

УДК 531.781

**ОЦЕНКА ДОПУСТИМЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА
ДЛЯ ВИХРЕВЫХ РАСХОДОМЕРОВ ГАЗА И ПАРА**

М.В. Богуш, Э.М. Пикалев

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 образования вихрей [1], которая в первом приближении пропорциональна скорости потока, а их количество за промежуток времени – суммарному расходу энергоносителя.

Достоинством вихревых расходомеров является инвариантность относительно свойств измеряемой среды, достаточно хорошая точность и линейность в широком диапазоне измерений, отсутствие подвижных элементов внутри трубопровода, частотный выходной сигнал [1,2].

Широкое распространение в вихревых расходомерах в качестве первичных преобразователей энергии потока в электрический сигнал получили пьезоэлектрические датчики изгибающего момента (ДИМ) [1-3], названные по аналогии с 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.

Анализ алгоритмов работы вихревых расходомеров показывает, что для создания конкурентоспособных приборов этого типа универсальных относительно свойств измеряемой среды необходимы датчики с определенной совокупностью свойств. Их динамический диапазон должен охватывать 5-6 поряд-

ков, начиная от единиц Па, с учетом квадратичной зависимости давления от скорости потока и вариации плотности вещества. Частотный диапазон должен быть не менее 3-4 порядков, начиная от единиц Гц, интервалы рабочих температур от $\pm 50^{\circ}\text{C}$ для газа, $0-150^{\circ}\text{C}$ для холодной и горячей воды, от 100 до $250-300^{\circ}\text{C}$ для потребителей пара и до $500-600^{\circ}\text{C}$ для систем управления парогенераторов крупных энергетических станций. Избыточные давления до 1,6-2,5 МПа – для жилищно-коммунального хозяйства, до 6,3 МПа для газораспределительных станций, 16-32 МПа – для парогенераторов. Ресурс должен исчисляться десятками тысяч часов, а долговечность не 10-12 лет. При этом датчики должны иметь малые габариты, допускающие монтаж в трубах с условным проходом от 15 мм, и низкую себестоимость.

Целью настоящей работы является оценка допустимых избыточных давлений и рабочих температур ДИМ, тип 108М [4].

Для количественного анализа технических характеристик ДИМ используем численные методы расчета параметров в рамках теории электротермоупругости на основе метода конечных элементов (МКЭ), универсальные относительно геометрии изделия и способа приложения нагрузки, изложенные в работах [5-8].

Базовая конструкция датчика, рис 1 а, состоит из корпуса 1, ПЭ 2, токоотъемника 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 трубе.

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, в дальнейшем будем называть ЧЭ.

По мере увеличения длины крыла толщина стенки шейки увеличивается, та-
 блице.

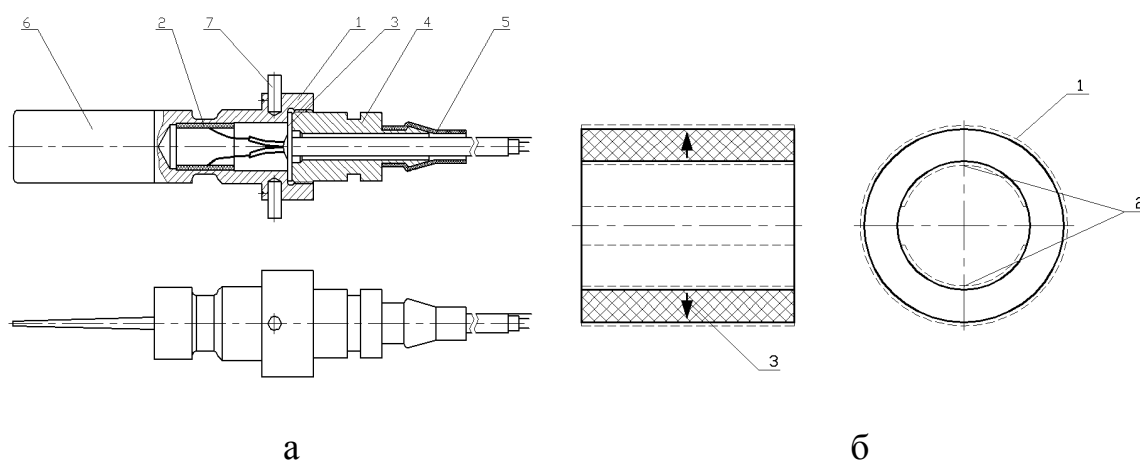


Рис. 1. Конструкция ДИМ 108М (а) и ПЭ (б).

