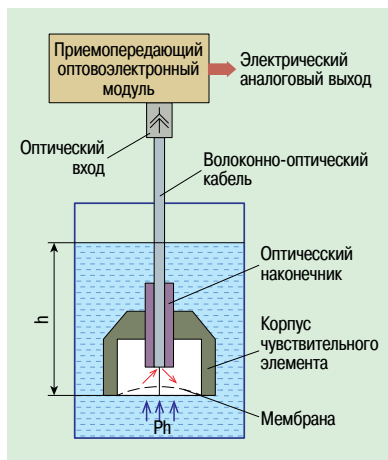


Рис.1. Волоконно-оптический уровень жидкости

рассматривается как торец самостоятельного, реально существующего световода. Этот световод направляет излучение обратно в приемо-передающий световод преобразователя, и оно распространяется к приемнику излучения. Рассмотрим, как распространяется излучение между направляющим и приемо-передающим световодами. Причем в роли направляющего световода, как уже отмечали, выступает отражение на мембране излучающего торца приемо-передающего световода преобразователя.

Исследование распространения излучения между этими световодами, направляющим и приемо-передающим, построено на волноводной теории оптических преобразователей [1,2]. Эквивалентная оптическая схема преобразователя (рис.2) отражает основные теоретические положения: взаимодействие мембраны с приемо-передающим световодом заменено на рассмотрение взаимодействия двух световодов – направляющего и приемо-передающего. Направляющий световод имеет переменные геометрические (радиус сердечника световода –  $r$ ) и оптические (показатель преломления сердечника –  $n_1$ , показатель преломления оболочки –  $n_3$ ) параметры; приемо-передающий световод имеет постоянные геометрические (радиус сердечника световода –  $a$ ) и оптические (показатель преломления сердечника –  $n_1$ , показатель преломления оболочки –  $n_2$ ) параметры.

Торцы световодов расположены на расстоянии  $Z$ . Поток излучения распространяется от торца направляющего световода на торец приемо-передающего световода через окружающую среду с показателем преломления  $n_0$ . Взаимодействие мембраны и приемо-передающего волоконного световода происходит следующим образом: приемо-передающий световод, принимает излучение от полупроводникового лазера, распространяет его к мембране, и направляет излучение от мембраны на фотоприемник, а направляющий световод является изображением на мембране излучающего торца приемо-передающего световода.

Для теоретического анализа построенной эквивалентной схемы оптического преобразователя применена теория оптических волноводов, которая успешно использована для создания математической модели функции преобразования оптического отражательного преобразователя. Математическая модель функции преобразования имеет вид [3]:

$$P_n = P_{in} \left[ 1 - \left( \frac{Z}{4r} \right) NA \right] \left( \frac{a}{r} \right)^2,$$

где  $P_{in}$  – световой поток на торце направляющего световода;  $P_n$  – световой поток на торце приемо-передающего световода;  $a$  – радиус сердечника приемо-передающего световода;  $r$  – радиус сердечника направляющего световода;  $2r = 2a + z \cdot \text{tg}(\arcsin(NA))$ ;  $NA$  – числовая апертура световодов;  $Z$  – расстояние между торцами световодов;  $n_0$  – показатель преломления окружающей среды;  $n_1$  – показатель преломления сердечников световодов;  $n_2$  – показатель преломления оболочки приемо-передающего световода;  $n_3$  – показатель преломления оболочки направляющего световода.

График функции преобразования представлен на рис.3. Из анализа графика функции вид-

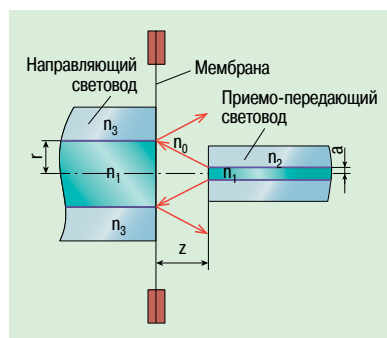


Рис.2. Схема взаимодействия мембраны и приемо-передающего волоконного световода

но, что для эффективной работы преобразователя величина прогиба мембраны в диапазоне 0–20 мкм достаточна, когда волоконно-оптический преобразователь выполнен из кварц-полимерного волокна диаметром 400 мкм и апертурой 0,5. Допустимо в качестве преобразователя применять оптическое волокно полимер-полимер с такими же параметрами.

Наконечник волоконно-оптического преобразователя, в котором размещен световод практически любого диаметра, оптически связывает преобразователь с мембраной. Наконечники изготавливают по технологии электроискровой обработки материалов [4,5].

