

ДИАПАЗОН 1000 ... ТАК ВСЕ-ТАКИ ОН ДОСТИЖИМ?

Кавригин С.Б.

В статье рассматривается давно обсуждаемый и наболевший вопрос о возможности измерения расхода в динамическом диапазоне 1000:1 и более применительно к электромагнитному методу. Может ли быть разработан расходомер, который «честно», то есть не только на стенде, но и на узле учета, будет обеспечивать измерения сверхмалых расходов с нормированной погрешностью.

В начале 90-х годов известные события в стране привели к быстрому росту тарифов на энергоресурсы, в том числе на тепловую энергию. Очевидной стала необходимость оплаты теплотребления по приборам учета. Потребность в них многократно превысила предложение, что стимулировало стремительный прогресс соответствующей отрасли в России и странах ближнего зарубежья. В конце 90-х рынок приборов учета тепловой энергии, в основном, сформировался. Выделились явные лидеры: около десятка фирм в России и 5 – 6 в странах ближнего зарубежья. Выпускаемое ими оборудование не «дотягивало» до мирового уровня, однако, низкие цены и учет специфики российских систем теплоснабжения позволили успешно конкурировать с инофирмами, поэтому лидеры заняли до 80% российского рынка.

До конца 90-х годов не было никаких проблем с диапазоном измерения расхода. Понятно, что разработчики стремились его увеличить, так как эта характеристика является конкурентным преимуществом для одних типов расходомеров (электромагнитные, ультразвуковые) и недостатком других (диафрагмы, вихревые и тахометрические расходомеры). Были достигнуты примерно следующие диапазоны: электромагнитные расходомеры 100...120, ультразвуковые – 80...100, вихревые – 50...70. Ситуация резко изменилась осенью 1999 года, когда одна из фирм, выходя на рынок теплосчетчиков, позиционировала свое новое изделие (надо сказать, достаточно совершенное для того времени), как «единственный в мире прибор с диапазоном измерения расхода 1000». Конкуренты вынуждены были ответить адекватно, и пошел лавинообразный



процесс. На сегодняшний день практически любой отечественный (!) производитель расходомеров предлагает или предлагал приборы с расширенным диапазоном измерений – 400, 500 и, даже, 1000. Однако, теперь очевиден и факт разительного несоответствия заявленных диапазонов реальным.

Попробуем разобраться, есть ли физические ограничения по диапазону измерения расхода. Для определенности рассмотрим электромагнитные расходомеры (ЭМР), у которых и декларируются «рекордные» диапазоны.

Как известно, принцип действия ЭМР основан на законе электромагнитной индукции. При условии ортогональности векторов скорости, индукции и диаметра, проходящего через оси электродов, выражение для электродвижущей силы на электродах будет иметь вид:

$$E = [B \times V \times D], \text{ где:}$$

B – вектор индукции магнитного поля,

V – вектор средней по сечению скорости потока,

D – расстояние между электродами.

Если ввести в рассмотрение классическую конструкцию ЭМР (неэлектропроводная труба круглого сечения, электроды точечные), то из уравнений Максвелла при задании граничных условий в виде конечной и изотропной электропроводности среды, отсутствии намагниченности среды и отсутствии искажения поля индуцированными в среде токами, можно получить выражение для сигнала ЭМР в виде:

$$U = \int_{\tau} [B \times W] V \, d\tau, \quad (1)$$

где: *W* – объемная весовая функция, τ – полный объем проточного канала ЭМР.

В (1) интегрирование ведется по всему объему канала, поэтому *V* имеет смысл интегрального значения и не зависит от распределения скоростей по сечению, конечно, при условии аксиально симметричного потока. Другими словами, сигнал ЭМР не зависит от характера потока (турбулентный или ламинарный), плотности, вязкости, температуры и давления. В принципе можно сформировать магнитное поле с таким пространственным распределением, чтобы выполнялось условие:



$$[B \times W] = k, \quad (2)$$

тогда:

$$U = k \int V d\tau, \quad (3)$$

τ

что означает независимость сигнала от деформации профиля потока. Весовая функция W определяется геометрической формой канала, размерами и положением электродов. Величина W на поверхности точечных электродов ($\varnothing_{эл} = 0$) стремится к бесконечности, так как для сред с конечной и изотропной электропроводностью:

$$W = [B \times J], \quad (4)$$

где: J – плотность тока, индуцированного в объеме канала.

