

# **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

**М.В. Богуш**

---

В рамках конечно-элементной математической модели пьезоэлектрический датчик рассматривается как единое электро-термоупругое тело, испытывающее действие информационного параметра и совокупности влияющих факторов. Описана методика проектирования и на примере датчика давления теоретически и экспериментально исследованы собственные частоты, чувствительность к давлению, вибрации и деформации объекта, механические напряжения в деталях датчика при действии избыточного давления и изменении температуры.

## **ВВЕДЕНИЕ**

В мировой практике для контроля и прогнозирования состояния промышленного оборудования широко применяются пьезоэлектрические датчики. Номенклатура параметров, измеряемых с их помощью в различных областях науки и техники исключительно разнообразна. Эти датчики используются для контроля акустического и быстропеременного давления, ускорения, усилия, вибрации, ударов, объемного и массового расхода, уровня и других физических величин. Они обладают хорошими эксплуатационными характеристиками, широкими динамическими и частотными диапазонами, малыми размерами, высокой надежностью, не требуют источников питания. В настоящее время датчики на основе пьезоэлектрических элементов выпускаются более, чем 30 фирмами в мире.

Обычно пьезоэлектрические датчики работают в жестких условиях эксплуатации: высокие и низкие температуры, квазистатические и динамические давления, линейные ускорения, акустические шумы, механические и гидравлические удары, агрессивные и криогенные среды. При этом датчик должен иметь механическую прочность и действовать дольше, чем агрегат, в котором он установлен.

Одновременно датчик как измерительное устройство должен обладать гарантированными метрологическими характеристиками при действии всех дестабилизирующих факторов за время выполнения задания. Все это необходимо для определения параметров нештатной ситуации, предшествующей аварии, и выработки мер их предупреждения. Поэтому требования к надежности датчиков исключительно высоки.

Для создания датчиков, отвечающим этим требованиям, важной задачей является совершенствование расчетных методов анализа их характеристик на стадии проектирования. Опыт показывает, что для достижения этой цели необходимо создание математических моделей, рассматривающих датчики как единое электро-термоупругое тело (а не набор конструктивных элементов), испытывающее действие информационного параметра и совокупности влияющих факторов [1,2]. Решению этой задачи посвящена настоящая работа.

## **МЕТОДИКА АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ**

Для количественного анализа метрологических и прочностных характеристик реальных датчиков в общем случае целесообразно использовать численные методы расчета параметров на основе конечно-элементных математических моделей (МКЭ), которые достаточно универсальны относительно формы и геометрии изделия.

Как показал многолетний опыт проектирование пьезоэлектрических датчиков с использованием МКЭ и программного пакета ANSYS предполагает следующие этапы работы [3]:

1) Формулирование назначения датчика и основных технических требований к нему.

Обычно эти сведения вытекают из технического задания или перспективных требований к данному типу изделий.

2) Определение принципа действия и базовой конструкции датчика. Построение базовой конструкции осуществляется на основании опыта разработчика, имеющейся в его распоряжении технологической и элементной базы, анализа литературных данных и аналогов конкурентов.

3) Определение цели расчетов.

Определяется набор параметров или их сочетаний, которые необходимо рассчитать для того, чтобы определить соответствует или нет базовая конструкция ожидаемым требованиям.

4) Построение геометрической модели датчика.

Геометрическая модель строится на основании базовой конструкции и чертежей деталей. При этом возможно включение в геометрическую модель только тех элементов датчика, которые влияют на расчетные характеристики. Если датчик имеет оси или плоскости симметрии можно рассматривать только часть конструкции. Например, для осесимметричного датчика геометрическая модель может включать только одну из его половин, т.к. напряженное состояние второй половины будет аналогично. Эти меры позволяют упростить модель и существенно сократить время счета без потери информации. Далее геометрическая модель разбивается на конечные элементы и осуществляется построение сетки конечных элементов.

5) Выбор материалов конструктивных элементов и определение их характеристик.

Каждому элементу конструкции датчика определяется материал, характеризующийся набором свойств. Обычно изотропные конструкционные материалы характеризуют модулями Юнга, коэффициентами Пуассона, коэффициентами линейного теплового расширения (КЛТР), плотностью, добротностью, пределами текучести или пропорциональности.

Пьезоэлектрические материалы характеризуют полным набором электроупругих модулей, КЛТР в направлении вдоль и поперек полярной оси, добротностью, плотностью, пределами прочности на растяжение и сжатие.

Жидкость характеризуют скоростью звука и плотностью, газы – скоростью звука и молекулярной массой.

Для нестационарных тепловых задач требуются также коэффициенты теплоемкости и теплопроводности материалов.

6) Задание уравнений, описывающих поведение каждой среды.

Для упругих изотропных твердых тел – это уравнение движения, закон Гука с учетом теплового расширения и соотношение Коши. Для пьезоэлектрических тел, кроме уравнения движения, задаются уравнения прямого и обратного пьезоэффекта и вынужденной электростатики. Для жидкостей и газов – волновое уравнение, а также уравнение сплошности жидкости или уравнение состояния газов. Если рассматривается нестационарная тепловая задача необходимо также уравнение теплопроводности.

7) Задание граничных условий.

При задании механических, электрических и тепловых граничных условий учитывают назначение датчика, способы его крепления, а также негативные влияющие факторы, действие которых следует учесть при анализе.

