

АНАЛИЗ И УТОЧНЕНИЕ МОДЕЛИ УРАВНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВИХРЕАКУСТИЧЕСКОГО РАСХОДОМЕРА

А.П. Лапин, К.В. Альшева

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Вихреакустические расходомеры широко применяются в сфере ЖКХ в силу своей малой чувствительности к качеству измеряемой среды. Однако, при малых расходах снижается стабильность процесса вихреобразования, что приводит к увеличению погрешности измерения расхода. В статье приведена модель уравнения измерения вихреакустического расходомера, полученная на основе стандартных экспериментальных испытаний расходомеров двух типов диаметров условного прохода: 32 и 50 мм. По экспериментальным данным, полученным при других режимах испытаний расходомеров, были уточнены коэффициенты модели уравнения измерения и подтверждена адекватность полученной ранее модели уравнения измерения для трех типов расходомеров (в том числе для диаметра 25 мм). В результате проведенных исследований показана принципиальная возможность снижения погрешности измерения на малых расходах с 3 % (паспортные данные) до 0,5 %.

Ключевые слова: вихреакустические расходомеры, модель уравнения измерения расхода, число Струхала.

Введение

В современных системах учета энергоресурсов расходомеры занимают ключевое положение. В сфере ЖКХ измеряемая среда зачастую имеет включения ржавчины, которые откладываются на стенках трубопровода. Вихревые расходомеры обладают самоочищающимся эффектом, в силу природы явления вихреобразования, что делает их применение для учета тепловой энергии более предпочтительным. Однако данный принцип измерения расхода обладает определенным недостатком. При малых скоростях движения измеряемой среды образование вихрей нестабильно, что увеличивает погрешность измерения в области малых расходов. Это обстоятельство обуславливает необходимость их усовершенствования для измерения в области малых расходов.

Исторически [1] методы исследования вихревых расходомеров были разделены на 3 направления: исследование конструкции тела обтекания [2] и проточной части [3] расходомера; исследование сенсора [4] и устройства обработки сигналов измерительной информации [5]; исследование уравнения измерения (функции преобразования) расходомеров [6]. Настоящая работа посвящена исследованию уравнения измерения вихреакустических расходомеров, как разновидности вихревых расходомеров.

Постановка задачи

Уравнение измерения (1) вихреакустического расходомера [7] имеет вид:

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \frac{1}{St} \cdot d \cdot f, \quad (1)$$

где Q – объемный расход, м³/с; D – диаметр проточной части, м; f – частота образования вихрей за телом обтекания, Гц; d – характерный размер тела обтекания, м; St – число Струхала, безразмерная величина.

Вихревые расходомеры принципиально предназначены для работы в области больших расходов, где число Струхала является постоянным [8, 9]. Значение числа Струхала в диапазоне малых расходов изменяется [7] в широких границах, что существенно влияет на погрешность измерений. У серийно выпускаемых расходомеров величина погрешности измерения в области малых расходов достаточно велика, она может достигать 3 %. Поэтому возникла необходимость исследования зависимости числа Струхала от частоты вихреобразования (величины расхода) в области малых расходов при различных температурах измеряемой среды.

Было проведено исследование [7] по стандартной методике десяти образцов вихреакустических расходомеров с диаметрами условного прохода (Ду): Ду 32 (5 шт.) и Ду 50 (5 шт.) на специальной поверочной установке, которая позволяет нагревать измеряемую среду. Эксперименты проводились при температуре измеряемой среды от 30 до 90 °С, с шагом в 10 °С. При каждой температуре были проведены испытания при четырнадцати режимах расхода жидкости.