Таблица.

№	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. 1 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.

Целью расчетов является определение:

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

Геометрическая модель ЧЭ ДИМ показана на рис. 2. 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.

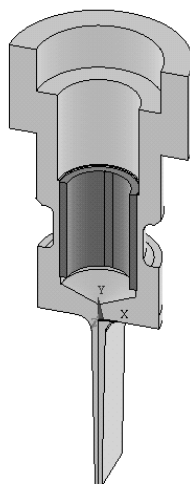


Рис. 2. Геометрическая модель ДИМ.

Применяемые материалы. ПЭ выполнен из состава ЦТС-83Г, корпус - из титанового сплава ВТ3-1. Характеристики материалов приведены в работах [1,9].

ДИМ рассматривается как кусочно-однородное пространственная электротермоупругое тело. 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, действует 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. 1 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 показаны на рис. 3.

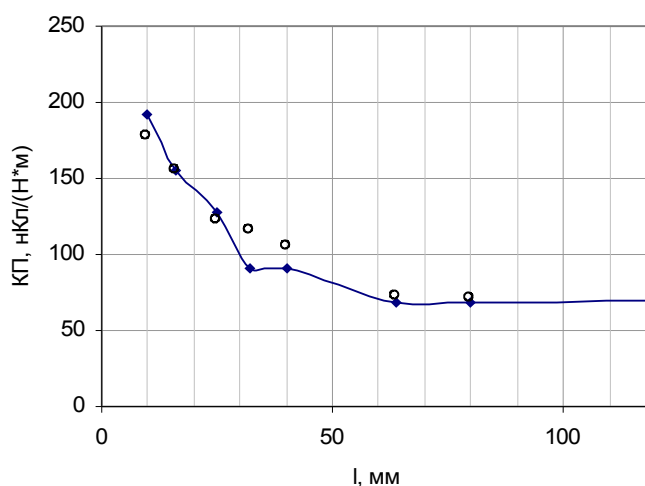


Рис. 3. Расчетная (кривая) и экспериментальная (точки) зависимость КП от длины крыла при фактических размерах ДИМ.

На этом же рисунке приведены **экспериментальные** значения КП, полученные на серийных образцах путем усреднения результатов приемо-сдаточ-

ных 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 ЧЭ. Изломы расчетной кривой связаны с изменением толщины стенки ЧЭ для различных типоразмеров датчиков.

Расчетная и экспериментальная зависимость первой резонансной частоты различных типоразмеров ДИМ 108М от длины крыла показана на рис. 4. Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями собственной частоты не превышает $\pm 3\%$. Из рис. 4 следует, что по мере увеличения длины крыла резонансная частота снижается.

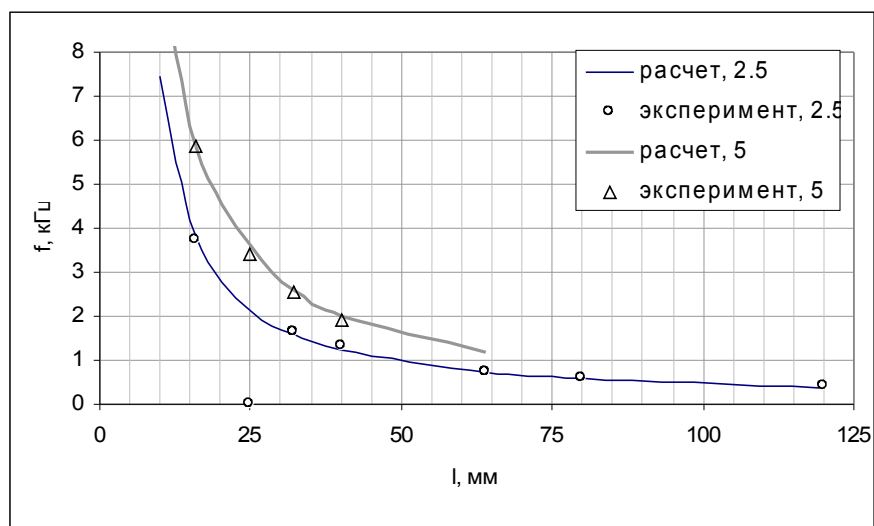


Рис. 4. Расчетная (кривая) и экспериментальная (точки) зависимость резонансной частоты ДИМ от длины крыла с углом $2,5^\circ$ и 5°

Соответствие между расчетными и экспериментальными данными свидетельствует о корректности модели.