8) Расчет характеристик.

После того как все параметры заданы, может быть выполнен и непосредственно расчет. Этот этап работы требует самых значительных затрат компьютерного времени и минимальных затрат времени разработчика.

9) Экспериментальная проверка расчетов.

Важный этап работы, повышающий уверенность в справедливости модели и позволяющий избежать грубых ошибок. При существенном расхождении расчетных и опытных данных необходимо внести коррективы в модель.

10) Оптимизация конструкции датчика.

Проводится исследование расчетных характеристик базовой конструкции при вариации геометрии деталей и свойств материалов. При этом важно, чтобы проверка возможности получения наилучших характеристик, определяющих информативность датчика (чувствительность, резонансная частота и т. п.) сочеталась с проверкой прочности конструкции при заданных уровнях влияющих факторов.

11) Рассмотрение альтернативных конструкций.

Если поиск путей оптимизации базовой конструкции не привел к желаемым результатам, необходимо рассмотреть другие варианты решения задачи, повторив процедуры, изложенные в п.п. 2-10.

## 12) Выбор оптимального технического решения.

Самый ответственный этап работы, когда нужно принять решение что делать дальше, какой вариант конструкции отдавать в работу для опытной апробации и возможно последующего серийного выпуска. При этом необходимо исходить, прежде всего, из возможности достижения требуемых характеристик, а также себестоимости, имеющихся технологий и других факторов, влияющих на конечные потребительские свойства изделия.

Несмотря на достаточно высокую трудоемкости выполнения этой работы, виртуальное моделирование, несомненно снижает трудозатраты на разработку новых изделий и сокращает сроки их доводки до серийных образцов.

Ниже рассмотрим пример применения описанной методики для решения конкретной задачи.

## ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ

Рассмотрим датчик давления, предназначенный для регистрации флуктуаций давления, возникающих за телом обтекания в вихревых расходомерах воды, газа, пара [4,5]

Датчик должен соответствовать следующим техническим требованиям:

1. Коэффициент преобразования не менее 20 пКл/кПа
2. Диапазон рабочих частот от 1 до 2000 Гц.
3. Установочный размер – под резьбу М10х1
4. Условия эксплуатации:
  - диапазон рабочих температур от минус 50 до 250°С;
  - максимальное избыточное давление 30 МПа;
  - промышленная вибрация до 2g частотой от 10 до 150 Гц;
  - акустические шумы по трубопроводу (деформация объекта).

Рассмотрим базовую конструкцию датчика, показанную на рис.1.

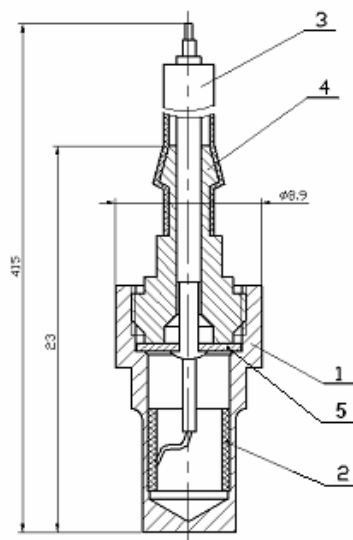


Рис.1. Базовая конструкция датчика давления

Датчик содержит корпус 1, пьезоэлемент (ПЭ) 2, кабель 3, ниппель 4 и токосъемник 5. ПЭ выполнен в виде радиально поляризованного цилиндра и жестко соединен с корпусом клеевой прослойкой, толщиной не более 20 мкм. Клеевой шов обеспечивает непрерывность смещений между корпусом и ПЭ и в силу малых размеров в расчетах не учитывается.

Внешнее давление действует на торец и боковые поверхности корпуса, деформация которого передается на ПЭ, генерирующий заряд, пропорциональный давлению. Информационный сигнал через кабель поступает в систему обработки.

Датчик не имеет конструктивно выделенного преобразователя давления в усилие, действующее на ПЭ, поэтому его расчеты традиционными методами, описанными в классической литературе [6-8] невозможны.

Цель расчетов: определение коэффициента преобразования, собственных частот, вибрационной и деформационной чувствительности, а также механических напряжений в элементах конструкции при максимальных давлениях и предельных температурах.

Геометрическая модель датчика показана на рис 2. В силу того, что перечисленные характеристики датчика в основном определяются свойствами ПЭ и корпуса, в геометрической модели рассматриваются только эти два элемента конструкции. Так как задача является осесимметричной, строится двумерная модель (для половины осевого разреза).

