

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА ДЛЯ ВИХРЕВЫХ РАСХОДОМЕРОВ ГАЗА И ПАРА

М.В. Богуш, Э.М. Пикалев

Описаны методы проектирования на основе конечно-элементной математической модели типоразмерного ряда датчиков изгибающего момента для вихревых расходомеров газа и пара с учетом требований к чувствительности, диапазону рабочих частот, прочности при действии информационного параметра, избыточного давления и изменении температуры.

ВВЕДЕНИЕ

Принцип действия вихревых расходомеров основан на преобразовании поступательного движения измеряемой среды в вихревую дорожку Кармана с помощью установленного поперек потока тела обтекания и измерения частоты срыва вихрей [1]. Частота образования вихрей в первом приближении пропорциональна скорости потока, а их количество за промежуток времени – суммарному расходу энергоносителя. Как правило, расходомеры одновременно являются и счетчиками количества энергоносителя, прошедшего через трубу.

Достоинством вихревых расходомеров является отсутствие каких-либо подвижных элементов внутри трубопровода, достаточно хорошая точность и линейность в широком диапазоне измерений, частотный выходной сигнал [1,2].

Широкое распространение в вихревых расходомерах в качестве первичных преобразователей энергии потока в электрический сигнал получили датчики изгибающего момента (ДИМ) [1-3], названные по аналогии с широко известными в технике датчиками крутящего момента. При этом учитывается то, что в рабочих условиях чувствительный элемент (ЧЭ) датчика испытывает колебания изгиба, а его коэффициент преобразования (КП) K_M нормируется как заряд q , генерируемый при единичном моменте силы $M=F \cdot l$, действующем на ЧЭ.

$$K_M = q/(F \cdot l) \quad (1)$$

Рассмотрим проектирование ДИМ на примере датчиков типа 108, которые первоначально были разработаны эмпирическим путем для вихревых счетчиков воды и тепла и нашли применение в датчиках расхода ПРВ-01 [1,4], созданных Казанским ВНИИ Расходомерии для нужд ЖКХ (1 этап). В дальнейшем была поставлена задача создания аналогичных изделий для счетчиков газа и пара (2 этап).

МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ синее – вставить, красное - убрать

Для количественного анализа технических характеристик ДИМ используем численные методы расчета параметров в рамках теории электротермоупругости на основе метода конечных элементов (МКЭ), который достаточно универсален относительно формы и геометрии изделия [5,6].

Как показал многолетний опыт работы, проектирование (анализ и синтез) пьезоэлектрических датчиков с использованием МКЭ и программного пакета ANSYS предполагает следующие этапы работы [1,5], рис.1.

- 1) Формулирование назначения датчика и основных технических требований к нему.
- 2) Определение принципа действия и базовой конструкции датчика.
- 3) Определение цели расчетов.
- 4) Построение геометрической модели датчика.
- 5) Выбор материалов конструктивных элементов.
- 6) Задание уравнений, описывающих поведение каждой среды.
- 7) Задание граничных условий.
- 8) Расчет характеристик.
- 9) Экспериментальная проверка расчетов.
- 10) Исследование путей оптимизации конструкции датчика.
- 11) Рассмотрение альтернативных конструкций.
- 12) Выбор оптимального технического решения.

