

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРА ДЛЯ МАССОВОГО РАСХОДОМЕРА

### THE OPPORTUNITY OF THE CYLINDRICAL PIEZOELECTRIC RESONATOR RESEARCH FOR THE MASS FLOW METER

г. Ульяновск, Ульяновский государственный технический университет  
Ulyanovsk, The Ulyanovsk State Technical University

The opportunity of the cylindrical piezoelectric resonator as a part of the pipeline for the Coriolis mass flow meter is considered. The dependence of frequency of fluctuations piezoelectric resonator from the mass flow of a liquid is determined.

Расход – один из самых распространенных в промышленности измеряемых параметров. Он является функцией распределения скоростей потока, зависящей от параметров жидкости и трубопровода, а также от предыстории потока. Поэтому задача измерения расхода в промышленных условиях достаточно сложна.

Потребность в непрерывном контроле количества расходуемой жидкости, все более жесткие требования по надежности, точности создают предпосылки для разработки новых типов расходомеров. Важными тенденциями в области расходомерии являются: увеличение производительности, уменьшения воздействия на окружающую среду, снижение затрат. В этой связи на первый план выходят массовые кориолисовые расходомеры, так как они обладают возможностью измерения нескольких величин, отличаются широким диапазоном измерения характеристик и высокой точностью. Подобные приборы являются идеальными для измерения потребления в химической, нефтехимической, пищевой и других отраслях.

Наиболее широко применяются кориолисовые расходомеры, которые состоят из вибрирующей трубки и двух датчиков электрических сигналов, характеризующих скорость течения жидкости. Информативным параметром, определяющим массовый расход, чаще всего является разность фаз этих электрических сигналов.

Сложность конструкций, реализующих данный метод измерения, заключается в наличии внешнего возбудителя для создания колебаний в трубопроводе и датчиков для съема сигнала.

С целью упрощения конструкции и получения информации в виде частотного сигнала предлагается использовать в качестве первичного преобразователя массового расходомера цилиндрический пьезорезонатор с нанесенными на его поверхность электродами, внутри которого течет измеряемая жидкость. Цилиндр выполняется из пьезокерамики титаната-цирконата свинца. Неоднородная поляризация и соответствующее расположение электродов обеспечивают возбуждение в нем изгибных колебаний. Частота этих колебаний зависит от механических напряжений  $\sigma_x$ , создаваемых в пьезорезонаторе [4]:

$$f = f_0 \sqrt{1 + k \sigma_x}, \quad (1)$$

где  $f_0$  – собственная частота пьезорезонатора;  $k$  – коэффициент, связанный с жесткостью пьезоэлемента.

На элемент жидкости, движущийся в трубке, действует сила, обусловленная градиентом давления, и сила трения, обусловленная градиентом скорости. Уравнение движения жидкости в направлениях, параллельных направлению изгибных колебаний трубки имеет вид [2]:

$$\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \rho U \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} = - \frac{\partial P}{\partial y} + \Phi \quad (2)$$

где  $x, y$  – продольная и поперечная координаты;  $t$  – время;  $U$  – скорость течения жидкости;  $\rho$  и  $P$  – плотность и давление жидкости соответственно;  $\Phi$  – сила трения, отнесенная к единице объема жидкости.

Напряжение в пьезорезонаторе создает сила трения  $\Phi$ , которую можно представить как сумму силы трения на стенке  $\Phi_w$  и силы трения в потоке  $\Phi_f$ , возникающую в результате деформации среды

вдоль оси трубки. Для дальнейших исследований интерес представляет сила трения на стенке  $\Phi_w$ . Ее можно выразить через касательное напряжение на стенке трубки  $\tau_w$ . Таким образом:

$$\sigma_x = \tau_w \quad (3)$$

Значение касательного напряжения зависит от характера течения жидкости (ламинарного или турбулентного), определяемого числом Рейнольдса  $Re$ . Известно, что течение становится турбулентным при значении числа Рейнольдса равным 2000. Исследования проводились для турбулентного потока водной среды при скорости ее течения от 1 до 5 м/с и диаметре цилиндра расходомера 24 мм. Значение касательного напряжения на стенке цилиндра необходимо рассчитывать согласно формуле:

$$\tau_w = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \rho \sqrt{\frac{\nu}{t}} U_\delta \quad (4)$$

где  $U_\delta = 0.99U$  – скорость на границе вязкого слоя;  $\nu$  – кинематическая вязкость;  $T_0$  – период колебания вязкого слоя.

