



## ВВЕДЕНИЕ. О МЕТОДАХ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Методы измерения давления, уровня, расхода, температуры и др. не стоят на месте. Разработчики и проектировщики контрольно-измерительных приборов и аппаратуры активно используют при создании новых серий своей продукции результаты современных научных исследований. Таким образом, появляются приборы, использующие новые, отличные от традиционных методы и технологии измерения физических величин.

Обсуждение темы, посвященное современным методам измерения, начнем с краткого перечисления основных методов измерения температуры, давления, уровня, расхода, влажности и состава газов<sup>1</sup>.

**Методы измерения температуры**

**Контактные методы** (верхний предел измерения температуры <2200°С).

Принцип действия *стеклянных жидкостных термометров* основан на тепловом расширении жидкостей, *манометрических термометров* — на изменении давления газа, жидкости или насыщенного пара в замкнутом объеме в зависимости от температуры. При этом применяются газовые, конденсационные и жидкостные манометрические термометры.

Принцип действия *биметаллических термометров* основан на том, что полоска из двух свальцованных друг с другом пластин из металлов с различными коэффициентами расширения (биметалл) искривляется при изменении температуры в приблизительной пропорции с температурой.

*Термометром сопротивления* называется комплект для измерения температуры, включающий термопреобразователь, основанный на зависимости электрического сопротивления от температуры, и вторичный прибор, показывающий значение температуры в зависимости от измеряемого сопротивления.

*Термоэлектрический метод* измерения температуры основан на зависимости термоэлектродвижущей силы (термоЭДС), развиваемой термопарой, от температуры ее рабочего конца. ТермоЭДС возникает в цепи, состоящей из двух разнородных электродов, если значения температуры мест соединения не равны.

*Кварцевые термопреобразователи* используются для преобразования температуры в частотный сигнал. Чувствительными элементами в кварцевых преобразователях температуры являются кварцевые резонаторы, частота колебаний которых определяется их температурой.

**Бесконтактные методы** измеряют температуру тела или среды по тепловому излучению. Пирометры

теоретически не имеют верхнего предела измерения, и возможности их использования определяются соотношением спектров излучения измеряемых тел или сред и спектральных характеристик пирометров.

*Монохроматические пирометры* (оптические или визуальные) воспринимают излучение в столь узком диапазоне длин волн, что он считается монохроматическим (обычно это излучение красной части спектра  $\lambda = 0,65$  мкм).

*Пирометры полного излучения (радиационные)* воспринимают излучение в столь широком спектральном интервале, что зависимость интегральной энергетической яркости от температуры с достаточной точностью описывается законом Стефана-Больцмана, связывающим энергию абсолютно черного тела с его температурой. В пирометрах этого типа температура определяется по интегральной энергетической яркости излучения.

*Пирометры спектрального отношения* основаны на использовании зависимости отношения его энергетических яркостей в двух спектральных интервалах от температуры тела.

**Методы измерения давления**

Средства для измерения давления и разности давления подразделяют на барометры, манометры избыточного или абсолютного давления, вакуумметры в зависимости от измеряемой величины. Манометры, предназначенные для измерения давления или разрежения в диапазоне до 40 КПа, называются напорометрами или тягомерами. Разность давления измеряют дифференциальными манометрами.

В зависимости от принципа, используемого для преобразования силового воздействия давления на чувствительный элемент в показания или пропорциональные изменения другой физической величины, средства измерения давления подразделяются на жидкостные, деформационные, электрические, ионизационные, тепловые и грузопоршневые. Устройство перечисленных приборов давления разнообразно. Среди них можно выделить пять основных групп измерительных приборов и преобразователей: механические, с дифференциально-трансформаторными преобразователями, с компенсацией магнитных потоков, с силовой компенсацией и с тензопреобразователями.

В *жидкостных манометрах* измеряемое давление или разность давления уравнивается гидростатическим давлением столба жидкости. Используется принцип сообщающихся сосудов, в которых уровни рабочей жидкости совпадают при равенстве давлений над ними, а при

<sup>1</sup> Чистяков В.С., Кузнецов Н.Д., Иванова Г.М. Теплотехнические измерения и приборы.

Учебник для вузов. — 2 изд. МЭИ. 2005 г.

неравенстве занимают такое положение, когда избыточное давление в одном из сосудов уравнивается гидростатическим давлением избыточного столба жидкости в другом. В *жидкостных дифманометрах* уровень жидкости непосредственно не наблюдается. Изменение последнего вызывает перемещение поплавка или изменение характеристик другого устройства, обеспечивающих либо непосредственно показание измеряемой величины с помощью отсчетного устройства, либо преобразование и передачу ее значения на расстояние.

В *деформационных манометрах* используется зависимость деформации чувствительного элемента или развиваемой им силы от измеряемого давления. Пропорциональная давлению деформация или сила преобразуются в показания или соответствующие изменения выходного сигнала.

*Электрический манометр* основан на зависимости электрических параметров преобразователя давления от измеряемого давления. Принцип действия пьезоэлектрических манометров основан на пьезоэлектрическом эффекте, сущность которого состоит в возникновении электрических зарядов на поверхности сжатой кварцевой пластины, которая вырезается перпендикулярно электрической оси кристаллов кварца. Чувствительные элементы (сенсоры) *манометров с тензопреобразователями* представляют собой мембраны, на которых размещены проволочные, фольговые или полупроводниковые резисторы, сопротивление которых меняется при деформации мембраны под действием давления.

*Ионизационный манометр* использует принцип действия, основанный на зависимости тока положительных ионов, образованных в результате ионизации молекул разреженного газа, от измеряемого давления.

*Тепловые манометры* используют принцип действия, основанный на зависимости теплопроводности разреженного газа от давления.

В *грузопоршневых манометрах* измеряемое давление уравнивается силой тяжести неуплотненного поршня с грузами.

#### Методы измерения уровня

Уровнемеры с визуальным отсчетом применяются, если не требуется дистанционная передача показаний. Рассмотрим разновидности уровнемеров, позволяющих осуществлять дистанционное измерение уровня.

В *гидростатических уровнемерах* измерение уровня жидкости постоянной плотности сводится к измерению гидростатического давления, создаваемого жидкостью.

*Поплавковым называется уровнемер*, основанный на измерении положения поплавка, частично погруженного в жидкость, причем степень погружения поплавка (осадка) при неизменной плотности жидкости не зависит от контролируемого уровня. Поплавок перемещается вертикально вместе с уровнем жидкости, и, следовательно, по его положению может быть определено значение уровня.

*Емкостными называются уровнемеры*, основанные на зависимости электрической емкости конденсатор-

ного преобразователя, образованного одним или несколькими стержнями, цилиндрами или пластинами, частично введенными в жидкость, от ее уровня.

*Индуктивные уровнемеры* используют зависимости индуктивности одиночной катушки при взаимной индуктивности двух катушек от глубины их погружения в электропроводную жидкость. Такая зависимость обусловлена возникновением в жидкости под воздействием магнитного поля переменного тока возбуждения вихревых токов, магнитное поле которых оказывает размагничивающее действие на поле тока возбуждения.

*Радиоволновые уровнемеры* основаны на облучении поверхности контролируемой среды радиоволновым сигналом СВЧ с периодически изменяющейся частотой. В результате взаимодействия излученного и отраженного сигналов возникает сигнал разностной частоты, пропорциональной расстоянию от антенны излучателя до поверхности продукта.

*Пьезоэлектрические манометры* используют для измерения пьезоэлектрический эффект, сущность которого состоит в возникновении электрических зарядов на поверхности сжатой кварцевой пластины, которая вырезается перпендикулярно электрической оси кристаллов кварца.

*Акустические уровнемеры* по принципу действия подразделяются на локационные, поглощения и резонансные. В *локационных уровнемерах* используется эффект отражения ультразвуковых колебаний от границы раздела жидкость — газ, в связи с чем они получили название ультразвуковых. Положение уровня определяется по времени прохождения ультразвуковых колебаний от источника до приемника после отражения их от поверхности раздела. В *уровнемерах поглощения* положение уровня определяется по ослаблению интенсивности ультразвука при прохождении через слои жидкости и газа; в *резонансных уровнемерах* — посредством измерения частоты собственных колебаний столба газа над уровнем жидкости, которая зависит от высоты уровня.

*Термокондуктометрическими* называются уровнемеры, элементом электрической цепи которых является нагреваемый током резистор с большим температурным коэффициентом электросопротивления, электрическое сопротивление которого зависит от уровня жидкости. Принцип действия таких уровнемеров основан на различии уровня теплообмена в жидкостях и газах. Чувствительный элемент уровнемеров представляет собой протяженный терморезистор, электрическое сопротивление которого определяется его температурой, причем чувствительность увеличивается с ростом температурного коэффициента электросопротивления материала.

#### Методы измерения расхода

*Метод измерения расхода по перепаду давления в сужающих устройствах* основан на зависимости перепада давления в неподвижном сужающем устройстве, установленном в трубопроводе, от расхода измеряемой среды. Принцип измерения заключается в том,

что при протекании потока через отверстие сужающего устройства повышается скорость потока по сравнению со скоростью до сужения. Увеличение скорости, а следовательно, и кинетической энергии вызывает уменьшение потенциальной энергии и соответственно статического давления. Наиболее распространенными представителями расходомеров постоянного перепада являются ротаметры.

*Тахометрическими* называются расходомеры, в которых скорость движения рабочего тела пропорциональна объемному расходу измеряемой среды. В большинстве случаев рабочее тело — преобразователь расхода (крыльчатка, турбинка, шарик и т.п.) — под воздействием потока вращается. В зависимости от устройства рабочего тела расходомеры подразделяются на крыльчатые, турбинные, шариковые, камерные, кольцевые и др.

*Электромагнитные расходомеры* основаны на законе электромагнитной индукции, в соответствии с которым в электропроводной жидкости, пересекающей магнитное поле, индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости движения жидкости.

Ультразвуковые расходомеры основаны на измерении зависящего от расхода того или иного акустического эффекта, возникающего при прохождении ультразвуковых колебаний через контролируемый поток жидкости или газа. Используется две разновидности ультразвуковых расходомеров: расходомеры, основанные на перемещении ультразвуковых колебаний движущейся средой, и доплеровские.

*В вихревых расходомерах жидкости/газа* значение расхода определяется по зависимости частоты вихрей Кармана, возникающих как при введении в поток тела обтекания, так и при специальном закручивании потока, от расхода жидкости/газа.

*Массовые расходомеры* являются разновидностью силовых расходомеров, у которых выходной сигнал или показания пропорциональны массе протекающего вещества. В массовых расходомерах используются кориолисовы силы, поэтому их часто называют кориолисовыми расходомерами.

#### Методы измерения влажности

*Психрометрический метод* измерения влажности основан на измерении психрометрической разности температур между "сухим" и "мокрым" термометрами. Мокрый термометр смачивается водой через специальный фитиль. Испарения, а следовательно, и охлаждение с поверхности мокрого термометра тем больше, чем ниже влажность газа. Поэтому разность температур сухого и мокрого термометров зависит от влажности газов.

*Метод точки росы* основан на определении температуры, при которой газ становится насыщенным находящейся в нем влагой. Эта температура определяется по началу конденсации водяного пара на зеркальной поверхности, температура которой может устанавливаться любой в интервале температур рабочего влагомера.

*Сорбционный метод* основан на связи физических свойств гигроскопических веществ с количеством

поглощенной ими влаги, зависящей от влажности анализируемого газа.

*Оптический метод* основан на измерении инфракрасного (ИК) излучения за счет его поглощения парами воды.

#### Методы анализа состава газов

Существующая классификация газоанализаторов основывается на физико-химических свойствах, положенных в основу измерения концентрации определяемых компонентов смеси, и включает следующие основные группы приборов: механические, тепловые, магнитные, оптические, электрические, хроматографические, и масс-спектрометрические.

*В механических газоанализаторах* измерение содержания определяемых компонентов производится на основании измерения механических параметров состояния или соответствующих свойств газовой смеси. К числу информативных величин в этих приборах относятся измерения объема или давления пробы газовой смеси, ее вязкости, плотности, скорости распространения звука. *Объемные химические газоанализаторы* являются наиболее распространенными приборами механического типа (волюмометрические). О содержании в них определяемого компонента судят по измерению объема газовой смеси в результате избирательного поглощения, каталитического окисления или сжигания определяемого компонента.

*В тепловых газоанализаторах* измерение концентрации определяемого компонента производится измерением тепловых свойств газовой смеси, зависящих от концентрации определяемого компонента. Наиболее распространенными приборами этого типа являются газоанализаторы, основанные на измерении теплопроводности смеси (термокондуктометрические) и теплоотдачи, выделяющейся при реакции каталитического окисления определяемого компонента (термохимические).

*В магнитных газоанализаторах* концентрация определяемого компонента измеряется по изменению магнитных свойств газовой смеси. Газы по их магнитной восприимчивости делятся на парамагнитные, втягиваемые в магнитное поле и диамагнитные, выталкиваемые из него.

*В оптических газоанализаторах* концентрация определяемого компонента измеряется по изменению оптических свойств газовой смеси, к числу которых относятся показатели преломления, спектрального поглощения и излучения, спектральная плотность и т.п. Наиболее распространенными являются четыре группы оптических газоанализаторов: инфракрасного и ультрафиолетового поглощения; фотокolorиметрические; люминесцентные; ослабления видимого излучения.

*В электрических газоанализаторах* концентрация того или иного компонента определяется по изменению электрических свойств газовой смеси или жидкости, с которой прореагировал определенный компонент. К числу наиболее распространенных газоанализаторов относятся электрохимические, применяемые

для измерения микроконцентраций токсичных газов и оксидов азота (циркониевые), содержащихся в воздухе и дымовых газах, определения концентрации загрязняющих примесей при производстве чистых газов.

*Хроматографические газоанализаторы* предназначены для анализа многокомпонентных газовых смесей, состава жидкостей и твердых тел. Существует три разновидности хроматографического метода измерения, различающиеся способом перемещения анализируемой смеси: проявительный, фронтальный и вытеснительный. Первый метод является наиболее распространенным. В его рамках различаются разновидности, обусловленные процессом разделения смеси на компоненты: газоадсорбционный, газожидкостный и капиллярный.

#### Методы анализа состава жидкости

К числу наиболее распространенных методов анализа жидкостей, применяемых в промышленных анализаторах, относятся разновидности электрохимического, оптического и теплового методов, а также хроматографический, титрометрический, масс-спектрометрический.

*Электрометрические методы: кондуктометрический*, с помощью которого измеряют общую электриче-

скую проводимость, концентрацию диссоциирующего вещества в растворе, кондуктометрическое титрование; *потенциометрический* — измеряют концентрацию конкретных ионов (ионометрия), окислительно-восстановительный потенциал (редоксометрия), потенциометрическое титрование; *амперометрический и кулонометрический* — определяют концентрацию определенного вещества в растворе или расплаве.

*Оптические методы: колориметрический и пламенно-фотометрический* — определяют концентрацию определенного вещества в растворе или расплаве; *турбидиметрический и нефелометрический* — определяют концентрацию взвешенных частиц в суспензиях и эмульсиях.

*Тепловой метод — термокондуктометрический* — измерение концентрации растворенных газов.

Таким образом, кратко рассмотрены основные методы измерения температуры, давления, уровня, расхода, влажности и состава газов. Далее в разделе представлены промышленные измерительные приборы отечественного и зарубежного производства, базирующиеся на современных методах измерения: особенности конструкции, технические и метрологические характеристики, принципы измерения, преимущества, рекомендации по поверке, предпочтительные области применения и т.д.

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОМПЛЕКСА

### МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ, УРОВНЯ И РАСХОДА

А.Л. Виноградов, С.А. Голь, К.С. Устинов (ООО "КБМТ")

В.Е. Корнеев, Ю.Л. Виноградов (РГРТУ)

*Рассматриваются вопросы проектирования и внедрения в серийное производство перспективного комплекса интеллектуальных многопараметрических приборов для измерения давления, уровня и расхода в теплоэнергетике и жилищно-коммунальном хозяйстве.*

Рассматриваемый комплекс предназначен для непрерывного измерения и преобразования в унифицированный токовый сигнал 4...20 мА, а также в цифровой код давления, расхода, уровня и температуры нейтральных и агрессивных сред. Области применения: в системах автоматического контроля, регулирования и управления ТП взрывобезопасных и взрывоопасных производств нефтегазовой, химической, металлургической, энергетической, пищевой и других отраслях промышленности, а также на объектах атомной энергетики и жилищно-коммунального хозяйства. В настоящее время для решения вышеуказанных задач используются отдельные приборы соответствующего назначения. Результаты их измерений обрабатываются ЭВМ для получения требуемых параметров. В работе предлагается унифицированный базовый прибор, позволяющий путем подключения к нему различных первичных измерительных преобразователей реализовывать расходомеры, уровнемеры, теплосчетчики. Использование комплекса в составе АСУТП освобождает ресурсы системы, в частности, память, используемую для хранения алгоритмов вычисления значений расхода, уровня и количества тепла, и время, затрачиваемое

на это вычисление. Объединение в одном компактном недорогом устройстве таких функций, как многопараметрические измерения, сложные расчеты, самодиагностика и др. делают комплекс идеальным решением для измерений, использующих различные типы первичных преобразователей. Поэтому разработка и серийное освоение принципиально нового для отечественного приборостроения и российского рынка комплекса многопараметрических преобразователей является актуальной задачей.

В настоящей работе рассматриваются следующие задачи:

- повышение точности приборов для широких пределов изменения измеряемых величин и возмущающих факторов;
- полная компенсация дополнительной температурной погрешности в условиях воздействия стационарных тепловых потоков;
- создание средств дистанционного управления и диагностики измерительных приборов на основе цифровых интерфейсов;
- расширение функциональных возможностей интеллектуальных многопараметрических ИП;

• разработка ПО для интегрирования измерительных приборов в цифровые информационные и управляющие системы, поддерживающие международные протоколы обмена.

В основу повышения точности измерительных преобразователей (ИП) положен структурно-алгоритмический метод компенсации погрешностей следящего уравнивания на основе функциональной коррекции [1]. Автоматическая компенсация погрешностей ИП использует адаптивно идентифицируемую на этапе градуировки многопараметрическую функцию коррекции. Реальная статическая функция преобразования ИП в режиме итерационной коррекции регулируется так, чтобы измеряемая при этом погрешность поддерживалась равной нулю. Технический результат достигается за счет методов повышения точности ИП на основе структурной и временной избыточности.

Доминирующим источником погрешности при измерении давления и расхода является нелинейность реальной статической функции преобразования измерительного блока, состоящего из упругой мембраны, деформирующейся под действием приложенного давления (разности давлений) и передающей перемещение на чувствительный элемент, изменяя электрическое сопротивление кремниевых тензорезисторов мостовой схемы. Для линеаризации функции преобразования измерительного блока предлагаются методы адаптивного моделирования и идентификации измерительного канала с использованием дополнительной информации о возмущающих воздействиях, т.е. на этапе градуировки приборов программа микропроцессора обучается на множестве эталонных значений измеряемой величины  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ , где  $n$  — число элементов множества зависит от величины нелинейности функции преобразования измерительного блока. Множество  $P$  служит основой для построения математической модели измерительного блока. Степень адекватности этой модели, в конечном счете, и определяет погрешность прибора в целом. В базовом комплексе приборов САПФИР-22МР для построения модели использовалась кусочно-линейная аппроксимация, которая не позволяла описать погрешность гистерезиса упругой мембраны. В данном проекте предлагается строить модель в виде поверхности с координатами "давление", "скорость изменения давления". Введение в модель второй координаты обеспечит минимизацию вариации показаний прибора. Подобный подход предполагает, что

*Лучше совсем не помышлять об отыскании каких бы то ни было истин, чем делать это без всякого метода.*

Рене Декарт

электронный блок близок к идеальному в смысле метрологических характеристик. Поэтому для исключения инструментальной погрешности электронных узлов предлагается применить астатические структуры с отрицательной обратной связью, обладающих в статическом режиме бесконечным коэффициентом усиления и использовать в измерительном эксперименте модифицированный метод замещения. Предложенное решение сформулировано в заявке на получение патента на предполагаемое изобретение: "Способ коррекции статических характеристик измерительных преобразователей и устройство для его осуществления". Экспериментальное исследование опытного образца показало возможность уменьшения основной приведенной погрешности до значения 0,075% на всех поддиапазонах измерения для стандартных измерительных блоков.