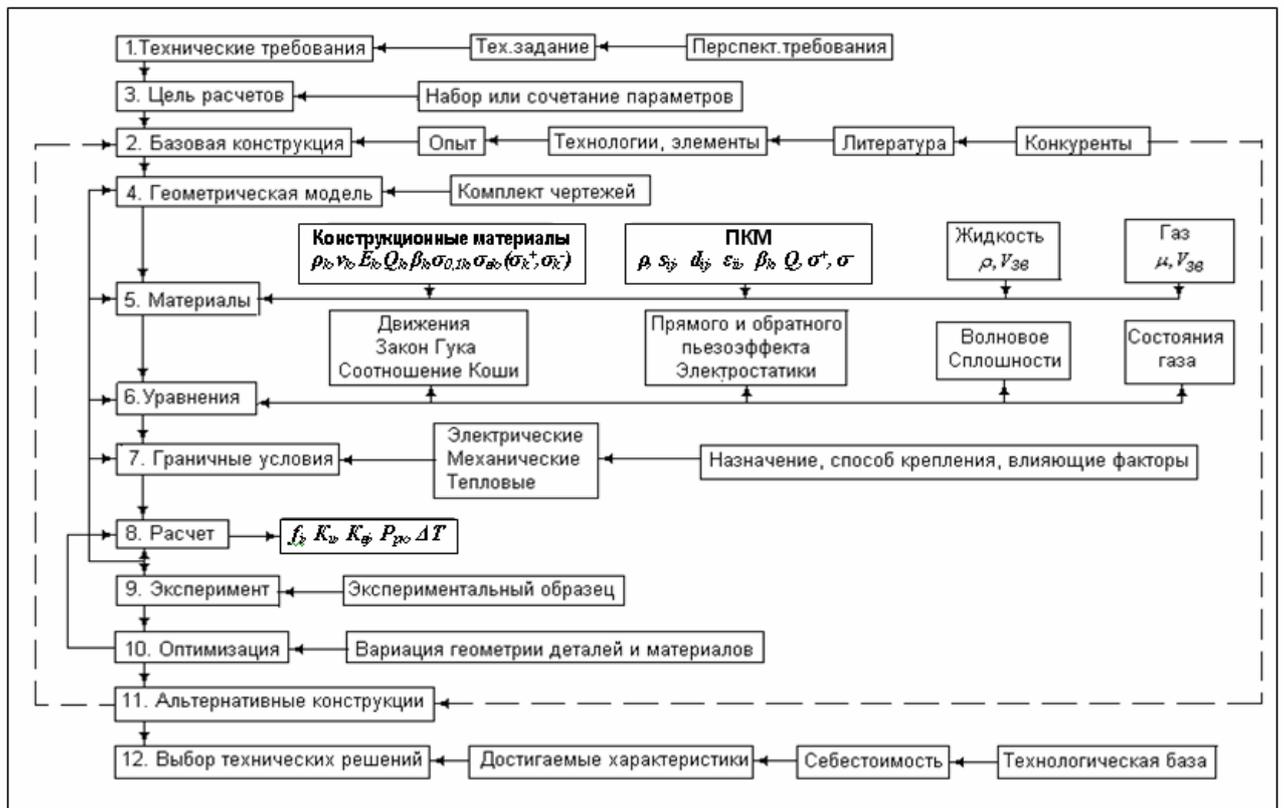


Рис 1. Методы проектирования пьезоэлектрических датчиков

На рис.1 используются следующие обозначения:

1) характеристики конструкционных изотропных материалов (металлов и диэлектриков): ρ_k - плотность, E_k - модуль Юнга, ν_k - коэффициент Пуассона, β_k - коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР), Q_k - добротность, $\sigma_{вк}$, $\sigma_{0,1k}$ - пределы текучести или пропорциональности для металлов, σ_k^+ , σ_k^- - пределы механической прочности на растяжение и сжатие керамических материалов, k - номер детали ($k = 1, 2, 3 \dots N$), N - общее количество деталей.

2) Характеристики пьезокерамического материала (ПКМ): ρ - плотность, полный набор упругих s_{ij} , пьезоэлектрических d_{ij} и диэлектрических ϵ_{ii} модулей, β_i - КЛТР в направлении вдоль и поперек полярной оси, Q - добротность, σ^+ и σ^- - то же, что и в 1).

3) Характеристики внешней среды (жидкости или газа): ρ - плотность, μ - молекулярная масса, $v_{зв}$ - скорость звука.

4) Расчетные характеристики:

f_n - собственные частоты, ($n = 1, 2, 3, \dots$ - все значимые для анализа частоты датчика), K_n - коэффициент преобразования информационного параметра, P_{pk} - несущая способность k -той детали при механических нагрузках, ΔT - диапазон рабочих температур датчика по условиям прочности, K_{bl} - коэффициенты преобразования влияющих факторов, например, виброэквивалент W_{ap} или деформационный эквивалент W_{sp} для датчиков давления и др. ($i = 1, 2, 3, \dots$ - все значимые механические влияющие факторы).

Комментарии к каждому этапу приведены в работах [1,5], а также поясняются ниже на примере применения предлагаемых методов для решения конкретной задачи.

Описанные этапы работы весьма близки к стандартизованному порядку проведения ОКР. Новизна предлагаемых методов заключается в том, что пьезоэлектрический датчик рассматривается как система с распределенными параметрами и анализируется с помощью универсальных относительно геометрии изделия численных пространственных электротермоупругих моделей и отличается от известных комплексным учетом требований к диапазону рабочих частот, чувствительности к информационному параметру и влияющим механическим факторам, прочности в условиях эксплуатации при действии сильных механических нагрузок и изменении температуры.

При этом для расчетов используется более совершенный математический аппарат (см. этап 6 «уравнения»), большой объем сведений о характеристиках материалов (см. этап 5 «материалы»), анализируются не только амплитудно-частотные характеристики датчика, но и влияющие на его метрологические характеристики факторы, а также сильные внешние воздействия (см. этап 8 «расчет»). Без комплексного анализа всех перечисленных характеристик невозможно полноценное проектирование и оптимизация конструкции пьезоэлектрических датчиков с учетом реальных условий эксплуатации.

Несмотря на высокую трудоемкость подготовительных работ, проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей МКЭ, несомненно, позволяет улучшить

технические характеристики датчиков, снизить трудозатраты на разработку новых изделий и сократить сроки их доводки до серийных образцов. Это достигается за счет того, что большая часть работы по оптимизации конструкции и технических характеристик изделия, проверке различных режимов его функционирования выполняется расчетным путем.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Технические требования, которым должны удовлетворять ДИМ 108 можно сформулировать следующим образом:

1. Датчики должны монтироваться в трубы с диаметром условного прохода, мм от 15 до 700
2. Диапазон рабочих частот, Гц, не менее
 - для счетчиков воды и других жидкостей (1этап) 1... 200
 - для счетчиков газа и пара (2 этап) 10....1000
3. Коэффициент преобразования изгибающего момента, нКл/Н·м, не менее (1этап) 60
(2 этап) 100
4. Диапазон рабочих температур, °С
 - (1этап) 0...150
 - (2 этап) минус 50...250.
5. Максимальное рабочее давление, МПа
 - (1этап) 1,6
 - (2 этап) 30

Базовая конструкция датчика, рис 2 а, состоит из корпуса 1, ПЭ 2, токосъемника 3, ниппеля 4 и кабеля 5. На торце корпуса имеется пластина 6 (крыло), выполненная за одно целое с корпусом. Пластина имеет сечение в виде клина или балки равного сопротивления с углом 2,5 градуса. Ширина пластины равна 7,8 мм, а длина выбирается из ряда 10, 16, 25, 32, 40, 64, 80,

120 мм. Направляющие 7 обеспечивают требуемую ориентацию датчика в трубопроводе.