Так как электропроводность воды, как и подавляющего большинства жидкостей в природе, имеет конечную величину, то вклад каждой точки сечения первичного преобразователя (ПП) существенно разный. Зависимость достаточно сложная и описывается объемными функциями Грина второго рода. Например, в классическом (круглом) ПП в плоскости, проходящей через электроды, зависимость в полярных координатах (r, φ) имеет вид:

$$W = (a^4 - a^2 * r^2 * \cos 2\varphi) / (a^4 + 2a^2 * r^2 * \cos 2\varphi + r^4)$$

где W – весовая функция, численно равная вкладу каждой точки поперечного сечения в полезный сигнал [1].

Анализ W (как и многочисленные экспериментальные проверки) показывает, что у классического расходомера имеется существенная зависимость сигнала от распределения локальных скоростей в поперечном сечении ПП, т.е. от профиля потока. Действительно, если за нормирующее значение принять $W=1$ в геометрическом центре сечения, то вблизи стенки $W=0,5$ (наименьшее значение), а вблизи точечного электрода W неограниченно возрастает (теоретически). В реальных конструкциях, например, ЭМР «Взлет ЭР» Ду 50 величина W на поверхности электрода достигает 15 – 17. Понятно, что величина полезного сигнала при одном и том же среднем объемном расходе, зависит от взаимного положения оси потока (области с наибольшей



локальной скоростью) относительно изолиний весовой функции. (Изолиния соединяет точки с одинаковой величиной W).

Отметим, что хотя численные значения W в выбранном сечении могут отличаться в 20 – 30 раз, дополнительная погрешность в реальных ситуациях составляет, как правило, 3 – 5 %, реже 8 – 10 %. Причина – интегральный характер полезного сигнала ЭМР (усреднение по всему объему ПП).

Классическая теория ЭМР предполагает, что магнитное поле в ПП – равномерное, т.е. вектор индукции B в любой точке строго перпендикулярен оси ПП и имеет одну величину. В современных конструкциях ЭМР поле значительно отличается от равномерного, особенно в малых и средних диаметрах, из-за наличия сердечников, полюсных наконечников и других ферромагнитных элементов, которые, собственно, и формируют поле в ПП. Пространственная неравномерность поля во многих случаях усугубляет проблему. Выход из положения – наличие прямолинейных участков до и после ПП. Практически все изготовители ЭМР устанавливают минимальные длины участков 3 – 5 Ду (некоторые до 10 Ду).

Условие (2) в реальных, а не теоретических, конструкциях нереализуемо, поэтому, с учетом (4), при измерении расхода деформированных потоков ЭМР имеют заметную дополнительную погрешность. Однако и при измерении симметричных потоков реальные ЭМР могут иметь заметную погрешность. Дело в том, что однородное магнитное поле по ряду причин (в том числе и по экономическим) неэффективно, поэтому во всех современных ЭМР поле неоднородно, причем условие (2) не выполняется, чем и объясняется зависимость сигнала от профиля потока, то есть от числа Рейнольдса Re .

Вывод 1: Сигнал современных ЭМР зависит от числа Re даже при измерении расхода развитых аксиально-симметричных потоков. На деформированных потоках (при наличии местных гидравлических сопротивлений) ситуация усугубляется.

Теперь рассмотрим гидродинамические режимы, при которых работают ЭМР на узлах учета. Для большинства ЭМР наибольшие расходы соответствуют скорости потока 10 – 12 м/с, поэтому нижней границе расходомера с диапазоном 1000 соответствуют скорости 0,01 – 0,012 м/с.