К задачам, связанным с принципиальными возможностями этого способа, можно отнести проблему устойчивости, а также выбор способа аппроксимации корректирующей функции и определение ее параметров [2].

Способ позволяет также уменьшить случайную составляющую погрешности за счет ее усреднения в результате интегрирования сигнала некомпенсации.

*Компенсация дополнительной погрешности в условиях нестационарных внешних воздействий* состоит в динамической коррекции влияния возмущающих факторов, прежде всего температуры, на особо чувствительные элементы измерительного канала за счет определения параметров функций влияния на этапе градуировки и введения вспомогательных каналов измерения возмущающих факторов [3].

Наличие *дистанционного управления* — отличительная опция интеллектуальных ИП, необходимая для встраивания в современные автоматизированные АСУТП.

В настоящее время большинство отечественных производителей выпускает интеллектуальные приборы, использующие для обмена данными промышленный протокол HART (Highway Addressable Remote Transducer). Протокол позволяет передавать одновременно аналоговый и цифровой сигналы по одной и той же паре проводов, используя частотную модуляцию. Однако такое решение для современного уровня развития телекоммуникаций по полевым шинам,



Рис. 1. Унифицированный коммуникатор дистанционной связи

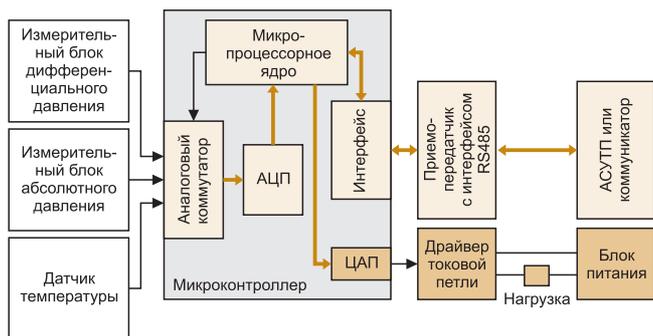


Рис. 2. Структурная схема многопараметрического ИП

несмотря на свою популярность, имеет определенные недостатки.

Во-первых, HART-протокол уже сыграл свою роль, обеспечив плавный переход от аналоговых систем управления ТП к цифровым. Использование в настоящее время гибридных аналого-цифровых систем управления, а следовательно, и измерительных приборов с таким протоколом, бесперспективно.

Во-вторых, при максимальной скорости передачи 1,2 Кбит/с, присущей HART-протоколу, возможно обеспечение только сервисных функций: дистанционная "установка нуля", диагностика работоспособности, выбор единицы измерения и т.д. Передача измерительного параметра от десятков и сотен приборов, обслуживающих современные производства, даже для квазистационарных режимов невозможна.

В-третьих, введение в состав прибора коммуникационного устройства отнимает энергию от измерительных цепей. При жестких ограничениях на потребляемый прибором ток (<4 мА) это приводит к ухудшению метрологических характеристик, так и не обеспечивает достаточную помехоустойчивость и дальность связи.

В-четвертых, единственное достоинство HART-протокола – поддержка сложившейся двухпроводной инфраструктуры связи на промышленных предприятиях перекрывается возможностями цифровой двухпроводной полевой шины Fieldbus Foundation, предложенной фирмой Fisher-Rosemount США. Скорость передачи информации по этому интерфейсу составляет 31,25 Кбит/с, то есть в 30 раз превышает пропускную способность HART-протокола. Кроме того, по данным фирмы Прософт в 80% систем автоматического контроля и управления ТП на базе распределенных полевых шин используется интерфейс RS-485 с протоколом обмена данными Modbus. Преимуществами этого протокола являются простота реализации, широкая распространенность готовых OPC-

серверов (как коммерческих, так и бесплатных) и SCADA-систем для работы с устройствами Modbus. Технология OPC (OLE for Process Control) представляет собой стандартный метод для доступа к периферийным устройствам, системам SCADA/MMI или другим промышленным приложениям, основанным на технологиях OLE, COM (Component Object Model) и DCOM (Distributed COM) [4].

Для оперативного удаленного управления и настройки ИП в комплекс входит специализированное ПО, устанавливаемое на компьютере АСУТП, а также унифицированный коммуникатор дистанционной связи, опытный образец которого показан на рис. 1. Коммуникатор обеспечивает связь с ИП по любому из вышеописанных протоколов.

Современные достижения микропроцессорной техники позволяют существенно расширить функциональные возможности ИП, сделав их многопараметрическими. Основная концепция создаваемого комплекса многопараметрических преобразователей состоит в создании базового унифицированного электронного блока (ЭБ), обеспечивающего подключение к нему различных первичных преобразователей. Различные комбинации ИП позволяют строить на его основе приборы различного функционального назначения: расходомеры, уровнемеры, теплосчетчики и т.д. Структурная схема устройства приведена на рис. 2.

Для измерения расхода жидкостей и газов косвенным методом на основе сужающего устройства необходимо проводить прямые измерения абсолютного давления, дифференциального давления и температуры рабочей среды, что определяет состав первичных преобразователей и средств их подключения. Измерение уровня пара в барабанах котлов ТЭЦ гидростатическим методом подразумевает наличие тех же каналов измерений. Идентичные параметры необходимы для расчета тепловой энергии.

Функциональные зависимости, положенные в основу косвенных измерений интересующих пользователя величин, имеют сложный трансцендентный характер [5], и в подавляющем большинстве случаев реализуются на основе либо специализированных вычислительных устройств, либо компьютеров АСУТП. Поэтому основным ограничением при построении многопараметрических ИП в условиях жестких требований к энергопотреблению, электромагнитной совместимости, искробезопасности и взрывонепроницаемости является мощность вычислительного ядра ЭБ.

Таким образом, важнейшей проблемой создания современных многопараметрических приборов является оптимизация вычислительных ал-



Рис. 3. Опытный образец расходомера

горитмов, обеспечивающих заданную погрешность измерения при существующих ограничениях. За счет этого оказалось возможным реализовать вычислительные процедуры расчета расхода жидкостей и газов, уровня и тепловой энергии на микропроцессоре с архитектурой intel 8052 в масштабе РВ. Предлагаемый комплексный подход к решению поставленных задач отличается высокой конкурентоспособностью, и аналогов в отечественной практике приборостроения не имеет.

На рис. 3 представлен опытный образец расходомера, к освоению серийного выпуска которого в настоящее время приступило ОАО "Теплоприбор" (г. Рязань). Прибор продемонстрировал следующие основные характеристики: динамический диапазон 1:10, погрешность измерений 2%, дополнительная погрешность не превышает основной в диапазоне температур -40...80°C.

#### Список литературы

1. Голь С.А. Автоматизация градуировки интеллектуальных измерительных преобразователей давления // Автоматизация в промышленности. 2006. №11.
2. Виноградов А.Л., Голь С.А., Лавров А.М., Устинов К.С. Исследование устойчивости процесса настройки параметров функции коррекции измерительного преобразователя // Известия РАЕН. Дифференциальные уравнения. 2006. № 11.
3. Виноградов А.Л., Голь С.А., Устинов К.С., Федоров В.Л. Структурно-алгоритмические методы коррекции погрешностей в современных интеллектуальных преобразователях давления // Автоматизация в промышленности. №11. 2006.
4. Виноградов А.Л., Виноградов Ю.Л., Корнеев В.Е., Устинов К.С., Федоров С.Ю. Расходомер с протоколом связи RS-485 и поддержкой спецификации OPC // Информационно-измерительная и биомедицинская техника. Сб. научных трудов. Рязань: РГРТА, 2006.
5. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ. Изд-во "Политехника". СПб, 2002.

*Виноградов Александр Леонидович — канд. техн. наук, доцент, директор,*

*Голь Станислав Артурович — канд. техн. наук, ведущий инженер,*

*Устинов Константин Сергеевич — ведущий программист*

*ООО "Конструкторское бюро микропроцессорной техники" г. Рязань (ООО "КБМТ"),*

*Виноградов Юрий Леонидович — канд. техн. наук, доцент,*

*Корнеев Владимир Евгеньевич — аспирант Рязанского государственного радиотехнического университета.*

*Контактный телефон (4912) 92-03-48. E-mail: iit@rgta.ryazan.ru*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТОВОЛОКНА В ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПИРОМЕТРОВ

**А.Ю. Неделько (ОАО НПП "Эталон")**

*Показана возможность использования оптоволоконных элементов в пирометрах для передачи потока измеряемого теплового излучения от объекта на датчик, а также для передачи излучения видимой подсветки области измерения на объект.*

В настоящее время оптическое волокно широко применяется в различных областях деятельности. Наибольшее распространение волокно получило в системах связи для передачи потока цифровой информации посредством модулированного оптического излучения. В измерительных системах оптическое волокно может быть применено в качестве линии передачи, а также может играть роль непосредственно чувствительного элемента.

На предприятии "Эталон" использование оптоволоконна в качестве непосредственно датчика находится на стадии изучения, а оптоволоконные элементы в пирометрах используются для передачи потока измеряемого теплового излучения от объекта на датчик, а также для передачи излучения видимой подсветки области измерения на объект.

Отметим некоторые достоинства оптических волокон: малые потери излучения (минимальные 0,154 дБ/км), малые диаметр и масса; эластичность (малый допускаемый радиус изгиба); механическая прочность (выдерживает нагрузку на разрыв примерно 7 кг); отсутствие взаимной интерференции (проникновение сигнала в соседние линии); безындукционность (практически отсутствует влияние электромагнитной индукции, а следовательно, и отрицательные явления, связанные с близостью к линии элект-

ропередачи, импульсами тока в силовой цепи и т.п.); взрывобезопасность (гарантируется абсолютной неспособностью волокна быть причиной искры); высокая коррозионная стойкость, особенно к химическим растворителям, маслам, воде.

Кратко рассмотрим конструкцию оптического волокна, а также основные принципы и понятия, используемые в оптоволоконной технике.

Волоконным световодом называют оптически прозрачную (в заданной спектральной области) нитевидную структуру, содержащую сердцевину и коаксиальную ей оболочку, показатель преломления  $n_0$ , которой меньше, чем у сердцевины  $n_c$ . В качестве материала световода обычно применяют кварцевое стекло ( $n \approx 1,5$ ), легированное различными примесями, или оптически прозрачные полимеры. Снаружи волоконный световод может быть покрыт защитной оболочкой, которая обычно не влияет на его оптические свойства.

Для передачи излучения по оптоволокону необходимо оптическое сопряжение источника излучения с одним из торцов световода. При этом в оптоволоконне могут распространяться только лучи, для которых угол падения на оболочку не превышает величины угла полного внутреннего отражения, то есть выполняется условие:

$$\cos \theta \geq n_0/n_c. \quad (1)$$

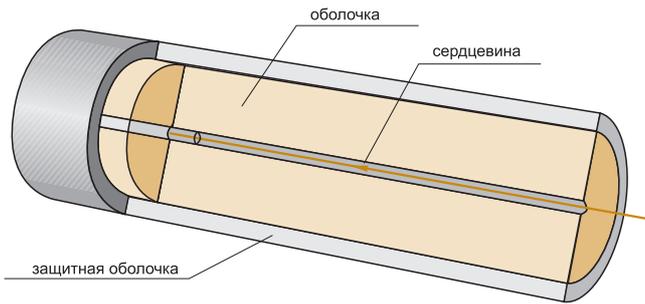


Рис. 1. Одномодовое волокно

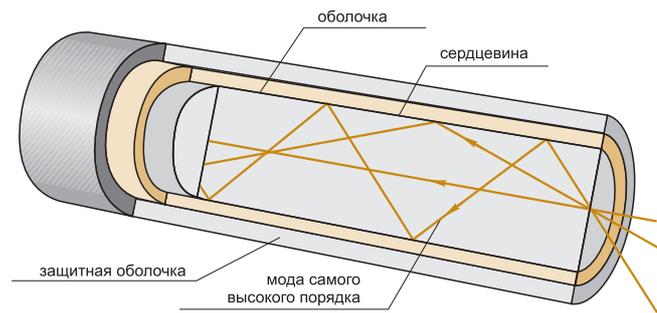


Рис. 2. Многомодовое волокно



Рис. 3. Затухание в оптоволокне

Максимально допустимый угол ввода света в световод (по отношению к оси световода) получил название апертурного угла ввода, синус данного угла называется числовой апертурой световода, которая вычисляется по формуле:

$$NA = \sin \theta_{max} = \sqrt{n_c^2 - n_o^2}, \quad (2)$$

где  $\theta_{max}$  – апертурный угол ввода света в оптоволокно;  $n_c$  – показатель преломления сердцевины оптоволокна;  $n_o$  – показатель преломления оболочки оптоволокна.

Таким образом, в оптическом волокне будет распространяться световой пучок, падающий на торец световода под углом, не большим  $\theta_{max}$ , и диаметром не больше диаметра сердцевины. Однако и в этом случае неизбежны потери на входе в световод в связи с отражением излучения от его торца.

Оптические лучи внутри волокна распространяются, многократно испытывая полное отражение. Но распространение этих лучей возможно лишь в том случае, когда они проходят под определенными углами. При попадании света от внешнего источника на торец световода в нем возбуждаются несколько волн (лучей), которые распространяются по световоду независимо от исходного луча. Возможные (разрешенные) собственные световые волны, которые распространяются в оптоволокне, называют модами. По сути, модой можно также назвать возможную траекторию прохождения светового луча по оптоволокну.

Оптоволокно, в котором в идеальном случае может существовать только одна мода (луч), получило название одномодовое волокно (рис. 1). Такой эффект достигается за счет использования лазеров и диаметра сердцевины оптоволокна, соизмеримого с длиной волны ( $d/\lambda < 10$ ) – для одномодового волокна диаметр сердцевины составляет 8...10 мкм.

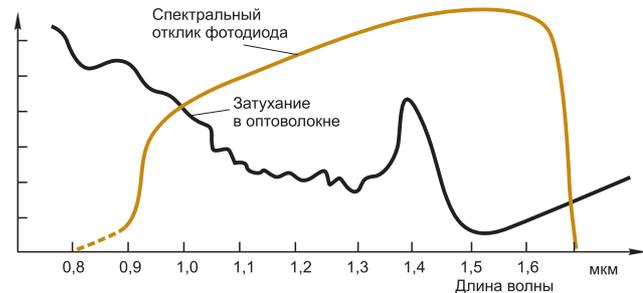


Рис. 4. Спектральные характеристики оптоволокна и фотодиода

В многомодовом волокне (рис. 2) вследствие сравнительно большого диаметра сердцевины и использования некогерентных источников излучения возможно существование большого числа мод. Промышленные многомодовые световоды для ВОЛС имеют диаметр сердцевины 50 или 62,5 мкм, внешний диаметр оболочки световода в обоих случаях составляет 125 мкм.

При передаче аналогового сигнала немаловажным является тот факт, что моды высоких порядков (входящие в волокно под большими углами) значительно затухают при изгибах волокна. Следовательно, для уменьшения погрешностей при изгибах волокна следует либо использовать одномодовое волокно, либо заведомо не допускать попадания в волокно мод высоких порядков.

При распространении излучения в волокне также возникают потери, связанные с его поглощением и рассеянием. Величину потерь при распространении принято оценивать в децибелах на километр:

$$k = -10 \cdot \frac{1}{L} \lg \left( \frac{I_{вых}}{I_{вх}} \right), \quad (3)$$

где  $I_{вх}$ ,  $I_{вых}$  – интенсивности излучения соответственно на входном/выходном концах световода;  $L$  – длина световода в километрах.

Реальная результирующая кривая затухания (рис. 3) отличается от теоретической, что связано с химическим составом материала оптоволокна (прежде всего, с примесями) и приводит к ухудшению его прозрачности на определенных длинах волн.

Участки спектра, на которых достигаются минимальные значения затухания, получили название окон прозрачности. В современной волоконно-оптической технике для передачи информации используются три основных окна прозрачности: 1 окно – в об-

ласти 850 нм; 2 окно – 1270/1280...1325 нм; 3 окно – 1528...1565 нм.

Учитывая сведения, приведенные выше, можно было приступить к разработке прототипа пирометра с оптоволоконным кабелем.

Большинство систем связи работают на длине волны 1,55 мкм, где ослабление сигнала в кварцевом волокне минимально. Логично выбрать фотодиод с максимумом чувствительности на этой длине волны, что при длинах волокна  $\geq 10$  м не критично. Если наложить кривые спектральных характеристик оптоволоконна и фотодиода, то видно, что рабочая область фотодиода попадает в полосу с минимальными потерями (рис. 4).

При выборе типа оптоволоконна решающими были следующие факторы: термостойкость; передача достаточной мощности потока излучения на датчик; воспроизводимость при изгибе кабеля.

От наиболее доступных из стандартных оптических волокон, применяемых для связи с пластиковыми оболочками, пришлось отказаться, так как рабочий температурный диапазон для них ограничен интервалом 70...80°C. Но в нормальных условиях макет с кабелем из пластикового волокна работал вполне удовлетворительно (рис. 5).

Оптическое волокно с сердцевиной и оболочкой из кварцевого стекла может выдерживать эксплуатацию при температурах до 600°C и намного более стойко к механическим деформациям. Оценив площади приемных площадок фотодиодов и технологические возможности оборудования, следующий вариант кабеля был изготовлен с оптоволоконном из кварцевого стекла, диаметр кварцевой сердцевины 500 мкм. С волокном такого диаметра легко работать и чувствительность по уровню шумов позволяла измерять температуры от 250°C. Но при испытаниях на изгиб уровень сигнала изменялся на 3...5% из-за ослабления мод высоких порядков. Следовало не допускать мод высоких порядков на входе в оптоволоконно. В конструкцию оптической приемной головки была установлена апертурная диафрагма, которая ограничивала моды высоких порядков. В результате зависимость от изгиба кабеля снизилась до 0,1%.

В качестве внешней защитной оболочки используется металлорукав из нержавеющей стали с внешним диаметром 6 мм, но наличие фторопластовых деталей в конструкции ограничивает температуру эксплуатации до 150°C. Со стороны подключаемой к пирометру кабель притягивается фторопластовой гайкой, а в пирометре установлена эбонитовая втулка, таким образом кабель надежно изолирован от прибора. Длина кабеля ограничивается только технологией сборки и в настоящий момент может изготавливаться кабель длиной до 10 м.

Для приклейки волокна к коннектору используется клей на основе эпоксидной смолы. Для шлифовки торца волокна понадобится металлическая оправка (рис. 6), ровная полированная металлическая или стеклянная пластина и полировочная шкурка. Момент окончательной готовности определяется при помощи микроскопа. Без микроскопа дефекты обработки торца оптоволоконна не видны. Отсутствие повреждений волокна в кабеле проверяется путем просвечивания его с помощью лазера или лампы. Дополнительно проверяется влияние изгиба путем накручивания кабеля на оправку радиусом, равным минимально допустимому радиусу изгиба кабеля.