Осесимметричный металлический корпус датчика имеет цилиндрическую полость диаметром 5 мм, в которую вставлен и закреплен при помощи клея цилиндрический ПЭ (наружный диаметр 5 мм, внутренний диаметр 4 мм, высота 6.8 мм). Корпус датчика имеет сужение в зоне размещения ПЭ. Зону ДИМ, в которой размещен ПЭ и сужение корпуса (шейка), в дальнейшем будем называть ЧЭ. По мере увеличения длины крыла толщина стенки шейки увеличивается, табл. 1.

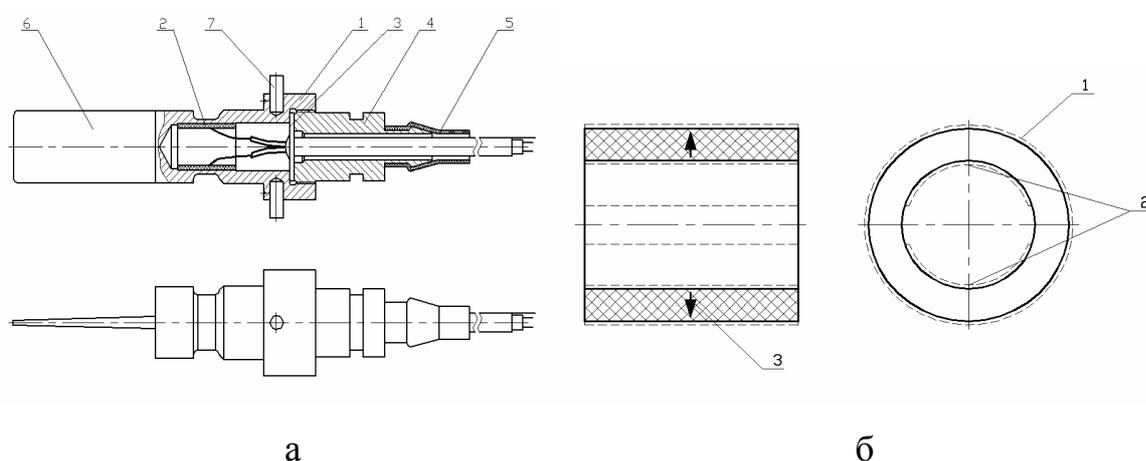


Рис. 2. Конструкция ДИМ (а) и ПЭ (б).

Таблица 1. Геометрические размеры ЧЭ ДИМ

№	Длина крыла, мм	Внешний диаметр шейки, мм	Толщина шейки, мм
1	10	5,8	0,4
2	16	6,0	0,5
3	25	6,2	0,6
4	32, 40	6,6	0,8
5	64, 80, 120	7,0	1,0

Конструкция ПЭ показана на рис. 2 б. Внешняя и внутренняя цилиндрические поверхности ПЭ (1, 2) покрыты тонкими металлическими

электродами, причем электрод на внутренней поверхности 2 имеет две равные изолированные секции, плоскость раздела которых совпадает с плоскостью крыла датчика. Стрелкой 3 показано направление вектора остаточной поляризации.

Датчик устанавливается в элемент трубопровода за телом обтекания так, чтобы плоскость крыла была ориентирована вдоль потока [1,3]. При движении потока вихри, образующиеся за телом обтекания, действуют на пластину. Колебания пластины приводят к деформациям ПЭ, работающего как биморф. В результате на электродах ПЭ генерируется заряд с частотой, пропорциональной скорости вихреобразования и объемному расходу жидкости. В качестве согласующего используется дифференциальный усилитель заряда. Типоразмерный ряд датчиков обеспечивает создание на их основе счетчиков воды для труб с условным проходом от 15 до 200 мм.

Целью расчетов является определение следующие характеристики датчика, вытекающих из технических требований:

- собственной частоты;
- КП изгибающего момента в заряд;
- прочности в рабочих условиях.

Конструкция датчика не содержит конструктивно обособленных элементарных преобразователей и расчет ее характеристик аналитическими методами не представляется возможным. Поэтому Воспользуемся для анализа и проектирования новых изделий используется МКЭ.

Геометрическая модель ЧЭ ДИМ показана на рис. 3. Наличие крыла и разреза электродов нарушает цилиндрическую симметрию датчика; в результате он имеет только одну плоскость симметрии – плоскость крыла. Поэтому для его расчетов методами ANSYS нужно решать трехмерную задачу для $\frac{1}{2}$ части датчика. В зависимости от длины крыла геометрическая модель содержит от 9000 до 15000 элементов.