В современных технических приложениях при перекачке жидкостей редко имеют дело со скоростями, превышающими 12 – 15 м/с. Большие скорости (30 – 50 м/с) применяются, например, в топливных системах реактивных двигателей, при дозаправке самолетов в воздухе, т.е. в достаточно экзотических случаях, поэтому рассматривать их не будем. В системах водо -, и теплоснабжения скорости еще ниже: как правило, не более 3 – 4 м/с. Причина проста: квадратичная зависимость потерь напора от скорости, и соответствующий рост удельных затрат на транспортировку воды.

Для анализа режимов определим числа Re для расходомеров трех Ду, работающих в диапазоне расходов 1000, 500 и 200 при температурах 0, 20, 100 и 150 °С и давлении 0,5 МПа:

Таблица 1

Ду, мм	Re при температуре											
	0 °С			20 °С			100 °С			150 °С		
	Диапазон расходов											
	1000	500	200	1000	500	200	1000	500	200	1000	500	200
10	57 143			370 370			370 370			526 316		
	57	114	286	122	244	610	370	741	1 852	526	1 053	2 632
50	285 714			609 756			1 851 852			2 631 579		
	286	571	1 429	610	1 220	3 049	1 852	3 704	9 259	2 632	5 263	13 158
150	857 143			1 829 268			5 555 556			7 894 737		
	857	1 714	4 286	1 829	3 659	9 146	5 556	11 111	27 778	7 895	15 789	39 474

Примечание: В выделенных ячейках Re соответствуют $V_{\text{наиб}} = 10$ м/с.

Как известно, число Re – это обобщенный параметр, характеризующий отношение сил инерции потока ньютоновской жидкости, например, воды, к силам вязкого трения. Число Re пропорционально величинам скорости и характерных размеров потока и обратно кинематической вязкости текущей жидкости. Обычно за характерный размер принимается либо диаметр трубы, тогда:

$$Re = V \cdot d / \nu ,$$

либо глубина открытого русла, тогда:

$$Re = V \cdot h / \nu , \text{ где:}$$

d и h – диаметр и глубина,

V – скорость потока,

ν – кинематическая вязкость жидкости.



От величины Re зависят два важнейших свойства потока: режим течения (ламинарный или турбулентный) и распределение скоростей в его поперечном сечении. Теоретически ламинарный и турбулентный режимы разделяют критические числа Рейнольдса $Re_{кр}$, равные: для круглых труб $Re_{кр} = 2320$ и для русел $Re_{кр} = 580$. Однако, на практике существует некоторый диапазон, в котором могут существовать не только оба режима, но и третий, так называемый переходный, при котором они спонтанно меняются и даже сосуществуют вместе, занимая свою часть сечения потока. Границы критического диапазона для круглых труб с технической шероховатостью [2]:

$$1000 < Re < 10^4$$

попадают в нормированный диапазон расходов большинства современных ЭМП (см. таблицу 1).

Вспомним, что вследствие неидеальности магнитной системы условие (2) не выполняется и сигнал ЭМП зависит от Re . Тем не менее, в диапазонах больших значений Re ($Re \gg Re_{кр}$) профиль потока, т.е. распределение скоростей в поперечном сечении, меняется мало, поэтому номинальная статическая характеристика (НСХ) ЭМП линейна, что позволяет легко получать погрешность 0,5 % и, даже, 0,25 – 0,3 %. На рис.1 показано распределение скоростей в поперечном сечении потока при развитом турбулентном режиме:

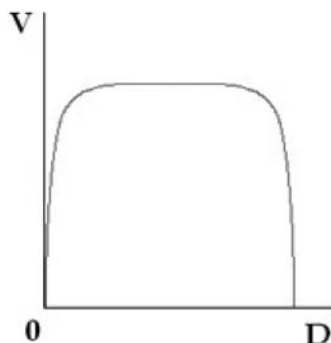


Рисунок 1.

Характерной особенностью режима является примерное равенство скоростей, что хорошо видно на рисунке: скорости вблизи стенок, а, следовательно, и вблизи



электродов, почти такие же, как и на оси трубы. Отсюда важнейшее следствие: практически все современные ЭМР, как импортные, так и отечественные, хорошо работают в диапазоне расходов 100 (некоторые в диапазоне 200 – 250).