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 ЧЭ. 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.5.

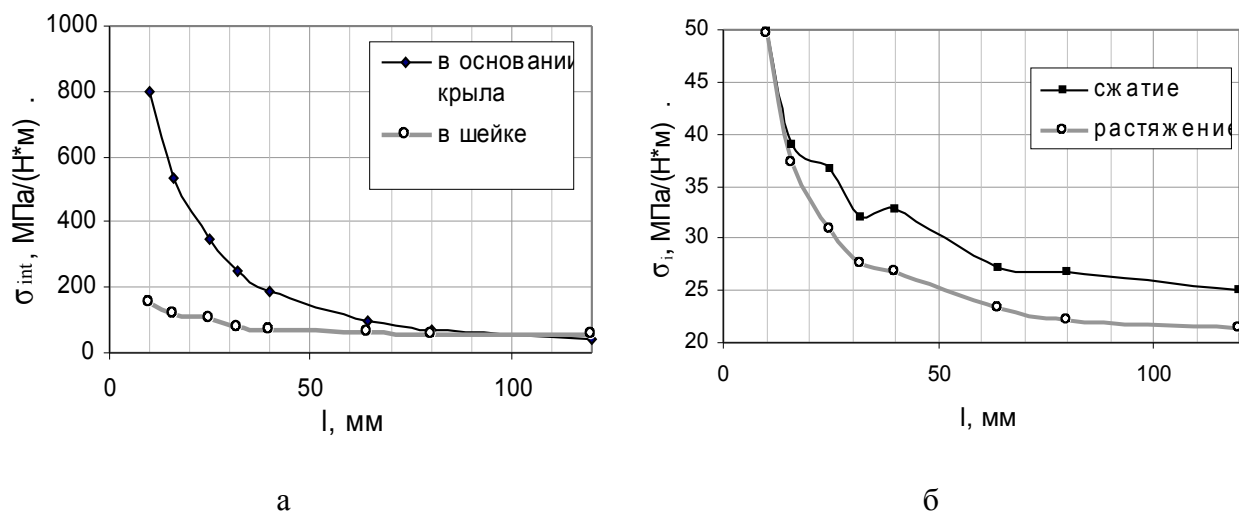


Рис. 5. Расчетные зависимости критических механических напряжений в корпусе (а) и ПЭ (б) ДИМ от длины крыла.

Поскольку в рабочих условиях датчики испытывают знакопеременные нагрузки, то предельно допустимые механические напряжения необходимо сравнивать с пределами выносливости материалов. Согласно справочнику [9], 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. 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.

Допустимые условия эксплуатации ДИМ 108 в координатах давление-температура показаны на рис. 6. Ограничения обусловлены:

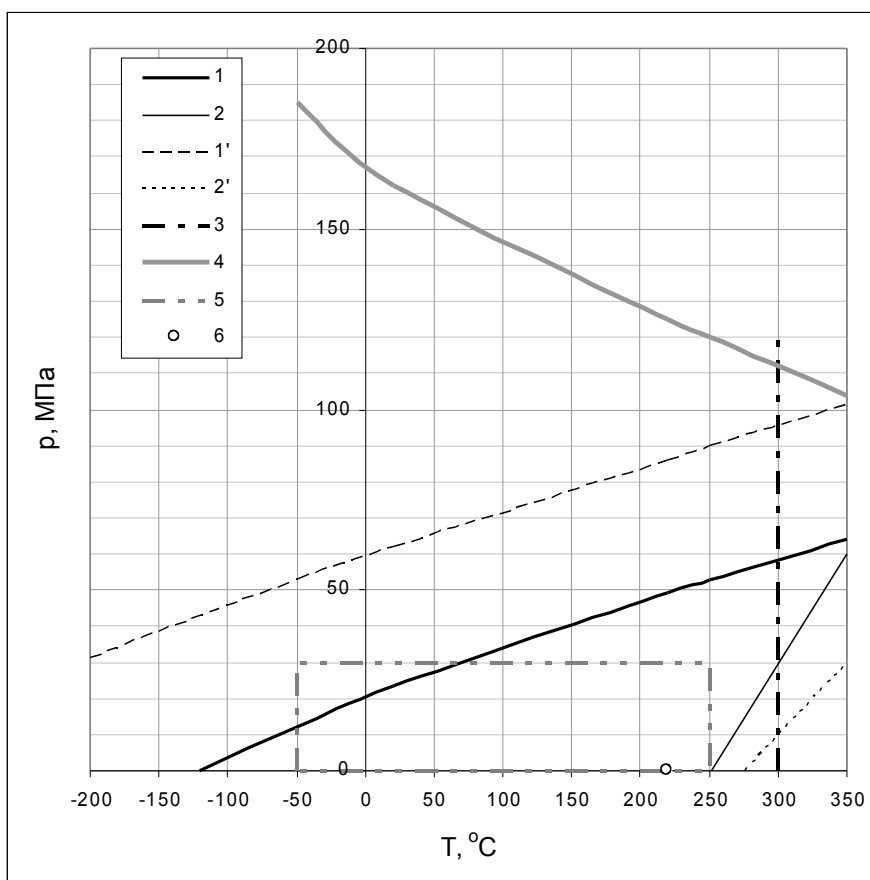


Рис 6. Допустимые условия эксплуатации ДИМ 108М

- в области высоких температур - предельной рабочей температурой для ПКМ ЦТС-83Г, соответствующей 300°C;

- в области средних и низких температур - критическими механическими напряжениями в деталях датчика, обусловленные действием избыточного давления и изменением температуры (кривые 1,1', 2, 2').

Кривые 1,1' и 2,2' определяются механическими напряжениями в ПЭ, рассчитанными при минимальной толщине стенки ЧЭ равной 0,4 мм. Кривая 4 - механическими напряжениями в корпусе при тех же толщинах стенки ЧЭ.

Ограничения, обусловленные механическими напряжениями, даны для математического ожидания прочности ПКМ, т.е. с вероятностью неразрушения 0,5 (кривые 1', 2') и с учетом вариации прочностных свойств материалов с на-

дежностью 0,95 (кривые 1, 2 и 4). При оценке вероятности неразрушения использовались методы, изложенные в работе [10] для средних значений и коэффициентов вариации прочности ПКМ ЦТС-83Г из книги [1] и пределов текучести титана ВТЗ-1 из справочника [9] с коэффициентом вариации 0,1. Аналогичным образом можно получить кривые ограничивающие возможные условия эксплуатации датчика и для любой другой вероятности неразрушения.

При расчетах внешние воздействия (давление и температура) считались детерминированными и соответствовали предельным значениям. Очевидно, что если учесть естественную вариацию условий эксплуатации различных приборов, не выходящих за предельные значения, то вероятность неразрушения датчиков будет выше.

Основные технические характеристики типоразмерного ряда ДИМ 108М приведены в статье [3]. Допустимые условия эксплуатации, показанные на рис. 6, хорошо согласуются с многолетней практикой производства и применения этих датчиков в реальных условиях эксплуатации.

ДИМ 108М 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, рис. 7, не имеющий аналогов среди отечественных и зарубежных приборов [11,12].



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. Богуш М.В., Пикалев Э.М. Проектирование пьезоэлектрических датчиков изгибающего момента для вихревых расходомеров газа и пара// Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика – 2008.-№ 4.– с.32-38.
8. Богуш М.В. Анализ и синтез пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей. Материалы третьей Всерос-

сийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Домбай, 2008. Т 1. -с. 228-230.

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. Богуш М.В. Оценка механической надежности чувствительных элементов пьезоэлектрических датчиков на основе пространственной модели напряженного состояния//Датчики и системы – 2008. - № 3. - с.2-9.

11. 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.

12. Богуш М.В. Успехи вихревой расходомерии //Приборы – 2007. - №8. - с. 32-39.