В пирометре ПД-7 подсветка области измерения производится путем подключения кабеля к разьему "Лазер", что конечно не совсем удобно. После наведения оптической головки в нужное место кронштейн фиксируется затяжкой винтов и кабель подключается к разьему "Сигнал". Неиспользуемые оптические разьемы закрываются защитными колпачками.

Следующим этапом стало объединение возможности измерений и подсветки. При работе прибора светящиеся точки окружают область измерений (рис. 7).

Введение оптоволоконна в оптическую схему пирометра дает ряд положительных эффектов. Так как диаметр сердцевины мал, то показатель визирования получается не хуже 1:100...1:150. Переотражения и боковые засветки через волокно не проходят, так как попадают под большими углами. Внешний вид пирометра ПД-9 приведен на рис. 8. Добавив в конструкцию зеркало с углом 45° можно получить достаточно интересную оптическую схему.

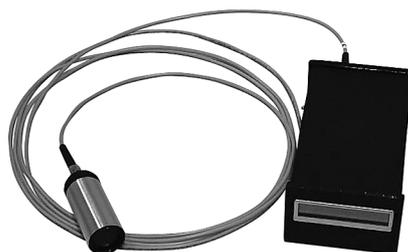


Рис. 5. Макет пирометра ПД-7 с пластиковым волокном

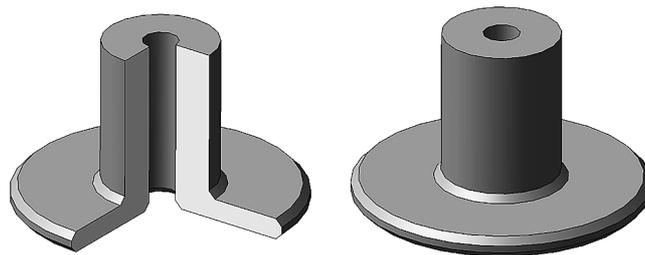


Рис. 6. Оправка для полировки оптоволоконна

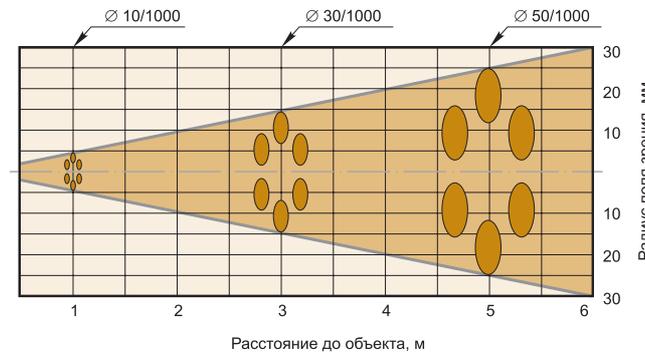


Рис. 7. Поле зрения пирометра ПД-9



Рис. 8. Пирометр ПД-9

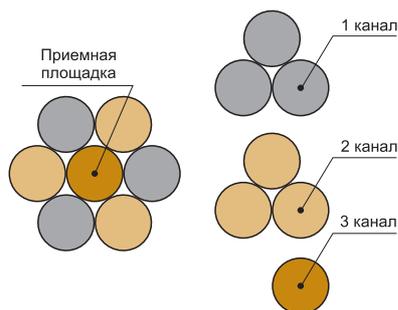


Рис. 9. Схема разделения каналов

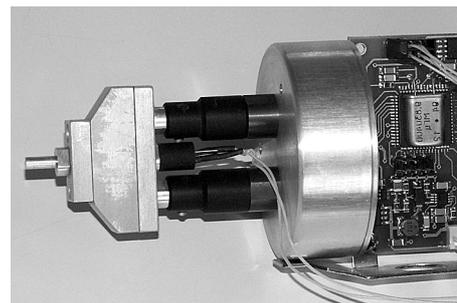


Рис. 10. Макет пирометра ПД-20

Волокна подсветки заводятся в боковой штуцер и полируются вместе с зеркалом и сигнальным волокном. Наведение на объект можно осуществлять как по светящимся точкам, так и наблюдая его через окуляр визира.

Еще одним вариантом использования волокна стала попытка разделения измерительного канала на два в пирометре спектрального отношения ПД-20. В каждом канале устанавливается интерференционный фильтр, световой поток через который должен быть максимально параллельным. Принцип разделения каналов поясняется на рис. 9. Центральное волокно используется для подсветки центра области измерения, два пучка по три волокна расходятся по каналам измерений.

Для подсветки центра области измерений устанавливается лазерный диод. Интерференционные фильтры и линзы термостатируются вместе с электронной измерительной схемой (рис. 10).

Подводя итоги, отметим следующее: применение оптического волокна открывает новые возможности

в разработке пирометрических средств измерений, улучшения параметров оптики, помехозащищенности и надежности, эргономичности и безопасности.

Применение оптоволоконна улучшает метрологические характеристики и не влияет критично на себестоимость, если не учитывать требования к квалификации специалистов. За счет применения оптоволоконна удалось увеличить показатель визирования, расширить температурный диапазон эксплуатации, а также значительно снизить влияние электромагнитных полей на работоспособность прибора в пирометре ПД-7.

На предприятии "Эталон" только началось изучение и применение оптоволоконных технологий, многое приходится познавать путем проб и ошибок. Большой интерес представляет изучение большого числа оптических эффектов, возникающих в оптоволоконне под воздействием различных физических параметров, с целью создания измерительных комплексов на базе оптоволоконных датчиков.

*Неделько Александр Юрьевич – ведущий инженер ОАО НПП "Эталон".*

*Контактный телефон (3812) 36-99-67. [Http://www.omsketalon.ru](http://www.omsketalon.ru)*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕХАНОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ДАВЛЕНИЯ

**Н.Ю. Макарова, К.В. Татмышевский, Д.Д. Павлов (ВлГУ)**

*Рассмотрены принцип действия, математическая модель и результаты моделирования механолюминесцентных датчиков давления (МЛД), преобразующих импульсное давление в оптический сигнал. МЛД являются принципиально новыми преобразователями давления – генераторными, твердотельными, миниатюрными, интегрирующимися в волоконно-оптические измерительные системы.*

### Введение

Автоматизация ТП, эффективное управление различными установками, развитие научных исследований требуют измерений разнообразных физических величин. В настоящее время на долю измерений давления приходится второе место после измерений температуры. Необходимо отметить возросший объем измерений в пределах одного объекта. Кроме того, условия, в которых производятся измерения, характеризуются дестабилизирующими воздействиями: электромагнитными и радиационными помехами, взрыво- и искроопасностью, высокой температурой, агрессивными средами. Системы с волоконно-оптическими линиями связи интенсивно вытесняют сис-

темы с традиционными кабельными линиями связи в случаях проведения измерений в экстремальных условиях. Это приводит к разработке датчиков, использующих в своей работе сигналы той же физической природы – оптические.

Свойства некоторых веществ – преобразовывать механическое воздействие в оптический сигнал (механолюминесценция (МЛ)) используется для создания оптических датчиков давления. Использование световых сигналов и волоконной оптики решает задачу сопряжения датчиков с волоконными линиями и повышения помехоустойчивости к электромагнитным помехам. Отсутствие движущихся частей и твердотельность датчика обеспечивают надежность, а использо-

вание помимо амплитудно-временных параметров оптического сигнала его пространственной модуляции и состояния поляризации повышает информативность.

### Измерительная цепь с механолюминесцентным датчиком

Обобщенная структурная схема информационно-измерительной системы с МЛД приведена на рис. 1.

Импульс механического напряжения  $\sigma(t)$  воздействует на МЛД. При превышении предела текучести механолюминофора начинает генерироваться люминесцентное излучение  $\Phi(t)$ . Излучение, пройдя по волоконно-оптической линии связи, передается в фотоприемное устройство, где преобразуется в электрический сигнал. Далее сигнал обрабатывается согласно разработанному алгоритму для получения информации о входном механическом импульсе. Необходимо отметить, что МЛД и волоконно-оптическая линия связи являются помехоустойчивыми блоками и могут размещаться и надежно функционировать в условиях мощных электромагнитных воздействий. Фотоприемный модуль и блок обработки электрического сигнала размещаются удаленно и при необходимости экранируются. Свечение датчика наблюдается, когда кристаллический люминофор испытывает пластическую деформацию, поэтому процесс обработки выходного оптического сигнала позволяет определить параметры механического импульса выше предела текучести люминофора.

Вариант МЛД с сосредоточенным чувствительным элементом представлен на рис. 2.

### Физическая сущность явления.

#### Математическая модель МЛ преобразователя

Механолюминесценция (триболюминесценция) как физическое явление обусловлена способностью светящихся веществ (люминофоров) трансформировать механическую энергию в видимый свет или реже в ультрафиолетовое или инфракрасное излучение. Способностью к МЛ обладают различные материалы, имеющие в основном кристаллическую структуру. Треть всех твердых тел обладает способностью к механолюминесценции, хотя в большинстве случаев излучение очень слабо и может наблюдаться адаптированным глазом лишь в полной темноте.

В обширном классе веществ, обладающих способностью к люминесценции вообще и к МЛ в частности, особое место занимают вещества, объединенные под общим названием "кристаллофосфоры". По своим свойствам кристаллофосфоры относятся к полупроводникам класса А2В6 с широкой запрещенной зоной и являются диэлектриками с высоким удельным сопротивлением. Люминесценция кристаллофосфоров возникает благодаря присутствию малого количества примесей других веществ, называемых активаторами. Основное вещество, за некоторыми исключениями, не обладает люминесцентными свойствами [1]. Наиболее ярким свечением обладают халькогенидные кристаллофосфоры ( $ZnS$ ,  $CdS$ ,  $ZnSe$ ,  $Zn_2SiO_4$ ,  $CaWO_4$ ). Одной из групп КФ являются

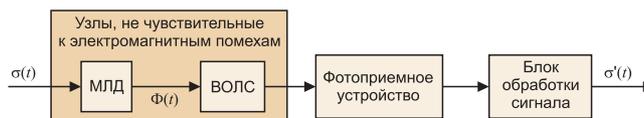


Рис. 1. Обобщенная структурная схема измерительной системы с механолюминесцентным датчиком давления (МЛД), где  $\sigma(t)$  – входное механическое воздействие;  $\Phi(t)$  – световой поток;  $\sigma'(t)$  – механическое воздействие, восстановленное из выходного оптического сигнала датчика

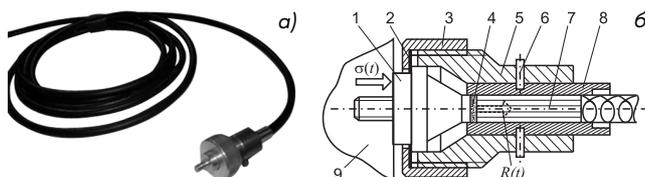


Рис. 2. Механолюминесцентный датчик с чувствительным элементом сосредоточенного типа волнового действия:

а) внешний вид датчика;

б) конструкция датчика: 1 – сердечник-концентратор; 2 – упругая прокладка; 3 – накидная гайка; 4 – механолюминесцентный чувствительный элемент; 5 – корпус; 6 – штифт; 7 – волоконно-оптический жгут; 8 – наконечник волоконно-оптического жгута; 9 – корпус изделия или специального крепежного элемента

ся цинкосульфидные соединения, характеризующиеся наибольшей яркостью свечения. Именно по этой причине на  $ZnS$ -фосфорах проводится подавляющее большинство исследований МЛ [2]. Для придания чистому сульфиду цинка люминесцентных свойств в него вводят различные примеси (активаторы), определяющие спектр излучения, время послесвечения и способность к люминесценции. Акт излучения происходит в субмикроскопических образованиях, связанных с атомами активатора и называемых центрами свечения (ЦС). В зависимости от активатора люминесценция может быть внутрицентральной или рекомбинационной, причем внутрицентральной люминесценция характеризуется высоким энергетическим выходом, а рекомбинационная – длительным послесвечением (внутрицентральной люминесценция рассмотрена на примере соединения  $ZnS:Mn$ , рекомбинационная – на примере  $ZnS:Cu$ ).

Доказано [3], что МЛ в соединениях А2В6 является следствием процессов движения дислокаций, сопровождающих пластическую деформацию кристаллов. Экспериментально обнаружено, что дислокации в полупроводниках А2В6 и, в частности,  $ZnS$  обладают сильным электрическим зарядом. В процессе пластической деформации происходит взаимодействие ЦС с электрическим полем движущихся заряженных дислокаций, которое приводит к возбуждению (ионизации) ЦС с их последующими излучательными переходами. Сильный заряд дислокаций обусловлен большой долей ионной составляющей в силах связи атомов основания  $ZnS$ .

Математическая модель МЛ преобразователя представляет собой систему интегродифференциальных уравнений, основой которой является уравнение светового потока люминесценции  $\Phi(t)$  как функции

времени. Механизм возбуждения МЛ не зависит от вида активатора, кинетика же излучения будет определяться видом люминофора [4].

В случае внутрицентральной люминесценции световой поток  $\Phi(t)$  зависит от скорости возбуждения ЦС во всем объеме кристалла  $\dot{N}_{\text{ЦС}}(t)$  при его деформации и определяется по экспоненциальному закону:

$$\Phi(t) = \frac{\eta}{\tau_{\text{л}}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{л}}}\right) \int_0^{t_{\sigma}} \dot{N}_{\text{ЦС}}(t) dt. \quad (1)$$

В случае рекомбинационной люминесценции световой поток  $\Phi(t)$  зависит от скорости ионизации ЦС во всем объеме кристалла  $\dot{N}_{\text{ЦС}}(t)$  при его деформации и определяется по гиперболическому закону:

$$\Phi(t) = \eta \frac{\beta \left( \int_0^{t_{\sigma}} \dot{N}_{\text{ЦС}}(t) dt \right)}{\left( 1 + \beta t \int_0^{t_{\sigma}} \dot{N}_{\text{ЦС}}(t) dt \right)}, \quad (2)$$

где  $\eta$  – энергия кванта света;  $\beta$  – коэффициент рекомбинации;  $t_{\sigma}$  – длительность возбуждения (ионизации) ЦС импульсом давления  $\sigma(t)$ ;  $\tau_{\text{л}}$  – время жизни возбужденного состояния.

Скорость возбуждения (ионизации) ЦС во всем объеме кристалла определяется особенностями механизма возбуждения люминесценции. Возбуждение ЦС в сильных электрических полях движущихся дислокаций происходит за счет туннелирования электронов на неравновесные возбужденные уровни.

В соответствии с электронными свойствами дислокаций в кристаллофосфорах исследовано их взаимодействие с ЦС. Выяснено, что скорость возбуждения (ионизации) ЦС зависит от плотности подвижных дислокаций  $N_{mD}$ , скорости их движения  $\tilde{U}_D$  и радиуса взаимодействия дислокации с ЦС  $r_{B3}$

$$\dot{N}_{\text{ЦС}} = N_{\text{ЦС}} 2r_{B3} \tilde{N}_{mD} \tilde{U}_D. \quad (3)$$

Напряженно-деформированное состояние чувствительного элемента датчика было проанализировано с использованием микродинамической теории пластичности, что позволило связать параметры, определяющие кинетику упругопластического деформирования, с макроскопическими параметрами удара – механическим напряжением и деформацией. Определяющее соотношение для скорости неупругих деформаций  $\dot{\epsilon}_1^p$  в форме Гилмана-Джонстона с учетом уравнения Орована имеет вид:

$$\tilde{N}_{mD} \tilde{U}_D = \frac{\dot{\epsilon}_1^p}{|\vec{b}|} = \frac{4}{3} k_s c_w \left( \tilde{N}_{iD}^0 + \frac{3}{4} M \epsilon_1^p \right) \times \exp\left(-\frac{D_f}{\sigma_1}\right) \exp\left(-\frac{\tilde{N}_{iD}^0 + \frac{3}{4} M \epsilon_1^p}{\tilde{N}_{\text{кр}}}\right), \quad (4)$$

где  $|\vec{b}|$  – модуль вектора Бюргерса, характеризующий область искажения кристаллической решетки

дислокацией определенного типа;  $k_s$  – поправочный коэффициент;  $c_w$  – скорость распространения сдвиговых волн в кристалле;  $\tilde{N}_{iD}^0$  – средняя начальная плотность дислокаций;  $M$  – коэффициент размножения дислокаций;  $D_f$  – эффективное напряжение внутреннего трения (сопротивление движению дислокации внутри кристалла);  $\sigma_1$  – главное значение тензора напряжения;  $\tilde{N}_{\text{кр}}$  – критическая величина общей плотности дислокаций.

Определены основные закономерности вывода излучения из МЛ чувствительного элемента с учетом его микроструктуры и параметров оптической среды. Структура чувствительного элемента (ЧЭ) представляет собой плоскопараллельный светорассеивающий слой частиц порошкообразного люминесцентного материала в затвердевшем прозрачном связующем. С учетом конструктивных параметров и внутренней структуры ЧЭ, величина полного потока излучения, выводимого с площадки ЧЭ в оптический канал, определяется по формуле:

$$\Phi(t) = 0,5 \eta_B k_n \Phi_1(t), \quad (5)$$

где  $k_n$  – коэффициент неравномерности свечения монослоев,  $\eta_B$  – максимальная доля мощности излучения, которую можно ввести из ЧЭ в волоконный световод,  $\Phi_1(t)$  – световой поток монослоя, определяемый по выражениям (1) или (2).

Таким образом, была получена совокупность уравнений, позволяющих определять световой поток люминесценции как функцию времени в зависимости от входного воздействия. Предложенная математическая модель может быть использована при разработке алгоритма обратного преобразования, позволяющего по оптическому сигналу датчика определить параметры входного механического воздействия.

#### Математическое моделирование МЛД

Расчеты светового потока, генерируемого МЛ датчиком давления при различных импульсных механических воздействиях, выполнены в среде MATLAB. В программе определяются квантово-механические, электрические и кинетические характеристики МЛ материала на основе промышленного электролюминофора ЭЛС-580М (состав ZnS:Mn,Cu; весовое содержание марганца 1%). В расчетах учитывалась только энергия квантов излучения, соответствующих максимуму спектра излучения марганцевых ЦС ( $\lambda = 580$  нм;  $\eta = 2,2$  эВ), так как интенсивность излучения медных ЦС приблизительно в 50 раз слабее. Кинетические параметры материала люминофора были определены с учетом технологии производства люминесцентных порошков.

Кинетика затухания свечения соответствует внутрицентральной люминесценции [2], характерной для ZnS:Mn с постоянной времени  $\tau = 150$  мкс. Следует отметить, что экспериментальное сравнение чувствительности группы промышленных электролюминофоров к механическому возбуждению показало, что наибольшей чувствительностью обладает именно люминофор ЭЛС-580М.

Проводился расчет энергетической светимости сенсора  $R(t)$ , то есть вычислялась величина потока, излучаемая сенсорным элементом с единичной площадью поверхности, равной  $1 \text{ м}^2$ . Входное воздействие в расчетах описывается одиночным импульсом давления  $\sigma(t)$ . На рис. 3 приведены механическое воздействие полусинусоидальной формы  $\sigma(t)$  и вызванное им МЛ излучение  $R(t)$ . Достоинством методики расчета является определение выходного оптического сигнала в абсолютных единицах энергетической светимости, пригодных для расчета схемы включения ФП.

Анализ выходных оптических сигналов МЛД показывает, что амплитуда и длительность световых импульсов существенно зависят не только от амплитуды, но и от длительности импульсов давления. При уменьшении амплитуды и крутизны волны давления наблюдается временная задержка в появлении излучения, которая определяется временем достижения давления, равного пределу текучести материала сенсорного элемента (рис. 4).

