



Рис. 8. Пирометр ПД-9

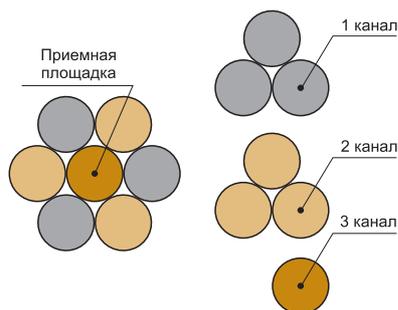


Рис. 9. Схема разделения каналов

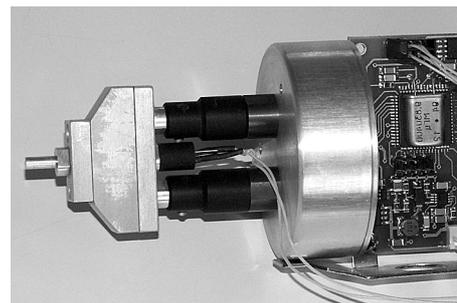


Рис. 10. Макет пирометра ПД-20

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

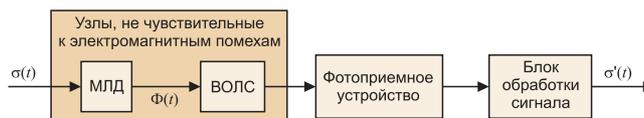


Рис. 1. Обобщенная структурная схема измерительной системы с механолюминесцентным датчиком давления (МЛД), где $\sigma(t)$ – входное механическое воздействие; $\Phi(t)$ – световой поток; $\sigma'(t)$ – механическое воздействие, восстановленное из выходного оптического сигнала датчика

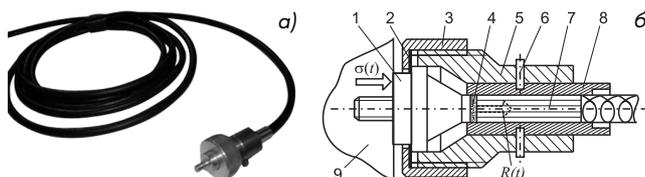


Рис. 2. Механолюминесцентный датчик с чувствительным элементом сосредоточенного типа волнового действия:

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 η – энергия кванта света; β – коэффициент рекомбинации; t_{σ} – 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); σ_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, η_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 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-

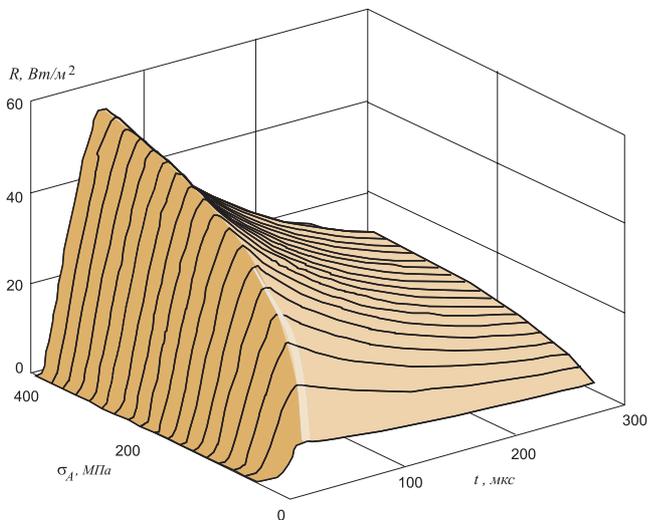


Рис. 4. Зависимость энергетической светимости МЛД R от амплитуды механического воздействия σ_d

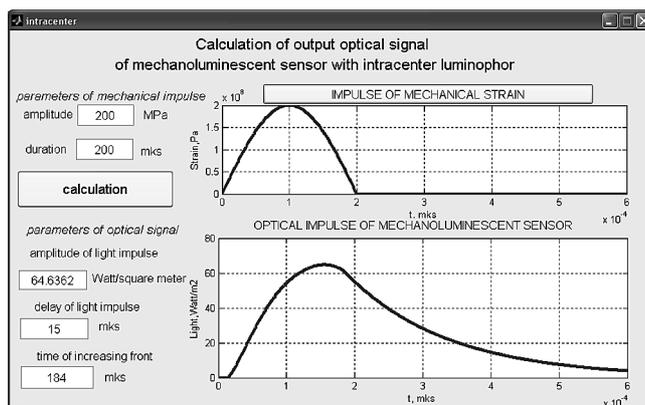


Рис. 3. Пример расчета выходного оптического сигнала механолюминесцентного датчика при синусоидальном механическом воздействии

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-

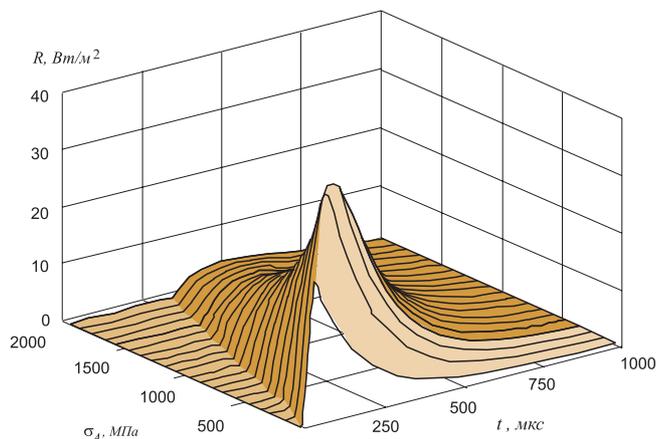


Рис. 5. Зависимость энергетической светимости механолюминесцентного датчика R от длительности механического воздействия t_0

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.