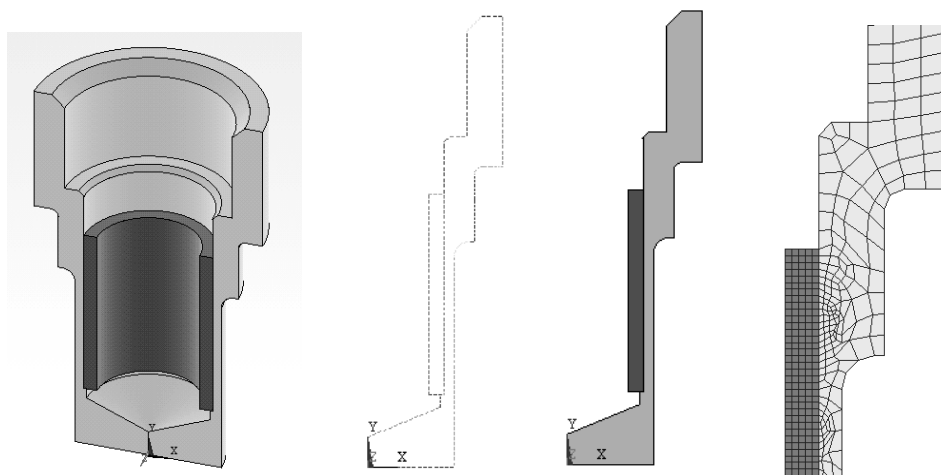


Рис. 2. Геометрическая модель датчика давления и этапы ее построения

При построении геометрической модели сначала задаются ключевые точки, которые соединяются линиями. Далее выделяются области с различными свойствами, которые разбиваются на конечные элементы. В зависимости от сложности изделия геометрическая модель может включать от 5000 до 1000000 и более конечных элементов.

Предполагается использовать следующие материалы: корпус – титан ВТ3-1, ПЭ – керамика ЦТС-83Г. Основные характеристики этих материалов приведены в работах [3,9].

Датчик рассматривается как кусочно-однородная среда, каждый сегмент которой описывается следующей системой уравнений [1-3]:

-уравнением движения:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial r_i} = \rho \ddot{u}_i + \zeta \rho \dot{u}_i \quad (1)$$

- обобщенным законом Гука и соотношением Коши - изотропные среды (корпус):

$$\sigma_{ik} = \frac{E}{1+\nu} \left[ (S_{ik} + \xi \dot{S}_{ik}) + \frac{\nu}{1-2\nu} (S_{ii} + \xi \dot{S}_{ii}) \delta_{ik} \right] \quad (2)$$

$$S_{ik} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

Если условия неизотермические, то в основных уравнениях учитывается тепловое расширение материала:

$$S_{ik}^T = \beta_* (T - T_c) \delta_{ik} \quad (4)$$

где  $T_c$  – начальная температура,  $\beta_*$  – коэффициент теплового расширения,  $\delta_{ik}$  – дельта-функция, равная 1 при  $i=k$  и нулю при  $i \neq k$ . Точки над символами означают производную по времени.

Для пьезоэлектрической анизотропной среды (ПЭ) к уравнению движения необходимо добавить уравнение прямого и обратного пьезоэффекта и вынужденной электростатики[1-3]:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}^E S_{kl} + \xi_{ijkl}^E S_{kl} - e_{ij}^E \mathcal{E}_i \quad (5)$$

$$D_i = e_{ijk} S_{jk} + \varepsilon_{ij}^S \mathcal{E}_j$$

$$\mathcal{E} = -\text{grad}\varphi, \quad \text{div}D = 0 \quad (6)$$

Тепловое расширение для анизотропной среды также анизотропно и дополнительная температурная деформация имеет вид:

$$S_{ik} = \frac{\beta_{ik} (T - T_c)}{3} \quad (7)$$

В выражениях (1) – (7) введены следующие обозначения:  $\rho$  - плотность среды,  $\sigma$  - тензор механических напряжений,  $u$  – вектор перемещений,  $S$  - тензор деформаций,  $P$  – давление,  $D$  – вектор индукции электрического поля,  $\mathcal{E}$  – вектор напряженности электрического поля,  $\varphi$  - электростатический потенциал,  $c^E$  – модули упругости пьезокерамического материала,  $e$  – пьезоэлектрические модули,  $\varepsilon^S$  - диэлектрические константы,  $E$  - модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $\beta_m^T$  – коэффициент линейного теплового расширения - симметричный тензор второго ранга.,  $\zeta$  и  $\xi$  - коэффициенты, введенные для описания затухания в твердых средах по Рэлею (фактически, вязкоупругие потери).

Граничные условия формулируются в следующем виде.

1. Механические граничные условия учитывают то, датчик закреплен на торцах корпуса с помощью ввертного штуцера:

- на наружных поверхностях датчика действует гармоническое измеряемое  $\Delta P$  и квазистатическое  $P$  давление;

- на закрепленных торцах корпуса задаются гармонически изменяющиеся смещения  $u_y$  и деформации в осевом и радиальном  $S_r$  направлении  $S_z$ . Это необходимо для определения вибрационной и деформационной чувствительности.

- прочие поверхности датчика свободны от напряжений;

2. Электрические:

- разность потенциалов на электродах ПЭ равна нулю (условие короткого замыкания);

- на торцевых (без электродов) поверхностях ПЭ электрические заряды отсутствуют;

3. Тепловые граничные условия соответствуют изотермическому процессу - температура всех элементов одинакова и совпадает с температурой окружающей среды.

На границе между элементами конструкции датчика предполагается идеальный жесткий контакт, при котором выполняются условия непрерывности компонент механически смещений и напряжений, электрического потенциала, температуры и теплового потока.

Результаты расчетов и эксперимент.

Модальный анализ амплитудно-частотных характеристик датчика для заряда и перемещений в интервале 0 - 200 кГц показал наличие двух резонансных мод с собственными

частотами 88 и 188 кГц. Это удовлетворительно согласуется с экспериментальными значениями (84 и 180 кГц). Первый резонанс выражен намного сильнее, чем второй. Расхождение расчетов с экспериментом для частоты не превысило 5%.