Полученный в результате эксперимента массив данных позволил определить вид зависимости числа Струхали от частоты вихреобразования в рабочем диапазоне измерений. На рис. 1 изображена зависимость числа Струхали от частоты образования вихрей при различных температурах среды для одного из исследуемых образцов расходомеров

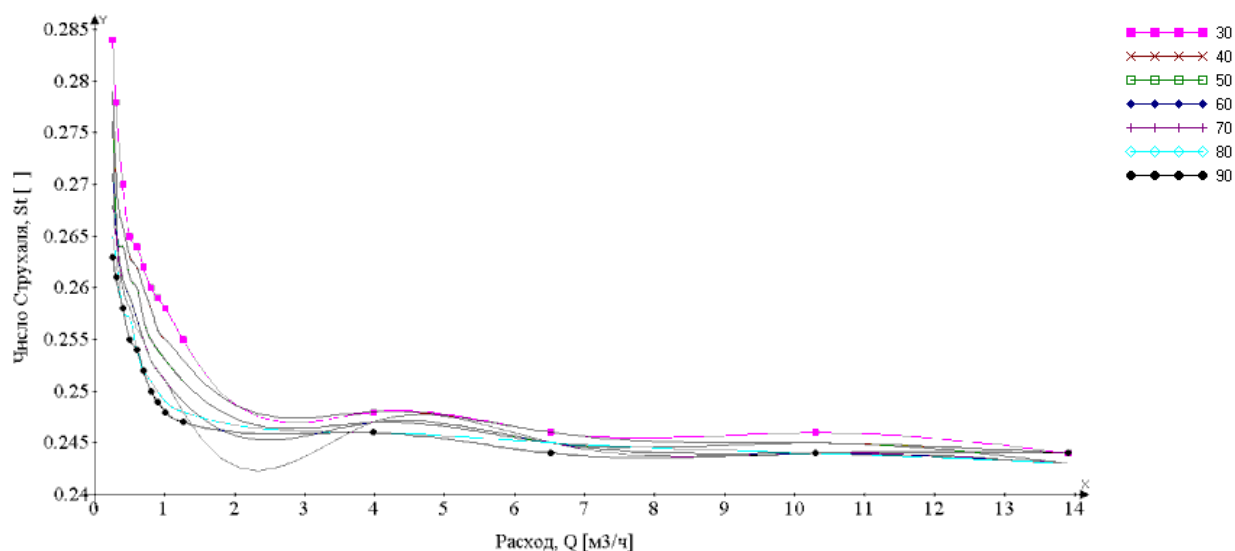


Рис. 1. Пример зависимости числа Струхали от частоты вихреобразования и температуры среды

Полученная зависимость числа Струхали от частоты вихреобразования и температуры измеряемой среды имеет вид [7]:

$$St(f, t) = a_0 + \frac{(b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2 + b_3 \cdot t^3)}{f} + \frac{a_2}{f^2} + \frac{a_3}{f^3}, \quad (2)$$

где $a_0, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3$ – коэффициенты модели, варьирующиеся в зависимости от типа Ду.

С учетом данной зависимости модель уравнения измерения (1) исследуемого вихреакустического расходомера может быть описана выражением (3):

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \frac{1}{a_0 + \frac{(b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2 + b_3 \cdot t^3)}{f} + \frac{a_2}{f^2} + \frac{a_3}{f^3}} \cdot d \cdot f. \quad (3)$$

Данная модель уравнения измерения была исследована с помощью методов математического моделирования, в результате чего было отмечено значительное снижение относительной погрешности измерения на диапазоне малых расходов с 3 % (паспортные данные) до 1,5 %.

Испытания расходомеров проводились по стандартной методике. Это привело к тому, что была упущена область переходных расходов, где число Струхали переходит из линейной области в нелинейную (расходы с 0,25 до 4 м³/ч – рис. 1). Возникла необходимость уточнения коэффициентов полученной ранее модели уравнения измерения с учетом наличия проблемного участка.

Уточнение коэффициентов модели уравнения измерения

Существующая стандартная методика экспериментальных исследований расходомеров обладает рядом существенных недостатков:

Инфокоммуникационные технологии и системы

1. Методика не включает исследование расходомеров с диаметром условного прохода (Ду) равным 25 мм.

2. Методика не позволяет оценить поведение числа Струхалия в зоне переходных (малых) расходов.

3. Значения расхода, при которых производились исследования, в соответствии с существующей методикой неравномерно распределены по всему диапазону измерений.

С целью исключения описанных выше недостатков была предложена новая методика проведения экспериментальных исследований.

В соответствии с табл. 1 проведено экспериментальное исследование 15 расходомеров трех типов диаметров условного прохода (Ду).

