

РАСЧЕТ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ МАССОВОГО РАСХОДОМЕРА ЖИДКОСТЕЙ

Аннотация.

Актуальность и цели. Измерение массового расхода необходимо в таких областях промышленности, как химическая, нефтехимическая, пищевая, фармацевтическая, целлюлозно-бумажная. Традиционные конструкции массовых расходомеров содержат одну или две металлические измерительные трубки, совершающие кориолисовы колебания за счет наличия внешнего виброгенератора, расположенного в центре, и двух датчиков, регистрирующих данные колебания на концах измерительной трубки. В качестве виброгенераторов либо в качестве датчиков регистрации могут применяться пьезоэлементы в форме пластин. Представляет интерес разработка измерительной трубки, полностью выполненной из пьезокерамического материала с нанесенными электродами. Это упрощает конструкцию, поскольку не требует наличия внешних возбудителей и сенсоров. Целью данной работы является исследование характеристик первичного преобразователя для массового расходомера, представляющего собой пьезоэлектрический резонатор, по которому протекает измеряемая жидкость.

Материалы и методы. Для определения зависимости частоты изгибных колебаний преобразователя от массового расхода протекающей среды использован синтез при исследовании динамических характеристик и устойчивости тел вращения и гидродинамических процессов в колеблющихся потоках жидкостей. С учетом особенностей взаимодействия потока с внутренней поверхностью пьезорезонатора в качестве основных параметров жидкостей, оказывающих влияние на его стенки, определены касательное напряжение и максимальная безразмерная толщина вязкого подслоя.

Результаты. Исследована зависимость частоты колебаний пьезорезонатора от скорости течения, плотности и вязкости различных жидкостей, что в конечном итоге определяет массовый расход. Проведены эксперименты с проливом через преобразователь воды, пива, молока и тосола-40. Все зависимости на начальном участке носят нелинейный характер. Прослеживается повторяемость результатов при соблюдении одних и тех же условий.

Выводы. Проведенные экспериментальные исследования преобразователя подтвердили теоретические расчеты и показали возможность его использования для измерения малых расходов в пищевой, химической и фармацевтической отраслях.

Ключевые слова: пьезокерамический первичный преобразователь, пьезоэлектрический резонатор, частота колебаний, протекающая жидкость, массовый расход.

V. E. Shikina

CALCULATION OF FREQUENCY OF OSCILLATIONS OF A PIEZOCERAMIC PRIMARY CONVERTER FOR MASS FLOWMETER OF LIQUIDS

Abstract.

Background. Measurement of mass flow rate is necessary in industries such as chemical, petrochemical, food, pharmaceutical, pulp and paper. Traditional designs of mass flowmeters contain one or two metal measuring tubes, performing Coriolis fluctuations due to the presence of an external vibrogenerator located in the centre, and two sensors registering these fluctuations at the ends of the measuring tube. Piezoelements in the form of plates may be applied as vibrogenerators or as sensors. The development of measuring tubes completely made of piezoceramic material with printed electrodes is of interest. It simplifies the design as it does not require external exciters and sensors. The aim of this work is to study the characteristics of a primary converter of a mass flowmeter, which is a piezoelectric resonator, through which there flows the measured liquid.

Materials and methods. To determine the dependence of the frequency of flexural vibrations of the transducer on the mass flow of the flow medium the author carried out a synthesis study of dynamic characteristics and stability of body rotation and hydrodynamic processes in oscillating flows of liquids. Taking into account the peculiarities of the interaction of the flow with the inner surface of a piezoresonator as the main parameters of liquids, influencing its walls, the researcher defined tangential stress and maximum dimensionless height of a viscous sublayer.

Results. The author researched the dependence of the oscillation frequency of a piezoresonator on the flow velocity, density and viscosity of different liquids that ultimately determine the mass flow. The researcher conducted the experiments of pouring the water, beer, milk and antifreeze-40 through a resonator. All the dependencies of the initial segment are non-linear. There is a trend of repeatability of the results subject to the same conditions.