Это подчеркивает пороговый характер функции преобразования МЛД. То есть в пределах упругих деформаций генерации излучения практически не происходит. Наблюдается временной сдвиг между максимумом давления и максимумом излучения, причем величина сдвига растет с увеличением продолжительности нагружения (рис. 5).

Это объясняется тем, что фактически одновременно протекают два конкурирующих процесса. В первом процессе с разной скоростью может происходить накопление возбужденных ЦС. Скорость их накопления зависит преимущественно от скорости нарастания давления. Второй процесс имеет постоянную скорость перехода возбужденных ЦС в исходное состояние. Соответственно, если скорость возбуждения будет много больше скорости возврата, то будет наблюдаться интенсивное излучение с крутым фронтом нарастания. В противном случае концентрации возбужденных ЦС не хватит, чтобы появилось замет-

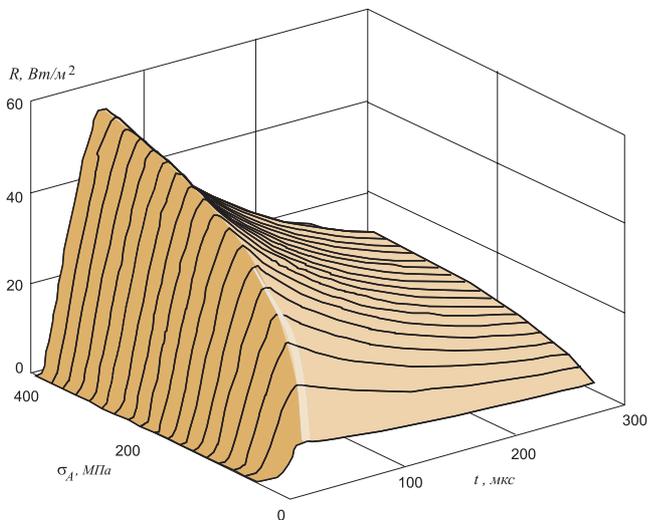


Рис. 4. Зависимость энергетической светимости МЛД  $R$  от амплитуды механического воздействия  $\sigma_d$

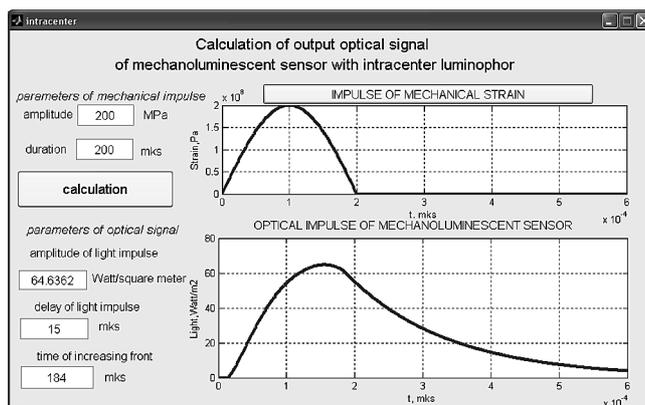


Рис. 3. Пример расчета выходного оптического сигнала механолюминесцентного датчика при синусоидальном механическом воздействии

ное излучение, хотя полная деформация датчика может быть значительно больше, чем в первом случае. Длительность оптического сигнала датчика на восходящей ветви практически во всех случаях в несколько раз больше длительности  $t_0$ . На нисходящей ветви длительность свечения значительно уменьшается. Снижение амплитуды и длительности излучения с ростом  $t_0$  объясняет отсутствие излучения при статическом воздействии. Ход процессов возбуждения ЦС в этом случае не изменяется, однако нарушение условия накопления возбужденных ЦС приводит к сильному снижению интенсивности излучения за счет увеличения его продолжительности.

Это подчеркивает существенные динамические свойства МЛД и сложность определения коэффициента преобразования датчика в целом. Для оценки применимости МЛД следует сначала рассчитать его реакцию на возможные предельные значения входного механического воздействия, а далее оценить возможность использования полученных реализаций для последующей регистрации конкретной аппаратурой.

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показало, что отклонения рас-

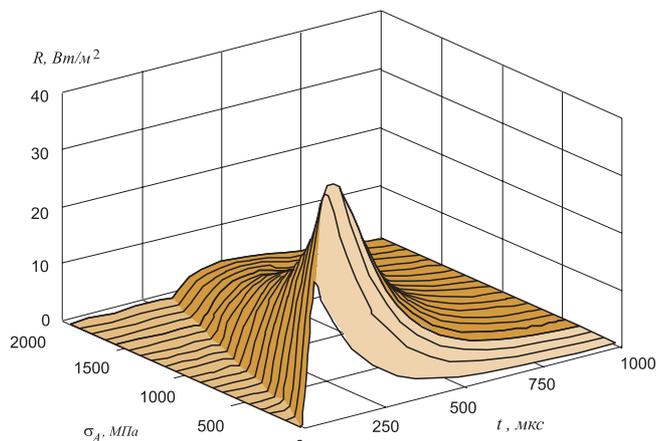


Рис. 5. Зависимость энергетической светимости механолюминесцентного датчика  $R$  от длительности механического воздействия  $t_0$

четных значений от экспериментальных не превосходят 10% [5]. Это доказывает адекватность и применимость разработанной математической модели МЛД.

#### Выводы

1. Проанализирована возможность использования МЛД импульсного давления в составе волоконно-оптических измерительных систем, предназначенных для эксплуатации в экстремальных условиях.

2. Разработана математическая модель МЛД на основе цинкосульфидных кристаллофосфоров. Разработанная программа расчета выходных оптических сигналов МЛД позволяет определять величину сигнала в абсолютных единицах измерения светового потока. Модель учитывает особенности конструкции сенсорного элемента и пригодна для расчета выходных сигналов датчиков любого типа.

3. Результаты моделирования показывают, что, во-первых, функция преобразования датчика имеет явно выраженный порог чувствительности (что предотвращает ложные срабатывания системы), во-вторых, функция преобразования имеет существенно нелинейный характер, в-третьих, форма выходных оптических сигналов значительно отличается от формы входных импульсов давления.

4. Разработанная модель позволяет оценить возможности применения датчиков, создать алгоритм и программу обработки выходного сигнала МЛД. Сопоставление полученных результатов с данными современных полупроводниковых фотоприемников показало, что даже с учетом потерь мощности излучения в оптическом канале возможно надежное детектирование оптического сигнала МЛД с целью дальнейшей обработки и использования в сенсорных устройствах сосредоточенного и распределенного типа различных промышленных измерительных систем.

#### Список литературы

1. Гурвич А.М. Введение в физическую химию кристаллофосфоров. М.: Высшая школа, 1982.
2. Прикладная электролюминесценция / Под ред. М.В. Фока. М.: Сов. радио, 1974.
3. Электронные свойства дислокаций в полупроводниках / Под ред. Ю.А. Осипьяна. М.: Эдиториал УРСС, 2000.
4. Макарова Н.Ю., Татмышевский К.В. Процесс преобразования в механолюминесцентном сенсоре давления // Инженерная физика. 2006. №1.
5. Макарова Н.Ю., Татмышевский К.В. Стенд для экспериментального исследования механолюминесцентных датчиков импульсного давления // Приборы и техника эксперимента. 2006. №1.

*Макарова Наталья Юрьевна — канд. техн. наук, преподаватель,*

*Татмышевский Константин Вадимович — канд. техн. наук, доцент,*

*Павлов Дмитрий Дмитриевич — аспирант Владимирского государственного университета (ВлГУ).*

*Контактный телефон (4922) 279-792. E-mail: mak-nat@inbox.ru*

## Об ультразвуковом методе измерения расхода

**И.А. Гришанова, С.И. Покрас, А.И. Покрас, И.С. Покрас (Фирмы "СЕМПАЛ")**

*Среди наиболее распространенных методов, позволяющих измерить расход или объем протекающей по трубопроводу жидкости (теплоносителя), выделяют электромагнитный, ультразвуковой, вихревой и скоростной (механические расходомеры). Рассмотрены преимущества и недостатки ультразвуковых расходомеров. Показаны факторы, оказывающие наибольшее влияние на процесс измерения ультразвуковых расходомеров, и предложены пути устранения вызываемых ими погрешностей.*

Первым шагом на пути экономии энергоресурсов, в частности тепла и газа, является их точный приборный учет. Существует большой выбор таких приборов, работающих на базе различных методов измерения расхода, среди которых наиболее распространены электромагнитный, ультразвуковой, вихревой и скоростной (механические расходомеры).

На вопрос: "Какой метод лучше?" однозначно ответить нельзя. В каждом конкретном случае либо потребитель, либо грамотный инженер должны сами оценить все достоинства и недостатки каждого из методов и сделать оптимальный выбор с учетом возможностей потребителя. Приборы, использующие в своей основе методы измерения вихревой и скоростной, прежде всего, ориентированы на потребителя, который желает приобрести теплосчетчик по минимальной стоимости и для которого высокие метрологические характеристики в широком диапазоне измерений непринципиальны. Если же финансовые возможности заказчика позволяют, и речь идет о приобретении прибора с высокими метро-

логическими характеристиками в более широком диапазоне измерения, то ему часто предлагают теплосчетчики, построенные на базе электромагнитных преобразователей расхода. Остановимся на них более подробно.

Электромагнитные расходомеры в российских публикациях последних лет представляются как приборы, которые по сравнению с другими типами измерителей расхода имеют более высокие метрологические характеристики (погрешность  $\pm 1...2\%$ ) в чрезвычайно широком диапазоне измерения, достигающем 1:500 и даже 1:1000. В последнее время в РФ появились приборы с еще более широким диапазоном, намного превышающим уже и 1:1000. Межповерочный интервал приборов при этом составляет 3...4 года. Примечательно, что приборов с такими блестящими характеристиками (и такой сравнительно невысокой стоимостью) не производится более нигде в мире. Если бы они там были, то другие производители по всем законам рынка в течение года должны были бы просто обанкротиться. Наверное, лишь по счастливой случайности этого пока не произошло.

Однако, как показывают исследования специалистов [1-3], столь высокие характеристики электромагнитные теплосчетчики демонстрируют лишь после предварительных регулировок непосредственно в момент их первичного пролива при выпуске. В ходе же их последующей реальной многолетней эксплуатации в условиях теплосетей СНГ с загрязненным теплоносителем (металлические примеси, взвеси и пр.) эти характеристики не подтверждаются из-за отложения металлических частиц, накипи и шлама на внутренней поверхности электромагнитных расходомеров.

Ультразвуковые приборы, не имеющие при первичном выпуске столь впечатляющих характеристик, как электромагнитные, тем не менее, действительно более надежно сохраняют свои метрологические показатели на протяжении межповерочного интервала по сравнению с другими типами приборов. Сегодня они относятся к числу одних из самых современных средств учета.

Ультразвуковая технология — это одна из немногих технологий, позволяющих измерять любые среды: жидкости, газы и даже пар. Измерение практически без потерь давления может сэкономить значительные затраты на насосное оборудование особенно там, где требуются высокое давление в магистрали или длинные дистанции транспортировки тех или иных сред.

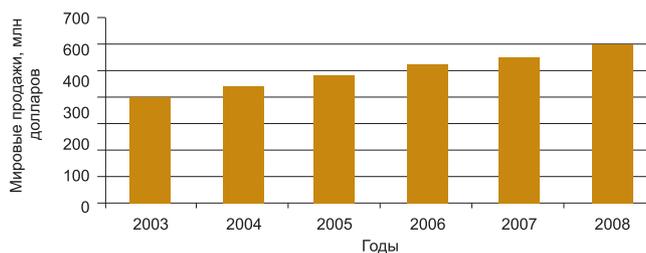
Именно ультразвуковые расходомеры в последние годы привлекают к себе все большее внимание, поскольку находят широкое применение во многих областях народного хозяйства. Они с успехом заменяют расходомеры других типов при измерении практически любых сред. Положительные тенденции развития мирового рынка продаж ультразвуковых расходомеров показаны на рисунке.

Ультразвуковые приборы являются одними из наиболее точных и надежных средств измерения расхода во всем мире, но, и среди них имеются различные типы, обладающие различными метрологическими характеристиками. В частности, выделяют ультразвуковые с накладными датчиками расхода, врезными, либо с метрологически аттестованным расходомерным участком.

Что касается первых двух типов, то, как показали исследования специалистов Англии (National Eng. Lab.) и США на большом статистическом материале, погрешности измерения расхода для накладных и врезных датчиков могут достигать 4...6%, да и то в ряде случаев после подстройки. Эти показатели можно уменьшить, если последовательно с указанными датчиками на трубопроводе установить эталонный расходомер и внести соответствующие поправки, однако в реальных условиях эталонный расходомер никогда не устанавливается.

Нельзя не отметить, что при проведении анализа всех вышеупомянутых случаев брались во внимание лишь результаты зарубежных исследований, поскольку отечественные производители ради рекламы указывают нереальные, т.е. заниженные погрешности.

На самом деле, довольно часто негативный опыт использования накладных и врезных ультразвуковых датчиков для измерения расхода обусловлен не столько



Прогноз мировых продаж ультразвуковых расходомеров по годам, в млн. долл. США

проблемами самого этого метода измерения, сколько невозможностью точного соблюдения всех его необходимых требований в реальных условиях. Ведь при таком методе измерения для обеспечения высоких метрологических характеристик необходимо:

- иметь очень точное (а значит, дорогостоящее) оборудование, чтобы производить замеры диаметра трубопровода, анализировать отклонение от круглости в сечении трубопровода, с высокой степенью точности позиционировать ультразвуковые датчики на трубе;
- владеть достоверной информацией о материале трубопровода и материале специальной прокладки между датчиком и трубопроводом (для накладных датчиков), чтобы не допустить ошибок при вводе этих сведений в программу обработки измерительной информации;
- пользоваться услугами высококлассных специалистов монтажников подобных устройств.

Если ультразвуковой прибор изготовлен по строго выдержанной технологии с соблюдением всех норм и правил, то он обеспечивает сохранение высокой точности и надежности при многолетней его эксплуатации в реальных условиях. Но, как говорится, нет предела совершенству, и задачи последующего повышения эффективности ультразвукового метода, в частности, точности актуальны и по сей день. Особенно, когда речь идет об измерении очень дорогих сегодня энергоресурсов.

Перспективы повышения точности измерений в основном кроются в особенностях метода измерений и технологии производства реализующих этот метод приборов, поэтому рассмотрим факторы, оказывающие наибольшее влияние на процесс измерения, и оценим пути устранения вызываемых ими погрешностей.

#### Погрешность, вносимая гидродинамическим поправочным коэффициентом

Неточность определения этого коэффициента вносит самую большую долю в суммарную погрешность прибора. Под гидродинамическим поправочным коэффициентом  $k$  понимают отношение:

$$k = V_{cp}/V_l,$$

где  $V_{cp}$  — средняя скорость потока, усредненная по сечению расходомерного участка;  $V_l$  — средняя скорость потока, усредненная по длине канала зондирования, расположенного между пьезодатчиками.

Некорректное принятие того или иного значения поправочного коэффициента может давать до 5% погрешности особенно в нижней части диапазона измерений.

*Наука начинается там,  
где начинают измерять.*

Д.И. Менделеев

Для уменьшения этой величины часто используют многохордовые схемы зондирования потока, благодаря которым, в частности, при задействовании 5 хорд разброс погрешностей показаний уменьшается до  $\pm 0,3\%$ . Если все же оставить традиционное однолучевое расположение пьезодатчиков, необходимо уточнять значения гидродинамического поправочного коэффициента экспериментально.

Традиционно этот коэффициент вычисляется по формуле, выведенной на базе степенного закона распределения скоростей в потоке по данным измерений, проведенных Никурадзе [4]:

$k = 2n/(1+2n)$ , где  $n = 11,269 - 3,0191gRe + 0,432lg^2 Re$ , где  $Re$  – число Рейнольдса.

Проблема состоит в том, что предложенная теория подходит лишь для случая практически идеальной трубы без изменения ее конфигурации, то есть сужений, расширений, без наличия на расходомерном участке "карманов" около ультразвуковых датчиков и т.д. Кроме того, предложенная формула не учитывает асимметрию потока, приводящую к неравномерному распределению скоростей, в результате которого измеренная средняя скорость не будет соответствовать реальной. Выходит, что для получения истинных значений поправочного коэффициента  $k$  целесообразно провести численный эксперимент, а для оценки его достоверности сравнить полученные результаты с результатами натурного эксперимента. Впоследствии такой путь даст огромную экономию временных и материальных затрат.

Численный эксперимент проводится фирмой "СЕМПАЛ" еще на этапе разработки расходомерного узла (РУ). Для его осуществления прежде всего создается сетка модели будущей конструкции.

Моделирование проводится на всех расходах диапазона измерений, что фактически охватывает разные режимы течения от ламинарного до турбулентного. Контуры распределения скоростей дают возможность оценить так называемые проблемные зоны на расходомерном участке.

На основании полученной картины распределения скоростей в РУ и используя наложенную на эту модель трассировку акустического луча, определяем гидродинамический поправочный коэффициент с достаточно высокой точностью.

Благодаря проведению численного моделирования оценивается также влияние местных сопротивлений, предопределяющее выбор оптимальной длины прямого участка перед расходомером или целесообразность его использования как такового еще на стадии проектирования расходомерного узла на объекте.

Для оценки адекватности результатов численного моделирования используется образцовый проливной стенд. Такой сложный научный подход на самом деле оправдывает себя, поскольку помогает определить "гидродинамическую специфику" работы расходомерного узла теплово-

досчетчика СВТУ-10М в разных условиях, а значит создавать прибор с высокой стабильностью показаний.

### Температурная погрешность

Эта погрешность определяется влиянием температуры на процесс распределения эпюры скоростей по сечению трубы, а также на характер прохождения в такой среде ультразвукового сигнала. Выявления подобной погрешности зачастую не происходит, поскольку подавляющее большинство проливных стендов работают на холодной воде. В реальных же условиях, если рассматривать отрасль теплоучета, разница температур подачи и обратного трубопровода весьма существенна, что приводит к образованию так называемых "сверхнормативных" утечек.

Теплосчетчик СВТУ-10М фирмы "СЕМПАЛ" с ультразвуковым методом измерения расхода теплоносителя неоднократно проходил испытания на горячеводном стенде, причем не только на Украине. Так, лишь за последний год было пройдено две серии испытаний в Республике Беларусь – в г. Минске и г. Витебске. Особенно серьезные комплексные испытания проводились на протяжении двух недель на проливном стенде "Витебскэнерго", где практически одновременно испытывались восемь различных типов теплосчетчиков производства России и Беларуси. Причем в проливной стенд "загонялся" реагент, имитирующий реальную химообработанную воду систем отопления, делались сужающие и искажающие поток вставки (шайбы), а также проводились многодневные горячеводные проливы при температуре  $85^\circ\text{C}$ . При этом по некоторым типам приборов достаточно известных фирм отклонения от заявленных метрологических характеристик оказались такими значительными (десятки процентов), что дальнейшие их испытания были просто прекращены. В то же время теплосчетчик СВТУ-10М показал стабильные результаты по всей серии испытаний.

### Погрешность от измерения времени

В ультразвуковом методе определения расхода процесс измерения времени является неотъемлемой частью. Использование сегодня в теплосчетчиках СВТУ-10М высокоточной и стабильной электроники, высококачественных кварцевых излучателей, оригинальных методов измерения коротких временных интервалов позволяет свести погрешность измерения времени практически к нулю. Таким образом, можно считать, что процесс измерения временной задержки прохождения акустических сигналов полностью отработан и не вносит неточностей при проведении измерений.