Режимы испытаний расходомеров

Таблица 1

Тип Ду	Расход, м ³ /ч											
25	0,18	0,3	0,4	0,6	1	1,4	1,8	2,3	4	5,5	7	
32	0,25	0,4	0,5	0,8	1,3	2	3	4	5	10	14	
50	0,4	0,6	0,8	1,25	2	3	4	6	8	15	23	

Для каждого режима расхода проводились исследования при температуре измеряемой среды от 30 до 90 °С с шагом 10 °С. Для каждого из трех типов диаметра условного прохода (Ду) было проведено исследование 5 расходомеров.

В результате для каждого датчика были получены зависимости погрешности измерения от величины расхода и температуры измеряемой среды (рис. 2), а на их основе трехмерная зависимость числа Струхалия от частоты вихреобразования и температуры (рис. 3).

Относительная погрешность рассчитана согласно выражению (4), где $Q_{\text{эт}}$ – показания эталонного расходомера при проведении испытаний, $Q_{\text{исп}}$ – значение расхода по показаниям испытанного расходомера, м³/ч:

$$\delta = \frac{Q_{\text{эт}} - Q_{\text{исп}}}{Q_{\text{эт}}} \cdot 100 \% \quad (4)$$

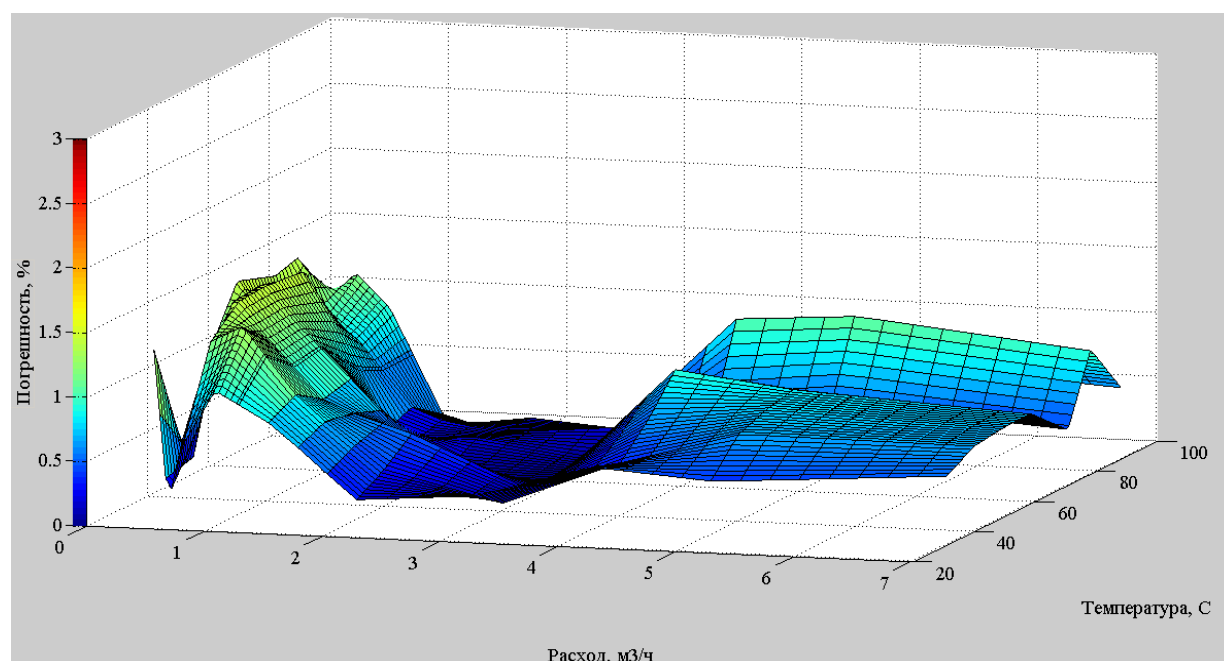


Рис. 2. Примерный вид зависимости относительной погрешности измерения расхода от температуры и величины расхода