Conclusions. Experimental research of the converter confirmed the theoretical calculations and showed the possibility of its use in low flow measurement in food, chemical and pharmaceutical industries.

Key words: piezoceramic primary converter, piezoelectric resonator, rate oscillations, flowing liquid, mass flow.

Введение

В настоящее время в расходомерии пьезоэлектрические элементы, выполненные из пьезокерамики или пьезокварца, используются при изготовлении ультразвуковых и вихревых расходомеров, измеряющих объемный расход сред, а также массовых расходомеров [1]. По форме пьезоэлементов и видам используемых колебаний можно сказать, что в основном применяются пьезоэлементы, имеющие простую форму пластины и использующиеся в качестве излучателей или приемников одномерных колебаний сдвига по толщине. Использование более сложных двумерных видов колебаний изгиба отмечено у вихревых расходомеров, однако в этом случае пьезоэлементы в виде пластины используются только для восприятия напряжений, являясь составным элементом внутри общей конструкции.

Традиционные конструкции массовых расходомеров, как правило, содержат одну или две металлические (нержавеющая сталь, титан, Хастеллой) измерительные трубки, совершающие кориолисовы колебания за счет наличия внешнего виброгенератора, расположенного в центре, и двух датчиков, регистрирующих данные колебания на концах измерительной трубки. Пьезоэлементы простой формы применяются либо в качестве виброгенераторов, либо в качестве датчиков регистрации кориолисовых колебаний, т.е. являются внешними элементами общей конструкции [2]. Следует отметить, что из-

мерение массового расхода является более точным по сравнению с объемным и необходимо в таких областях промышленности, как химическая, нефтехимическая, пищевая, фармацевтическая, целлюлозно-бумажная.

Проведенные исследования показали, что в расходомерии практически не применяются пьезоэлементы более сложных форм в виде тел вращения, которые при соответствующей поляризации и определенном нанесении системы входных и выходных электродов можно использовать как единую колебательную систему для возбуждения и регистрации колебаний, т.е. в виде законченной конструкции, заключенной в одном модуле. Это упрощает конструкцию, поскольку исключает использование внешних элементов. Поэтому целью работы являлась разработка и исследование первичного преобразователя для массового расходомера жидкостей, представляющего собой полый пьезокерамический цилиндр, по которому протекает измеряемая жидкость, и который является частью основного трубопровода [3].

1. Конструкция первичного преобразователя массового расходомера

В качестве материала для изготовления первичного преобразователя использована пьезокерамика цирконата-титаната свинца ЦТС-19, выбор которой, а также ограничения по соотношению геометрических размеров преобразователя описаны в [4].

Прототипом конструкции первичного преобразователя для массового расходомера является цилиндрический виброгироскоп, описанный в [5] и представленный на рис. 1. В данном случае преобразователь расположен горизонтально, однако возможно и вертикальное расположение.

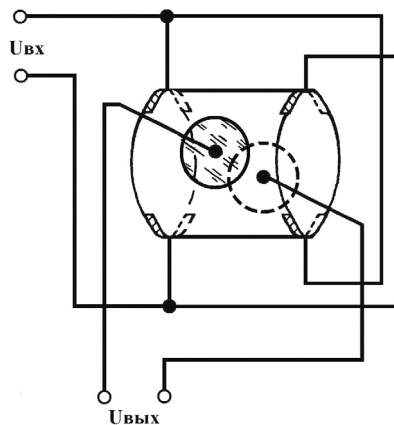


Рис. 1. Внешний вид первичного преобразователя расходомера

Цилиндр закреплен в точках входа и выхода и колеблется так, что максимальная амплитуда находится в средней точке между точками закрепления. Этот момент необходимо учитывать при нанесении выходных электродов на внешнюю поверхность цилиндра. Кориолисовы силы, образуемые в каждой половине цилиндра, имеют одинаковую величину, но противоположное направление. Эта пара сил создает изгибающий момент, который закручивает цилиндр и вызывает его деформацию. Таким образом, при наличии движущейся жидкости внутри цилиндр неизбежно совершает колебания.

