

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ МАССОВОГО РАСХОДОМЕРА ЖИДКОСТЕЙ

В. Е. ШИКИНА

Ульяновский государственный технический университет, 432027, Ульяновск, Россия  
E-mail: shik7789@gmail.com

Исследуются метрологические характеристики опытного образца пьезоэлектрического первичного преобразователя, выполненного из неметаллического материала. Для разработанного преобразователя математическими методами определены функция преобразования массового расхода в частоту колебаний и чувствительность. Представлены графические зависимости данных метрологических характеристик от величины массового расхода различных жидкостей и определено время переходного процесса при их протекании. Рассмотрены основные источники методических погрешностей разработанного преобразователя и представлена зависимость абсолютной погрешности от массового расхода воды.

**Ключевые слова:** первичный преобразователь, функция преобразования, чувствительность, частота колебаний, эксперимент, погрешность

**Введение.** Измерение массового расхода жидких сред является необходимой задачей в ряде отраслей промышленности (энергетике, сельском хозяйстве, медицине и т.д.), поскольку позволяет получить более точные результаты по сравнению с традиционным измерением объемного расхода [1]. Было проведено исследование возможности измерения массового расхода первичным измерительным преобразователем, выполненным из неметаллического материала [2], на основе сведений, представленных в работах [3, 4].

Разработанный первичный преобразователь (датчик) для массового расходомера жидкостей представляет собой измерительную трубку в виде полого пьезокерамического цилиндра, который заполняется протекающей жидкостью и является частью основного трубопровода [5]. Прототип данной конструкции — цилиндрический виброгироскоп, описанный в работе [6]. Подобная конструкция имеет малые размеры и является более простой по сравнению с классическими массовыми расходомерами [7]. В качестве материала датчика используется пьезокерамика цирконата-титаната свинца типа ЦТС-19 [8], технические характеристики которой, необходимые для дальнейших расчетов, представлены в работе [9] и ОСТ 11 0444-87.

Данное конструктивное решение реализовано в НИИ „Элпа“ (Зеленоград) [10]. Изготовлено несколько экспериментальных образцов, которые исследовались на кафедре измерительно-вычислительных комплексов Ульяновского государственного технического университета.

Задачи представленного в настоящей статье исследования:

- определение статических метрологических характеристик разработанного первичного измерительного преобразователя, таких как функция преобразования и чувствительность;
- построение, по результатам экспериментов на проливной установке, градуировочных характеристик датчика при протекании различных жидкостей;
- исследование инерционных свойств датчика путем определения длительности переходного процесса (времени установления показаний);
- определение погрешностей разработанного преобразователя, а также источников их возникновения.

**Теоретическое определение функции преобразования и чувствительности.** Исходя из теоретических расчетов, представленных в работе [7], для разработанного первичного измерительного преобразователя определена функциональная зависимость выходного параметра (частоты колебаний пьезокерамического цилиндра) от входной величины (массового расхода жидкости). Функция преобразования имеет вид

$$f = f_0 \sqrt{1 - 6,137 \frac{\nu^{0,125}}{E h^2 \eta_0 d^6 \rho^{0,875}} Q_m^{1,875}}, \quad (1)$$

где  $f_0$  — собственная частота колебаний полого незаполненного жидкостью пьезокерамического цилиндра, Гц [11];  $l, h, d$  — длина, толщина и наружный диаметр цилиндра соответственно, м;  $E$  — модуль упругости пьезокерамики ЦТС-19, Н/м<sup>2</sup>;  $\nu, \rho$  — кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с, и плотность, кг/м<sup>3</sup>, протекающей жидкости соответственно;  $\eta_0$  — максимальная безразмерная толщина вязкого подслоя;  $Q_m$  — массовый расход, кг/с.