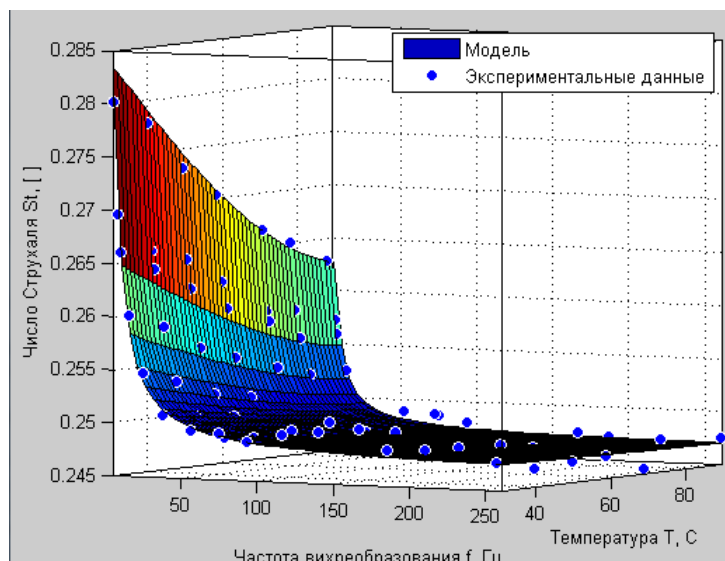


Рис. 3. Примерный вид зависимости числа Струхали от температуры и частоты вихреобразования

Уточненные коэффициенты модели (3) получены с помощью программы, написанной в среде MATLAB, на основе новых экспериментальных данных. Значения коэффициентов модели уравнения измерения (функции преобразования) расходомеров с диаметром условного прохода (Ду) 25 представлены в табл. 2, для Ду 32 – в табл. 3, для Ду 50 – в табл. 4. Также в таблицах указаны усредненные значения коэффициентов новой модели функции преобразования.

Таблица 2

Значение коэффициентов модели функции преобразования для Ду 25

№ расходомера	a_0	a_2	a_3	b_0	b_1	b_2	b_3
3**414	0,229104	-0,746550581	5,453287	0,676457	-0,01846	0,000224	-1,01E-06
3**415	0,230736	1,117378488	-3,94241	0,37238	-0,0097	9,71E-05	-3,97E-07
3**416	0,230916	0,107282646	0,697225	0,469303	-0,00904	6,61E-05	-1,66E-07
3**417	0,228375	0,216582843	-0,16903	0,524177	-0,01177	9,72E-05	-2,43E-07
3**418	0,230123	2,087457711	-9,38907	0,339821	-0,00853	6,10E-05	-1,35E-07
Среднее	0,229851	0,556430221	-1,47	0,476428	-0,0115	1,09E-04	-3,91E-07

Таблица 3

Значение коэффициентов модели функции преобразования для Ду 32

№ расходомера	a_0	a_2	a_3	b_0	b_1	b_2	b_3
3**419	0,246827	0,355524174	-1,32243	0,235434	-0,00209	-1,44E-05	1,77E-07
3**420	0,247022	0,583839934	-2,21436	0,215874	-0,00263	1,26E-06	6,95E-08
3**421	0,247658	0,829835726	-2,96806	0,206234	-0,00342	2,45E-05	-1,23E-07
3**422	0,245832	0,889083338	-2,93511	0,203511	-0,00319	8,25E-06	2,93E-08
3**423	0,246247	0,627192406	-2,22359	0,361739	-0,01073	1,44E-04	-7,50E-07
Среднее	0,246717	0,657095116	-2,33271	0,244558	-0,00441	3,27E-05	-1,19E-07