### Погрешности, определяемые геометрическими параметрами РУ

Эти погрешности могут иметь разное происхождение. Во-первых, следует учитывать заложенные на стадии создания конструкторской документации допуски на диаметр РУ. Именно из-за них в ряде случаев получаем ступеньку при присоединении расходомерного участка к подводящей трубе. Если речь идет об акустических расходомерах, где лучи располагаются вблизи стенок трубопро-

вода, то данная ступенька может существенно отразиться на конечном результате измерения. По данным исследований, проводимых компанией Instronet Inc. (г. Хьюстон, США) ступенька в 5% приводит к появлению погрешности 0,1...0,15% даже у многоручевых расходомеров. Во избежание негативного влияния ступенек, а также для реализации возможности присоединения РУ к трубам отличающегося в пределах заданного допуска диаметра, целесообразно использовать конические переходы, чтобы не происходил отрыв пограничного слоя от стенок трубы, не искажалась эпюра скоростей, и соответственно не вносились погрешность в измерительный процесс.

Во-вторых, при присоединении РУ к трубе может иметь место разная шероховатость внутренних поверхностей трубы и РУ. По результатам проведенных исследований [5] погрешность может достигать до 0,3 % при использовании труб с высокой степенью коррозии, равномерно образованной на внутренней поверхности труб.

На практике зачастую бывает весьма тяжело разделить коррозию от загрязнения или осадочного налета, который образуется на стенках труб, причем весьма неравномерно по окружности, но как первая, так и вторая субстанция приводят к уменьшению проходного сечения РУ, а значит к появлению дополнительной составляющей погрешности. По поводу неравномерности налета: в трубопроводах больших диаметров часто наблюдаются стекловидные осадки, а также "сталагмитовые" образования толщиной в несколько сантиметров на дне трубы и раковины от коррозии на "потолке" из-за частого прохода водовоздушных "пробок".

Возвращаясь еще раз к допускам, заложенным на стадии выполнения конструкторской документации, укажем, что фирмой "СЕМПАЛ" закладывается высокая степень точности изготовления деталей (в ряде случаев допустимые отклонения на основные размеры РУ не превышают десятка микрон), притом все размеры тщательно контролируются отделом технического контроля. Такой подход позволяет добиваться стабильности и высокого качества в производстве расходомерных участков, другими словами, исключения погрешностей, связанных с неточностью выполнения того или иного размера РУ.

На заключительном этапе производится калибровка расходомеров на образцовом поверочном стенде фирмы "СЕМПАЛ". Проливы ведутся как на холодной, так и на горячей воде в соответствии с определенной программой, цель которой состоит в определении точности и повторяемости показаний прибора в разных условиях. Повторяемость каждого расходомера СВТУ-10М находится в пределах  $\pm 0.3$  %, что является весьма высоким показателем стабильности средств измерений.

Как следует из всего вышесказанного, влияние ряда факторов, дестабилизирующих работу ультразвуковых расходомеров, можно заранее предвидеть и предотвратить, сэкономив при этом большие денежные средства, связанные с неточностью учета. Во многом этому помо-

гает использование ПО на базе современных методов обработки данных. Кроме того, ПО дает возможность наиболее полно реализовать в приборе функции контроля, учета и анализа нештатных ситуаций, возникающих на объектах эксплуатации. В связи с этим фирмой "СЕМПАЛ" разработано ПО SEMPAL Device Manager, которое позволяет осуществлять следующие операции:

- обращаться к любому теплосчетчику СВТУ-10М без выхода на объект, установленному на произвольно расположенном объекте;

- считывать архивы из переносного устройства съема данных УСД-01;

- контролировать все изменения расхода, температуры и давлений в режиме РВ;

- считывать и распечатывать на принтер любые виды архивной информации, накопленной в приборе, с автоматическим впечатыванием в ведомость теплового учета полных данных об объекте;

- дистанционно изменять параметры почасового и посуточного регулирования встроенных в СВТУ-10М регуляторов;

- автоматически в заданные интервалы времени считывать архивы с любого числа теплосчетчиков СВТУ-10М, расположенных в любых точках мира, и др.

В заключение, добавим, что будущее ультразвуковой расходомерии видится за так называемыми смарт-приборами, то есть "умными" приборами учета, способными к диагностике и предотвращению влияния на измерительный процесс любых нежелательных факторов. С учетом этого, а также многочисленных очевидных достоинств ультразвуковых расходомеров и при высоком качестве их производства можно прогнозировать лидирующие позиции данных средств учета в любых сферах, где речь идет о проведении точных, стабильных и надежных измерений, что позволит сберечь огромные денежные средства, а экономии энергоресурсов сделать действительно экономной.

#### Список литературы

1. Данилов Е.А., Бригаденко И.Н., Иванова Г.М., Парамонова Е.Ю. Хорош ли продолжительный межповерочный интервал теплосчетчиков при расширенном диапазоне измерения расхода // Энергосбережение. 2003. №5.
2. Милейковский Ю.С. Реальности коммерческого учета тепловой энергии и теплоносителя в России. Ч.1 // С.О.К.2005. №2.
3. Луней А.Г. Расходомеры со сверхширокими диапазонами измерений: желаемое и действительное. Материалы 3-го Международного научно-практического форума двух конференций: 18-й "Коммерческий учет энергоносителей" и 13-й "Совершенствование измерений расхода жидкости, газа и пара". 2003. С.-Петербург.
4. Шлихтинг Х. Пространственный пограничный слой. М.: ИИЛ, 1965.
5. Dane H., Wilsack R. Upstream pipe wall roughness influence on ultra-sonic flow measurement // AGA Operations Conference, Cleveland, 1999.

*Гришанова И.А. — канд. техн. наук, ведущий инженер, Покрас С.И. — канд. техн. наук, ген. директор, Покрас А.И. — канд. техн. наук, директор, Покрас И.С. — ведущий инженер фирмы "СЕМПАЛ". Контактный телефон (38 044) 239-21-97, 239-21-98. <http://www.sempal.com>*

## Датчики давления и дифференциального давления новой серии DPharp EJX

И. Тамаки, О. Тетсу, Н. Масааки, К. Етсутаро,  
Т. Тетсуроу, А. Ридзоу (Yokogawa Electric Corporation, IA),  
В.Н. Кравченко (ООО "Июкогава Электрик СНГ")

Специалистами компании Yokogawa выполнена разработка датчиков давления и датчиков дифференциального давления серии DPharp EJX<sup>1</sup> с усовершенствованным кремниевым резонансным чувствительным элементом. В датчиках серии DPharp EJX реализуется технология мультисенсорности, позволяющая одновременно измерять дифференциальное и статическое давление. Эта технология исключает необходимость использования дополнительных датчиков давления, что способствует уменьшению затрат при вводе в действие производственной установки. Кроме того, кремниевый резонансный чувствительный элемент, обладающий долговременной стабильностью, позволяет улучшить качество и надежность работы, что уже было продемонстрировано проверенными на производстве приборами серии EJA. Использование новейших технологий обеспечило для этих интеллектуальных датчиков дифференциального давления достижение минимального времени отклика и компактность конструкции. Удобный для пользователя многофункциональный ЖК-дисплей, расширенная функция самодиагностики и удобство эксплуатации обеспечивают пользователю максимальную эффективность работы. Приборы серии DPharp EJX представлены широким разнообразием моделей, включая датчики избыточного давления и датчики дифференциального давления с выносными разделительными мембранами, датчики избыточного давления ввертного типа и многопараметрические датчики дифференциального и абсолютного давления с функциями вычисления расхода. Кроме того, они соответствуют различным стандартам, включая стандарты пожаро-, взрыво- и искробезопасного исполнения, нормы техники безопасности SIL и директивы ЕС. Приборы этой серии также совместимы с протоколами связи HART и FOUNDATION fieldbus.

Благодаря гибкости и универсальности модельного ряда и расширенной функциональности, приборы серии EJX располагают широкими возможностями, отвечающими требованиям разностороннего применения, внося в результате существенный вклад в минимизацию для заказчика величины полной стоимости владения (TCO).

### Введение

После выпуска в 1991 г. приборов серии DPharp EJ, а в 1994 г. приборов серии DPharp EJA [1] во всем мире используется около 1,2 млн. этих датчиков. Недавно компанией Yokogawa на базе кремниевого резонансного чувствительного элемента (сенсора) были разработаны также датчики серии EJX, являющиеся еще более компактными, легкими и усовершенствованными приборами, реализующими функцию мультисенсорности. На рис. 1 показан внешний вид прибора серии EJA (слева) и прибора серии EJX (справа).

### Возможности датчиков серии DPharp EJX

#### Мультисенсорность

Датчики дифференциального давления измеряют перепад давления между сторонами высокого и низкого давления. Однако при измерении расхода часто необходимо измерять давление на стороне высокого давления (в дальнейшем изложении называется статическим давлением), например, чтобы выполнить коррекцию по плотности потока жидкости. Датчики дифференциального давления серии EJX могут выполнять считывание значений статического давления, обеспечивая решение двух задач (измерение дифференциального и статического давления) с использованием одного прибора. Прибор



Рис. 1. Внешний вид прибора серии EJA (слева) и серии EJX (справа)

можно легко сконфигурировать так, чтобы в качестве статического давления он регистрировал давление на стороне низкого давления. В результате при измерении уровня в резервуаре можно с помощью того же датчика измерять внутреннее давление в резервуаре. Кремниевый резонансный сенсор, встроенный в прибор серии DPharp, имеет два резонатора (формируемых с использованием технологии MEMS), расположенных на кремниевой мембране, так что в одном из них при приложении дифференциального давления происходит деформация растяжения, а в другом — деформация сжатия. Резонансные частоты этих резонаторов можно представить следующим уравнением:

$$f = \frac{4,73^2 h}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho} \left\{ 1 + 0,2366 \left( \frac{l^2}{h} \right) \varepsilon \right\}},$$

где  $\varepsilon = \varepsilon_0 \pm \varepsilon_{dp} + \varepsilon_{sp}$ ,  $f$  — резонансная частота,  $E$  — модуль Юнга,  $\rho$  — плотность кремния,  $l$  и  $h$  — длина и толщина резонатора,  $\varepsilon$  — напряжение (плотность силы) растяжения,  $\varepsilon_0$  — начальное напряжение растяжения,  $\varepsilon_{dp}$  — изменение напряжения растяжения, обусловленное дифференциальным давлением,  $\varepsilon_{sp}$  — изменение напряжения растяжения, обусловленное статическим давлением.

<sup>1</sup>DPharp EJX является зарегистрированной торговой маркой Yokogawa Electric Corporation. Другие названия продуктов и систем, появляющиеся в этом документе, являются торговыми марками или зарегистрированными торговыми марками соответствующих владельцев.

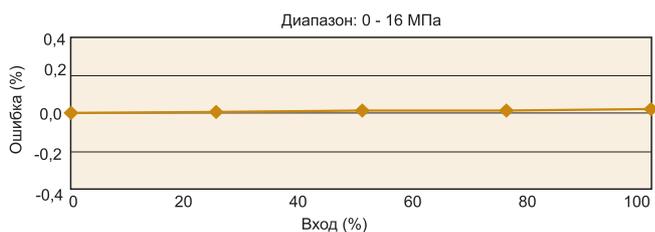


Рис. 2. Погрешность измерения сигналов статического давления

Сигналы дифференциального и статического давления можно вычислить, выполняя дифференцирование и суммирование для двух резонаторов соответственно. Для простоты объяснения вычисление резонансной частоты здесь сведено к следующему уравнению:

$$f^2 = f_{02}^2 \cdot (1 + G_f \cdot \varepsilon),$$

где  $f_0$  – резонансная частота при нулевой силе растяжения,  $G_f = 0,2366 \cdot (1/h)^2$  – возведенная в квадрат чувствительность резонатора.

Изменения ( $\Delta f^2$ ) резонансных частот  $f_1$  и  $f_2$  двух резонаторов, расположенных на одной кремниевой мембране, обусловленные давлением, задаются следующими уравнениями:

$$\Delta f_1^2 = f_{01}^2 \cdot G_{f1} (\varepsilon_{dp1} + \varepsilon_{sp1}),$$

$$f_2^2 = f_{02}^2 \cdot G_{f2} (\varepsilon_{dp2} + \varepsilon_{sp2}).$$

Как видно из уравнений, вычисление выражения  $\Delta f_1^2 - a \cdot \Delta f_2^2$  позволяет исключить члены, относящиеся к статическому давлению, и получить сигнал дифференциального давления. Аналогично, вычисление выражения  $\Delta f_1^2 + a \cdot \Delta f_2^2$  позволяет исключить члены, относящиеся к дифференциальному давлению, и получить сигнал статического давления. Основное свойство кремниевого резонансного сенсора заключается в том, что предварительное определение каждого коэффициента на основе фактически измеренных соответствующих данных позволяет рассчитать сигналы дифференциального и статического давления на основе деформации одной мембраны посредством выполнения простых операций вычитания и суммирования.

На рис. 2 показана реальная погрешность определения статического давления 1 МПа при допустимой согласно спецификации погрешности  $\pm 0,2\%$ . В более сложном датчике дифференциального давления с функциями вычисления расхода благодаря этому свойству стало возможным реализовать гарантированную точность для статического давления в 1 МПа даже более высокую –  $\pm 0,1\%$ .

Датчики дифференциального давления серии EJX с протоколом Foundation fieldbus могут одновременно передавать сигналы дифференциального и статического давления. В приборах серии EJX с протоколом HART предусмотрена возможность отображения на дисплее также и статического давления.

Уже существует многопараметрические датчики, которые выполняют измерение дифференциального



Рис. 3. Результаты проверки долговременного дрейфа

и статического давления с использованием нескольких сенсоров. Приборы серии EJX являются первой в мире серией датчиков дифференциального давления, которые могут выполнять измерения дифференциального и статического давления с использованием одного сенсора, а также обеспечивать считывание и вывод значений давления.

#### Высоко надежный чувствительный элемент

Стабильность кремниевого резонансного чувствительного элемента, используемого в приборах серии EJX, обусловлена принципом его действия. Превосходную рабочую стабильность приборов этой серии демонстрируют не только записи долговременной эксплуатации, но и результаты 15-летней проверки долговременного дрейфа (рис. 3).

Рассмотрим свойства кремниевого резонансного сенсора:

- отличные упругие свойства кремния;
- большой коэффициент тензочувствительности ( $\geq 2000$ ) и соответственно высокая чувствительность измерения давления;
- малые температурные коэффициенты и низкая чувствительность к примесям по сравнению с пьезорезистивными сенсорами (поскольку резонансные частоты резонаторов зависят от их механических и конструктивных размеров). В результате сенсор обеспечивает высокую долговременную стабильность;
- высокая точность обработки данных, так как резонансную частоту можно считывать непосредственно с использованием счетчика центрального процессора. Такой сенсор идеально подходит для использования в интеллектуальных датчиках. Кроме того, поскольку сенсор не подвержен влиянию ошибок аналого-цифрового преобразования, присущих датчикам давления, основанных на других принципах работы, точность датчика можно повышать;
- возможность получить значения дифференциального и статического давления с гораздо большей стабильностью (по сравнению с пьезорезистивными датчиками), используя большую часть возможностей кремниевого резонатора с большим коэффициентом тензочувствительности и всего лишь обрабатывая сигналы от двух резонаторов;
- возможность измерения температуры кремниевой мембраны через сопротивление резонатора. Температурная зависимость коэффициента упругости кремния хорошо изучена и достаточно четко определена [2, 3]. В дополнение к тому, что она и так значительно меньше аналогичной зависимости упругости

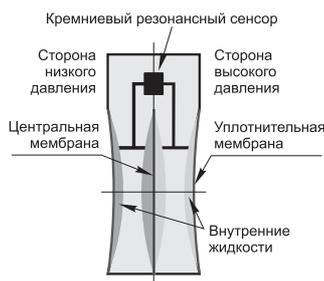


Рис. 4. Устройство защиты от перегрузки по давлению датчика EJA 110

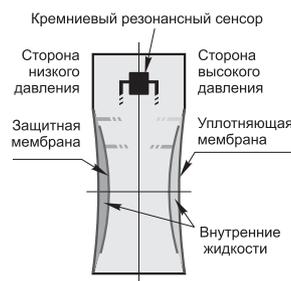


Рис. 5. Новый механизм защиты от перегрузки по давлению датчика EJX 110

металлических и керамических мембран, применяемых в емкостных датчиках, информация о температуре сенсора позволяет делать дополнительную коррекцию на этот эффект так же, как и на другие факторы влияния температуры капсулы на дрейф показаний сенсора.

#### Быстрый отклик

В приборах серии EJX для увеличения быстродействия применен новый механизм защиты от перегрузки по давлению, а электронные схемы выполняют вычисления с высокой скоростью. Тем самым эти приборы стало возможным применять в контурах высокоскоростного управления, например, для управления расходом пара в турбинах. В результате этих доработок достигнута реакция 63% от воздействия за 95 мс.

В существующих датчиках дифференциального давления серии EJA в защите от перегрузок реализована идеология емкостных датчиков давления: внутри капсулы сделан дополнительный объем с центральной мембраной, демпфирующий перегрузку, перепуская избыток жидкости на сторону низкого давления, как показано на рис. 4. Естественно, существует гидродинамическое сопротивление внутри передающих жидкость капилляров, которое существенно увеличивает время отклика.

Новый механизм защиты от перегрузки по давлению, используемый в приборах серии EJX, проиллюстрирован на рис. 5. Этот механизм состоит из двух взаимно независимых механизмов защиты от перегрузки по давлению, расположенных на сторонах высокого (H) и низкого (L) давления. Этот механизм предотвращает движение внутренней жидкости в пределах диапазона измерения давления, обеспечивая быстрый отклик приборов серии EJX.

В части электроники были предприняты следующие шаги, с помощью которых удалось уменьшить период обработки данных в четыре раза по сравнению с обычными датчиками.

1) *Определение частоты.* С использованием контура подсчета частотных сигналов измеряются периоды, меньшие одного импульса, так что частота может быть измерена без потери разрешения даже в случае более коротких времен выборки.

2) *Увеличение скорости* вычисления значения давления. Использование следующих четырех подходов

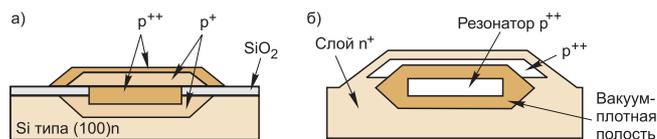


Рис. 6. Вид резонатора в поперечном разрезе

позволило увеличить скорость обработки при вычислении давления в 4 раза по отношению к существующим приборам серии EJA:

- минимизирована частота использования вычислений с плавающей запятой и введены вычисления с фиксированной запятой;
- элементы вычислений, имеющие минимальные изменения, выполняются как работы с низким приоритетом, позволяя минимизировать объем вычислений, непосредственно связанных с определением значения давления;
- увеличена скорость системных часов за счет использования маломощных конструкций устройств;
- усовершенствованы характеристики микропроцессора.

3) *Усовершенствование резонаторов.* С использованием техники микрообработки удалось увеличить выходное напряжение резонаторов в 1,5 раза без изменения их основной структуры (рис. 6). Это привело к значительному увеличению стабильности выходного напряжения и существенному снижению времени обработки сигнала.

На рис. 7 показана переходная характеристика (реакция на ступенчатое изменение давления) для наиболее распространенной модели серии EJX — датчика дифференциального давления EJX110 с капсулой М.