Режим течения жидкости по трубопроводу — турбулентный [12]. Считается, что турбулентный поток условно можно разделить на четыре зоны: вязкий подслой, промежуточный подслой, логарифмический слой и турбулентное ядро [13]. Вязкий подслой — тонкий слой, прилегающий непосредственно к стенке трубы. Параметр максимальной безразмерной толщины вязкого подслоя, определенный в работе [14], непосредственно зависит от числа Рейнольдса (Re):

$$\eta_0 = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\xi_0}{2}} \cdot \text{Re} \frac{\delta_0}{r_0},$$

где  $\xi_0$  — стационарный коэффициент сопротивления трению;  $\delta_0$  — толщина стационарного вязкого подслоя, м;  $r_0$  — радиус измерительной трубки, м.

Графическая зависимость  $\eta_0(\text{Re})$  представлена на рис. 1.

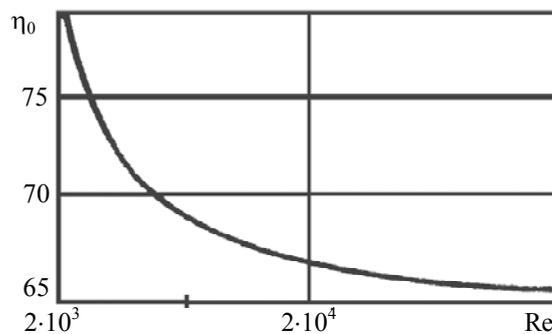


Рис. 1

Как известно, число Рейнольдса зависит от скорости протекающей жидкости и диаметра трубопровода. Изготовленные цилиндрические образцы имеют внутренний диаметр 9 мм, что обеспечивает течение жидкости со скоростью до 1,5 м/с. Таким образом, число Рейнольдса может изменяться в диапазоне от 900 (при скорости 0,1 м/с) до 13 500. Исходя из этого максимальная безразмерная толщина вязкого подслоя  $\eta_0$  изменяется от 80 до 67.

Для дальнейших расчетов приняты следующие значения параметров:  $f_0 = 62\,800$  Гц,  $l = 0,01$  м,  $h = 0,001$  м,  $d = 0,011$  м,  $E = 0,7 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>.

В зависимости от конкретной жидкости, протекающей внутри первичного измерительного преобразователя, значения кинематической вязкости и плотности будут изменяться.

Используя функцию преобразования (1), можно определить чувствительность  $S$ :

$$S = \frac{df}{dQ_m} = \frac{361\,315,875 \cdot Q_m^{1,875} \nu^{0,125}}{Eh^2 \eta_0 d^6 \rho^{0,875} \sqrt{1 - \frac{6,137 \cdot Q_m^{1,875} \nu^{0,125}}{Eh^2 \eta_0 d^6 \rho^{0,875}}}}. \quad (2)$$

Анализ выражения (2) позволяет сделать предварительный вывод, что чувствительность не является постоянной величиной и практически линейно зависит от измеряемого массового расхода.

**Условия проведения экспериментов.** По технологии, описанной в работе [10], было изготовлено несколько экспериментальных образцов датчиков, три из которых были исследованы на проливной установке. Цель экспериментов — исследование датчика при протекании по нему рабочих жидкостей с разной скоростью и определение градуировочных характеристик, чувствительности и длительности переходного процесса. Уровень рабочего напряжения датчиков может варьироваться, по данным изготовителя, от 100 мВ до 3 В. Рабочие жидкости — проточная вода, молоко, пиво и тосол-40, имеющие различные значения плотности и вязкости.

Согласно формуле (1) при увеличении скорости течения жидкости и, следовательно, массового расхода частота колебаний датчика должна уменьшиться, поскольку подкоренное выражение станет меньше 1. Исходное значение частоты (при отсутствии жидкости внутри датчика) — 62 800 Гц.