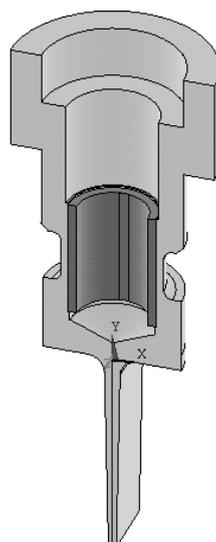


Рис. 3. Геометрическая модель ДИМ.

Применяемые материалы. ПЭ выполнен из состава ЦТС-83Г, корпус - из титанового сплава ВТЗ-1. Характеристики материалов приведены в работах [1,7].

ДИМ рассматривается как кусочно-однородная пространственная электротермоупругая система с распределенными параметрами. Расчеты выполняются с использованием следующих **уравнений** [1,5]:

- поведение каждого элемента конструкции описывается уравнением движения;
- детали из изотропных материалов (корпус) описываются обобщенным законом Гука с учетом теплового расширения и соотношениями Коши;
- ПЭ описывается уравнениями прямого и обратного пьезоэффекта с учетом теплового расширения и вынужденной электростатики.

Механические **граничные условия** формулируются следующим образом.

На боковые поверхности элементов датчика L , погруженных в жидкость или газ, подвержены действию всестороннее давление P .

На крыло датчика, наряду с всесторонним давлением, действует переменный изгибающий момент M - эквивалент действия переменных динамических давлений со стороны вихрей, возбуждаемых в потоке. Торцы фланца корпуса 1, рис. 2 а, закреплены – механические перемещения на их

поверхностях равны нулю. Остальные боковые поверхности элементов датчика свободны от напряжений.

Между деталями датчика выполняются условия непрерывности механических перемещений и напряжений, электрического поля и потенциала, температуры, которая для всех деталей считается одинаковой.

Результаты **расчета** КП для всех типоразмеров ДИМ 108 на основании построенной конечно-элементной модели с учетом формулы (1) показаны на рис. 4.

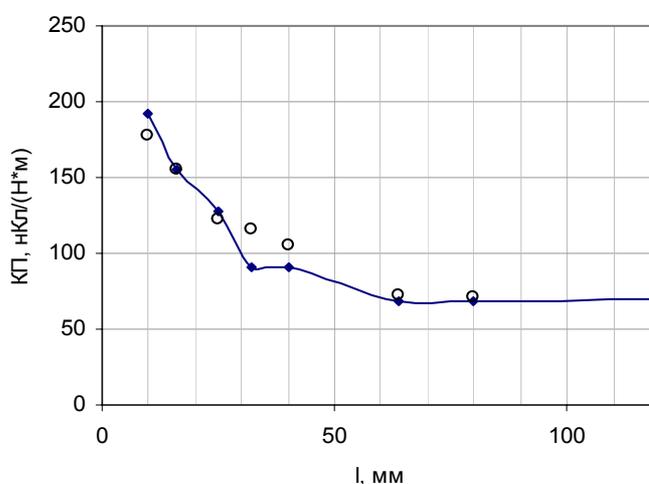


Рис. 4. Расчетная (кривая) и экспериментальная (точки) зависимость КП от длины крыла при фактических размерах ДИМ.

На этом же рисунке приведены **экспериментальные** значения КП, полученные на серийных образцах путем усреднения результатов приемо-сдаточных испытаний от 4 до 100 датчиков в каждой точке. Расхождение между расчетными и опытными данными для КП всех типоразмеров датчиков составило от 2,5 до 20%, что является вполне приемлемым результатом. Снижение КП при увеличении длины крыла происходит в связи с увеличением толщины шейки. и изломы расчетной кривой связаны с изменением толщины шейки для различных типоразмеров датчиков.

Отметим, что способ нормирования КП в соответствии с формулой (1), сложился исторически при выпуске более ранних типов ДИМ 101-107, которые не имели крыла, крепились непосредственно к телу обтекания и являлись

унифицированным датчиком для проточной части расходомера любого диаметра [1].

Расчетная и экспериментальная зависимость первой резонансной частоты различных типоразмеров датчиков 108 от длины крыла показана на рис. 5.