Система из четырех входных электродов, расположенных на концах цилиндра, обеспечивает при соответствующей поляризации и подаче рабочего напряжения изгибные колебания, которые усиливаются при протекании жидкости внутри конструкции. Такая конструкция представляет собой пьезорезонатор [6]. Два выходных электрода, расположенных в центре цилиндра, имеют квадратную или круглую форму и служат для получения частотного выходного сигнала, пропорционального массовому расходу протекающей жидкости.

2. Расчет частоты колебаний первичного преобразователя

При изгибных колебаниях цилиндра на единицу длины действует распределенная нагрузка [7]:

$$\sigma = -m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\rho S \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где m – масса, приходящаяся на единицу длины цилиндра; ρ – плотность; S – площадь поперечного сечения цилиндра; y – прогиб при колебаниях.

В общем случае зависимость частоты колебаний пьезорезонатора от механических напряжений определяется следующим образом:

$$f = f_0 \sqrt{1 + k\sigma}, \quad (2)$$

где f_0 – собственная частота колебаний пьезорезонатора;

$$k = \frac{R_2}{E} \frac{l}{4dh^2},$$

здесь R_2 – постоянный коэффициент, зависящий от подвода усилия; E – модуль упругости; l , d , h – длина, диаметр и толщина цилиндра соответственно.

Собственная частота пьезорезонатора может быть представлена следующим выражением:

$$f_0 = \frac{\alpha^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \quad m = \rho dh, \quad J = \frac{dh^3}{12}, \quad (3)$$

где α^2 – корень частотного уравнения изгибных колебаний полого цилиндра, определяемый в зависимости от способа закрепления; J – момент инерции.

Для конструкции, жестко закрепленной с двух сторон, при условии возникновения формы колебаний, представленной на рис. 2 ($i = 1$), $\alpha^2 = 22,37$.

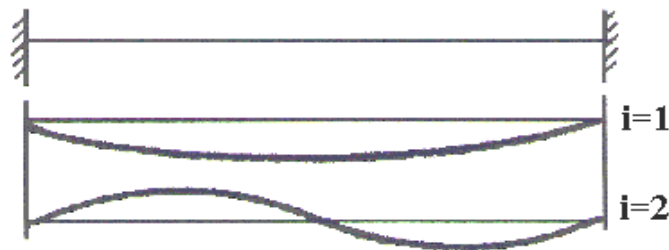


Рис. 2. Формы собственных колебаний конструкции

Значение коэффициента R_2 при соответствующем нанесении электродов равно 2,6.

Исследованиям подвергались пьезокерамические цилиндры, имеющие следующие геометрические размеры: $l = 0,01$ м; $d = 0,011$ м; $h = 0,001$ м. Подставляя данные значения в формулу (3), а также учитывая, что для пьезокерамики ЦТС-19 модуль упругости $E = 0,7 \cdot 10^{11}$ н/м², а плотность $\rho = 7,5 \cdot 10^3$ кг/м³, получено значение собственной частоты колебаний полого пустого цилиндра, равное 62,8 кГц.

Тогда окончательно имеем

$$f = 62800 \sqrt{1 - \frac{R_2}{E} \frac{l}{4dh^2} \sigma}. \quad (4)$$

В формуле (4) под вторым корнем знак «+» изменен на «-», так как согласно формуле (1) распределенная нагрузка σ имеет отрицательное значение.

Поскольку при использовании пьезорезонатора в качестве датчика для массового расходомера внутри него протекает измеряемая жидкость, необходимо рассмотреть взаимодействие потока с внутренней поверхностью пьезорезонатора и определить те параметры жидкости, которые оказывают влияние на его стенки.