Условия проведения экспериментов:

- температура окружающей среды — +22 °С;
- рабочее напряжение датчика — 100 мВ;
- температура воды — 18 °С;
- плотность воды при данной температуре — 998,62 кг/м<sup>3</sup>;
- кинематическая вязкость воды —  $1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;
- температура пива — 18 °С;
- плотность пива — 1010 кг/м<sup>3</sup>;
- кинематическая вязкость пива —  $1,8 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;
- температура молока — 3 °С;
- плотность молока — 1030 кг/м<sup>3</sup>;
- кинематическая вязкость молока —  $1,13 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;
- температура тосола-40 — 20 °С;
- плотность тосола-40 — 1085 кг/м<sup>3</sup>;
- кинематическая вязкость тосола-40 —  $19,17 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

Для всех жидкостей исследование было проведено при четырех значениях массового расхода, для каждого из значений измерения проводились пять раз.

Контрольные точки расхода воды — 16, 40, 163 и 231 кг/ч. Для альтернативных жидкостей были выбраны следующие контрольные точки: 15, 45, 170 и 340 кг/ч. Разница значений связана с особенностями проливной установки и изменением положения крана.

**Результаты экспериментов.** *Градуировочные характеристики, чувствительность.* На рис. 2 показаны градуировочные характеристики датчика при протекании всех рабочих жидкостей с различной скоростью. Наиболее стабильные показания при повторении эксперимента наблюдались при максимальном расходе, когда жидкость полностью заполняла измерительную трубку; менее стабильные показания — при минимальном расходе, когда жидкость почти отсутствовала в трубке. В целом, разброс значений частоты при повторных измерениях не превышал 1 %.

Сравнительный анализ показаний позволяет сделать вывод, что датчик реагирует не только на изменение скорости течения, но и на плотность и кинематическую вязкость протекающей жидкости. Это еще раз подтверждает, что датчик регистрирует именно массовый,

а не объемный расход и может использоваться также при контроле качества жидкости. Для каждой жидкости характерен свой частотный диапазон: это особенно заметно при сравнении альтернативных жидкостей и в данном случае дает возможность однозначного ее определения. Вода характеризуется самым узким частотным диапазоном, однако при ее протекании наблюдались самые стабильные показания.

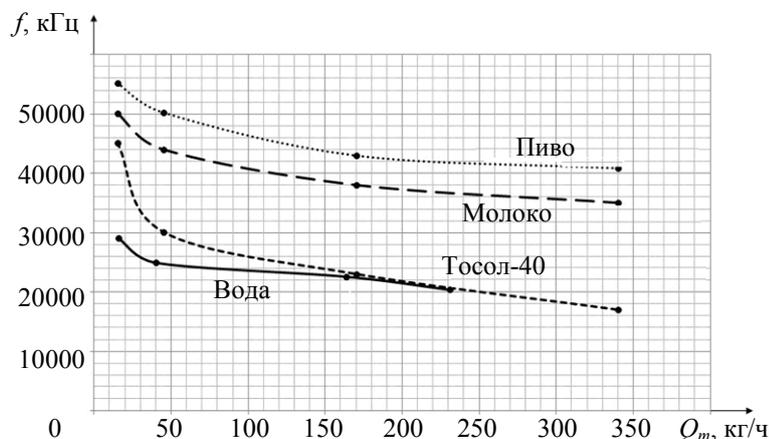


Рис. 2

Результаты сравнительного исследования чувствительностей для всех указанных жидких сред приведены на рис. 3. Значения массового расхода представлены на логарифмической шкале. Поскольку функция преобразования датчика является нелинейной, его чувствительность в зависимости от расхода меняется. Максимальная чувствительность соответствует наибольшему расходу.