Резонансные частоты более, чем на порядок превышают рабочие частоты датчика (до 2000 Гц), что обеспечивает частотную стабильность чувствительности.

Расчетное значение чувствительности к давлению  $K_{pq}$  составило 30,5 пКл/кПа, чувствительности к вибрации  $K_{aq}$  - 0,210 пКл  $c^2/m$ . Средние значения этих же параметров, измеренные в партии датчиков 30 шт. составило соответственно 26,9 пКл/кПа и 0,190 пКл  $c^2/m$ . Виброэквивалент датчика – отношение реакции на ускорение к реакции на давление  $W_{ap} = K_{aq}/K_{pq}$  - составил 6,9 Па  $c^2/m$ . Расхождение расчетных и экспериментальных значений для чувствительности по давлению не превысило 9%, виброэквивалента - 3%.

Результаты расчетов и экспериментальные данные сведены в таблицу 1, включая также расчеты деформационной чувствительности для осевой деформации  $K_{eyy}$  и деформационного эквивалента – отношения реакции на деформацию к реакции на давление  $W_{epyy}$ .

Таблица 1

Результат	Параметры						
	$f_{01}$ кГц	$f_{02}$ кГц	$K_{pq}$ пКл/кПа	$K_{aq}$ пКл/м/с <sup>2</sup>	$W_{ap}$ Па/м/с <sup>2</sup>	$K_{exx}$ мкКл	$W_{epxx}$ ГПа
Расчет	88,0	188	30,5	0,210	6,9	94,3	5,55
Эксперимент	84,1	180	27,9	0,192	7,1	-	-
Отклонение,%	4,5	4,3	9	9	3,0	-	-

Отметим, что по чувствительности к давлению датчики также соответствуют предъявляемым требованиям.

Для анализа прочности датчика при действии сильных влияющих факторов рассмотрим напряженное состояние элементов конструкции при максимальном заданном уровне давления в нормальных условиях и при комплексном воздействии температуры и давления, т.е. на границах заданного рабочего диапазона температур при нулевом и максимальном заданном уровне внешнем давлении. Влияние вибрации 2g на напряженное состояние в данном случае ничтожно мало и им можно пренебречь. Максимальные механические напряжения сравним с пределами прочности для керамики и пределами пропорциональности для металла.

Поскольку сборка датчика (соединение корпуса с ПЭ) осуществляется путем полимеризации клея при повышенной температуре 220°C, то в нормальных условиях элементы конструкции будут напряжены. Внешние давление и изменение температуры относительно температуры сборки приводят к изменению напряженного состояния и при определенных уровнях влияющих факторов внутренние напряжения могут достигать критических.

Напряженное состояние элементов датчика при действии максимального давления 30МПа приведено на рис 3. В цветовой шкале показаны величины действующих радиальных  $\sigma_{xx}$ , осевых  $\sigma_{yy}$ , азимутальных  $\sigma_{zz}$  и сдвиговых  $\sigma_{xy}$  компонентов механических напряжений. Ось симметрии датчика в данном случае совпадает с осью Y. Напомним, что растягивающие напряжения в теории упругости считаются положительными. Максимальные их значения соответствуют красному цвету. Сжимающие напряжения считаются отрицательными и соответствуют сине-фиолетовым цветам. Каждому цвету шкалы соответствуют численные значения.

Поскольку элементы конструкции испытывают сложное объемное напряженное состояние, то для оценки их несущей способности необходимо использовать соответствующие критерии прочности [10]. При этом напряженное состояние, приводится к главным осям, когда равны нулю сдвиговые компоненты. Напомним, что растягивающие напряжения в теории упругости считаются положительными, а сжимающие – отрицательными.