Анализируя гидродинамические процессы в трубопроводе при протекании жидкостей, можно сказать, что распределенная нагрузка или напряжение σ в цилиндрическом пьезорезонаторе определяется касательным напряжением трения на его внутренней стенке τ_W [8]:

$$\sigma = \tau_W = \tau_{W0} + \Delta\tau_W, \quad (5)$$

где τ_{W0} , $\Delta\tau_W$ – осредненное по времени и пульсационное касательное напряжение соответственно.

При ламинарном стабилизированном стационарном режиме течения жидкости в трубопроводе

$$\tau_W = \xi \frac{\rho U_0^2}{8} = \frac{64}{\text{Re}} \frac{\rho U_0^2}{8} = \frac{8}{\text{Re}} \rho U_0^2 = \frac{8\nu}{d} \rho U_0, \quad (6)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; ρU_0 – статическая составляющая массовой скорости; $\text{Re} = \frac{U_0 d}{\nu}$ – число Рейнольдса, d – диаметр трубопровода; ν – коэффициент кинетической вязкости.

В случае нестационарного режима течения касательное напряжение трения можно представить следующим образом:

$$\tau_W = \tau_{W0} + \Delta\tau_W; \quad \tau_{W0} = \frac{8\nu}{d} \rho U_0;$$

$$\Delta\tau_W = \frac{8\rho U_0^2}{\text{Re}_0} + \Delta(\rho U_0) \frac{\partial \Delta U_0}{\partial x} \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}} = \frac{8\nu \rho U_0}{d_0} + \Delta(\rho U_0) \frac{\partial \Delta U_0}{\partial x} \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}};$$

$$\tau_w = 8\nu\rho U_0 \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{d_0} \right) + \Delta(\rho U_0) \frac{\partial \Delta U_0}{\partial x} \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}}, \quad (7)$$

где $d_0 = 4S/\Pi$, Π – периметр канала; $\Delta(\rho U)$ – колебательная составляющая массовой скорости; ω – угловая частота.

Следовательно, при $\sigma = \tau_w$ получено:

– для ламинарного стабилизированного стационарного режима течения:

$$f = 62800 \sqrt{1 - \frac{R_2}{E} \cdot \frac{l}{4dh^2} \cdot \frac{8\nu}{d} \cdot \rho U_{0S}} \cdot \rho U_{0S} = 62800 \sqrt{1 - \frac{2R_2 l \nu}{Ed^2 h^2} \cdot \rho U_{0S}}; \quad (8)$$

– для ламинарного нестационарного режима течения:

$$f = 62800 \sqrt{1 - \frac{R_2 l}{4Edh^2} \left[8\nu\rho U_{0S} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{d_0} \right) + \Delta(\rho U_{0S}) \frac{\partial \Delta U_{0S}}{\partial x} \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}} \right]}. \quad (9)$$

Рассматривая турбулентный режим течения, необходимо использовать четырехслойную модель потока (вязкий подслой, промежуточный подслой, логарифмический слой и турбулентное ядро) [9].

Деформация профиля скорости наблюдается вблизи стенки, тогда как ядро потока колеблется как «жесткий стержень». Максимум скорости смещается к стенке, и течение носит характер пограничного слоя.

Здесь необходимо ввести понятие *турбулентной вязкости*. При стационарном режиме течения турбулентная вязкость определяет связь между напряжением Рейнольдса и градиентом средней скорости. В квазистационарном стабилизированном колебательном режиме течения предполагается, что турбулентная вязкость во времени не изменяется и зависит только от универсальной переменной η :

$$\eta = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \frac{y}{\nu}, \quad (10)$$

где y – поперечная координата, отсчитываемая от стенки канала; ρ – плотность жидкости.

Изменение значения касательного напряжения на стенке канала в течение периода роста вязкого подслоя равно

$$\tau_w(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \rho \sqrt{\frac{\nu}{t}} U_\delta, \quad (11)$$

где $U_\delta = 0,99U$ – скорость на границе вязкого подслоя.