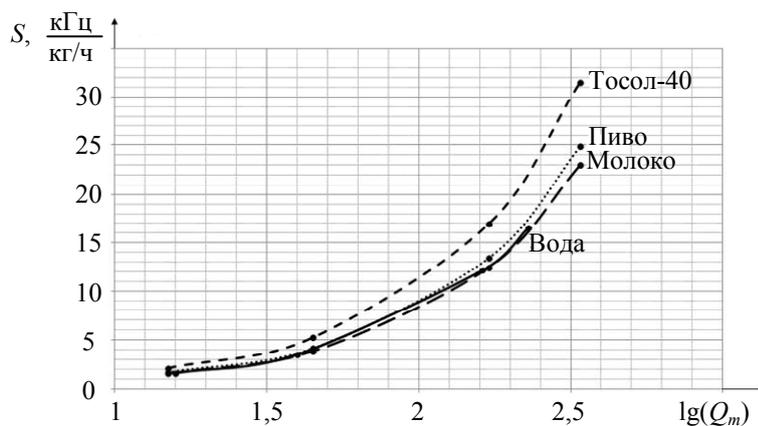


Рис. 3

Наибольшую чувствительность датчик имеет при протекании тосола, а практически одинаковые значения чувствительности — при протекании воды и молока. Во всех случаях чувствительность растет с увеличением расхода, однако увеличение расхода ограничено диаметром измерительной трубки, следовательно, дальше воздействовать на чувствительность можно только путем варьирования конструктивных параметров датчика и изменением способа крепления выходных электродов, как и было указано в работе [10].

*Длительность переходного процесса.* Эксперименты по определению длительности переходного процесса проводились для всех рабочих жидкостей и на всех контрольных точках расхода. Поскольку экспериментальные образцы датчика изготовлены в одной партии и являются идентичными, значения всех рассмотренных метрологических характеристик практически одинаковы.

Наибольший по длительности переходный процесс при протекании воды наблюдался при минимальном расходе (16 кг/ч) и составил 9,2 с (рис. 4, а). При других значениях расхода время переходного процесса не превышало 5 с, что соответствует требованиям, предъявляемым к по-

добного рода датчикам. Таким образом, разработанный первичный преобразователь может использоваться для измерений массового расхода воды, причем в данном случае датчик не имеет специального защитного покрытия внутренней поверхности измерительной трубки.

Показатель длительности переходного процесса каждой из альтернативных жидкостей был стабильным. На рис. 4, б—г графически проиллюстрированы переходные процессы при наибольшем значении массового расхода (340 кг/ч), поскольку именно в этом случае видно различие уровней установившегося значения частоты колебания датчика в зависимости от вида протекающей жидкости. Согласно экспериментам, длительность переходного процесса для молока составляет 11,3 с, для пива — 18,4 с, для тосола-40 — 21,5 с. Таким образом, при использовании рассмотренных жидкостей в качестве рабочих сред стабильные показания можно получить через 22 с после начала процесса течения для любого экспериментального образца.