Обычно эту особенность ЭМР принято объяснять большой величиной отношения «сигнал / шум» на высоких скоростях потока. Соответственно, при работе в нижней части диапазона расходов повышенную погрешность измерения, и нестабильность показаний объясняют сильным влиянием различных помех. Действительно, отношение «сигнал / шум» может достигать – 120 дБ: отдельные виды помех превосходят по амплитуде полезный сигнал на 5 – 6 порядков. Однако, воздействие помех – далеко не единственная причина нестабильной работы ЭМР в расширенном диапазоне, и, однозначно – не главная. Дело в том, что современная элементная база и программные методы обработки позволяют без особых усилий издержек реализовать даже в недорогих моделях ЭМР подавление помех с необходимым и достаточным уровнем. Например, входные инструментальные усилители (стоимостью 1 USD) обеспечивают ослабление сетевой помехи на 115 – 140 дБ, уровень шума по входу 7 – 12 нВ/√Гц при входном сопротивлении свыше 200 ГОм. На контроллерах за 3 – 4 USD легко реализуются фильтры 18 порядка и более. Кроме того, питание магнитных систем большинства ЭМР – импульсное, реализованное на специализированных микросхемах с высококачественными MOSFET – ключами, что позволяет получать КПД свыше 90%, поэтому увеличить на порядок ток возбуждения (до 3 – 5 А) не составляет особого труда! Несомненно, усилия разработчиков в этом направлении были затрачены не на одной фирме – изготовителе, однако, успехи более чем скромные.

Совершенно другая ситуация в области $Re < Re_{кр}$, т.е. в диапазоне малых расходов. Здесь профиль потока – парабола (рис.2), скорость плавно уменьшается при приближении к стенке трубы:

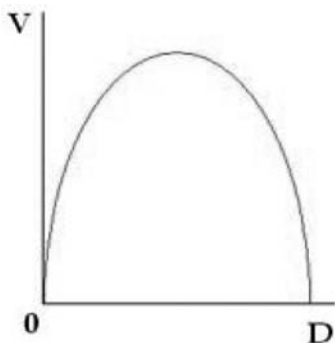


Рисунок 2.

Вспомним, что весовая функция W на поверхности электродов достигает значений 15 – 17, а в некоторых конструкциях и существенно больших. В этом основная причина нелинейности НСХ широкодиапазонных ЭМР: с уменьшением Re профиль скоростей становится все более вытянутым и сигнал ЭМР уменьшается гораздо резче, чем средняя скорость потока. Выход очевиден: необходима кусочно-линейная аппроксимация НСХ расходомера. Весь диапазон измерений разбивается на 3 – 5 поддиапазонов (иногда 7 – 10), в которых выполняется калибровка прибора.

Таким методом удается почти идеально линеаризировать НСХ расходомеров, у которых характеристика принципиально не просто нелинейная, а еще и немонотонная. Типичным примером является газовый вихревой расходомер с тензодатчиком, у которого НСХ в нижней части диапазона измерения имеет несколько экстремумов разной амплитуды. После калибровки нелинейность практически у 100% расходомеров не превышает 0,25 – 0,3%!

Однако имеется причина, заметно снижающая эффективность метода кусочно-линейной аппроксимации применительно к широкодиапазонным ЭМР. Дело в том, что в реальных трубопроводах существуют местные гидравлические сопротивления (МГС). Принято относить к МГС только различную арматуру: задвижки, колена, тройники, конфузоры и т.д. В действительности, МГС – это любой элемент трубопровода, возмущающий поток, поэтому шероховатость стенок, в особенности неравномерная, сварные швы,



места сочленений (фланцы, прокладки), эллипсность и несоосность, также являются сопротивлениями.