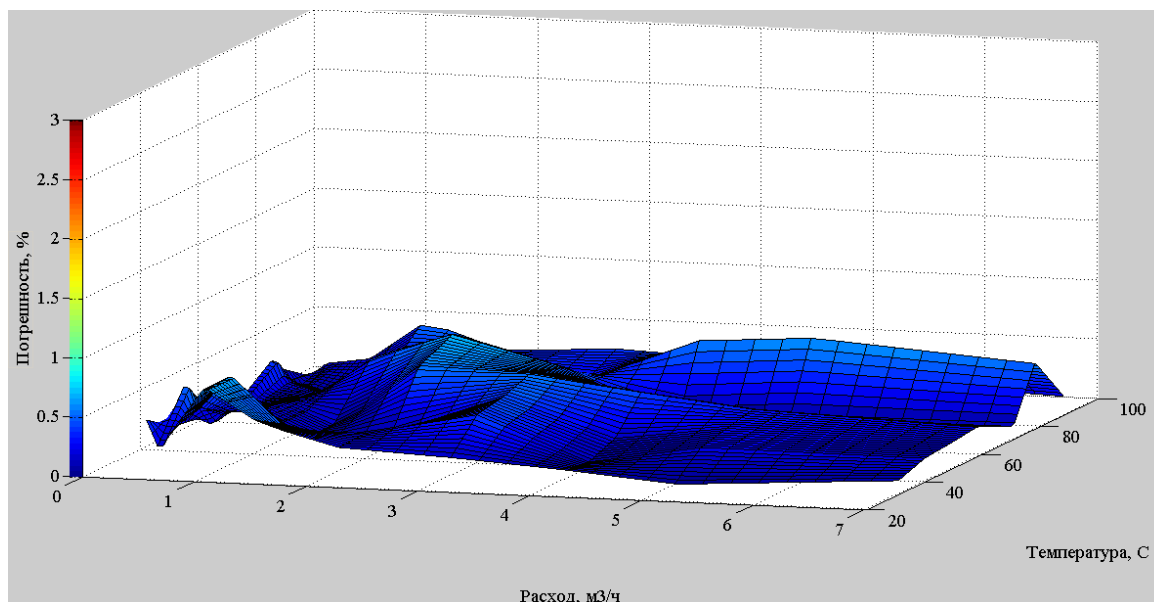
Таблица 4

Значение коэффициентов модели функции преобразования для Ду 50

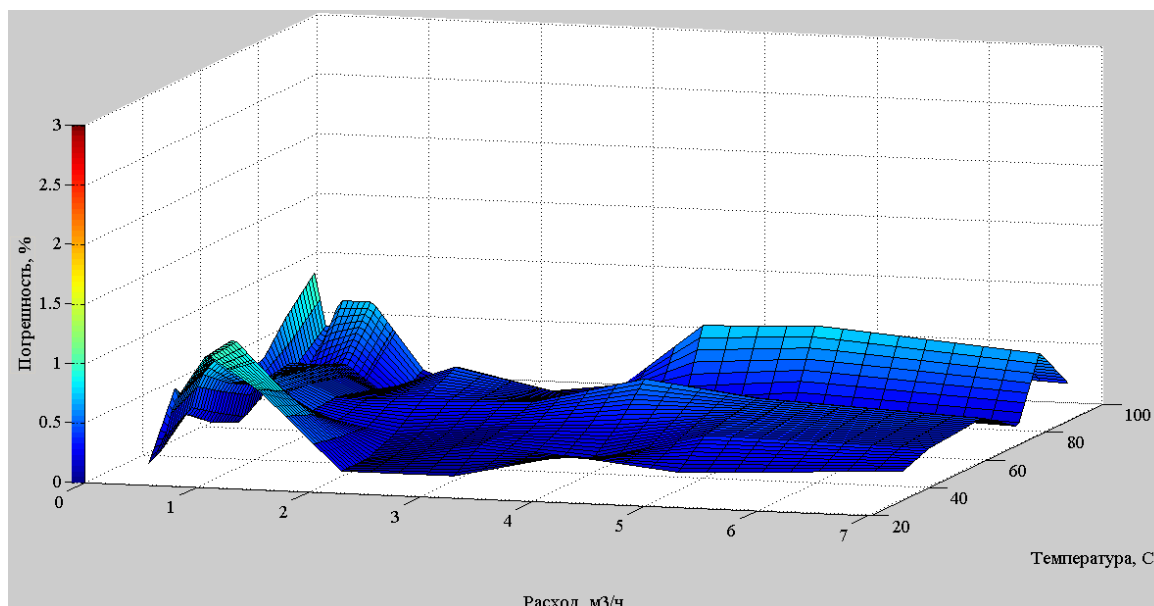
№ расходомера	a_0	a_2	a_3	b_0	b_1	b_2	b_3
3**424	0,338355	0,191614133	-0,35135	0,220715	-0,00566	5,86E-05	-2,16E-07
3**425	0,340667	0,113999664	-0,22073	0,225116	-0,00589	7,59E-05	-3,97E-07
3**426	0,341609	0,215236499	-0,36152	0,223783	-0,00697	9,02E-05	-4,40E-07
3**427	0,337533	0,074265447	-0,15492	0,231476	-0,00614	7,65E-05	-3,56E-07
3**428	0,342667	0,342371994	-0,55368	0,183248	-0,00646	9,41E-05	-5,25E-07
Среднее	0,340166	0,187497547	-0,32844	0,216868	-0,00622	7,91E-05	-3,87E-07