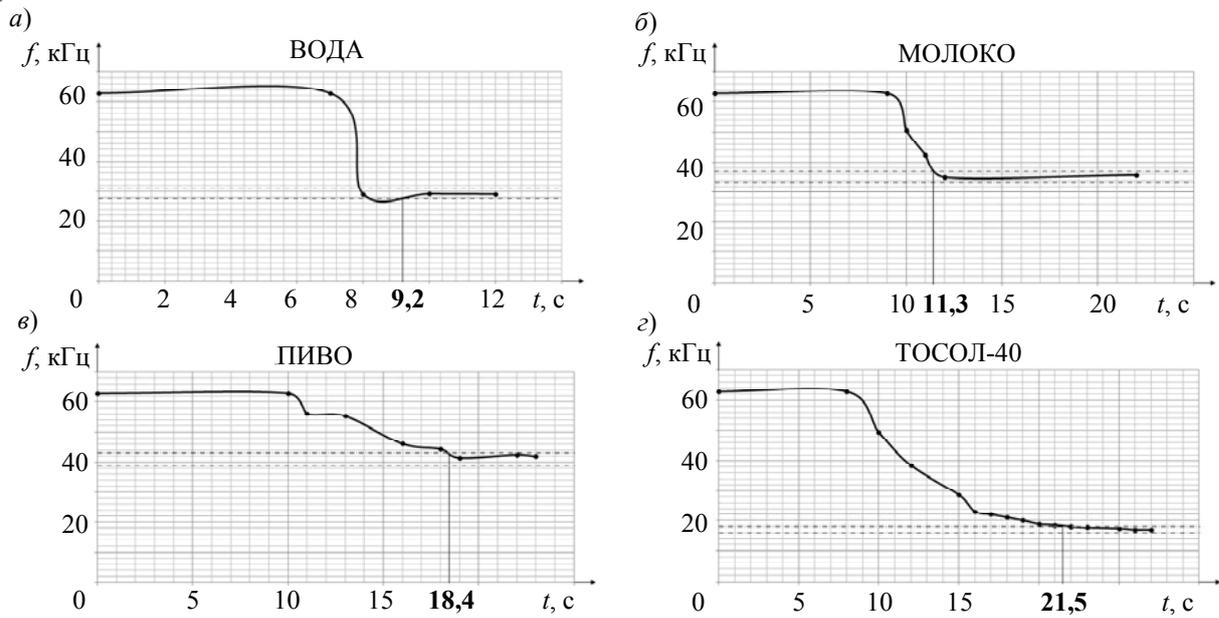


Рис. 4

Для корректности исследования следует отметить, что все жидкости являются более вязкими по сравнению с проточной водой, в связи с чем внутренняя поверхность измерительной трубки может загрязниться достаточно быстро. Кроме того, тосол-40 является агрессивной средой и может, помимо налипания на стенки трубки, разъедать внутреннюю поверхность. Поэтому необходимо предусмотреть защитное покрытие внутренней поверхности органическим лаком или эмалью.

**Анализ погрешностей первичного преобразователя.** Для полноты исследования необходимо оценить погрешности разработанного измерительного преобразователя, а также выявить источники их появления. При проведении экспериментов наблюдались случайная и систематическая погрешности. Случайная погрешность проявилась в разбросе результатов при повторных измерениях в каждой контрольной точке. Для ее уменьшения, как известно, необходимо при дальнейших исследованиях увеличить количество повторных измерений.

Источниками систематических погрешностей являются:

— конструктивные особенности измерительного преобразователя (геометрические размеры, используемый материал), технология изготовления, отсутствие защитного покрытия внутренней стенки измерительной трубки или влияние этого покрытия на результат при его наличии (инструментальная составляющая);

— кинематическая вязкость жидкости  $\nu$ , плотность жидкости  $\rho$  и безразмерная толщина вязкого подслоя  $\eta_0$  (методическая составляющая).

На данном этапе исследования уменьшить инструментальную составляющую нельзя, поскольку образцы уже изготовлены.

Уравнения для составляющих методической погрешности измерения расхода имеют следующий вид:

$$\frac{\partial f}{\partial v} = - \frac{24\,087,725 \cdot l Q_m^{1,875}}{E \eta_0 \rho^{0,875} d^6 h^2 v^{0,875} \sqrt{1 - \frac{6,137 l \cdot Q_m^{1,875} v^{0,125}}{E \eta_0 \rho^{0,875} d^6 h^2}}};$$

$$\frac{\partial f}{\partial \rho} = \frac{168\,614,075 \cdot l Q_m^{1,875} v^{0,125}}{E \eta_0 \rho^{1,875} d^6 h^2 \sqrt{1 - \frac{6,137 \cdot l Q_m^{1,875} v^{0,125}}{E \eta_0 \rho^{0,875} d^6 h^2}}};$$

$$\frac{\partial f}{\partial \eta_0} = \frac{192\,701,8 \cdot l Q_m^{1,875} v^{0,125}}{E \eta_0^2 \rho^{0,875} d^6 h^2 \sqrt{1 - \frac{6,137 \cdot l Q_m^{1,875} v^{0,125}}{E \eta_0 \rho^{0,875} d^6 h^2}}}.$$