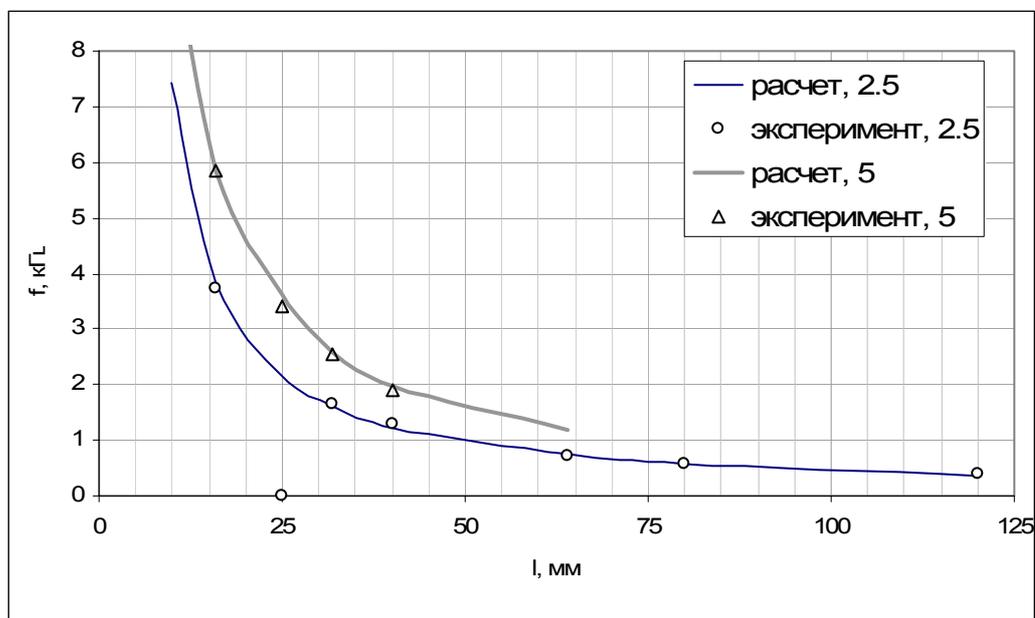


Рис. 5. Расчетная (кривая) и экспериментальная (точки) зависимость резонансной частоты ДИМ от длины крыла с углом $2,5^\circ$ и 5°

Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями собственной частоты не превышает $\pm 3\%$. Из рис. 5 следует, что по мере увеличения длины крыла от 16 до 120 мм для базовой конструкции датчика с углом $2,5^\circ$ резонансная частота снижается от 3800 до 350 Гц. Причем, если для вихревых расходомеров жидкости резонансная частота для всех типоразмеров ДИМ выше максимальной рабочей частоты (>200 Гц), то для расходомеров газа и пара этому требованию удовлетворяют только ДИМ 108 с длиной крыла до 40 мм (>1000 Гц).

Оценка прочности конструкции при действии информационного параметра — изгибающего момента — показала, что при различных соотношениях геометрических размеров максимум интенсивности механических напряжений σ_{int} в металле наблюдается либо у основания крыла, либо в верхней части шейки. Например, для ДИМ с длиной крыла 10 мм его

величина составляет 80 МПа при $M = 0,1 \text{ Н}\cdot\text{м}$. ПЭ при колебаниях испытывает знакопеременные механические напряжения, величина которых достигает 5 МПа при тех же предельных нагрузках. С уменьшением длины крыла максимальные механические напряжения на единицу момента, как в металле, так и в ПЭ увеличиваются (рис. 6).

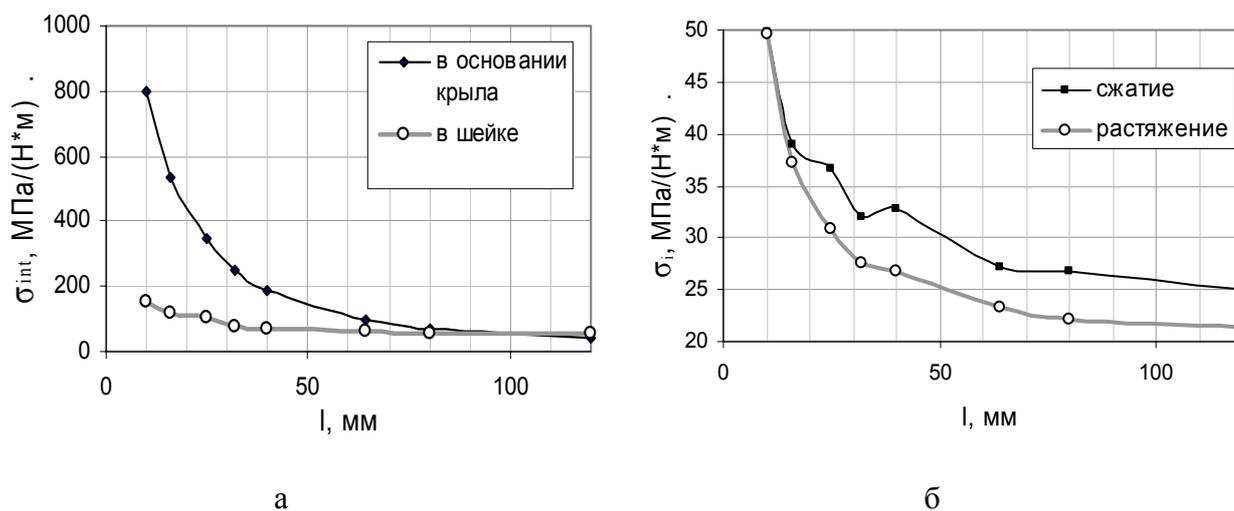
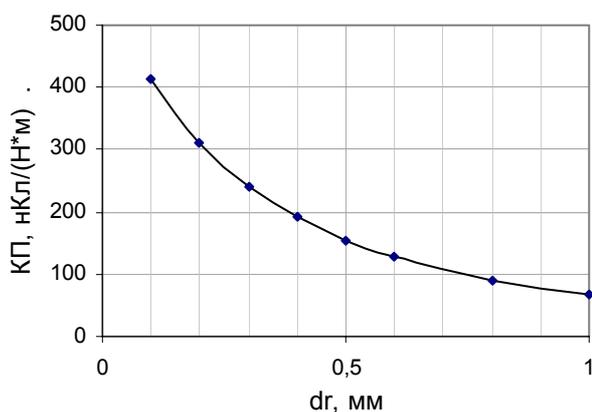


Рис. 6. Расчетные зависимости критических механических напряжений в корпусе (а) и ПЭ (б) ДИМ от длины крыла.