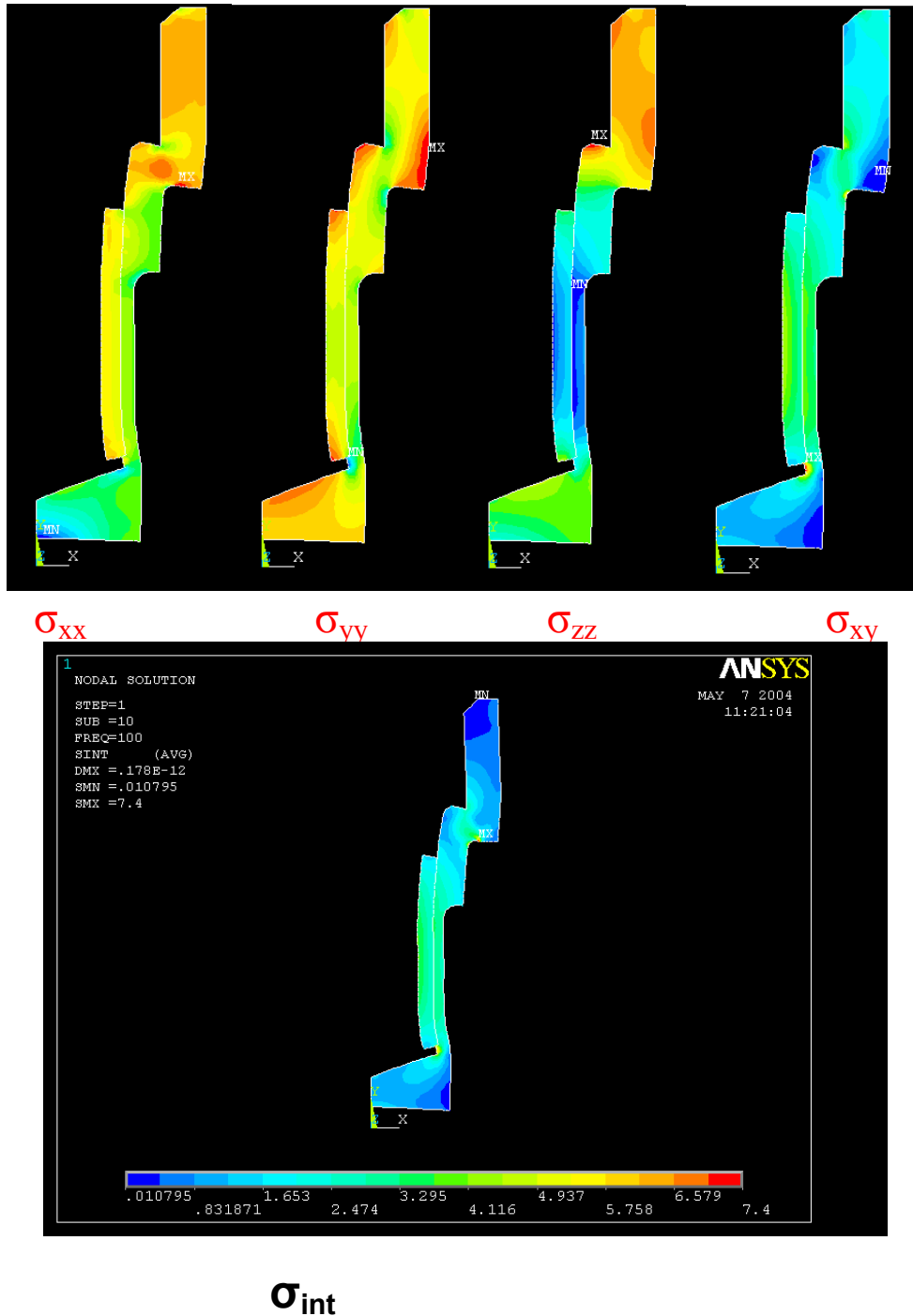


Рис 3. Механические напряжения в датчике при избыточном давлении 30 МПа и  $\Delta T = 0$ . Пределы изменения каждого компонента (в МПа):  $\sigma_{xx}$  (-75,6 .. 14,7);  $\sigma_{yy}$  (-185,1 .. 11,3);  $\sigma_{zz}$  (-125,4 .. 33,9);  $\sigma_{xy}$  (-53,1 .. 15,06);  $\sigma_{int}$  (6,03 .. 181,2).

На этом же рисунке приведена интенсивность напряжений  $S_{int}$ , которая является максимальной разностью между осевыми компонентами напряжений с учетом их знака. Для металлов необходимо использовать третий критерий прочности, согласно которому разрушение происходит, когда эквивалентные напряжения, равные максимальной разности между осевыми компонентами напряжений с учетом их знака, достигают предела прочности (текучести) материала. Для хрупких керамических материалов следует использовать первый критерий прочности, согласно которому разрушение происходит, когда один из компонентов механических напряжений приведенных к главным осям, достигает предела прочности материала на растяжение или сжатие [10].

В таблице 2 приведены максимальные значения компонентов механических напряжений, приведенных к главным осям, действующих в элементах конструкции датчика при различных внешних воздействиях в МПа.

Таблица 2

Элементы конструкции	Компоненты мех. напр.	20°С, 0 МПа	20°С, 30МПа	250°С, 0 МПа	250°С, 30МПа	-50°С, 0 МПа	-50°С, 30МПа
Пьезоэлемент	$\sigma_1$	-59...+1,1	-77...+3,1	+18...+8,0	-16...+4,7	-79...+1,5	-99...+3,3
	$\sigma_2$	-110...-1,7	-177...-4,5	+16...+0,3	-59...+1,1	-148...+2,3	-215...-5,1
	$\sigma_3$	-124...-53	-214...-90	+9,6...-0,2	-110...+24	-167...-72	-250...-110
Корпус	$\sigma_{int}$	182	318	27,6	163	246	381

Наиболее опасные напряжения в ПЭ при заданных внешних воздействиях наблюдаются на краях температурного диапазона. Причем, при 250°С, с учетом того, что температура сборки (полимеризации клея) принята 220°С, в ПЭ действуют преимущественно растягивающие напряжения, а при минус 50°С – сжимающие. Хотя уровень напряжений в последнем случае значительно выше, сопротивление разрушению керамики сжимающим напряжениям на порядок выше, чем растягивающим.

Максимальные напряжения наблюдаются вблизи углов склеиваемых поверхностей ПЭ и стенки корпуса, что обусловлено концентрацией напряжений на острых кромках. При округлении углов ПЭ концентратор перемещается в крайнюю точку склейки. Это приводит к снижению на 10 – 20% максимальных напряжений внутри ПЭ вблизи концентратора

При одновременном воздействии предельного давления 30 МПа и температуры 250°С происходит смещение внутренних напряжений в отрицательную сторону: в керамике уже преобладают напряжения сжатия, что благоприятно для прочностных свойств. При температуре минус 50°С и давлении 30 МПа интенсивность напряжений в металле возрастает до 244 МПа. В керамике сжимающие напряжения достигают 250 МПа.