С помощью методов математического моделирования была проверена адекватность модели уравнения измерения относительно экспериментальных данных, а также изучено влияние на точность модели индивидуальных и усредненных коэффициентов.

На рис. 4, а представлен результат моделирования погрешности расходомера с диаметром условного прохода Ду 32 с учетом индивидуальных коэффициентов, а на рис. 4, б представлен результат моделирования погрешности этого же расходомера с учетом усредненных значений коэффициентов по всем пяти расходомерам.



а)



б)

Рис. 4. Пример зависимости относительной погрешности измерения расхода от температуры среды и величины расхода: а – с учетом индивидуальных коэффициентов; б – с учетом усредненных коэффициентов

Исследование показало, что новая методика проведения испытаний позволила уточнить уравнение измерения вихреакустического расходомера и снизить погрешность измерения на малых расходах до 0,5 %. При этом отмечено, что при использовании индивидуальных коэффициентов точность измерения расхода выше, чем при использовании усредненных коэффициентов по всем пяти расходомерам.

Заключение

В настоящей работе проанализирована модель уравнения измерения вихреакустического расходомера, полученная на основе экспериментальных исследований расходомеров двух типов диаметров условного прохода: 32 и 50 мм. Применение этой модели, по сравнению с используемой в настоящее время в расходомерах, позволяет снизить погрешность измерения расхода в 2 раза: с 3 % (паспортные данные) до 1,5 %. Авторами была изменена методика исследования расходомеров и на основе полученных новых экспериментальных данных подтверждена адекватность предложенной ранее модели уравнения измерения для трех типов расходомеров (в том числе и Ду 25). В результате исследований были уточнены коэффициенты модели уравнения измерения, что позволило дополнительно снизить погрешность измерения – до 0,5 % на малых расходах.

Следует отметить, что экспериментальный стенд, на котором производились исследования расходомеров при различных температурах измеряемой среды, не позволяет проводить изучение расходомеров с диаметром условного прохода больше 50 мм. Поэтому следующим шагом в процессе уточнения уравнения измерения становится моделирование течения жидкости в проточной части вихреакустического расходомера с Ду больше 50 мм. Это позволит уточнить модель уравнения измерения расходомеров для всех выпускаемых типов Ду.

Литература

1. Pankanin, G.L. *The vortex flowmeter: various methods of investigating phenomena* / G.L. Pankanin // *Measurement science and technology*. – 2005. – No. 16. – R1–R16.
2. Yamasaki, H. *The vortex flowmeter* / H. Yamasaki, M. Rubin // *Flow Measurement and Control in Science and Industry (USA)*. – 1974. – P. 975–983.
3. Cousins, T. *A linear and accurate flowmeter using vortex shedding* / T. Cousins, S.A. Foster, P.A. Johnson // *Proc. Power Fluid for Process Control Symposium, Inst. Measurement and Control, Guildford, UK*. – 1973. – P. 45–56.
4. Вихревые расходомеры digitalYEWFLOW Компании «Июкогава». – <http://www.rsk-k.ru/journals.html>.
5. Chen, J. *Vortex signal processing method with dual channel* / J. Chen, K. Min, L. Zhong // *Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. – 2011. – P. 2833–2837.
6. Yi, Y. *An improved intelligent calibration method for vortex flowmeter* / Y. Yi, W. Huifeng // *American Control Conference, 2007. ACC'07*. – IEEE, 2007. – P. 2927–2931.
7. Лапин, А.П. Анализ зависимости числа Струхала в уравнении измерения вихреакустического расходомера / А.П. Лапин, А.М. Дружков, К.В. Кузнецова // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии управление, радиоэлектроника»*. – 2013. – Т. 13, № 4. – С. 70–77.
8. Кремлевский, П.П. *Расходомеры и счетчики количества: справ.* / П.П. Кремлевский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.
9. Baker, R.C. *Flow measurement handbook* / R.C. Baker. – New York: Cambridge University Press, 2000. – 524 p.