#### Расширенные функции самодиагностики

Функции самодиагностики приборов серии EJX были расширены, так что теперь эти приборы имеют 30 элементов диагностики и около 20 видов сигнализаций. Число сигнализаций различается в зависимости от модели. Эти сигнализации можно классифицировать в четыре категории: неисправная работа самого датчика; неправильная установка параметров; ошибочные переменные процесса; выполнение работы с несоблюдением допустимых или заложенных условий эксплуатации.

#### Конструкция датчиков серии DPharq EJX

##### Конфигурация

Компоновочные составляющие датчиков дифференциального давления серии EJX:

- блок восприятия давления, состоящий из капсулы, фланцевых крышек и штуцеров для подсоединения к процессу.

- блок преобразования, состоящий из электронной части и клеммной коробки, которые идентичны для всех моделей серии EJX (но они могут меняться в зависимости от используемых протоколов связи). Этот блок также может компоноваться цифровым ЖК-дисплеем, на котором пользователи имеют возможность отслеживать измеренные значения диффе-

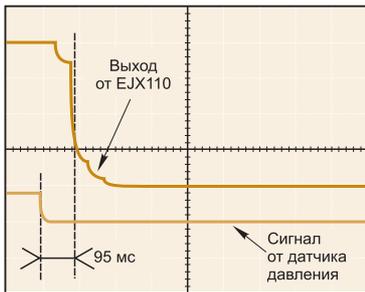


Рис. 7. Реакция на единичный скачок EJX110

ренциального и статического давления, а также сообщения сигнализации блока преобразования.

Использование нового механизма защиты от чрезмерного давления позволило уменьшить размеры устройства восприятия давления таким образом, что его вес составляет только 2,7 кг (на 30% меньше по отношению к датчику серии EJA).

Для создания датчика дифференциального давления, невосприимчивого к изменениям температуры и способного выполнять стабильные измерения, усилия были сконцентрированы, в первую очередь, на создании конструкции с минимальным объемом жидкости, передающей давление от разделительной мембраны к сенсору в измерительной капсуле. Использование нового механизма защиты от чрезмерного давления позволило уменьшить объем этой жидкости в 10 раз по сравнению с датчиками серии EJA.

Блок восприятия давления имеет симметричную структуру, устойчивую к воздействию различных возмущений, обусловленных внешним давлением. Объемы жидкости внутри капсулы на сторонах высокого и низкого давления хорошо сбалансированы, так что влияние эффектов, обусловленных расширением или сжатием внутренней жидкости, вызванных изменением температуры или статического давления, минимизировано.

Для изготовления внутренних разделительных мембран используется специально спассивированный высококачественный никелевый сплав Hastalloy C, представляющий собой испытанный в производстве коррозионно-стойкий материал, также используемый для датчиков серии EJA. При этом никакие сварные соединения не контактируют с атмосферой. Для корпуса капсулы используется ковкая нержавеющая сталь 316L, и тем самым обеспечивается коррозионно-стойкая конструкция.

Для уменьшения влияния нагрузки, возникающей при закреплении фланцевых крышек, было уделено серьезное внимание обеспечению механической изоляции. Поверхности сварных соединений разделительной мембраны и детали, на которой закрепляется прокладка, были отделены друг от друга для предотвращения дополнительных напряжений в разделительной мембране, связанных с нагрузкой при затягивании болтов крепления фланцевых крышек.

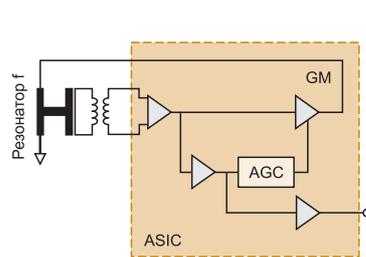


Рис. 8. Блок-схема цепи возбуждения (показана только для одного резонатора)

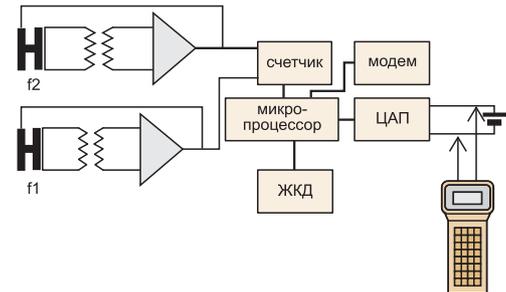


Рис. 9. Общая блок-схема

Фланцевые крышки, обеспечивающие подключение к процессу, имеют конструкцию, отвечающую стандарту IEC61518.

#### Блок преобразования

В датчиках серии EJX используется тот же самый метод возбуждения резонатора, что и в датчиках серии EJA (рис. 8). Недавно компанией Yokogawa было разработано устройство ASIC, основанное на маломощной структуре, с низким потреблением тока, использование которого обеспечивает в три раза более высокие характеристики по сравнению с датчиками обычных серий. На рис. 9 показана общая блок-схема блока преобразования.

Следует отметить, что частотные сигналы от резонатора являются асинхронными по отношению к системным часам счетного контура. По этой причине периоды времени (дробные отрезки времени), которые короче периода системных часов и поэтому не могут быть измерены, возникают на обоих концах интервала времени выборки в случае применения используемого в EJA контура счетчика, основанного на методе взаимодействия. Соответственно при этом возникает погрешность, эквивалентная  $\pm 1$  импульсу.

Если для увеличения скорости обработки сигнала сократить время выборки без повышения частоты системных часов, эта погрешность возрастает, ухудшая разрешение счетчика. Если чрезмерно увеличивать частоту системных часов, то будет увеличиваться потребление тока, что выводит прибор за рамки требуемых характеристик.

В приборах серии EJX в дополнение к обычному методу взаимодействия используется метод растяжения временного масштаба [4], в котором эти дробные отрезки времени расширяются в 64 раза, а затем измеряются. Используя метод растяжения временного масштаба при помощи дополнительных мер, в частности, добавления специального счетчика стало возможным обеспечить низкое потребление электроэнергии и высокую скорость обработки сигнала, а также высокое разрешение, превышающее в пять раз или более разрешение приборов обычных серий.

Использование мультиплексного метода цифроаналогового преобразования (D/A) для блока цифроаналогового преобразователя (ЦАП) позволило получить быстрый отклик, в 10 раз или более превышающий отклик приборов обычных серий, при одновременном сохранении высокого разрешения.

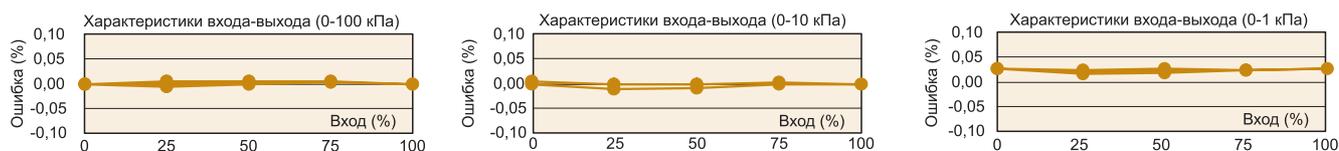


Рис. 10. Характеристики входа/выхода

В выходном контуре 4...20 мА используется 16-битовый контур цифро-аналогового преобразования, и диапазон токового выхода удовлетворяет стандарту NAMUR NE43.

#### Встроенный дисплей

Учитывая важность удобства восприятия информации, были увеличены размеры встроенного дисплея, при этом в целом размеры приборов серии EJX были уменьшены. К элементам, отображаемым на дисплее, были добавлены гистограммы, значения переменных процесса, показатели степени и единицы измерения.

**Индикация параметра процесса.** Пользователи могут выбрать для отображения на дисплее максимум четыре из следующих пяти параметров: дифференциального давления в процентах; масштабного коэффициента и единицы измерения; дифференциального давления; статического давления в процентах; статического давления. Выбранные параметры при этом будут чередующимся образом периодически отображаться на дисплее. Усовершенствованный дизайн отображения переменной в виде гистограммы позволит пользователю мгновенно определить, находится ли переменная процесса в пределах нормального рабочего диапазона.

Для отображения единиц измерения и коэффициента масштабирования можно использовать до шести символов. Функциональность дисплея усовершенствована таким образом, что наиболее часто используемые единицы измерения, такие как единицы расхода, могут быть заданы пользователями. Пользователи могут также вывести на дисплей показатели степени ( $\times 10$ ,  $\times 100$  и  $\times 1000$ ), которые следует использовать для представления фактических коэффициентов масштабирования.

**Дисплей сообщений о сигнализации.** При обнаружении неисправности на дисплее появится короткое сообщение, содержащее в дополнение к номеру сигнализации информацию о ней. Из короткого сообщения пользователи смогут быстро узнать о содержании сигнализации, не сверяясь с документацией для поиска описания по номеру сигнализации.

Если возникнет сигнализация, относящаяся к уставкам параметров, переменным процесса или рабочей среды, на дисплее будут чередоваться номер сигнализации и значение переменной процесса. Если возникнет сигнализация, относящаяся непосредственно к датчику, дисплей покажет только информацию о сигнализации, обеспечивая пользователей необходимой информацией так быстро, как это возможно.

#### Рабочие характеристики

Рассмотрим примеры характеристик прибора EJX110 (капсула М; диапазон измерения давления  $\pm 100$  кПа), являющегося наиболее типовой моделью приборов серии EJX.

На рис. 10 показаны характеристики входа/выхода для диапазонов 0...100 кПа, 0...10 кПа и 0...1 кПа; на рис. 11 – дрейф нулевой точки при изменении температуры окружающей среды 40...80°C; на рис. 12 – дрейф нулевой точки при изменении статического давления от 0 МПа до максимального рабочего давления 16 МПа.

**Влияние перегрузки по давлению.** При нормальных условиях датчик дифференциального давления часто монтируется с использованием трехвентильного блока. При этом достаточно часто возникают ситуации, когда в зависимости от положения вентилей трехвентильного блока во время запуска установки или работы по обслуживанию к одной из сторон датчика может быть приложено чрезмерное давление, выходящее за пределы диапазона измерения дифференциального давления.

Чтобы избежать возможного сдвига выхода или повреждения кремниевой мембраны за счет перегрузки по давлению, датчик оснащен механизмом защиты от чрезмерного дифференциального давления. На рис. 13 показано влияние односторонней перегрузки по давлению.

Поскольку влияние перегрузки по давлению является незначительным, и датчик достаточно легкий, многие пользователи могут монтировать его непосредственно на оборудовании без применения трехвентильного блока.

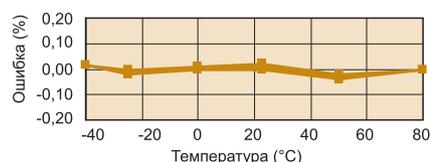
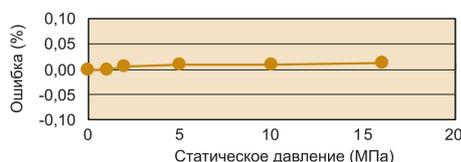
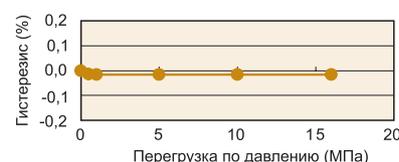
Рис. 11. Влияние изменений температуры окружающей среды на нулевую точку (максимальный диапазон  $\times 1/10$ )Рис. 12. Влияние изменений статического давления на нулевую точку (максимальный диапазон  $\times 1/10$ )

Рис. 13. Влияние перегрузки по давлению (максимальный диапазон)

**Спецификация.** На рис. 14 показан диапазон измерения давления для датчика дифференциального давления EJX110. Четыре типа капсулы полностью охватывают диапазон шкал измерения давления 0,1 кПа...14 МПа. Капсулы М, Н и V имеют глубину перестройки шкалы 1:200, предоставляя пользователям возможность измерения дифференциального давления в широком диапазоне.

Имеется возможность выполнения дистанционной настройки и мониторинга через протокол связи HART посредством ручного коммуникатора или распределенной системы управления (DCS). Приборы серии EJX также поддерживают протокол Foundation fieldbus.

Для поддержки многообразия возможных применений фирма Yokogawa представила большое семейство датчиков серии EJX, включающее датчики избыточного, абсолютного и дифференциального давления, монтируемые на фланце, ввертного исполнения, датчики дифференциального давления для высокого статического давления, датчики давления и датчики дифференциального давления с разделительными мембранами, датчики давления и дифференциального давления для санитарно-технического оборудования, а также многопараметрические датчики дифференциального давления с функцией вычисления расхода. Это семейство датчиков было сертифицировано на соответствие различным типам искро-, взрыво- и пожаробезопасности.

Частота резонаторов определяется механическими размерами и физическими свойствами, и на нее не влияют другие возмущения, поэтому достаточно легко определить их состояние и насколько достоверны показания прибора. В приборах серии EJX также реализованы специальные программы для проверки вычислений микропроцессора. Приборы серии EJX сертифицированы на соответствие интегрированному уровню безопасности 2 (SIL2) уже в стандартном исполнении.

*Исикава Тамаки, Одохира Тетсу, Никкуни Масааки, Кояма Етсумаро, Тсумагари Тетсуро, Асада Ридзоу – сотрудники Yokogawa Electric Corporation, IA,*

*Кравченко Василий Николаевич – канд. физ. мат. наук, генеральный менеджер, руководитель департамента КИП ООО "Июкогава Электрик СНГ".*

*Контактный телефон (495) 933-85-90. E-mail: Vasilij.Kravchenko@ru.yokogawa.com Http://www.yokogawa.ru*

## СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ: СЕРИЯ УСТРОЙСТВ NGC 8200 ПРОИЗВОДСТВА КОМПАНИИ АББ

ООО "АББ Автоматизация"

Показано, как на базе известного метода измерения из области газовой хроматографии и в результате развития технологии измерения и инженерии специалистами компании АББ была разработана новая серия устройств NGC 8200, позволяющая определить теплотворную способность природного газа.

Невозможно представить современный мир без надежных источников энергии. Электроснабжение, в свою очередь, зависит от торговой деятельности энергоснабжающих организаций. Несмотря на рост стоимости энергии, такие компании постоянно заботятся о том, чтобы уменьшить ненужные излишки и потери, по этой причине они находятся в непрерывном поиске более совершенных технологий измерения.

Тогда как традиционное измерение газа довольствуется измерением объемного расхода, поставщик и

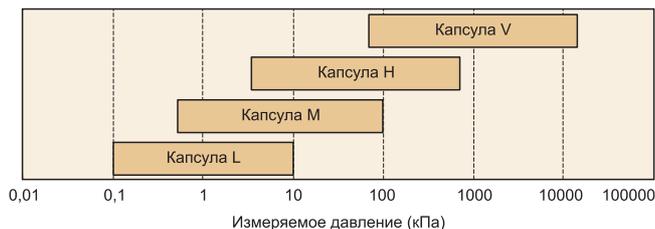


Рис. 14. Диапазоны шкал измерения давления для датчиков дифференциального давления

### Выводы

В статье представлены особенности, конструкция и характеристики датчиков давления и датчиков дифференциального давления новой серии EJX.

Мультисенсорная функция кремниевого резонансного чувствительного элемента реализует новые возможности в решении прикладных задач. Комбинирование этой функции с программными средствами, в которых используются эти возможности, позволяет выполнять всевозможные расширенные диагностики, такие как диагностика засорения импульсных линий.

Компания Yokogawa продолжит разработки в области измерительных технологий нового поколения, чтобы пользователи все больше могли применять датчики серии EJX скорее как многофункциональные приборы, а не только как обычные датчики давления или дифференциального давления.

### Список литературы

1. Saegusa Tokuji, Gotoh Shigeru, Kuwayama Hideki, Michiaki Yamagata. DPharp Series Electronic Differential Pressure Transmitters. Yokogawa Technical Report. №15. 1992.
2. McSkimin, H.J., J. Appl. Phys. 24, 8. 1953.
3. Morin, F.J. and J.P. Maita, Phys. Rev. 96. 1. 1954.
4. Katano Kazuya. How to Use Time-measuring Instruments. Transistor Gijutsu. Vol. 31. №2. 1994.

ное, а также удобное в эксплуатации и точное. Всем этим требованиям как нельзя лучше удовлетворяет новая серия устройств NGC 8200 (рис. 1).

Крупным техническим достижением компании АББ в области оперативной газовой хроматографии является создание технологии, которая может использоваться при анализе теплотворной способности природного газа.

В большинстве реализуемых контрактов на транспорт природного газа сегодня указывается величина теплотворной способности, тогда как в спецификации приводится объемный расход газа, который измеряется в миллионах британских тепловых единиц (MMBtu)<sup>1</sup>.

Финансовое преимущество отслеживания тепловой энергии, а не просто расхода, очевидно. Большинство основных (крупных) газопроводов имеют оперативное измерение при помощи теплометров определенного типа. Ожидается, что в будущем большее число менее крупных станций будут пользоваться данной технологией, поскольку благодаря новым разработкам стоимость газовых хроматографов может быть снижена.

Общий подход компании АББ Totalflow заключался в работе над стандартизацией хроматографических методов с тем, чтобы газовые хроматографы могли создаваться как инструментальные средства, а не как изготовленные вручную приборы, для установки, эксплуатации и технического обслуживания которых необходим специально обученный персонал. Несколько производителей ставили целью такую стандартизацию и опробовали различные подходы. Команда аналитиков компании АБВ Bartlesville (штат Оклахома, США) в сотрудничестве с отделом Инжиниринга и НИОКР корпорации АБВ тщательно исследовали методы микроэлектромеханической системы

методы микроэлектромеханической системы (MEMS). В результате этой работы было принято решение о создании высокоинтегрированного модуля на базе трубопровода (коллектора)<sup>2</sup> с использованием традиционных материалов для повышения оперативной хроматографии до нового уровня технологии с точки зрения модульности и ремонтпригодности. Таким образом, появился компактный мощный и технически прогрессивный газовый хроматограф NGC 8200.

Расширенная проверка на пилотных моделях и опытных образцах продемонстрировала не имеющую аналогов линейность, воспроизводимость, температурную стабильность, а также нижний предел обнаружения компонента.

Основа нового, "революционного", оперативного газового хроматографа была заложена более 10 лет назад, когда был создан Btu/CV-трансмисмиттер модели 8000/8100 (рис. 2).

Данное устройство имеет проверенную временем репутацию и опыт работы с более чем 1200 устройствами, работающими в качестве анализаторов природного газа по всему миру. Конструктивное исполнение включало несколько исключительно важных технических достижений, не имеющих себе равных в промышленности до настоящего времени. Некоторые из достижений позволили использовать хроматографический анализ в прикладных задачах газовой промышленности, в которых использование подобного анализа не считалось ранее целесообразным. Пользовательский интерфейс на базе ОС Windows, который с тех пор стал обычным явлением, обеспечил удобство использования,

несмотря на сложность базисного инструмента. Контроллер, работающий от автономного компьютера,

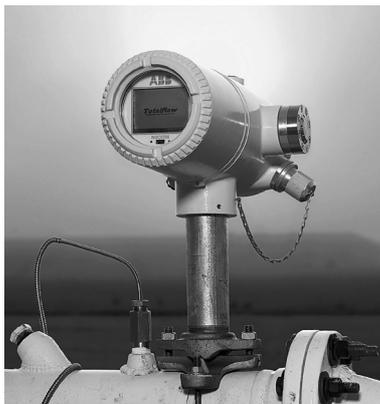


Рис. 1

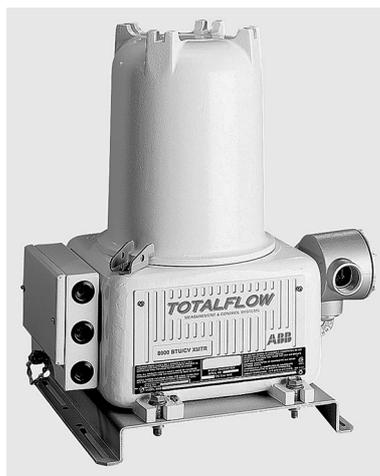


Рис. 2



Рис. 3

<sup>1</sup> Btu — одна британская тепловая единица — количество тепла, необходимое для повышения температуры одного фунта воды с 58,5°Ф до 59,5°Ф (соответствует примерно 1055 Дж в соответствии с системой СИ). В Северной Америке распространена единица измерения энергии MMBtu (миллион британских тепловых единиц) или dekaTherm (в Европе зачастую в качестве единицы измерения используется Джоуль). Тепловая энергия, сохраняемая в газе (MMBtu) = теплотворная способность (Btu/cf) · объем газа (MMcf).