Из табл. 2 следует, что при всех сочетаниях температуры и давления значения действующих механических напряжений в элементах конструкции не превышают критических значений: предела пропорциональности материала корпуса, равного 1000 МПа, и пределов прочности материала ПЭ на растяжение, равного 27 МПа, и сжатие, равного 280 МПа [3,9], приведенных в таблицах 1 и 2. Конструкция удовлетворяет требованиям прочности в заданных условиях эксплуатации. Однако существенных резервов нет. Достаточно увеличить рабочую температуру до 300°С, и в ПЭ появятся растягивающие механические напряжения, превышающие предел прочности керамики на растяжение.

С целью экспериментальной проверки механических напряжений, действующих, в элементах конструкции, проведены испытания 5 датчиков 014М избыточным давлением до разрушения. Испытания проводились с помощью грузопоршневых манометров: сначала МП-60, затем МП-600 и далее МП-2500. В процессе нагружения контролировалась электрическая емкость и чувствительность датчика к переменному давлению. Чувствительность определялась статическим методом по величине генерируемого датчиком заряда при фиксированном приращении давления. По мере повышения избыточного давления наблюдалось монотонное снижение, как электрической емкости, так и чувствительности датчика, рис 3. Относительные изменения этих параметров в интервале давлений от 0,1 до 180 МПа составили соответственно 51 и 73%.



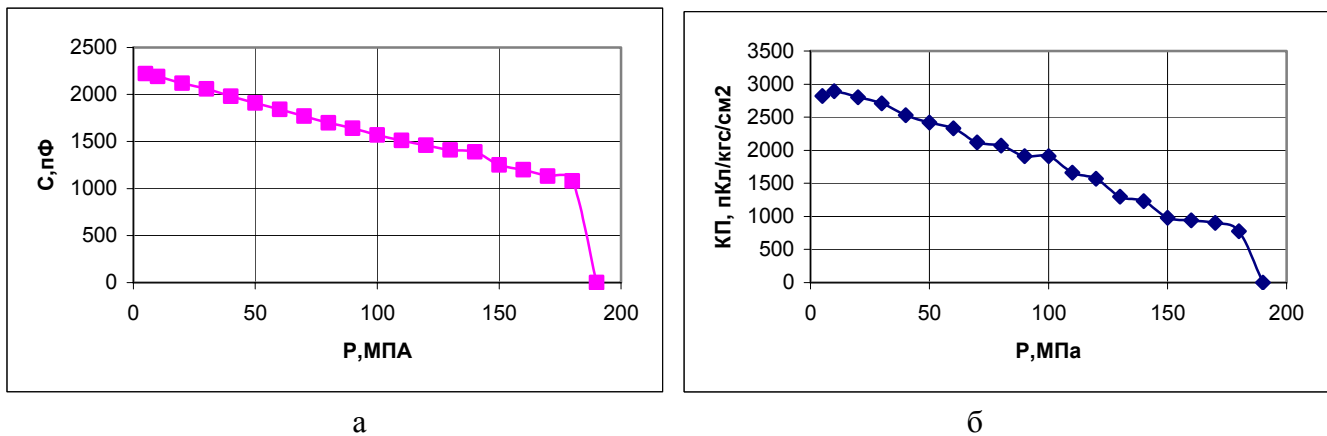


Рис. 3. Изменение электрической емкости (а) и коэффициента преобразования (б) датчиков 014М от избыточного давления

В общем случае в датчиках как средствах измерения выделяют, по крайней мере, 3 уровня критических внешних воздействия, которые приводят к различным последствиям:

- 1) выход метрологических характеристик за гарантированные пределы, т. е. изменение чувствительности больше допустимого; это может быть в зависимости от ситуации и 0,5% и 10%;
- 2) полная потеря информации, т.е. разрушение чувствительного элемента;
- 3) разгерметизация конструкции, т.е. разрушение корпуса или уплотнения.

Если считать, что допустимые изменения чувствительности не более 5%, то 1-ый уровень критических напряжений, как следует из рис. 3 б, составляет около 30 МПа. 2-ый уровень критических напряжений явно не просматривается, хотя расчеты показывают, что при давлении около 70 МПа напряжения в ПЭ достигают разрушающих. Однако, значительное уменьшение электрической емкости и чувствительности датчика нельзя объяснить только эффектами зажатия ПЭ (уменьшение диэлектрической проницаемости от  $\epsilon^s$  до  $\epsilon^s$ ). По-видимому, в процессе нагружения происходит растрескивание и откалывание кусочков ПЭ, что ведет к снижению параметров, но полной потери информации не происходит вплоть до разрушения корпуса.

Испытания показали, что полное разрушение различных датчиков наблюдалось после действия избыточного давления от 170 до 190 МПа. Первоначально происходил разрыв тонкой оболочки корпуса, затем разгерметизация ввода кабеля и разрушение резьбы, соединяющей ниппель с корпусом. Разрушающая трещина зарождалась в месте уменьшения диаметра оболочки корпуса и расположения края ПЭ. Расчетное значение разрушающего напряжения в корпусе из титана ВТЗ-1 с пределом текучести 1000 МПа [9] составляет 175 МПа. Это значение хорошо согласуется с экспериментом (180 МПа).