Рассмотрим механизм влияния МГС на широкодиапазонные ЭМР. Как уже отмечалось Re определяется, в частности, характерным размером области потока, например, в круглых трубах – это диаметр. Если рассматривать не все сечение трубы, а только меньшую его часть, то при наличии в этой части МГС, число Re сильно возрастет, т.к. теперь характерный размер сопоставим с размерами выбранной части сечения. Например, в трубе с $D_u = 100$ мм $Re = 500$, т.е. имеется установившийся ламинарный режим. Допустим, что на части окружности трубы есть нагар от незачищенного сварного шва высотой $h = 5$ мм. На высоте 10 мм от стенки трубы местная скорость составляет 0,36 от максимальной на оси трубы, локальное число Re в выделенной части сечения возрастает до 1500 – 3000, а при наличии вибрации трубопровода или пульсаций давления еще больше. Возникает частичная турбулизация потока, вследствие которой происходит выравнивание местных скоростей и, соответственно, искажение профиля (рис.3):

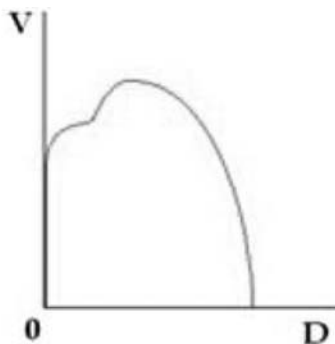


Рисунок 3.

Тем не менее, в целом, характер режима потока не изменился, т.к. кинетической энергии потока не хватает на преодоление сил вязкого трения и поток ламинарный. Если учесть, что относительная длина участка стабилизации для ламинарного потока: $L / d = 0,028 Re$, то зона турбулизации, постепенно затухая, распространится на 14 D_u вниз по потоку и, вполне, может достигнуть приэлектродной области ЭМР, где значения весовой функции W велики [3].



Теперь становится понятным механизм воздействия МГС на широкодиапазонные ЭМР, в которых применен метод кусочно-линейной аппроксимации. При работе ЭМР в нижних поддиапазонах помимо зависимости от общего числа Re , на показания начинает сказываться и зависимость от локального числа Re , поэтому НСХ расходомера «плавает».

Здесь представляется уместным небольшое отступление. Существующая практика испытаний ЭМР на проливных установках (ПУ) предполагает, что если обеспечивается точное воспроизведение расхода и температуры жидкости (воды), то обеспечивается и полное воспроизведение гидравлических условий при повторных испытаниях. С точки зрения гидравлики это означает, что автомодельная область (область гидравлического подобия) распространяется на диапазон малых чисел Re (менее 3000-5000). Однако, подавляющее большинство существующих ПУ не обеспечивает этого. Практически невозможно обеспечить гидравлически гладкое сопряжение датчика ЭМР с арматурой рабочего стола ПУ, всегда имеются несоосности, выступающие или, наоборот, утопленные прокладки, незачищенные изнутри сварные швы подводящих труб ПУ, несовпадение фактических диаметров проточных частей ЭМР, проставок и подводящих труб, отсутствие струевыпрямителей при наличии колен на подводящих трубах и т.д. Все эти огрехи являются МГС и создают локальные Re . Даже на одной и той же ПУ при ремонте одних и тех же ЭМР невозможно воспроизвести профиль потока при $Re < 10^4$, т.е. в зоне перемежающейся турбулентности, которую захватывают широкодиапазонные расходомеры средних ($D_u < 100$ мм) и малых диаметров. При проведении испытаний или поверки на разных ПУ ситуация с воспроизведением гидравлического подобия потока еще хуже. По этой причине самые точные (и дорогие!) ЭМР не воспроизводят НСХ при повторных проливках в диапазоне 500-600 и более. Конечно, существуют способы искусственного увеличения числа Re – турбулизаторы, например, 2-3 решетки, установленные непосредственно перед датчиком расходомера. К сожалению, это не решение проблемы, так как на узле учета турбулизаторы отсутствуют, а местные сопротивления (и какие!) имеются.



Вывод 2: Зависимость положения НСХ ЭМР как от общего, так и от локального числа Re не позволяет создать расходомер с честным диапазоном более 500-600, т.к. существенная часть диапазона находится вне автомобильной области.

Однако, ситуация отнюдь не безнадежна. Существует конструкция, которая теоретически, а, главное, практически обеспечивает полную независимость показаний ЭМР от профиля потока – это ЭМР с прямоугольным каналом.

