

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ КОРИОЛИСОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ – СТРАТЕГИИ И «ЛОВУШКИ» ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

Жестков Александр Владимирович, директор ООО «ЭлМетро-Инжиниринг», к.ф.-м.н.

Ярким примером политики импортозамещения в РФ явилась задача создания отечественных кориолисовых расходомеров. Эти весьма сложные электронно-механические устройства, работающие на принципе силы Кориолиса, являются наиболее точными и универсальными среди всех приборов расхода. Коммерческий и технологический учет углеводородов в нефтяной и газовой промышленности в значительной степени основан на использовании именно этих приборов. Однако до недавних пор отечественные разработки в этой области отсутствовали, а рынок России оказался целиком занят импортными расходомерами. В 10-х годах на рынке появилось несколько отечественных производителей, и они выбрали принципиально различные стратегии.

Массовые кориолисовые расходомеры до сих пор являются одним из наиболее сложных и трудновоспроизводимых приборов расхода. И, соответственно, самых дорогих. Причиной является сложность технологии, выражающаяся во множестве нюансов и «ноу-хау», тщательно оберегаемых ведущими мировыми фирмами-изготовителями и дороговизной самого технологического оборудования для серийного производства. Сам принцип измерений основан на тонких эффектах и требует глубокой проработки конструкции на основе численного моделирования процессов механики и гидрогазодинамики.

Когда на рубеже нулевых и десятых годов несколько российских приборостроительных компаний поставили перед собой задачу вывести на рынок отечественные кориолисовые расходомеры, перед ними открывались и были выбраны различные альтернативные стратегии импортозамещения.

Одна из них, уже привычная в России, сводилась к ребрендингу, т.е. сертификации под отечественной маркой готовых, как правило азиатских моделей. При этом российское «производство» заключается лишь в переклеивании шильдиков и калибровке таких приборов на проливочных метрологических стендах.

Вторая «быстрая» стратегия предусматривала крупноузловую сборку из комплектующих изделий того же происхождения с постепенной частичной локализацией наименее сложных узлов на отечественных предприятиях по аутсорсингу. Иными словами, это опора на сторонние ресурсы: «слепое» копирование конструкций азиатских производителей и производственный аутсорсинг.

Третья стратегия, которую и выбрала Группа компаний ЭлМетро, - наиболее сложная, но и наиболее перспективная - овладение полным циклом технологии расчета, проектирования и изготовления столь наукоемких приборов. Это потребовало больших затрат времени и ресурсов, вызвало необходимость теоретических исследований и анализа лучших решений от ведущих производителей. Но эта стратегия позволила приобрести бесценные знания и технологический опыт и выработать методику проектирования таких приборов, во всём комплексе: от сложных расчетов конструкции датчика до моделирования прецизионных измерительных электронных схем.



Рисунок 1. Кориолисовые расходомеры «ЭЛМЕТРО-Фломак»

Вышедший на рынок в 2011 году, кориолисовый расходомер «ЭЛМЕТРО-Фломак» первоначально был воспринят нефтегазовыми компаниями с опасениями. Ведь у всех остался осадок от негативного опыта эксплуатации появившегося в середине нулевых годов и затем сошедшего первого отечественного кориолисового расходомера. Его чувствительный элемент (датчик) внешне был очень похож на аналоги от западных производителей, но близко не обеспечивал их стабильность и точность измерений. Ведь он был изготовлен полностью сваркой, с присущими ей поводками и низкой точностью выдерживания геометрических размеров.

Дело в том, что принцип работы кориолисового расходомера основан на динамике колебаний системы из двух измерительных трубок, которая является своего рода камертоном. Его частотная настройка является тонкой операцией, подобной настройке музыкального инструмента, а идеальность частотных характеристик обеспечивается тщательностью сборки подобно склейке корпуса скрипки из деревянных деталей. И формирование конструкции кориолисового «камертона» сваркой можно уподобить скреплению деталей корпуса скрипки с помощью гвоздей.

Вследствие этого и других просчетов, вызванных непониманием многих «ноу-хау» в технологии изготовления, да и теории работы прибора, эта «новинка» оказалась никому не нужна и быстро ушла с рынка.

Понимая сложность задачи, инженеры ЭлМетро сразу сделали ставку на высокие технологии производства. Это, в первую очередь, высокотемпературная конструкционная пайка кориолисового «камертона» в глубоком вакууме с последующим отжигом. Такая технология ранее применялась в нашей стране для столь большеразмерных деталей только в ВПК. Только она позволила достичь высокой точности и повторяемости параметров механического чувствительного элемента датчика. Проводимая последовательно в едином технологическом цикле операция отжига обеспечивает стабильность частотно-резонансной характеристики чувствительного элемента во времени и под нагрузкой - вследствие снятия механических напряжений в конструкции.