Рассмотрим возможные пути оптимизации характеристик датчика 014М с целью повышения его чувствительности или соотношения полезный сигнал/помеха от вибрации и деформации корпуса. На рис.4 показаны зависимости коэффициента преобразования датчика от толщины стенки корпуса и ПЭ.

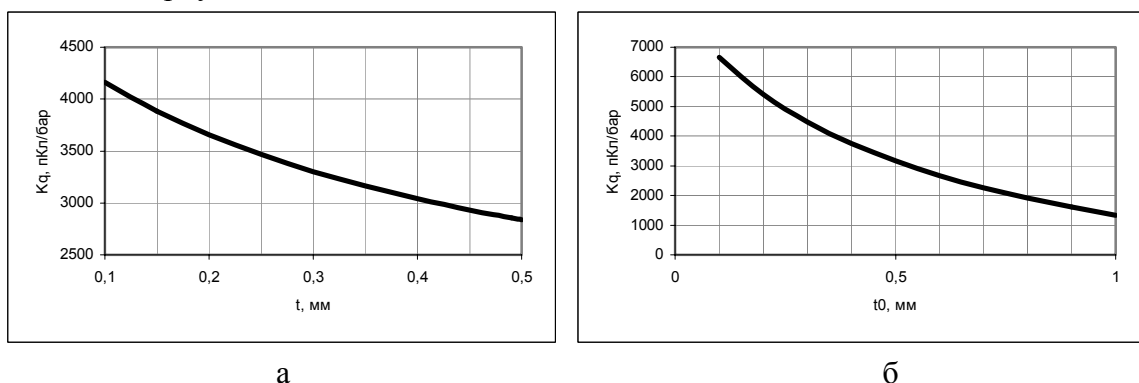


Рис. 4. Зависимость коэффициента преобразования датчика 014М от толщины стенки корпуса (а) и ПЭ (б)

Из рисунка видно, что при уменьшении толщины корпуса от 0,35 (базовая конструкция) до 0,1 мм возможно увеличение чувствительности на 30%, а при снижении толщины ПЭ от 0,5 до 0,2 мм чувствительность повысится в два раза. При этом, естественно, снизится предельно допустимое давление на датчик при эксплуатации. Поэтому целесообразность принятия таких мер необходимо проверить повторным анализом механических напряжений в модернизированной конструкции.

На рис. 5 показаны зависимости коэффициента преобразования датчика к давлению, вибрации и деформации объекта в зависимости от высоты ПЭ. Из рисунка видно, что по мере уменьшения высоты ПЭ, чувствительность датчика ко всем трем параметрам уменьшается. Однако, чувствительность к давлению уменьшается почти линейно, к вибрации примерно квадратично, а к деформации объекта еще более круто. В результате, при уменьшении высоты ПЭ существенно снижается виброэквивалент и деформационный эквивалент, рис.6. Например, при уменьшении высоты вдвое виброэквивалент снижается в 2 раза, а деформационный эквивалент в 15 раз. Это значит, что в реальных условиях эксплуатации соотношение сигнал/шум датчика увеличится вдвое, а вместе с ним и динамический диапазон в области малых значений измеряемого параметра. Снижение чувствительности возможно компенсировать за счет уменьшения толщины стенки ПЭ.

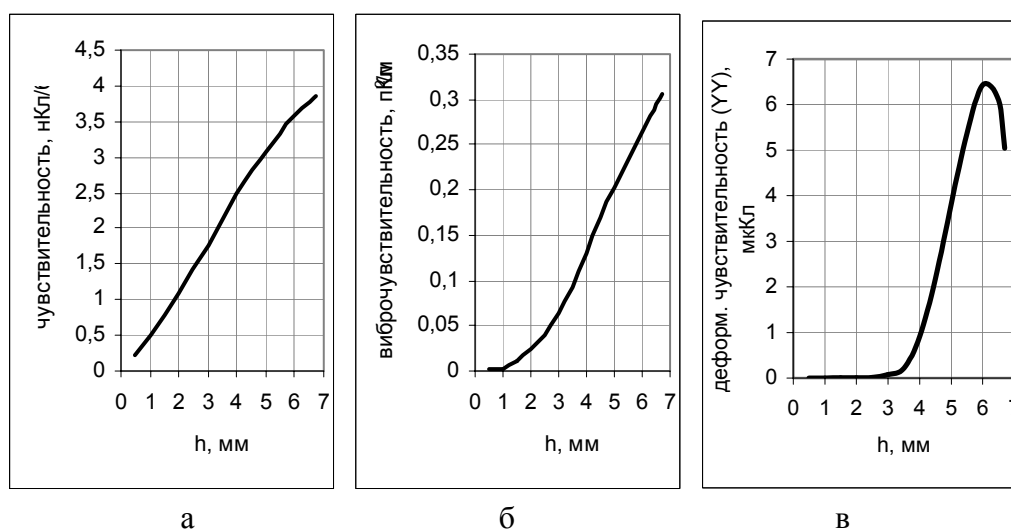


Рис. 5. Зависимости чувствительности датчика 04М к давлению (а), вибрации (б) и деформации объекта (в) от высоты ПЭ.