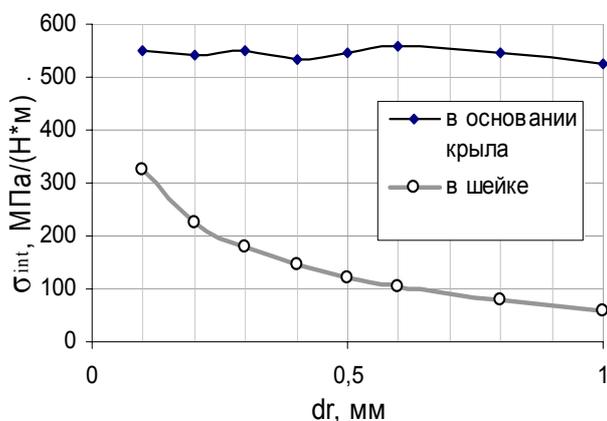
Поскольку в рабочих условиях датчики испытывают знакопеременные нагрузки, то предельно допустимые механические напряжения необходимо сравнивать с пределами выносливости материалов. Согласно справочнику [6], для титана ВТЗ-1 предел выносливости при $2 \cdot 10^7$ циклах нагрузки составляет около 600 МПа, что вдвое меньше, чем при статических нагрузках. Если предположить, что для ПКМ характерны такие же закономерности, то предельными циклическими нагрузками для ПЭ можно считать растягивающие напряжения 14 МПа. Согласно рис. 6, при максимальном заданном изгибающем моменте 0,1 Н·м напряжения в металле не превышают 80 МПа, а в керамике 5 МПа. Следует учесть, что в реальных условиях датчик и ПЭ испытывает также и избыточное давление, на фоне которого небольшие переменные напряжения являются лишь осцилляцией сжимающих.

Рассмотрим пути **оптимизации** конструкций ДИМ с целью приведения их характеристик в соответствие с техническими требованиями 2 этапа для максимального количества типоразмеров датчиков.

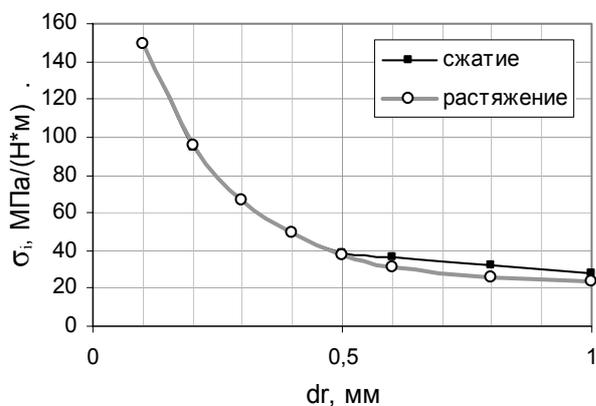
На рис. 7, 8 показаны изменения характеристик датчиков с длиной крыла 16 мм при вариации геометрии ЧЭ – толщины стенки и длины шейки.



а



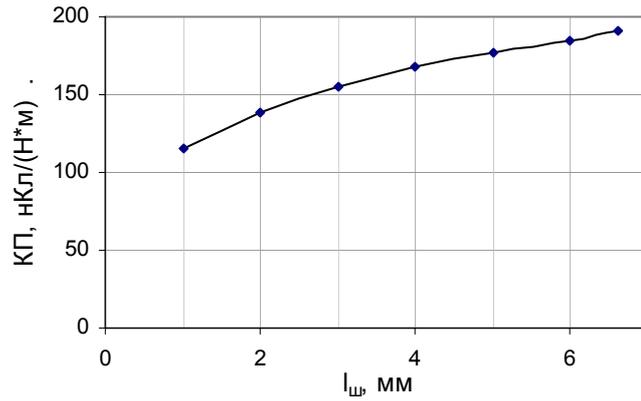
б



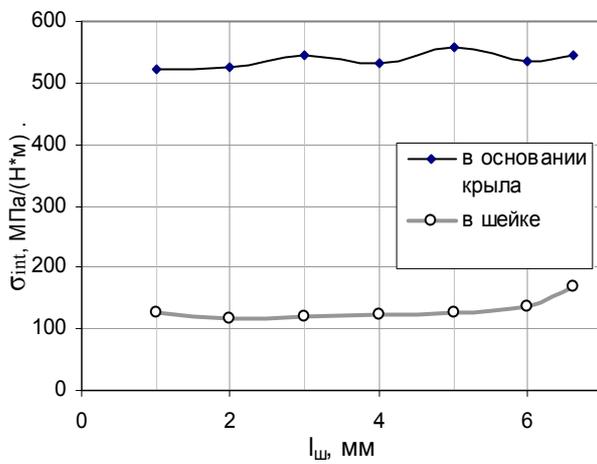
в

Рис. 7. Расчетные зависимости КП (а) и критических механических напряжений в корпусе (б) и ПЭ (в) ДИМ от толщины стенки шейки.