По параметрам кинематической вязкости условно установлен разброс  $\pm 5\%$ . Если рассматривать в качестве исследуемой жидкости воду, ее плотность при изменении температуры от  $-10$  до  $90$  °С варьируется в пределах от  $994,79$  кг/м<sup>3</sup> (при  $32$  °С) до  $1000$  кг/м<sup>3</sup> (при  $4$  °С). Как было сказано ранее, максимальная безразмерная толщина вязкого подслоя  $\eta_0$  варьируется в диапазоне от  $67$  до  $80$ . Таким образом, абсолютная методическая составляющая погрешности массового расходомера, обусловленная всеми перечисленными факторами, будет определяться уравнением  $\Delta f = \frac{\partial f}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial f}{\partial \rho} \Delta \rho + \frac{\partial f}{\partial \eta_0} \Delta \eta_0$ . Данная составляющая при малых расходах

незначительна, а с его увеличением носит практически линейный характер, т.е. является мультипликативной. Уменьшение методической составляющей погрешности возможно при введении более жестких ограничений по параметрам кинематической вязкости и температуры рабочей жидкости.

Результирующая экспериментальная абсолютная погрешность первичного преобразователя для массового расходомера представлена на рис. 5 (рабочая жидкость — проточная вода).

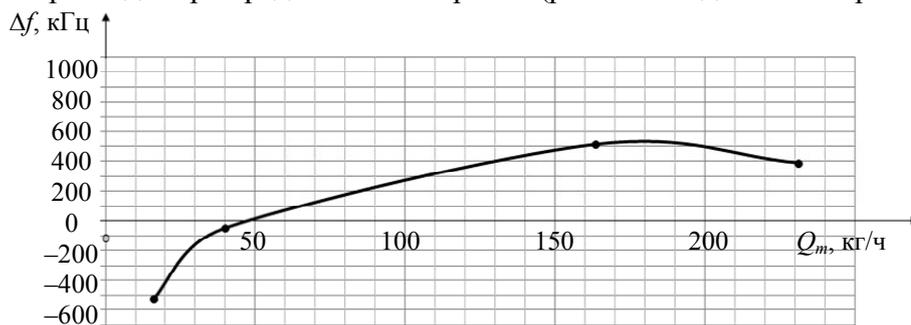


Рис. 5

Анализ данной зависимости показывает, что мультипликативная составляющая прослеживается достаточно четко. Наибольшая погрешность наблюдается при минимальном расходе и по абсолютной величине составляет  $525$  Гц, что соответствует максимальной приведенной погрешности  $\pm 1,2\%$  относительно диапазона измерения.

**Заключение.** По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

— математическими методами определены статические метрологические характеристики первичного измерительного преобразователя;

— построены градуировочные характеристики датчика при протекании четырех видов жидкостей с различными значениями плотности и кинематической вязкости, причем диапазоны выходных частот колебаний датчика для каждой жидкости не перекрывают друг друга, что дает возможность идентифицировать жидкость;

— использование разработанного первичного преобразователя позволяет определять наличие минимального количества любой жидкости внутри измерительной трубки;

— чувствительность преобразователя растет при увеличении массового расхода жидкости;

— максимальная чувствительность датчика наблюдается при протекании тосола;

— длительность переходного процесса увеличивается при увеличении вязкости протекающей жидкости, следовательно, можно сказать, что преобразователь является более инерционным при протекании по нему вязких сред;

— с целью уменьшения результирующей погрешности, в частности инструментальной составляющей, необходимо рассмотреть возможность корректировки или изменения технологии изготовления преобразователя.

Следует отметить, что разработанный первичный преобразователь впервые используется для измерения массового расхода жидких сред. Полученные в ходе экспериментов численные значения частоты колебаний и чувствительности могут быть приняты в качестве исходных для дальнейших исследований.