Энергия, получаемая в результате сжигания газа, зависит от его химического состава. Чем выше энергия на единицу объема (теплотворная способность), тем ниже объем газа, необходимый для нагрева резервуара для горячей воды. Суммарная энергия рассчитывается следующим образом:  $E = H \cdot Q$ , где  $E$  = расход энергии (MMBtu),  $H$  = теплотворная способность/единицу объема или массы (Btu или CM (теплотворная способность)) на единицу объема или массы;  $Q$  — объемный расход или удельный массовый расход (стандартный кубический фут/метр или удельный массовый расход).

<sup>2</sup> Устройство, регулирующее поток в гидравлической системе.

позволил снизить затраты на монтаж наряду с тем, что предоставил возможность использовать газовый хроматограф во взрывоопасных средах.

Защищенный от атмосферных влияний корпус и безвоздушная камера позволили устанавливать газовый хроматограф вблизи точки отбора пробы, снижая тем самым проблемы с системой труб для транспортировки газовых проб и проблем с температурой конденсации. Четыре последовательных цифровых порта связи обеспечили доступ участников на объектах транспортировки газа к информации о качестве и теплотворной способности. Кроме того, благодаря таким каналам передачи данных стал возможным расчет потока энергии на объекте путем подключения к компьютерным вычислительным устройствам. Встроенные соленоиды переключения потоков позволили обеспечить мониторинг нескольких источников газа без какого-либо дополнительного аппаратного обеспечения.

Однако все эти разработки экстремально уровня незначительны при сравнении с модульными принципами исполнения, внедряемыми настоящим устройством. В первый раз за всю историю часть "хроматографии" газового хроматографа стала "запасной частью". Это означает, что заказчики могут использовать запасные модули газовых хроматографов на местах, и на ремонт анализаторов уйдет не несколько дней, а несколько часов. Основу такого модуля газового анализатора составляет высокоинтегрированный трубопровод, в состав которого входят колонки, краны и детекторы. Данный модуль может использоваться в любой модели серии 8000. Ранее подобный модульный принцип построения не применялся.

Доказавшие свою пригодность один раз, принципы построения на основе трубопровода модуля газового хроматографа совершенствовались за счет добавления других механических частей, необходимых для работы многопоточного газового хроматографа. Это привело к созданию модели 8000/8100 Типа М, немногим более компактной, с техническими данными, аналогичными последним в предыдущей модели (рис. 3).

Используя опыт, накопленный благодаря этим двум моделям, компания АББ разработала новое поколение взрывобезопасных оперативных газовых хроматографов — NGC 8200 (рис. 3). Данная серия устройств более высоко интегрирована по сравнению с ее предшественниками. Несмотря на уникальность сменного модуля газового хроматографа модели 8000, его самое главное преимущество заключается в использовании трубопровода. На самом деле аналитический мо-



Рис. 5

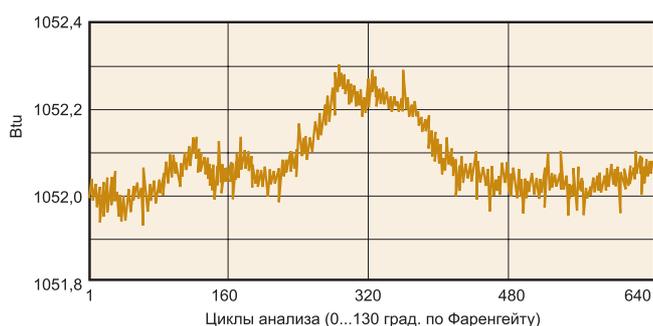


Рис. 4

дуль серии NGC 8200 можно заменить при помощи шестигранного ключа. Более того, конструкция включает достоинства предшественников. Встроенный контроллер гораздо более мощный и не потребляет большого количества электроэнергии. Устройство более компактное, однако сохраняет такие качества, как взрывобезопасность и устойчивость к атмосферным воздействиям, как и его предшественники, а также обеспечивает повышенную конструктивную прочность. Аналогично более ранним моделям, это по-прежнему многопоточное устройство, которое может также управлять несколькими калибровочными потоками.

Кроме того, во взрывобезопасном исполнении оперативного газового хроматографа имеется ряд абсолютно новых функций, отличающих его от ранее существующих устройств. Среди них: внутренний интерактивный графический дисплей; ОС Windows с ПО согласно СЕ; полностью цифровая секция для обработки аналитических сигналов; два регулятора давления газоносителя с независимым программированием; порты связи USB и Ethernet; аналоговая транзисторная конструкция (внешний вид и установка подобна традиционным многофункциональным датчикам); встроенный поточный компьютер с дополнительными многофункциональными датчиками; регистраторы данных; программируемые пользователем мониторинг аварийной сигнализации и математические/логические функции; программируемый в соответствии с промышленным стандартом МЭК 61131 язык для более сложных вариантов применения и т.д.

Фактическое значение новой конструкции заключается в мощной комбинации улучшенных эксплуатационных качеств с более низкими затратами, включающими установку. Например, воспроизводимость в широком диапазоне температуры окружающей среды устанавливает новый промышленный стандарт. На рис. 4 показана точность в диапазоне температур 0...130°Ф.

**Опытная эксплуатация**

Результат опытной эксплуатации учитывает паспортные технические данные при  $\pm 0,125$  Btu при 1000 Btu в диапазоне температуры окружающей среды,  $\pm 0,25$  Btu при 1000 Btu в диапазоне  $0 \dots 130^\circ\text{Ф}$ .

Тогда как модель 8000 состоит из анализатора и поточного компьютера для измерения энергии, модель NGC 8200 интегрирует функции двух устройств в одном измерительном приборе. Производительность 32-битового микропроцессора контроллера газового хроматографа и объектная структура ПО XSeries (заимствован-

ная от первых моделей Totalflow и поточных компьютеров) – это реальное направление в измерении энергии.

При использовании многофункционального датчика для обеспечения ввода пробы, газовый хроматограф становится поточным компьютером и хроматографом одновременно.

Серия NGC 8200 представляет универсальную платформу, интегрирующую множество функций, необходимых инженерам, занимающимся эксплуатацией трубопровода, для обеспечения более высокой производительности (рис. 5).

*При поддержке Меньщикова И.В. — менеджера отдела АСУТП для нефти и газа ООО "АББ Автоматизация".*

*Контактный телефон (495) 956-05-44, факс (495) 956-30-18.*

*E-mail: igor.menshikov@ru.abb.com*

**УНИВЕРСАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ OMRON В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАТЧИКАХ СЕРИИ ZX****ООО "ОМРОН ЭЛЕКТРОНИКС"**

*Измерительные датчики серии ZX фирмы Omron, основанные на технологии Plug & Play, позволяют подключать к одному усилителю разные сменные головки и характеризуются высокой точностью измерения и миниатюризацией.*

**Лазерные датчики**

Компания Omron расширяет семейство микропроцессорных датчиков и предлагает *измерительный лазерный датчик ZX-L*. Принцип действия датчика основан на триангуляционном методе измерения, предусматривающем формирование на контролируемой поверхности светового пятна, получение его изображения на многоэлементной фотодиодной линейке и определение по положению изображения расстояния до поверхности объекта (рис. 1).

Скорость срабатывания датчика серии ZX не уступает скорости фотоэлектрических датчиков. Разрешение 0,2 микрона обеспечивает очень высокую точ-

ность и позволяет немедленно обнаружить ошибки или расхождения, которые могут привести к потере времени и средств в производственном процессе. В зависимости от типа головки у датчика на отражение от объекта есть четыре состояния срабатывания, охватывающие диапазоны  $30 \pm 2$  мм,  $40 \pm 10$  мм,  $100 \pm 40$  мм и  $300 \pm 200$  мм.

*Лазерные датчики серии ZX на пересечение луча* предлагают три различные ширины луча 1...2,5 мм, 1...5 мм, и 1...10 мм, а пороговый уровень можно настроить на фиксацию как усиления, так и ослабления сигналов. Головка этого датчика состоит из двух отдельных частей – приемника и передатчика; измеряемая величина пропорциональна количеству света попавшего на приемник (рис. 2).

Сверхмалый сфокусированный пучок лазера способен обнаруживать мельчайшие объекты, например контакты микросхемы. На таких шероховатых поверхностях, как дерево или бумага, линейный пучок лазера способен стабильно производить замеры, несмотря на неровность поверхности. Идеальные параметры для различных сфер применения можно за-

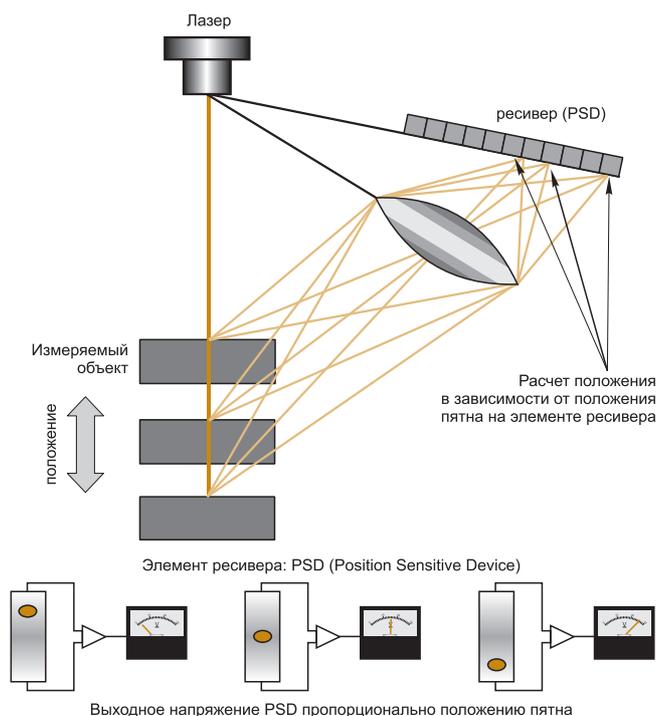


Рис. 1

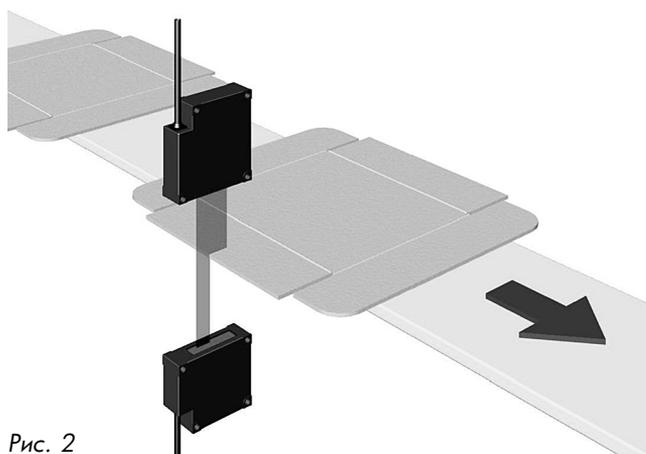


Рис. 2

### Технический обзор датчиков серии ZX

#### Технические характеристики усилителя ZX-LDA

Питание .....	=12...24 В (p-n-p/n-p-n)
Число цифровых индикаторов на 5 знаках, ед.....	2
Время измерения, мс.....	≤0,15 с шаговой настройкой
Число циклов считывания, ед.....	1...4096
.....	с шаговой настройкой
Цифровые выходы .....	LOW, PASS, HIGH
Аналоговый выход.....	с настройкой по возрастающей (-5...5 В/ 0...20 мА)
Цифровые входы.....	LASER OFF, TIMER, RESET, ZERO
Переключение.....	между интенсивностью света, расстоянием или замером различий

#### Технические характеристики головки датчика ZX-LD

Диапазон измерения, мм.....	40±10, 100±40, 300±200
Точность считывания, мм.....	≤0,002
(4096 циклов считывания на белой керам. поверхности)	
Размер считывающей головки, мм.....	33x39x17
Разрешение, мс.....	< 2

#### Технические характеристики

##### специальных головок датчиков ZX-LD\_V

Диапазон измерения, мм.....	30 ± 2
Точность считывания, мкс.....	до 0,25 мкс (4096 циклов считывания на полированной белой керам. поверхности)
Размер считывающей головки, мм.....	45x55x21

Усилители ZX-LDA и специальные головки датчиков ZX-LD\_V выполнены в двух моделях: каждая работает как сфокусированный пучок или линейный пучок (рис. 3).

#### Технические характеристики датчика (на пересечение луча) оптического диапазона частот ZX-IT

Ширина измерения, мм.....	1...2,5/5/10
Расстояние считывания, мм	
при ширине измерения 1 мм.....	< 500
при ширине измерения 2,5 мм.....	<500...2000
при ширине измерения 5 и 10 мм.....	<500
Разрешение, мкм.....	4

дать, используя как режим перемещения, так и режим изменения интенсивности света.

Подсоединив усилитель к головке датчика и включив питание, можно мгновенно получить информацию о расстоянии и пороговом уровне между головкой датчика и объектом. Встроенный двойной цифровой индикатор показывает действительное расстояние и может переключаться для индикации напряжения/тока или интенсивности отраженного света.

Вставив "вычислительное устройство" между двумя усилителями, можно измерить толщину объекта, и результат появится на головке датчика. Эта технология устраняет необходимость подключения цифровых измерительных приборов, настройки и подсоединения проводов.

К удобным современным функциям датчиков серии ZX относятся масштабирование, негативный дисплей, режим отключения дисплея, режим ECO, изменение разряда дисплея, измерение (функции таймер/остановка), установка пороговой величины, параметр ввода/вывода, взаимная интерференция, блокировка функций, начальный сброс, сброс нуля, производная функция, выбор чувствительности и фокус контроллера.



Рис. 3

За счет компактной головки датчика компания Omron смогла разработать специальное приспособление, позволяющее устанавливать датчик разными способами. Это приспособление можно использовать со всеми головками датчиков серии ZX.

Возможность автоматической калибровки датчиков серии ZX означает, что прежде чем начать снимать показания, датчик сам настраивается. Пользователю не приходится тратить время на калибровку. Кроме того, датчик автоматически распознает, какая головка подключена (рефлекторная или с пересечением луча), и задает оптимальные функциональные настройки для быстрой и точной работы.

Функция разрешения индикатора позволяет в режиме РВ проверять разрешение, которое зависит от объекта (воспроизводимый высокий уровень точности). Эта функция может проверить разрешение при помощи пучка лазера и измерения объекта. Вывод разрешения на экран позволяет более гибко пользоваться пороговой настройкой и быстро оценить качество полученных результатов.

В датчиках серии ZX используются три функции обучения, которые не уступают функциям, применяемым в современных фотоэлектрических датчиках. К этим функциям относятся:

- обучение определению позиции (для применений, требующих точного позиционирования);
- обучение замеру по двум точкам (для обнаружения сверхмалых различий между двумя точками);
- автоматическое обучение (для обучения в условиях производства без остановки изделия).

Датчики серии ZX легко настраиваются и практически обслуживают себя сами. В датчики серии встроен лазерный контроллер, действующий в течение всего срока его службы, и в случае ухудшения работы лазерного диода на вспомогательном цифровом дисплее появляется предупреждение. Такая система раннего обнаружения позволяет своевременно и без помех произвести замену.

Благодаря удобному индикатору на головке датчиков серии ZX легко настраивать и обслуживать. Этот индикатор четко отображает результаты измерения, которые могут быть чем угодно: от расстояния, порогового уровня и разности между головкой и объектом до автоматического вычисления толщины. Двойной цифровой индикатор можно переключать так, что он будет показывать расстояние, напряжение/ток или силу отраженного света. Кроме того, может отображаться разрешение в зависимости от реального измеряемого объекта.

**Контактные датчики**

Еще один датчик семейства ZX – это *контактный измерительный датчик смещений ZX-T*, являющийся одним из самым высокоточных. Используя цифровую технологию, датчик ZX-T измеряет длину, ширину, толщину, диаметр, эксцентриситет, прямолинейность, наклон и шероховатость объектов с разрешением  $<0,1$  мкм (рис. 4).

Датчик не подвержен воздействию электромагнитных шумов

и помех, что делает его высоконадежным, высокоточным и высокопроизводительным средством для применения в усовершенствованных системах контроля качества. Кроме того, датчик ZX-T полностью совместим с концепцией интеллектуальной платформы Omron Smart Platform, так что настройка, программирование и эксплуатация изделия сводится к простым операциям на экране монитора.

Благодаря применению уникальной конструкции с линейными шарикоподшипниками каждый датчик имеет длительный срок службы. Такая конструкция обеспечивает плавное движение скользящих частей, а резиновые манжеты защищают конструкцию от пыли. Класс защиты IP67 обеспечивает надежную работу датчика в самых тяжелых условиях эксплуатации.

Датчики серии ZX могут быть снабжены опцией Smart Monitor – программным средством настройки датчиков, через стандартный разъем RS-232 можно соединить датчик с портативным или настольным ПК. Этот комплект ПО идеален для быстрой и простой настройки параметров и значений при помощи экранного меню с дискеты или жесткого диска. С помощью этого ПО можно обрабатывать полученные данные для контроля качества, что помогает обеспечить беспере-

*При поддержке Скабаро В.Ю. – менеджера по продукции "Датчики" ООО "ОМРОН ЭЛЕКТРОНИКС".*

*Контактный телефон (495) 648-94-50. <http://www.omron-industrial.ru>*



Рис. 4

бойную работу. Форму сигнала можно контролировать дополнительно (например, с помощью осциллографа), а также можно легко получить значение порогового параметра.

Подлинным новшеством в датчиках серии ZX является то, что один и тот же усилитель можно использовать с любой из шести диффузионных лазерных головок, двух лазерных головок зеркального отражения или трех лазерных головок

с пересечением луча. Пользователь выбирает наиболее подходящую головку для конкретного измерения. Для контактных датчиков измерительные головки одинакового диапазона измерения могут отличаться только тем, что одна из них предназначена для измерений с низким крутящим моментом – например, для хрупких или мягких поверхностей. Кроме того, одно из устройств – ZX-TDS04 с увеличенным ходом штока – обладает наивысшей в своем промышленном классе точностью измерения (0,1 мкм) и линейностью (макс. 0,3 % полной шкалы). А измерительная головка датчика ZX-T диаметром 6 мм является рекордсменом миниатюризации в промышленности и может применяться для измерений в очень узких местах и для многоточечных измерений.

Все эти функциональные возможности делают датчики серии ZX идеальным средством в тех применениях, где необходим высоконадежный и высокоточный датчик для работы с любыми материалами и поверхностями в условиях, когда другие измерительные датчики не могут быть использованы. Датчики ZX подходят для применения в автомобильной и металлообрабатывающей промышленности, а также на любых сборочных производствах.