Конструкция классического ЭМР с прямоугольным каналом (ПК) достаточно проста: электродами являются боковые стенки проточного канала. Магнитная система формирует равномерное магнитное поле. Принцип действия тот же, однако, имеется очень существенное отличие от «круглого» ЭМР: в любой точке поперечного сечения весовая функция одинакова и равна 1 ($W = 1$). Это главное преимущество ПК (но не единственное). Равенство $W = 1$ теоретически [1] обеспечивает полную независимость сигнала от профиля потока. Конечно, реальные конструкции не соответствуют «идеальной», поэтому W лишь приблизительно равна 1. Например, невозможно обеспечить строго равномерное поле: в области электродов поле искажается («выпучивается» наружу из датчика), т.к. магнитная система имеет конечные размеры. Тем не менее, нечувствительность к искажению профиля потока просто феноменальная!

В 1994 г. на проливной установке завода «Ленводприбор» (С.-Петербург) испытывался макет ЭМР с ПК Ду 100 мм. Непосредственно перед входным фланцем ПК устанавливались сегментные диафрагмы, которые перекрывали поток на $1/3$, $1/2$ и $2/3$ Ду. В наихудшем случае дополнительная погрешность составила всего 0,7 – 0,8 %. В тех же условиях «круглый» ЭМР показывал погрешность 25 – 30% (до 70%!).

Вторым замечательным свойством ПК является возможность значительного увеличения удельной чувствительности расходомера без особых затрат.

Под удельной чувствительностью понимается величина (амплитуда) полезного сигнала на скорости потока 1 м/с. В современных ЭМР удельная чувствительность близка к 150 мкВ/ м/с. Можно увеличивать амплитуду полезного сигнала, увеличивая мощность, подводимую к магнитной системе, однако, при этом возрастают и соответствующие помехи,



поэтому отношение сигнал/шум меняется мало. Уд. чувствительность 150 – 200 мкВ/м/с при современных методах обработки сигналов является оптимальной.

Совершенно другая ситуация с ПК. Величина полезного сигнала ЭМР (см. выше) пропорциональна индукции поля B , средней скорости потока V и расстоянию между электродами d . Конструктивно легко обеспечить поперечное сечение канала в виде щели, раздвинув электроды и сблизив катушки индуктивности. При этом:

- индукция возрастает в 3 –4 раза, а поле становится практически равномерным, т.е. вектор B везде параллелен поперечной оси канала;

- скорость потока возрастает, если площадь поперечного сечения уменьшена по сравнению с «круглым» ЭМР такого же D . Потери напора возрастают незначительно, если обеспечен гидравлически плавный переход от круглого сечения к прямоугольному и обратно. Прямые измерения на макете показали, что при двукратном увеличении скорости потока потери напора составили всего $0,12 \text{ кг/см}^2$ (ок. 1 м вод. ст.) на скорости 10 м/с, что соответствует потерям на полностью открытой задвижке.

- расстояние между электродами, в силу особенностей конструкции ПК, всегда больше соответствующего D «круглого» ЭМР на 50% и более.

Таким образом, достаточно просто обеспечивается увеличение полезного сигнала в 10 – 12 раз при той же мощности, подводимой к магнитной системе. Другими словами, отношение «сигнал/шум» и, соответственно, чувствительность также увеличивается в 10 – 12 раз!

Эти два отличия ПК от классического «круглого» ЭМР: практически полная независимость показаний от профиля потока и на порядок большая чувствительность, позволяют создать ЭМР с реальным (честным) диапазоном измерения расхода 1000:1 (и более) и погрешностью 0,3 - 0,5%.

Здесь необходимо подчеркнуть, что речь идет о реальной погрешности измерений в условиях эксплуатации. При попытках создания классических ЭМР с расширенными диапазонами измерения на ЗАО «Взлет», НПФ «Теплоком», ТБН Энергосервис и ряде других фирм, был набран огромный объем экспериментальных материалов. Расходомеры с диапазонами вплоть до 1000:1 поставлялись



заказчикам, однако, повторные проливки, например, при периодической проверке, в большинстве случаев, не подтверждают заявленные характеристики.