Рисунок 2. Конструкционная пайка датчиков кориолисовых расходомеров в высокотемпературной вакуумной печи на заводе ЭлМетро

Но такая сложная технология была бы обесценена, если не обеспечить высокую точность формования/изгиба измерительных трубок как основных составляющих частей колебательной системы кориолисового датчика. Для достижения заданной геометрии завод ЭлМетро приобрел высокоточное оборудование и разработал специальную оснастку для 3d-формования трубок без деградации округлости сечения. Основная цель – достижение высокой добротности, сбалансированности колебаний и стабильности частотной характеристики. Но и этого оказалось мало! Для обеспечения требуемой сбалансированности потребовалось применить высокоточный контроль геометрии трубок с помощью 3-d координатно-измерительной установки (штангенциркулем здесь не обойтись!) с последующим индивидуальным подбором каждой пары. Как бы создание близнецов...



Рисунок 3. Контроль геометрии измерительных трубок 3-d координатно-измерительной установкой на заводе ЭлМетро

«Выжав» максимум точности из датчика расходомера, разработчики ЭлМетро не имели права потерять ни одной сотой доли процента точности измерений на электронном преобразовании сигнала. Особенностью электроники кориолисового расходомера «ЭЛМЕТРО-Фломак» является прямая цифровая обработка первичного аналогового сигнала сенсора, с необходимыми элементами адаптивной фильтрации помех и шумов, коррекции по давлению, температуре и неоднородности измеряемой среды. Применение специализированного сигнального процессора позволило применить весьма сложные математические алгоритмы вычислений «на лету», обеспечивающие высокую точность измерений и сохранив высокую скорость обновления данных. Последнее весьма критично для пульсирующих течений и для применения расходомеров в системах дозирования и слива-налива.

Разработчики электроники, по-видимому, первыми в мире применили для полевых устройств во взрывонепроницаемой оболочке емкостную клавиатуру, работающую сквозь 10-миллиметровое стекло. Это позволило отказаться от традиционной инфракрасной клавиатуры подобных приборов, не эргономичной и уязвимой к ложным срабатываниям.

«ЭЛМЕТРО-Фломак» – первый и пока единственный отечественный кориолисовый расходомер с полноценным HART-интерфейсом, зарегистрированный международной ассоциацией FieldComm, осуществляющей развитие и поддержку протокола HART. Это означает, что прибор успешно прошёл официальные испытания и удовлетворяет всем спецификациям этого протокола. Сейчас многие компании рекламируют свои приборы как «HART- совместимые». Но без прохождения процедуры испытаний и сертификации это лишь декларации, на практике не гарантирующие устойчивость и даже возможность работы в стандартной сети HART-устройств.

Разработанное компанией DDL-описание устройства легко интегрируется в библиотеку любого HART-коммуникатора или стандартного конфигурационного ПО, например, типа AMS. Это открывает возможность полноценной работы с расходомером, используя эти стандартные программно-аппаратные средства.

Выбранная Группой Компаний ЭлМетро стратегия освоения полного цикла технологий: расчета, проектирования и изготовления, - позволила избежать тех ловушек, которые крылись и кроются в альтернативных «быстрых» решениях.

Её основой явилось развитие ключевых технологий производства кориолисовых расходомеров *in site*, т.е. на своём заводе. Наш многолетний опыт разработки показал, что, только держа технологический процесс под своим контролем, возможно получить качественную метрологию кориолисовых расходомеров. Опыт международных компаний также свидетельствует о концентрации всех высокотехнологичных операций на своем производстве. Таким образом, нам удалось избежать «ловушки» аутсорсинга: **для кориолисовых расходомеров стандартная схема производственного**

аутсорсинга для ключевых технологических операций не работает, поскольку приводит к существенному ухудшению конечных технических характеристик продукта.

В качестве примера можно привести упоминавшуюся выше (рис.2) важнейшую технологическую операцию высокотемпературной вакуумной конструкционной пайки измерительных трубок датчика с последующим его отжигом. Без этой операции невозможно достичь стабильности механических свойств, а значит и стабильности метрологических характеристик. Однако соответствующее оборудование очень громоздко, дорого и требует высокой квалификации при обслуживании. Казалось бы, естественный путь – передать эту дорогостоящую операцию на аутсорсинг, как правило на предприятия ВПК, где такое оборудование есть. Но это как раз одна из ловушек, подстерегающих Приборостроителя, поскольку технология и объем работ, которые там могут быть выполнены, ориентированы на конструкционную прочность и механическую надежность. Приборостроителю же не менее важно выполнение специфических требований: воспроизводимость и стабильность частотных характеристик. Это требует подбора паяльных материалов, длительной отработки и оптимизации оснастки для пайки, режима самого процесса и многого, чего невозможно отладить на «чужом» производстве. Тем более, с учетом «режимности» таких предприятий контроль и авторский надзор за технологическим процессом скорее всего невозможен.

Другим примером порочности аутсорсинга в применении к производству кориолисовых расходомеров может служить технологическая операция изгиба/формования измерительных трубок - основных элементов кориолисового «камертона». Она, конечно, может быть выполнена контрактными производителями на общепромышленном трубогибном оборудовании, минимально достаточном для изготовления полотенцесушителей и выхлопных труб автомобилей. Это будет, что называется, дешево и сердито, и даже это может выглядеть красиво, но вот точность изготовления ... - из двух полотенцесушителей нельзя сделать качественный кориолисовый датчик!