Особое внимание при разработке уделено приемо-передающему каналу преобразователя еще и потому, что приемо-

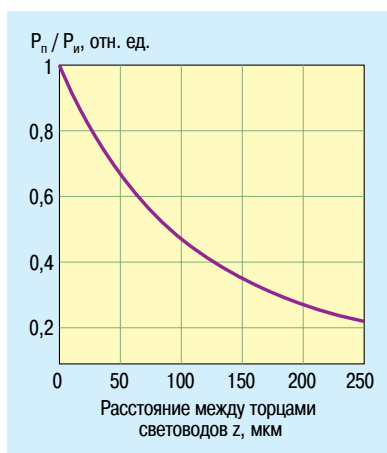


Рис.3. Функция преобразования приемо-передающего канала на основе одного волоконного световода (радиус сердечника световода  $a = 200$  мкм)

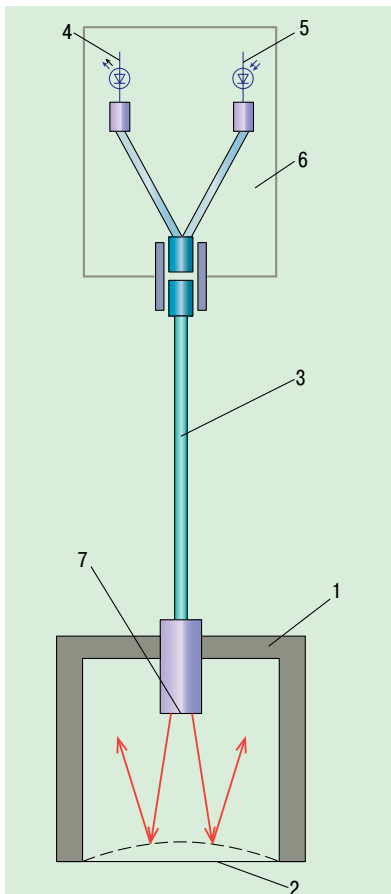


Рис. 4. Термостабилизированный высокочувствительный преобразователь давления

передающий канал на основе одного волоконного световода позволяет осуществить температурную стабилизацию измерительного оптического тракта. Температурная погрешность в известных преобразо-

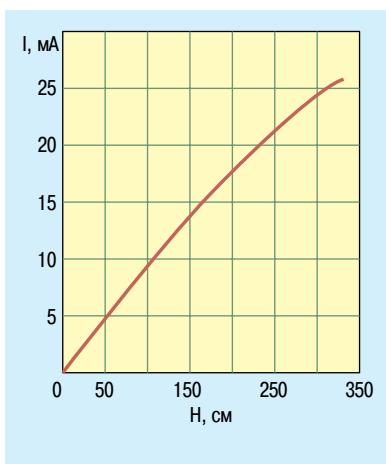


Рис. 5. Зависимость выходного сигнала  $I$  уровнемера от высоты  $H$  столба воды

вателях обусловлена конструкцией оптического измерительного тракта, включающего светоизлучающий диод, фотоприемник и волоконно-оптический преобразователь из кварц-кварцевых световодов.

Хорошо известно, что именно конструкция оптического измерительного тракта, в которую входят светоизлучающий диод, фотоприемник и волоконно-оптический преобразователь из кварц-кварцевых световодов, определяет величину температурной погрешности в волоконно-оптических преобразователях [6]. При повышении температуры снижается оптическая мощность на выходе светоизлучающего диода. Если принять за 100% мощность излучения на длине волны 0,85 мкм светоизлучающего диода при 25°C, то рост температуры на 1°C приводит к падению мощности излучения на 0,8%. В то же время кварц-кварцевые световоды термостабильны и не изменяют оптические свойства в широком диапазоне температур от -80 до 1000°C [7]. Поэтому изменение условий эксплуатации, а конкретно – температуры окружающей среды, приводит к большой температурной погрешности преобразователя давления.

Эту погрешность пытаются устранить совершенствованием электрической схемы преобразователя, тем не менее, она остается на уровне 3% и более. Экспериментальные работы показали, что исполнение преобразователя в виде одного волоконного световода стабилизирует температуру измерительного оптического тракта. Поэтому оптической конструкции датчика было уделено особое внимание при разработке приемопередающего канала преобразователя.

Оптический метод стабилизации температуры в измерительном тракте преобразователя давления заключается в том, что в конструкции используются два эффекта, которые при увеличении температуры вносят в результат измерений погрешности, равные по значению, но противоположные по зна-

ку. Посмотрим, каким образом это достигается. Датчик давления состоит из оптоэлектронного блока с источником и приемником излучения, мембранного чувствительного преобразователя и волоконно-оптического преобразователя (приемо-передающего канала). Весь фокус заключается в свойствах самого волоконно-оптического преобразователя: он выполнен из термонестабильных волоконных световодов. При этом длина волны источника излучения  $\lambda_{и}$  меньше рабочей длины волны  $\lambda_{с}$  волоконных световодов.