Вывод 3: ЭМР с диапазоном измерения расхода шире чем 500 – 600 может быть реализован только с прямоугольным (или приближенным к прямоугольному) каналом. Никакими методами обработки сигнала невозможно обеспечить воспроизводимость результата на разных проливных стендах и, тем более, на реальном объекте (узле учета).

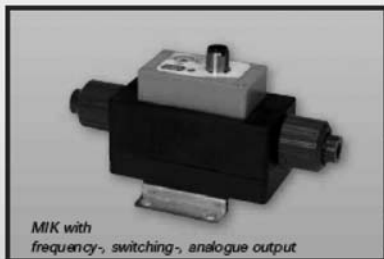
Основной недостаток расходомера с ПК – это значительные технологические трудности при изготовлении проточной части. Традиционные технологии, при которых труба футеруется фторопластом в виде «чулка» с разбортовкой по торцам, для прямоугольного канала не пригодны. Наиболее приемлемая технология – литье из полимерных материалов всей проточной части с электродами в виде закладных деталей. При этом должны обеспечиваться требования по механической прочности, температурной и коррозионной устойчивости изделия. Прессформы для деталей такого уровня сложности дороги и сложны в разработке и изготовлении. По всей видимости, именно по этой причине удачные серийнопригодные конструкции до последнего времени не были известны.

Необходимо отметить, что все перечисленные выше фирмы-изготовители в разное время предпринимали попытки разработки собственных ЭМР с прямоугольным каналом.



Примеры ЭМП с прямоугольным каналом.

 Zertifizierte QM-Systeme DIN EN ISO 9001 Zertifiziert, 1997	Compact Magnetic-Inductive Flow Meter for conductivity liquids		measuring • monitoring • analysing
---	--	---	--



- Range from liquids, acids and caustic solutions:
0.05...1.0 up to 40...800 L/min
- Accuracy: $\pm 2.0\%$ of F.S.
- p_{max} : 10 bar; t_{max} : 80°C
- Connection: G 1/2...G 2 1/4 male, diverse accessories



- Material:
normal liquids: PPS, st. st.
aggressive liquids:
PVDF, Hastelloy
- Advantage:
 - no moving parts in the measuring tube
 - low pressure loss
 - any mounting position
 - short reaction time – Replacement for calorimetric flow switch
 - high quality for lowest price





ЭМП фирмы KOBOLD (Германия). Наиболее совершенный из известных прибор с ПК. Назначение: учет холодной и горячей воды в быту.

Расходомер с ПК (Ду 100 мм) фирмы CLORIUS (Дания). Разработан в середине 90-х годов. Выпускался 2-3 года. Всего было изготовлено 300-400 шт.

Кроме указанных ЭМП с ПК выпускали фирмы RAAB KARCHER (Германия) и VITERRA (Германия, Италия).

Выводы:

1. Анализ тенденций рынка расходомеров, предназначенных для узлов учета тепловой энергии в ЖКХ России, показывает, что через 3 – 5 лет возможно его насыщение, которое обусловит обострение конкурентной борьбы. Следовательно, отечественные фирмы-производители будут вынуждены предлагать приборы с максимально возможными рыночными преимуществами, в частности, с расширенными диапазонами измерения, поэтому разработка серийнопригодного ЭМП с ПК представляется актуальной.
2. Никакие, даже самые передовые, методы обработки сигнала в классическом «круглом» ЭМП не позволят реализовать «честный» диапазон 1000. Причина – физические ограничения на воспроизводимость результата измерения вне автомодельной области для классического ЭМП.

Литература:

1. Шерклиф Д.А. Теория электромагнитного метода измерения расхода. Изд. Мир, 1965.
2. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. Энергоатомиздат, 1991.
3. Рабинович Е.З. Гидравлика. Изд. Физматгиз, 1963.

Сведения об авторах:

Кавригин Сергей Борисович -
ведущий специалист ЗАО «Взлет».

ksb_55@mail.ru