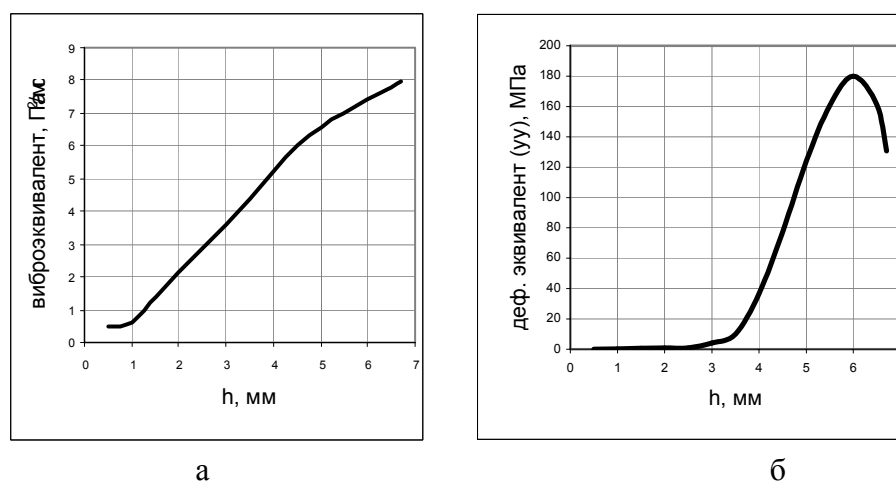


Рис.6. Зависимость виброэквивалента (а) и деформационного эквивалента (б) датчика 014М от высоты ПЭ.

Таким образом, проведенный анализ датчика давления 014М МКЭ показал:

- 1) Расчетные значения параметров хорошо согласуются с экспериментом.
- 2) Базовая конструкция датчика давления 014М соответствует предъявляемым требованиям.
- 3) Имеются существенные резервы по улучшению характеристик датчика в рамках тех же габаритных и присоединительных размеров.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье описана методика и приведен пример анализа с использованием МКЭ характеристик пьезоэлектрических датчиков давления, работающих на прямом пьезоэффекте. Ранее рассматривались также излучатели акустических волн, работающие на обратном пьезоэффекте и сигнализаторы уровня – устройства параметрического типа с частотным информационным сигналом, в которых одновременно используется и прямой и обратный пьезоэффект [11,12]. В соответствии с классификацией авторов [7] эти устройства охватывают все основные типы пьезоэлектрических измерительных преобразователей с точки зрения физического принципа действия.

Варьируя геометрическую модель, уравнения состояния, граничные условия можно получить решения для любых пьезоэлектрических датчиков в рабочих условиях при действии информационных параметров и влияющих факторов.

Исследованные модели измерительных преобразователей хорошо описывают собственные частоты изделий, пьезоэлектрическую чувствительность к давлению и другим механическим воздействиям, распределение электрических и механических полей в деталях датчика при действии избыточного давления и изменении температуры.

Очевидно, что виртуальное моделирование МКЭ является эффективным инструментом при проектировании пьезоэлектрических датчиков, повышающим достоверность оценок их характеристик, способствующим сокращению числа натурных испытаний и ускорению доводки опытных образцов.

Описанные в настоящей работе датчики давления 014М используются для регистрации быстропеременного давления, возникающего за телом обтекания, и преобразования его в информационный частотный сигнал в вихревых расходомерах воды, газа, пара [3]. Датчики давления 014М разработаны ООО «Пьезоэлектрик» г. Ростов-на-Дону и широко используются в вихревых расходомерах энергоносителей ОАО «Сибнефтеавтоматика», ОАО «Опытный завод Электрон», ЗАО «Даймет», - все г. Тюмень, ООО «Ирвис», г.Казань, ООО «Глобус», г.Белгород, ЗАО «Метран», г. Челябинск и др.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Богуш М.В., Гориш А.В. Исследование технических характеристик пьезоэлектрических датчиков методом конечных элементов. – Информационно-измерительная техника, экология и мониторинг: науч. тр.- Вып.6 – (2003). – М.: РКА, МГУЛ, 2003. - с 229 –242.
2. Abramenko T, Gorish A., Bogush M., Mitko V,, Main characteristics analysis of the piezoelectric sensors under finite-element method. – Proceeding of the Tenth International Congress on Sound and Vibration, Stockholm, Sweden, 2003, v.3, p951-959.
3. 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.
4. 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.
5. Богуш М.В. Пьезоэлектрические датчики для вихревых расходомеров воды, газа и пара. – В кн.: Коммерческий учет энергоносителей. – СПб.: Политехника, 2000, с 28-30.

6. Проектирование датчиков для измерения механических величин/ Под общ. ред. Е.П. Осадчего. – М.: Машиностроение. 1979. -480 с.

7. Левшина К.С., Новицкий И.В. Электрические измерения физических величин, М.: Энергоатомиздат, 1973, с. 107-130

8. Датчики теплофизических и механических параметров: Справочник в трех томах. Т.1/ Под общ. ред. Ю.Н. Коптева, М.:ИПРЖР, 1999 –548 с.

9. 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.

10. Писаренко Г.С. и др. Сопrotивление материалов. – Киев: Виша школа, 1979. – 694 с.

11. Богуш М.В. Синтез пьезоэлектрических преобразователи для ультразвуковых расходомеров газа с использованием метода конечных элементов // Датчики и системы- 2007.- №8.

12. Богуш М.В. Расчет частотных характеристик пьезорезонансных сигнализаторов уровня методом конечных элементов. Сборник трудов четвертой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GMBL, М. 2004, с 316-322.

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