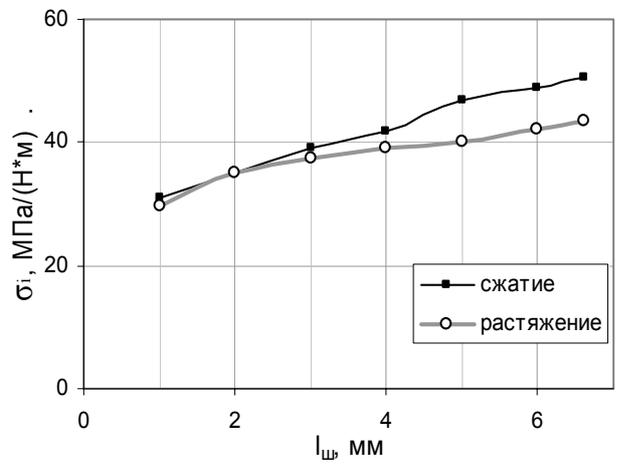
С уменьшением толщины стенки шейки датчика КП увеличивается, а вместе с ним и величина критических механических напряжений в ПЭ и металле в зоне ЧЭ, рис.7. В металле преобладают механические напряжения в зоне основания крыла, которые, естественно, не зависят от геометрии шейки.



а



б



в

Рис.8. Расчетные зависимости КП (а) и критических механических напряжений в корпусе (б) и ПЭ (в) ДИМ от длины шейки.

С увеличением длины шейки КП также увеличивается, рис.8. При этом механические напряжения в корпусе остаются практически неизменными, а в ПЭ увеличиваются более плавно, чем при вариации толщины.

Изменение резонансной частоты датчика при вариации геометрии ЧЭ, в пределах, показанных на рис. 7, 8 не превышает 2,5%.

Таким образом, имеется возможность увеличения КП датчиков за счет оптимизации геометрии ЧЭ без снижения резонансной частоты и прочности к изгибающему моменту.

На рис.9 показаны изменения резонансной частоты, КП и интенсивности механических напряжений в датчиках в зависимости от угла клина крыла.