Среднее значение за период колебания касательного напряжения на стене канала равно

$$\sqrt{\frac{\nu}{T_0}} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\xi_0}{2}} \operatorname{Re} \frac{\nu}{r_0} \frac{3,64}{\eta_0} = 0,91 \sqrt{\frac{\xi_0}{2}} \frac{\nu}{r_0} \operatorname{Re}, \quad (12)$$

В данной формуле период колебания вязкого подслоя T_0 является неизвестной величиной, которую необходимо определить. Для этого следует перейти к универсальным переменным, тогда:

$$\sqrt{\frac{\nu}{T_0}} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\xi_0}{2}} \operatorname{Re} \frac{\nu}{r_0} \frac{3,64}{\eta_0} = 0,91 \sqrt{\frac{\xi_0}{2}} \frac{\nu}{r_0} \frac{\operatorname{Re}}{\eta_0}, \quad (13)$$

где $\xi_0 = 0,3164 \operatorname{Re}^{-0,25}$; r_0 – радиус трубопровода; η_0 – максимальная безразмерная толщина вязкого подслоя, зависимость которой от числа Рейнольдса представлена в [4].

Таким образом, частота колебаний пьезорезонатора будет определяться следующим выражением:

$$f = 62800 \sqrt{1 - 0,4043 \frac{R_2}{E} \frac{l}{4dh^2} \frac{\nu}{r_0} \frac{\operatorname{Re}^{0,875}}{\eta_0}} \rho U. \quad (14)$$

Из формулы (14) видно, что значение частоты колебаний напрямую зависит от скорости течения жидкости.

Поскольку массовый расход жидкости равен $Q_m = \rho US$, в явном виде зависимость частоты колебания цилиндрического пьезорезонатора от массового расхода выглядит следующим образом:

$$f = 62800 \sqrt{1 - 6,137 \frac{l\nu^{0,125}}{Eh^2 \eta_0 d^6 \rho^{0,875}} Q_m^{1,875}}. \quad (15)$$

В зависимости от конкретной жидкости, протекающей внутри датчика, значения кинематической вязкости и плотности будут меняться, следовательно, можно предположить, что при одном и том же расходе частоты колебаний датчика должны быть различны.

3. Экспериментальные исследования первичного преобразователя

Для проведения экспериментов с целью подтверждения теоретических расчетов и выводов были выбраны следующие жидкости, имеющие различные значения плотности и кинематической вязкости: проточная вода, пиво, молоко жирностью 2,5 %, тосол-40.

Поскольку самой распространенной в использовании жидкостью является вода, начальные эксперименты проводились с ней. На рис. 3 представлена зависимость частоты колебаний датчика от массового расхода при протекании воды. Зависимость показана, начиная с собственной исходной частоты датчика 62,8 кГц.

Все эксперименты проводились несколько раз с целью получения повторяемости результатов при соблюдении одних и тех же условий.

Как уже указывалось, в качестве альтернативных жидкостей выбраны пиво и молоко, которые относятся к пищевой промышленности, и тосол-40, относящийся к нефтехимической промышленности. Данный выбор определялся доступностью жидкостей и безопасностью при проведении экспериментов. Сравнение уровней частот показывает, что датчик реагирует на изменение типа жидкости изменением частоты колебания, что иллюстрирует рис. 4.

Исходя из всего вышеизложенного, можно сделать вывод, что экспериментальные исследования датчика подтверждают представленные теоретиче-

ские расчеты. Все зависимости на начальном участке при малых расходах носят нелинейный характер. После проведения серии экспериментов с одной жидкостью для очищения внутренней поверхности датчик промывался несколько раз водой, протекающей с максимальной скоростью. При этом сначала частота колебаний имела некоторое промежуточное значение, а затем возвращалась к значению 20 кГц, что соответствует колебаниям датчика с водой. Данная ситуация повторялась после каждой серии экспериментов. Это дает возможность сделать вывод, что датчик можно использовать для контроля плотности протекающей жидкости, поскольку любые ее изменения сказываются на частоте колебаний.