Лапин Андрей Павлович, канд. техн. наук, доцент кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; a_lapin@mail.ru.

Альшева Кристина Витальевна, аспирант кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; kristi.kuznetsova@gmail.com.

Поступила в редакцию 24 ноября 2016 г.

ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF THE MEASUREMENT EQUATION MODEL FOR VORTEX SONIC FLOWMETERS

A.P. Lapin, a_lapin@mail.ru,

K.V. Alsheva, kristi.kuznetsova@gmail.com

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Vortex sonic flowmeters are widely used in the housing and communal services field due to their low sensitivity to the quality of the medium. But at low flow rates the stability of the vortex shedding process decreases and as a result the flow measurement error increase. The article describes the measurement equation model received on the basis of the standard experimental test two types of vortex sonic flowmeters nominal diameters: 32 and 50 mm. According to other experimental data measurement equation model was improved and verified for the three types of flowmeters diameters (including 25 mm). As a result of the research shows the fundamental possibility of reducing the measurement error at low flow rates from 3 % (passport) to 0.5 %.

Keywords: vortex sonic flowmeters, flow measurement equation model, the Strouhal number.

References

1. Pankanin G.L. [Vortex Flowmeter: Various Methods of Investigating Phenomena]. *Measurement Science and Technology*, 2005, no. 16, pp. 1–16. (in Russ.)
2. Yamasak H., Rubin M. Vortex Flowmeter. *Flow Measurement and Control in Science and Industry*. ISA, 1974, pp. 975–983.
3. Cousins T., Foster S.A., Johnson P.A. A Linear and Accurate Flowmeter Using Vortex Shedding. *Proc. of Power Fluid for Process Control Symposium*, Inst. Measurement and Control, Guildford, UK, 1973, pp. 45–56.
4. *Vikhrevyye raskhodomery digitalYEWFL0 kompanii Yokogawa* [Vortex Flowmeters digitalYEWFL0 of Yokogawa Company]. Available at: <http://www.rsk-k.ru/journals.html>.
5. Chen J., Min K., Zhong L. Vortex Signal Processing Method with Dual Channel. *Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 2011, pp. 2833–2837.
6. Yi Y., Huifeng W. An Improved Intelligent Calibration Method for Vortex Flowmeter. *American Control Conference*, 2007. ACC'07, IEEE, 2007, pp. 2927–2931. DOI: 10.1109/acc.2007.4282171
7. Lapin A.P., Druzhkov A.M., Kuznetsova K.V. Analysis of the Dependence of the Strouhal Number in the Measurement Equation for Vortex Sonic Flowmeters. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2013, vol. 13, no. 4, p. 70–77. (in Russ.)
8. Kremlevskiy P.P. *Raskhodomery shchetchiki kolichestva: Spravochnik* [Flowmeters and Counters: Handbook]. Leningrad: Mashinostroenie, 1989. 701 p.
9. Baker R.C. *Flow Measurement Handbook*. New York, Cambridge University Press, 2000. 524 p. DOI: 10.1017/CBO9780511471100

Received 24 November 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Лапин, А.П. Анализ и уточнение модели уравнения измерения вихреакустического расходомера / А.П. Лапин, К.В. Альшева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 42–48. DOI: 10.14529/ctcr170105

FOR CITATION

Lapin A.P., Alsheva K.V. Analysis and Improvement of the Measurement Equation Model for Vortex Sonic Flowmeters. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 42–48. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr170105