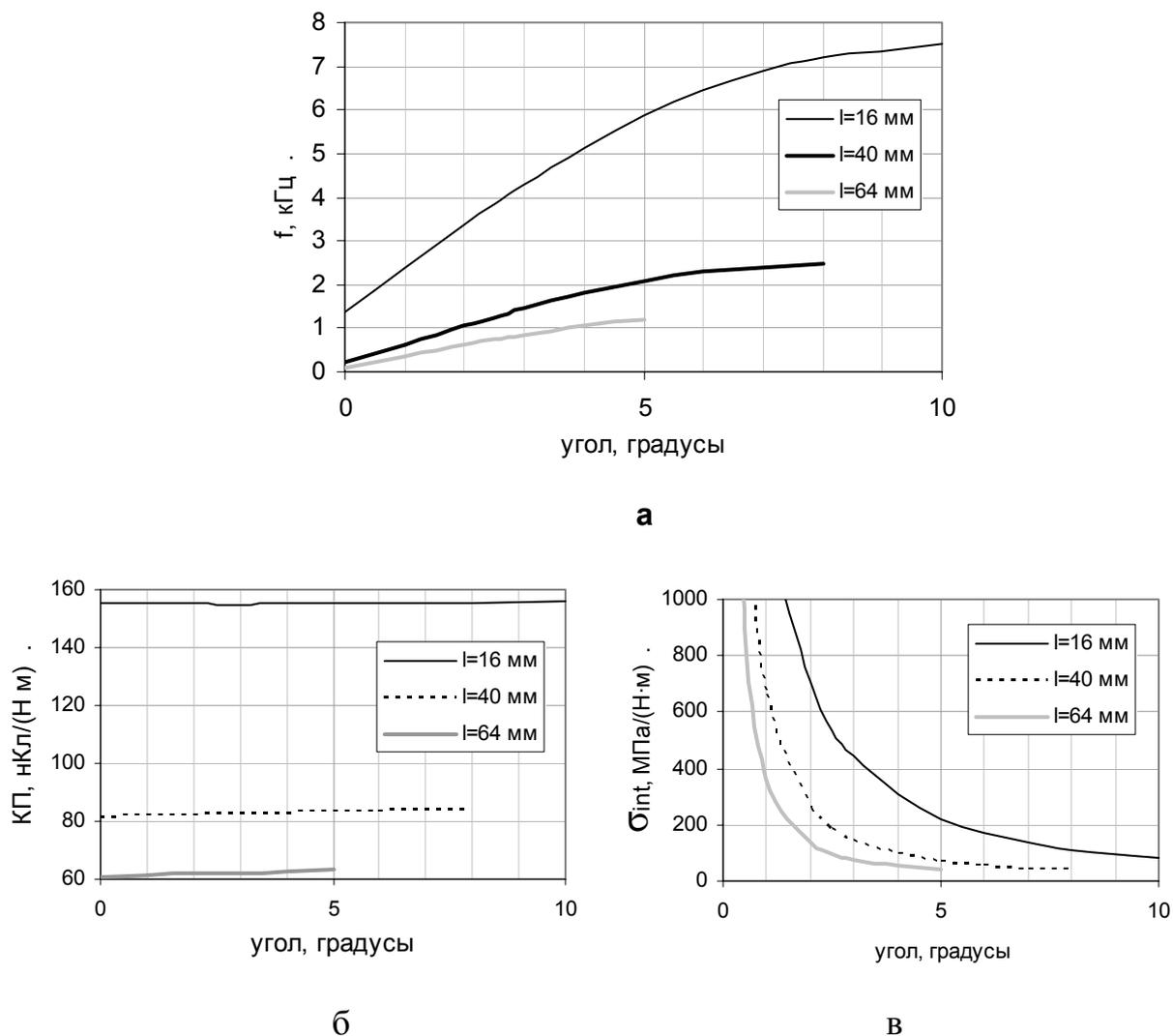


Рис.9. Расчетные зависимости резонансной частоты (а), КП (б) и критических механических напряжений (в) в зависимости от угла клина крыла

Из рис. 9 следует, что при увеличении угла клина крыла резонансная частота увеличивается, механические напряжения снижаются, а КП для низких частот остается практически неизменным. Таким образом, увеличивая угол клина крыла, удалось повысить резонансные частоты датчиков и довести до заданных требований ДИМ с длиной крыла до 64 мм. Для датчиков с большей длиной крыла увеличение угла приводит к тому, поперечный размер основания крыла выходит за габариты посадочного места.

Расчеты и экспериментальная проверка прочности показали, что в деталях ДИМ 108 при действии избыточного давления до 30 МПа в диапазоне температуры от минус 50 до 280°С механические напряжения не превышают предела текучести титана и пределов прочности на растяжение и сжатие ПКМ, и датчики вполне могут работать в счетчиках газа и пара в указанных условиях эксплуатации.

Основные технические характеристики типоразмерного ряда ДИМ 108 приведены в статье [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе описаны методы проектирования пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей с использованием инвариантного относительно геометрии изделия МКЭ конечно-элементных математических моделей и приведен пример синтеза типоразмерного ряда ДИМ 108, не имеющих конструктивно выделенных элементарных преобразователей, для вихревых расходомеров газа и пара с учетом требований к чувствительности, диапазону рабочих частот, прочности при действии информационного параметра и сильным влияющим факторам избыточного давления в широком диапазоне температуры.

ДИМ 108 используются в вихревых счетчиках газа и пара Ирга-РВ (ООО «Глобус», г. Белгород) с динамическим диапазоном изменений 1:40 и погрешностью в пределах $\pm 1,5\%$, включая апробированный в эксплуатации полномерный датчик расхода с диаметром условного прохода 500 мм, не имеющий аналогов среди отечественных и зарубежных приборов [8,9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Пьезоэлектрическое приборостроение: сборник в 3 томах. Т. 3. Богуш М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Ростов-на-Дону. Издательство СКНЦ ВШ, 2006, 346 с: ил.
2. Богуш М.В. Бинеев Р.У. Шатуновский О.В. Пьезоэлектрические датчики давления для вихревых расходомеров. – В кн.: Методы и средства измерения в системах контроля и управления. Материалы Международной научно-технической конференции. – Пенза: изд-во ПГУ, 1999, с 6- 8.
3. Богуш М.В. Современные пьезоэлектрические датчики для вихревых расходомеров//Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика – 2007. - № 11. - с 32-37.
4. Богуш М.В. Развитие вихревой расходомерии в России// Датчики и системы – 2007. - №9. - с 2-9.
5. Богуш М.В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков с использованием конечно-элементных математических моделей //Приборы – 2007. - № 12.- с 30-38.
6. Наседкин. А.В. Моделирование некоторых типов задач термоэлектроупругости в ANSYS. Сборник трудов четвертой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GMBL, М. 2004, с 311-315.
7. Физические величины: Справочник/ А.П.Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. - 1232 с.
8. Горбунов И.А., Хоружев Г.М. Опыт эксплуатации счетчиков газа и пара на базе вихревого расходомера-счетчика «Ирга-РВ». Сборник трудов VII Всероссийского совещания-выставки по энергосбережению. Екатеринбург, 2006 г.
9. Богуш М.В. Успехи вихревой расходомерии//Приборы – 2007. - №8. - с. 32-39.

*Богуш Михаил Валерьевич – канд. техн. наук, зам. директора НКТБ
«Пьезоприбор» Южного Федерального Университета, г. Ростов-на-Дону
Тел. (863) 299-50-80, факс 290-58-22, E-mail: piezo@inbox.ru*

*Пикалев Эдуард Михайлович – канд. физ.-мат. наук,
ООО «Пьезоэлектрик» г. Ростов-на-Дону
Тел. (863) 243-45-33, факс 290-58-22, E-mail: piezo@inbox.ru*

Лариса Анатольевна 269-00-04 ikd2004@mail.ru