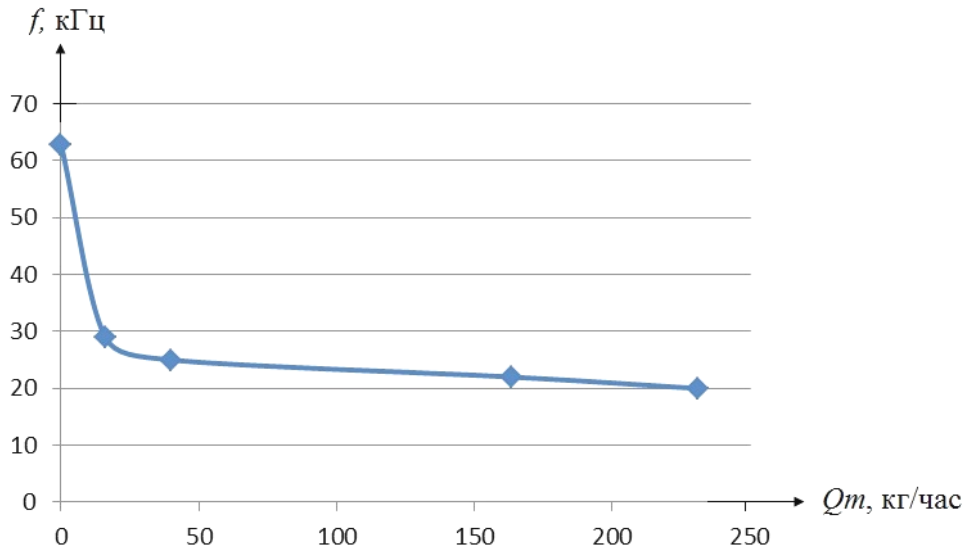


Рис. 3. Зависимость частоты колебаний датчика от массового расхода воды

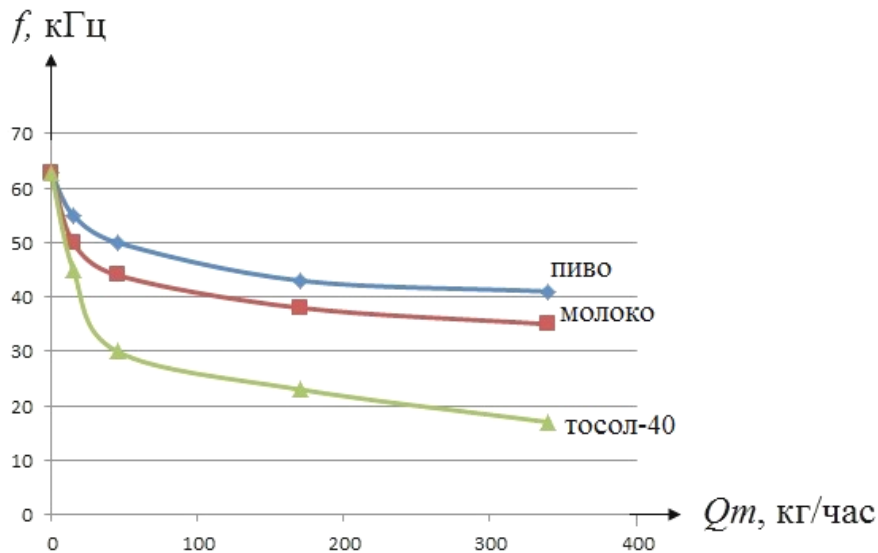


Рис. 4. Соотношение частот колебаний датчика для разных жидкостей

В заключение следует отметить, что разработанный первичный преобразователь в силу небольших геометрических размеров, в частности диаметра условного прохода, можно применять для измерений малых расходов в пищевой, химической и фармацевтической отраслях промышленности.