В целом, наиболее стабильные показания преобразователь имеет при протекании жидкости с наименьшей плотностью и вязкостью. В данном случае таковой является вода, которая, кроме того, не относится к агрессивным средам и ее влияние в меньшей степени сказывается на состоянии внутренней поверхности измерительной трубки. Тем не менее не исключена возможность использования разработанного преобразователя для измерения массового расхода более вязких жидких сред.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кремлевский П. П.* Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник. СПб: Политехника, 2002. Кн. 2. 412 с.
2. *Горбоконеко В. Д., Шикина В. Е.* Исследование возможности использования цилиндрического пьезорезонатора для массового расходомера // Датчики и системы: Сб. докл. Междунар. конф. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2002. Т. 1.
3. *Аронов Б. С.* Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 272 с.
4. Пьезокерамические преобразователи / *В. В. Ганопольский, Б. А. Касаткин, Ф. Ф. Легуша* и др. Л.: Судостроение, 1984. 256 с.
5. Пат. 2248529 РФ. Массовый расходомер / *В. Д. Горбоконеко, В. Е. Шикина, А. В. Черный* // Б. И. 2005. № 8.
6. *Малов В. В.* Пьезорезонансные датчики. М.: Энергоатомиздат, 1989. 272 с.
7. *Шикина В. Е.* Расчет частоты колебаний пьезокерамического первичного преобразователя для массового расходомера жидкостей // Изв. вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2014. № 1. С. 54—63.
8. *Шикина В. Е.* Использование пьезоэлектрического материала для изготовления датчика массового расходомера жидкости // Вестн. УлГТУ. 2013. № 3. С. 72—74.
9. *Яффе Б.* Пьезоэлектрическая керамика. М.: Мир, 1974. 288 с.
10. *Шикина В. Е.* Изготовление цилиндрического пьезокерамического первичного преобразователя для массового расходомера жидкостей // Изв. вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2014. № 4. С. 93—101.
11. *Шарапов В. М.* Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера, 2006. 632 с.
12. *Ротта И. К.* Турбулентный пограничный слой в несжимаемой жидкости. Л.: Судостроение, 1967. 792 с.

13. Гургидов А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика): Учебник для вузов. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2002. 545 с.
14. Галицкий Б. М. Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках. М.: Машиностроение, 1977. 256 с.

**Сведения об авторе****Виктория Евгеньевна Шикина**

— УлГТУ, кафедра измерительно-вычислительных комплексов; ст. преподаватель; E-mail: shik7789@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
измерительно-вычислительных комплексовПоступила в редакцию  
29.06.16 г.**Ссылка для цитирования:** Шикина В. Е. Метрологические характеристики первичного преобразователя для массового расходомера жидкостей // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 1. С. 45—52.**METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF PRIMARY CONVERTER  
FOR MASS LIQUIDS FLOWMETER****V. E. Shikina***Ulyanovsk State Technical University, 432027, Ulyanovsk, Russia  
E-mail: shik7789@gmail.com*

Metrological characteristics of a prototype of primary piezoelectric converter made of non-metallic material are studied. Mathematical methods are used to derive the conversion function of mass liquid flow into oscillation frequency as well as the developed converter sensitivity. Experimentally obtained dependencies of the metrological characteristics on the mass flow rate and transition process duration for water, milk, beer, and antifreeze-40 are demonstrated. The main sources of methodological errors for the converter are considered, and dependence of the absolute error on the mass flow rate of the water is presented.

**Keywords:** primary converter, conversion function, sensitivity, frequency of oscillations, experiment, accuracy

**Data on author****Viktoriya E. Shikina**

— Ulyanovsk State Technical University, Department of Measuring-Computing Complexes; Senior Lecturer; E-mail: shik7789@gmail.com

**For citation:** Shikina V. E. Metrological characteristics of primary converter for mass liquids flowmeter // Izv. vuzov. Priborostroyeniye. 2017. Vol. 60, N 1. P. 45—52 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-1-45-52