Для нахождения неизвестной величины  $T_0$  следует перейти к универсальным переменным [2]:

$$\sqrt{\frac{\nu}{T_0}} = \frac{V^*}{T_0^*} \quad \text{или} \quad T_0^* = \frac{\eta_0}{3.64} \quad (5)$$

Известно, что

$$\eta_0 = \frac{V^* \delta_0}{\nu} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\xi_0}{2}} Re \frac{\delta_0}{r_0} \quad (6)$$

где  $V^*$  – динамическая скорость;  $\eta_0$  – максимальная безразмерная толщина вязкого слоя;  $\delta_0$  – толщина стационарного вязкого слоя;  $r_0$  – радиус цилиндра пьезорезонатора;  $\xi_0$  – стационарное значение коэффициента сопротивления трению, который равен:

$$\xi_0 = 0.3164 Re^{-0.25} \quad (7)$$

Выражая из формулы (6) динамическую скорость  $V^*$ , получим:

$$V^* = \frac{\eta_0 \nu}{\delta_0} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\xi_0}{2}} Re \frac{\nu}{r_0} \quad (8)$$

Следовательно,

$$\sqrt{\frac{\nu}{T_0}} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\xi_0}{2}} Re \frac{\nu}{r_0} \frac{3.64}{\eta_0} = 0.91 \sqrt{\frac{0.3164 Re^{-0.25}}{2}} \frac{\nu}{r_0} \frac{Re}{\eta_0} = 0.3619 \frac{\nu}{r_0} \frac{Re^{0.875}}{\eta_0} \quad (9)$$

Существует зависимость максимальной безразмерной толщины вязкого слоя  $\eta_0$  от числа Рейнольдса  $Re$  [2], из которой при заданном значении  $Re$  можно определить  $\eta_0$ . Касательное напряжение на стенке канала, с учетом (4) и (9), равно:

$$\tau_w = 0.4043 \frac{\nu}{r_0} \frac{Re^{0.875}}{\eta_0} \rho U, \quad (10)$$

Частота колебания пьезорезонатора вычисляется по формуле:

$$f = f_0 \sqrt{1 + 0.4043k \frac{\nu}{r_0} \frac{\text{Re}^{0.875}}{\eta_0} \rho U} \quad (11)$$

Таким образом, частота колебания пьезорезонатора зависит от скорости течения жидкости.

Используя дополнительный блок обработки частотного сигнала, можно рассчитать массовый расход жидкости:

$$Q_m = \frac{\left[ \left( \frac{f}{f_0} \right)^2 - 1 \right] \cdot r_0 \eta_0 S}{0.4043k \nu \text{Re}^{0.875}} \quad (12)$$

Таким образом, предложен новый метод измерения массового расхода жидкостей и соответствующая ему конструкция расходомера, основой которой является пьезорезонатор.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вельмисов П.А., Горбоконенко В.Д., Фармазонова Т.В. О периодических режимах колебаний трубопровода. // Методы и средства преобразования аналоговой информации. Международная конференция. – Ульяновск, 1999.
2. Галицейский Б.М., Рыжов Ю.А., Якуш Е.В. Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках. – М.: Машиностроение, 1977. – С.17-21, 35.
3. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. – Л.: Машиностроение, 1975. – 776 с.
4. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. – 2-е изд., перераб. и. доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – С.63-65, 212-213.