Подобное построение волоконно-оптического преобразователя обеспечивает снижение ошибки в показаниях преобразователя давления за счет использования двух эффектов: снижения мощности излучения светодиода из-за роста температуры и увеличения светопропускания термонестабильных световодов [8]. Один эффект – уменьшение выходного сигнала преобразователя давления за счет снижения мощности источника излучения – связан с ростом температуры окружающей среды и другой эффект – увеличение выходного сигнала преобразователя давления за счет увеличения светопропускания термонестабильных световодов – тоже связан с ростом температуры. Кроме этого, при увеличении температуры источника излучения (светодиода) происходит смещение максимума спектрального распределения его излучательной способности в сторону длинных волн [6], то есть длина волны источника излучения  $\lambda_{и}$  приближается к рабочей длине волны  $\lambda_{с}$  волоконных световодов. Это снижает оптические потери в измерительном тракте, и выходной сигнал преобразователя давления также увеличивается.

Итак, в измерительном оптическом тракте преобразователя давления одновременно действуют противоположно направленные физические температурные эффекты и, как следствие, происходит уменьшение температурной погрешности преобразователя давления.

Термостабильный высокочувствительный волоконно-оптический преобразователь давления (рис.4) содержит мембранный чувствительный элемент 1, в котором закреплены мембрана 2 и волоконно-оптический преобразователь 3, выполненный из термонестабильного волоконного световода. Преобразователь 3 с одной стороны обращен к мембране 2, а с другой стороны оптически связан с источником излучения 4 и фотоприемником 5, которые расположены в оптоэлектронном блоке 6. Принцип работы термостабильного высокочувствительного преобразователя давления заключается в следующем. Давление вызывает прогиб мембраны 2. Этот прогиб мембраны уменьшает расстояние от торца 7 световода до мембраны 2. При этом увеличивается поток отраженного от мембраны 2 и попадающего на фотоприемник 5 излучения. При повышении температуры мощность источника излучения уменьшается, и показания преобразователя давления падают. Одновременно увеличение температуры вызывает рост светопропускания термонестабильного световода из-за увеличения его числовой апертуры NA и смещения длины волны источника излучения  $\lambda_{и}$  к его рабочей длине волны  $\lambda_{с}$ . При этом показания преобразовате-

ля давления растут. И, как мы уже говорили, такое сочетание двух противоположно направленных физических эффектов практически устраняет температурную погрешность при измерении давления.

В лучшем исполнении преобразователя давления в качестве световода 3 используется кварцполимерное оптическое волокно с диаметром световедущей жилы  $d = 400$  мкм и с числовой апертурой  $NA = 0,5$ . В качестве излучателя 4 использован светоизлучающий диод с длиной волны  $\lambda = 0,807$  мкм, в качестве фотоприемника 5 – фотодиод ФД-256. Мембрана 2 выполнена из титановой пластины толщиной 0,5 мм.

Были проведены экспериментальные измерения для конкретного устройства, в котором по требованию заказчика при изменении уровня жидкости в диапазоне 0–3 м необходимо было поддерживалось давление 101,325104 Па (10 атм). На рис.5. приведена зависимость выходного сигнала уровнемера от высоты столба воды. Результаты показали, что систематическая погрешность метода, вызванная изменением температуры окружающей среды в диапазоне от  $-10$  °C до  $70$  °C не превышала 1%. При этом нелинейность преобразования не превышала 5%. Это подтверждает вывод о том, что построение приемо-переда-

ющего канала на основе одного термонестабильного оптического волокна позволяет получить высокочувствительный термостабильный измерительный канал преобразователя давления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Marcuse D.** Theory of Dielectric Optical Waveguides. – N. Y.: Acad. Press., 1974.
2. **Григорьев В.** Применение теории оптических волноводов к исследованию и разработке оптических преобразователей для помехоустойчивых систем связи. – Научно-технический сборник «Системы и средства связи», 2010, №1.
3. Пат. № 2178902 РФ / **В.Григорьев.** Устройство ввода/вывода оптического излучения в волоконный световод. 27.08.1998.
4. **Гуларян К., Жуков Г., Квокотов Б. и др.** Пятикоординатный электроискровой вырезной станок. – Электронная обработка материалов, 1989, N 4.
5. Пат. № 2152061 РФ / **В.Григорьев, В.Кравченко.** Способ изготовления волоконно-оптического соединителя. 23.12.1996.
6. **Красюк Б., Корнеев Г.** Оптические системы связи и световодные датчики. – М.: Радио и связь, 1985.
7. **Вейнберг В., Саттаров Д.** Оптика световодов. – Л.: Машиностроение, 1977.
8. **Теумин И.** Волноводы оптической связи. – М.:Связь, 1978.