Список литературы

1. **Кремлевский, П. П.** Расходомеры и счетчики количества веществ : справочник / П. П. Кремлевский. – 5-е изд. перераб. и доп. – СПб. : Политехника, 2002. – Кн. 2. – 412 с.
2. Патент 5460053 США, G01F1/84 Electronic method for mass flow measurement / Hyok S. Lew; Yon S. Lew; Yon K. Lew (США). – № 946675 ; заявл. 18.09.92 ; опубл. 24.10.95. – 20 с.
3. Патент 2248529 Россия, G01F Массовый расходомер / Горбоконенко В. Д., Шикина В. Е., Черный А. В. ; заявитель и патентообладатель Ульяновский гос. техн. ун-т ; заявл. 29.03.2002 ; опубл. 20.11.2003.
4. **Шикина, В. Е.** Использование пьезоэлектрического материала для изготовления датчика массового расходомера жидкости / В. Е. Шикина // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2013. – № 3. – С. 72–74.
5. **Малов, В. В.** Пьезорезонансные датчики / В. В. Малов. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.
6. **Шарапов, В. М.** Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шарапова. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.
7. Справочник по сопротивлению материалов / Е. Ф. Винокуров, М. К. Балыкин, И. А. Голубев и др. – Мн. : Наука и техника, 1988. – 464 с.
8. **Галицейский, Б. М.** Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках / Б. М. Галицейский, Ю. А. Рыжов, Е. В. Якуш. – М. : Машиностроение, 1977. – 256 с.
9. **Гиргидов, А. Д.** Механика жидкости и газа (гидравлика) : учебник для вузов / А. Д. Гиргидов. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2002. – 545 с.

References

1. Kremlevskiy P. P. *Raskhodometry i schetchiki kolichestva veshchestv: spravochnik* [Flow meters and scaler of amount of matter: reference]. Saint Petersburg: Politekhnik, 2002, Bk. 2, 412 p.
2. Patent 5460053 USA, G01F1/84 *Electronic method for mass flow measurement*. Hyok S. Lew; Yon S. Lew; Yon K. Lew (USA). No. 946675, 24.10.95, 20 p.
3. Patent 2248529 Russian Federation, G01F *Massovyy raskhodomer* [Mass flow meter]. Gorbokononko V. D., Shikina V. E., Chernyy A. V. [applicant and rightholder – Ulyanovsk State Technical University], 20.11.2003.
4. Shikina V. E. *Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ulyanovsk State Technical University]. 2013, no. 3, pp. 72–74.
5. Malov V. V. *P'ezorezonansnye datchiki* [Piezoresonance sensors]. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 272 p.
6. Sharapov V. M., Sharapov V. M., Musienko M. P., Sharapova E. V. *P'ezoelektricheskie datchiki* [Piezoelectric sensors]. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 632 p.
7. Vinokurov E. F., Balykin M. K., Golubev I. A. et al. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Reference on strength of materials]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1988, 464 p.
8. Galitseyskiy B. M., Ryzhov Yu. A., Yakush E. V. *Teplovyie i gidrodinamicheskie protsessy v koleblyushchikhsya potokakh* [Heat and hydrodynamic processes in oscillating flows]. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 256 p.

9. GirgidoV A. D. *Mekhanika zhidkosti i gaza (gidravlika): uchebnik dlya vuzov* [Mechanics of liquids and gases (hydraulics): textbook for universities]. Saint Petersburg: Izd-vo SPbGPU, 2002, 545 p.

Шикина Виктория Евгеньевна
старший преподаватель, кафедра
измерительно-вычислительных
комплексов, Ульяновский
государственный технический
университет (Россия, г. Ульяновск,
ул. Северный Венец, 32)

E-mail: shik7789@gmail.com

Shikina Viktoriya Evgen'evna
Senior lecturer, sub-department
of measuring-computing complexes,
Ulyanovsk State Technical University
(32 Severniy Venets street, Ulyanovsk,
Russia)

УДК 681.586, 532 (075.8)

Шикина, В. Е.

Расчет частоты колебаний пьезокерамического первичного преобразователя для массового расходомера жидкостей / В. Е. Шикина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 1 (29). – С. 54–63.