Ещё одна «ловушка» следования «быстрым» стратегиям импортозамещения ведёт к ущербу продуктовой линейки. У азиатских производителей кориолисовых расходомеров отсутствуют типоразмеры менее Ду10мм. Это связано с существенно большей сложностью их проектирования и изготовления, повышенными требованиями к точности и сбалансированности колебательной системы измерительных трубок датчика. В отсутствие «прототипов» нет этих диаметров и у отечественных производителей, работающих по азиатским «лекалам». В то же время серьёзная потребность в таких типоразмерах возникла для комплектования систем дозирования реагентов в нефтегазовой промышленности, в фармацевтике, малотоннажной химии.

Основываясь на своих компетенциях в проектировании и технологии производства Группа Компаний ЭлМетро, единственная в стране, разработала линейку кориолисовых расходомеров, начинающуюся от Ду2 мм. Столь малых типоразмеров нет ни у кого из отечественных производителей.

В настоящее время линейка приборов «ЭЛМЕТРО-Фломак» насчитывает типоразмеры от Ду2 до Ду200 мм, покрывая диапазон расходов от менее 1 кг/ч до 1100 т/ч. Достигнута точность измерений до $\pm 0.1\%$ при измерении расхода жидкостей и $\pm 0.35\%$ при измерении газов. Это соответствует самым высоким требованиям всех нефтехимических компаний.

Наряду с развитием типоразмерного ряда и повышением точности, собственные разработки позволили управлять функциональностью приборов, откликаясь на требования Заказчиков. Производители замерных установок (АГЗУ) газодонефтяной эмульсии на нефтяных скважинах заинтересованы в применении кориолисовых расходомеров, максимально устойчивых к наличию газовой фракции. Это позволяет снизить требования к узлам предварительной сепарации газа и соответственно уменьшить их себестоимость. Совершенствование конструкции датчика и электронного преобразователя расходомера «ЭЛМЕТРО-Фломак» обеспечило устойчивость их работы даже при высоком газовом факторе. При объемной доле газа до 3% в рабочих условиях выполняются требования ГОСТ-8.615 к точности измерения расхода жидкой фазы. Несколько сотен приборов ЭлМетро установлено в составе АГЗУ, эксплуатирующихся ведущими нефтяными компаниями РФ и Казахстана.

Устойчивость к газовым включениям очень важна и при **измерении газового конденсата**. «ЭЛМЕТРО-Фломак» внесены в Реестр МТР ПАО «Газпром» и активно применяются на объектах Общества.

«ЭЛМЕТРО-Фломак» являются многопараметрическими приборами, позволяющими, кроме расхода, одновременно измерять плотность и температуру среды. Проведенные НИОКР позволили разработать специализированное исполнение прибора с повышенной точностью измерения плотности: ± 0.3 кг/м³ в широком диапазоне плотностей, причем без необходимости калибровки на рабочей жидкости. Данная разработка была проведена в рамках **Дорожной карты ПАО «Газпром»** по импортозамещению. Она предусматривает, в частности, замену автоматических поточных плотномеров Solartron и CDM100, долгое время монополично применявшихся в России в СИКН и блоках

измерения качества нефти и газового конденсата. Проведены успешные эксплуатационные испытания прибора на одном из объектов ПАО «Газпром».

Качество технологий и продукции ЭлМетро подтверждено большим количеством аудитов и инспекций системы менеджмента качества разработок и производства, проведенных крупными компаниями: Газпром, Газпромнефть, Арктик СПГ, Транснефть и др. Результатом стало доверие Заказчиков, в том числе вертикально-интегрированных компаний, и включение нашей продукции в их программы импортозамещения. Знаковым стало приглашение разместить стенд нашей компании на экспозиции ПАО «Газпром» в рамках «VIII Петербургского международного газового форума» - «Импортозамещение в газовой отрасли».



Рисунок 4. Посещение стенда ЭлМетро руководством ПАО «Газпром» во главе с заместителем председателя Правления В.А.Маркеловым

Немаловажное преимущество опоры на собственные компетенции и технологии – в доступной стоимости приборов для потребителя. Нынешнее соотношение валютных курсов делает импортозамещение экономически выгодным. Достигнутый уровень метрологических характеристик и технологии производства кориолисовых расходомеров в Группе Компаний ЭлМетро гарантирует нашим Заказчикам уверенность в обоснованности импортозамещения на настоящую российскую продукцию.

Таким образом, выбранная ГК ЭлМетро стратегия создания отечественных кориолисовых расходомеров показала свою эффективность. Она основывается на овладении полным циклом компетенций и технологий. По сути, это и есть подлинная реализация концепции технологической независимости России, ставшей столь актуальной в условиях санкционных ограничений. Мы продолжаем исследования и разработки в перспективных направлениях: измерение криогенных сред (сжиженного природного газа), измерение многофазных сред, глубокая самодиагностика приборов с предсказанием изменения метрологических характеристик. Готовы к сотрудничеству с ведущими вертикально-интегрированными компаниями страны и метрологическими институтами.