**ЭКОНОМИЧНЫЙ МАССОВЫЙ РАСХОДОМЕР****Компания KROHNE**

*Показано, как на базе кориолисовой измерительной системы в результате развития технологии измерения и инженерии специалистами компании KROHNE был разработан экономичный универсальный расходомер OPTIMASS 1000, обеспечивающий высокую точность измерений массы/концентрации продукта, в том числе в случае особых требований по температуре и давлению.*

Компания KROHNE разработала экономичный универсальный расходомер OPTIMASS 1000 (точность 0,2%), обладающий свойствами и опциями, присущими только самым передовым приборам.

**Принцип действия**

Кориолисовы силы FC возникают в колебательных системах, когда жидкость или газ двигаются от/к оси колебаний. Кориолисова измерительная система сконструирована симметрично и состоит из двух из-

мерительных труб. Драйвер С заставляет измерительную трубу равномерно вибрировать.

Если скорость потока  $v = 0$  м/с, то и  $FC=0$  (рис. 1).

При скорости потока  $v > 0$  м/с частицы жидкости ускоряются на отрезке AC, а затем тормозятся на отрезке CB. Это приводит к малой деформации измерительной трубы, прямо пропорциональной массовому расходу (рис. 2). Измерение плотности определяется частотой колебаний, изменяющейся при изменении плотности жидкости.

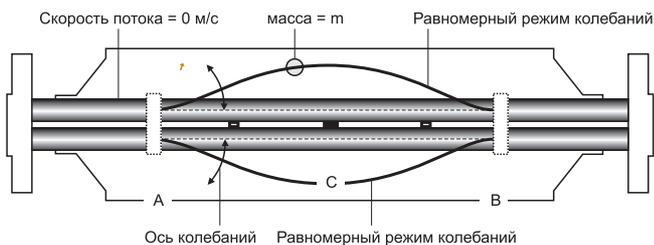


Рис. 1. Скорость потока = 0 м/с

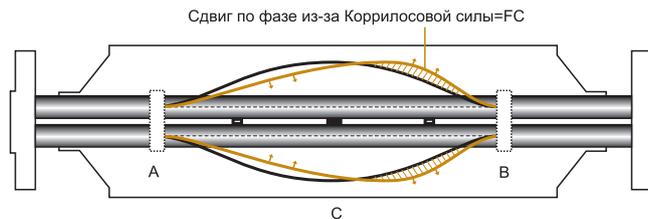


Рис. 2 Скорость > 0 м/с

### Особенности конструкции

Значительный прогресс наблюдается в дизайне OPTIMASS, сочетающем сдвоенную измерительную трубу и оптимизированный разделитель потока. Такая конструкция является прочной, простой в производстве и способной проводить измерения значительных расходов при допустимых потерях давления. Многочисленные элементы техники развязки, предусмотренные в приборах серии OPTIMASS 7000 с одной прямой трубой, использовались и в этой конструкции.

Благодаря этому данный измерительный прибор не имеет ограничений по установке и невосприимчив к внешним факторам, таким как вибрация, гидравлические шумы и т.д.

Одним из преимуществ данного дизайна является внешний корпус, сертифицированный по нормам PED (European Pressure Equipment Directive). В частности, в химической промышленности, как в одном из самых перспективных рынков для данного класса расходомеров, это может рассматриваться пользователем как настоящее преимущество, т.к. в случае маловероятной поломки измерительной трубы не произойдет загрязнения окружающей среды опасными веществами.

Разделитель потока был разработан с особой тщательностью с помощью программных пакетов динамики потока и конечного элемента, что позволило минимизировать площадь, на которую наталкивается жидкость при входе в разделитель (рис. 3). По сравнению с другими аналогами, имеющими более сильное углубление или выполненными в виде "пяточка", падение давления здесь минимально (рис. 4).



Рис. 3. Оптимизированный разделитель потока для минимизации потерь давления и турбулентности

### Гибкий выбор типа преобразователя

OPTIMASS 1000 используется с преобразователем MFC 300 в соответствии с испытанной временем архитектурной концепцией деления. Таким образом, для конечного пользователя обеспечивается максимальная гибкость при минимальных потерях.

Все датчики оснащены преусилителем, всегда интегрированным с самим датчиком, и затем откалиброваны. К ним может добавляться вторичный преобразователь в различных исполнениях. Это могут быть варианты компактного или полевого исполнения как в стандартном, так и во взрывозащищенном корпусе, а также версии настенного и каркасного монтажа на рейку 19". Далее, в зависимости от требований заказчика, вторичные преобразователи могут оснащаться различными вариантами электроники. Речь может идти как о простом и недорогом преобразователе с двумя аналоговыми выходами, так и о версии переднего края с большим числом выходных сигналов и цифровой коммуникации.

Главное преимущество экономичного преобразователя состоит в том, что не существует никаких ограничений по его функциональности. Доступны все опции: измерения концентрации, продвинутое программное обеспечение, свободно настраиваемое для всех выходных сигналов, а также расширенная диагностика, предлагаемая в данном поколении преобразователей.

Существует возможность применять массовый расходомер только с преусилителем (без вторичного преобразователя). С этой опцией конечный пользователь может использовать полную функциональность расходомера через Modbus протокол. Для этого KROHNE разработала базирующееся на платформе ОС Windows удобное для пользователя ПО, позволя-

#### Технические характеристики

Диаметры, мм .....	15, 25, 40 и 50
Точность, % .....	0,2 от измеренного значения
Диапазон измерений плотности, кг/м <sup>3</sup> .....	400...2500
Точность измерений плотности, кг/м <sup>3</sup> .....	2
.....	(калибровка по месту 0,5)
Измерительная труба.....	нержавеющая сталь 316L (Duplex SS)
Фланец.....	нержавеющая сталь 316L
Внешний цилиндр.....	нержавеющая сталь 304L (316 L)
Давление, бар	
измерительной трубы.....	100
внешнего корпуса .....	63 (100)
Диапазон температур, °С.....	40...130
Диапазон расхода, кг/ч.....	4800...125000

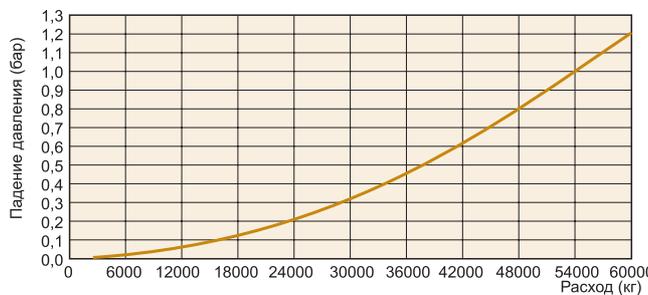


Рис. 4. График падения давления для диаметра 40 мм

ющее иметь полный доступ ко всем функциям, включая диагностику, измерение концентрации и т.д.. Установка измерительного прибора и поиск неисправностей проходят благодаря этому крайне просто.

#### Опции

OPTIMASS 1000 предлагает пользователю также богатый выбор опций, которые обычно не встречаются у стандартных экономичных универсальных расходомеров. Сюда относятся целый ряд гигиенических соединений для фармацевтической, пищевой промышленности и производства напитков. В будущем будут возможны полированные исполнения измерительной трубы с высоким качеством обработки поверхности.

Стандартная измерительная труба рассчитана на давление 100 бар и для этого имеются соответствующие фланцы. Стандартный внешний корпус рассчитан на 63 бар, однако возможна специальная версия на давление 100 бар. Это уникальная характеристика не только для приборов данного класса, но и для всего рынка кориолисовых расходомеров в целом. Немногие производители могут предложить сертифицированный внешний корпус данного вида. Этим гарантируется высочайший



Рис. 5. Типичная установка на химическом заводе

уровень безопасности прибора. Все сенсорные материалы, подверженные влиянию внешних атмосферных факторов, по желанию могут быть выполнены из нержавеющей стали 316 L. Это также относится и к корпусу преобразователя. В частности, эта опция обязательна в производстве напитков, фармацевтической и пищевой промышленности, где оборудование подвергается струйной очистке, а также на нефтяных платформах, где агрессивно влияние морского воздуха и воды.

Область применения данного прибора практически не знает границ. Как жидкости (точность 0,2 %), так и газы (точность до 0,75 %) могут быть измерены без проблем.

OPTIMASS 1000 представляет собой для конечного пользователя экономичный универсальный измерительный прибор высшей степени гибкости и многосторонности без каких-либо ограничений в отношении функциональности или производительности (рис. 5). Благодаря постоянным работам по разработке и инвестициям в область кориолисовых расходомеров KROHNE и дальше будет в состоянии предложить заказчику продукты мирового уровня с гарантированным качеством и надежностью.

Контактный телефон (495) 911-71-65.

Email: [krohne@krohne.ru](mailto:krohne@krohne.ru)

## ПОВЕРОЧНЫЕ УСТАНОВКИ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ВЯЗКОСТЬЮ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ

В.П. Каргапольцев, А. В. Косолапов,  
А.А. Сиденко (ООО "ОКБ "Гидродинамика")

*Представлен подход к созданию испытательного и поверочного оборудования, позволяющего проводить весь комплекс работ над приборами измерения расхода и объема жидкости в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным.*

При разработке приборов измерения расхода и объема жидкости, предназначенных для эксплуатации на ответственных объектах (например, в авиационной промышленности) возникает необходимость проведения испытаний на рабочей среде, отличной от воды и имеющей характеристики, максимально близкие к характеристикам той жидкости, объем и расход которой измеряются в реальных условиях эксплуатации приборов. В частности, в практике таких предприятий встречаются задачи, требующие измерения расходов и объемов вязких жидкостей. Приборный парк этих счетчиков и расходомеров-счетчиков поверяется, как правило, на обычной воде. Конечно, имея под рукой таблицы для пересчета показаний или выведенные ранее эмпирические зависимости, можно получить результат, приближенный к желаемому. Но, во-первых, такие данные и формулы нужно еще где-то и как-то получить. А, во-вторых, погрешность полученного таким образом результата может оказаться

неприемлемо высокой, ввиду его зависимости от слишком большого числа внешних не учитываемых факторов. Получение реальных зависимостей массового и объемного расходов при различных величинах вязкости рабочей жидкости возможно только при моделировании требуемых характеристик среды и натурных испытаниях средств измерений на ней. Таким образом, возникает необходимость изготовления испытательного и поверочного оборудования, позволяющего проводить весь комплекс работ в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным.

Формулировка задачи сводится к изготовлению поверочного комплекса, имеющего практически применимые диапазоны воспроизведения вязкости и расхода. Для удовлетворения большинства задач диапазон изменения кинематической вязкости составляет 1,5·10<sup>-6</sup>...50·10<sup>-6</sup> м<sup>2</sup>/с (1,5...50 сСт), а диапазон воспроизводимых расходов – 0,01...50 м<sup>3</sup>/ч. При этом

достаточно, чтобы допускаемое предельное отклонение подготовленной поверочной среды по параметру кинематической вязкости от заданной находилось в пределах  $\pm 4\%$ , а ее измерение обеспечивалось с относительной погрешностью  $\leq \pm 2\%$  от предела измерений. Прочие характеристики поверочной установки обычны для данного типа оборудования: относительная погрешность при измерении объема (массы) весовым методом  $\leq \pm 0,05\%$ , относительная погрешность при измерении объема методом сличения  $\leq \pm 0,25\%$ , давление на входе измерительного стола в диапазоне воспроизводимых расходов  $\leq 0,63$  МПа, воспроизведение расхода в процессе поверки обеспечиваться с нестабильностью  $\leq \pm 2\%$ .

Естественно, основной вопрос, возникающий при проработке данной темы, — это выбор поверочной жидкости. От этого выбора во многом будет зависеть схема работы и конструкция поверочной установки, применяемое в ней оборудование, удобство и безопасность работы, наличие или отсутствие негативных воздействий на рабочие средства измерений и поверителя. Поверочная жидкость должна наиболее полно моделировать рабочую жидкость по параметрам кинематической вязкости, электрической проводимости, плотности и т.д., быть безопасной (то есть соответствовать четвертому классу опасности по ГОСТ 12.1.007-76), быть удобной в хранении и применении.

Классическим решением считается использование в качестве поверочной жидкости водно-масляной смеси с добавлением различного вида реагентов, улучшающих ее свойства. Такие жидкости представляют собой эмульсию, стабилизируемую от расслаивания поверхностно-активными веществами, с добавлением присадок, улучшающих эксплуатационные качества смеси. Этот способ хорошо известен, но также хорошо известны и его недостатки. Например, процесс приготовления подобных жидкостей связан с необходимостью интенсивного перемешивания составляющих его компонентов, чтобы получить пригодную для работы однородную смесь со "сроком жизни" превышающим хотя бы несколько десятков минут. Кроме того, полученная жидкость имеет строго определенное значение кинематической вязкости, и изменение этого параметра связано с серьезными технологическими сложностями, а порой и вовсе невозможно. Таким образом, для проведения программы испытаний (или поверки) в полном объеме и во всех контрольных точках требуется приготовление нескольких смесей с разными, заранее определенными характеристиками. Очевидно, что этот вариант не лишен набора недостатков.

Существует альтернативный подход к решению проблемы получения поверочной жидкости, не имеющей описанных ограничений. Он основан на известном факте, что вязкость большинства ньютоновских жидкостей изменяется в соответствии с экспоненциальной зависимостью при изменении их температуры, то есть без манипуляций с ее составом.

Этот способ гораздо удобнее в применении, однако ограничен рамками изменения температуры, предельно допустимыми для работы используемого в поверочной установке оборудования и поверяемых средств измерений.

При подготовке технико-экономического обоснования на разработку и изготовление поверочной установки, удовлетворяющей приведенным выше требованиям, специалистами ООО "ОКБ "Гидродинамика" был предложен синтетический вариант обеспечения требуемого диапазона кинематической вязкости. Вместо водно-масляной эмульсии, сложной в приготовлении и подверженной расслоению со временем на составляющие ее компоненты, предложено использовать химический раствор, не имеющий подобного недостатка. Одновременно с этим должен реализовываться и второй подход — корректировка имеющейся вязкости до необходимой посредством изменения температуры поверочной среды.

Серией проведенных экспериментов было установлено, что для перекрытия заданного условиями диапазона кинематической вязкости достаточно иметь пять заранее подготовленных растворов разной концентрации входящих в ее состав компонентов и возможность изменения их температуры в пределах  $30^\circ\text{C}$ . По сути, известную зависимость между кинематической вязкостью (напрямую связанную с концентрацией компонентов в растворе при нормальных условиях) и температурой мы используем, задаваясь процентным соотношением составляющих смеси как константой. Существенным достоинством такого метода является отсутствие необходимости постоянного приготовления смесей с различными требуемыми параметрами, то есть расходования исходных компонентов.

При этом процесс задания любого значения вязкости внутри требуемого диапазона будет происходить по следующей схеме. Рабочая емкость поверочной установки по указанию оператора в автоматическом режиме заполняется из одного из резервуаров готовой поверочной жидкостью в зависимости от имеющихся задач. После этого данная среда выводится на нужное значение кинематической вязкости корректированием температуры по одному из алгоритмов, сформированных на экспериментальных результатах исследования характеристик каждого конкретного раствора. При достижении раствором требуемых параметров, поверочная установка считается готовой к работе, а дальнейшие операции не отличаются от обычно проводимых и соответствуют методике поверки на каждый конкретный тип средств измерений. Немаловажными достоинствами подобной схемы являются полная автоматизация процесса замены поверочной жидкости и короткое время подготовки стенда к эксплуатации, которое не должно превышать одного часа. Стоит отметить и то, что в процессе работы характеристики поверочной среды (вязкость, температура, плотность и другие) контролируются в режиме РВ и могут в автоматическом режиме поддерживаться в рамках



заданной погрешности, что невозможно при использовании других схем моделирования.

Вторая сложность, которую предстоит решить разработчику подобного комплекса, связана с физическими свойствами вязкой среды, с которой предстоит работать. Один из основных аспектов заключается в пониженной способности подобной жидкости выделять содержащийся в ней воздух без образования пены. При проектировании следует предпринять исключаяющие пенообразование меры, которые должны касаться не только используемого в составе поверочной установки оборудования (в первую очередь насосов), но и конструкции всего канала прохождения жидкости в процессе работы в целом. Насосное оборудование должно применяться специализированное, допускающее перекачивание вязких сред, не вызывающее кавитационные процессы и вихреобразование. Трубная обвязка и другие элементы гидравлического тракта также не должны способствовать образованию вихрей в жидкости в процессе работы, не иметь острых кромок срыва потока, возмущающих поток элементов и зон критического падения давления. Учет особенностей поверочной среды и выполнение этих рекомендаций во многом исключит возможность "запенивания" жидкости. В случае необходимости, способность противостоять пенообразованию можно дополнительно усилить добавлением антипенной присадки, механизм действия которой состоит в понижении поверхностного натяжения жидкости, а следовательно, разрыву газовых пузырей на поверхности раздела сред и быстрому гашению образовавшейся пены.

В составе поверочной установки (рисунок), для сохранения неизменных параметров заранее подготовленных растворов, должна быть предусмотрена возможность полного слива жидкости из рабочей емкости с последующей ее промывкой. Этими мерами можно значительно увеличить число циклов использования поверочной жидкости и удлинить срок ее использования и следовательно, снизить эксплуатационные затраты на приобретение компонентов этих растворов. Однако полностью исключить поглощение влаги и газов из окружающего воздуха и "старение" раствора в целом невозможно, и его характеристики с течением времени могут незначительно меняться. Для их корректировки представляется удобным применять те же полученные эмпирические зависимости, связывающие концентрацию компонентов растворов, их кинематическую вязкость и температуру. Зная текущие значения вязкости, температуры и объема готовых смесей, можно с высокой степенью достоверности рассчитать концентрацию компонентов в растворе и их необходимое количество для добавления. Дозировано вводя одну или несколько составляющих раствора и создавая условия для их взаимодействия, можно предельно точно довести величину кинематической вязкости до первоначально заданной. Эту операцию легко автоматизировать, включив соответствующую функциональную возможность в имеющееся ПО, существенно упростив и облегчив тем самым работу оператора.

Из вышеизложенного можно сделать вывод о "жизнеспособности" и практической применимости описанного метода моделирования параметров рабочих сред. Совмещая достоинства обоих подходов задания требуемой вязкости поверочной жидкости, он лишен сопутствующих им недостатков. Выявленные сложности в разработке подобных поверочных комплексов не критичны и достаточно легко устранимы еще на этапе проектирования. Кроме того, применение данного способа моделирования эксплуатационных условий расходомеров (в части имитации параметров рабочей среды) позволяет существенно расширить функциональные и сервисные возможности поверочной установки, сократить текущие затраты на расходные материалы, максимально сократить время подготовительных операций и, следовательно, иметь возможность проводить на установке весь спектр исследовательских и поверочных работ.

*Каргапольцев Василий Петрович — заместитель директора по маркетингу,*

*Косолапов Александр Васильевич — заместитель директора по метрологии и развитию,*

*Сиденко Андрей Александрович — начальник конструкторского отдела ООО "ОКБ "Гидродинамика".*

*Контактный телефон (8332) 703 439. [Http://www.gidrodinamika.com](http://www.gidrodinamika.com); E-mail: [info@gidrodinamika.com](mailto:info@gidrodinamika.com).*

#### Уважаемые читатели!

Начинается подписка на журнал "Автоматизация в промышленности" на первое полугодие 2008 г. Оформить подписку Вы можете:

**В России** — индекс в каталоге "Роспечать" **81874** и "Пресса России" **39206**

**В Белоруссии, Казахстане, Узбекистане, Украине** — индекс в каталоге "Пресса России" **39206**

**Все желающие**, вне зависимости от места расположения, могут оформить подписку, прислав заявку в редакцию или заполнив анкету на сайте **[www.avtprom.ru](http://www.avtprom.ru)**