

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 экономить значительные затраты на насосное оборудование особенно там, где требуются высокое давление в магистрали или длинные дистанции транспортировки тех или иных сред.

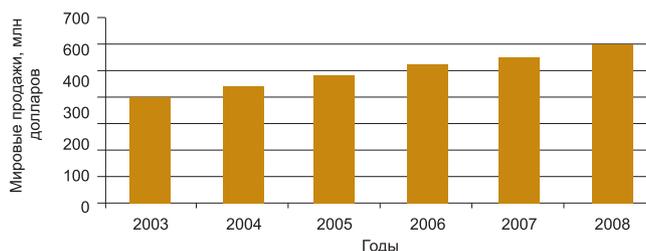
Именно ультразвуковые расходомеры в последние годы привлекают к себе все большее внимание, поскольку находят широкое применение во многих отраслях народного хозяйства. Они с успехом заменяют расходомеры других типов при измерении практически любых сред. Положительные тенденции развития мирового рынка 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 химобработанную 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 Instromet 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. Лупей 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>*