

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ЧИСЛА СТРУХАЛЯ В УРАВНЕНИИ ИЗМЕРЕНИЯ ВИХРЕАКУСТИЧЕСКОГО РАСХОДОМЕРА

А.П. Лапин, А.М. Дружков, К.В. Кузнецова

Проведено исследование зависимости числа Струхалия в широком диапазоне измерения расходомера при различных температурах измеряемой среды. Установлено, что значение числа Струхалия не является постоянным на всем диапазоне измерения и обладает значительной нелинейностью в области малых расходов. С использованием показателей качества осуществлен выбор наилучшей математической модели, описывающей зависимость числа Струхалия от расхода при различных температурах.

Проведено сравнение выбранной математической модели функции преобразования с используемой в настоящее время в серийном производстве расходомеров. Представление числа Струхалия в виде нелинейной функции в зависимости от частоты образования вихрей и температуры измеряемой среды позволяет значительно сократить погрешность измерения на малых расходах. Предложен способ адаптации нелинейной функции преобразования исследованных расходомеров для расходомеров с большим диаметром проточной части.

Ключевые слова: вихреакустические расходомеры, функция преобразования, число Струхалия, взвешенный метод наименьших квадратов.

Введение

Широкое применение для измерения расхода жидкостей находят вихревые расходомеры, принцип работы которых основан на образовании вихрей за телом обтекания и последующем детектировании этих вихрей [1–3]. Задача расширения диапазона измерения таких расходомеров в сторону малых расходов является актуальной [4, 5]. Однако погрешность измерения на малых расходах возрастает и зачастую выходит за допустимые границы.

Тело обтекания в вихревом расходомере является наиболее значимой частью конструкции, определяющей метрологию расходомера. Обзор наиболее известных исследований, посвященных выбору формы и параметров тела обтекания, можно найти в [1, 2].

Известен ряд работ, посвященных аппаратным решениям [6–8], улучшающим качество детектирования образующихся вихрей, что повышает точность измерения на малых расходах. Дополнительно к аппаратным методам возможна цифровая обработка сигналов [4, 5] с сенсора расходомера, увеличивающая соотношение сигнал/шум, что также улучшает качество измерения малых расходов.

Одним из наиболее простых и наименее затратных путей повышения точности измерения на малых расходах являются алгоритмические методы, связанные с анализом уравнения измерения и правильным выбором функции преобразования (ФП) расходомера. Подобный подход был использован в задачах снижения погрешности измерения давления [9] и оказался весьма продуктивным.

1. Постановка задачи

В основу уравнения измерения [10] расходомеров объемного расхода положено следующее выражение:

$$Q = S v, \quad (1)$$

где Q – объемный расход, м³/с; S – площадь поперечного сечения проточной части расходомера, м²; v – скорость потока измеряемой среды, м/с.

Площадь поперечного сечения проточной части расходомера выражается формулой $S = (\pi D^2)/4$, где D – диаметр проточной части, м. Скорость потока измеряемой среды в вихревых расходомерах пропорциональна частоте вихреобразования за телом обтекания [1, 2] и определяется выражением

$$v = \frac{f d}{St}, \quad (2)$$

где f – частота образования вихрей за телом обтекания, Гц; d – характерный размер тела обтекания, м; St – число Струхалия, безразмерная величина.

Тогда уравнение измерения (1) принимает следующий вид:

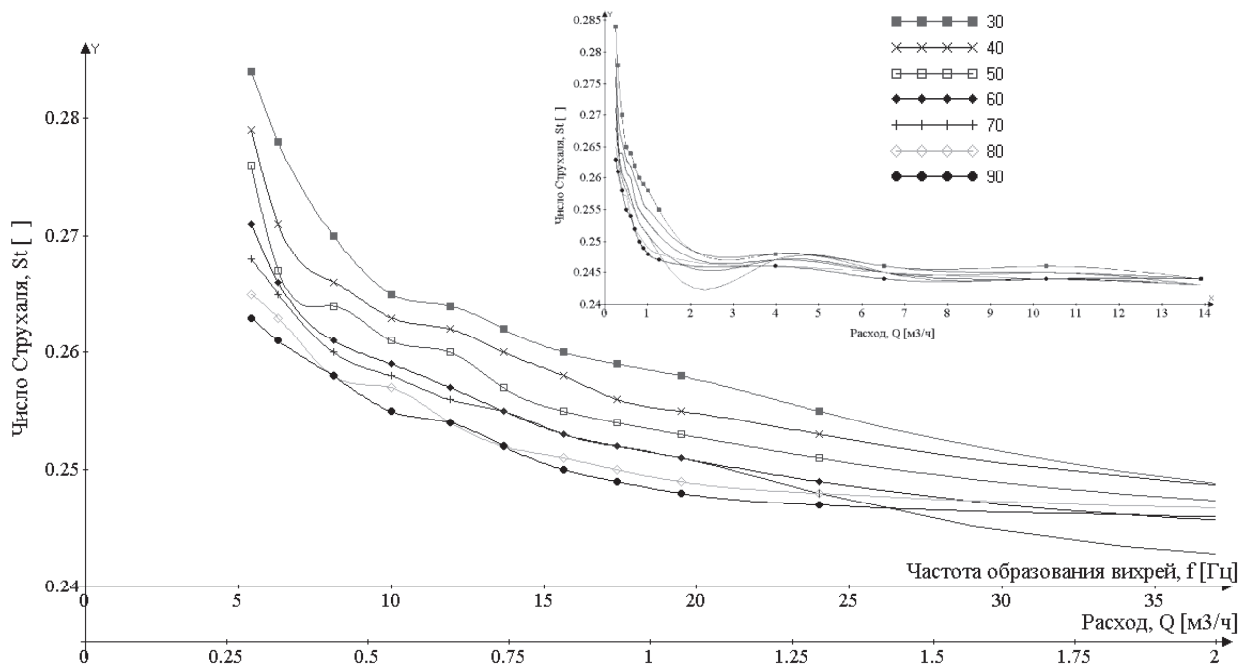
$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 \frac{1}{St} d f. \quad (3)$$

Большинство вихревых расходомеров предназначены для работы в области больших расходов (для чисел Рейнольдса более 10 000), где число Струхалия является постоянным [1, 2]. Чувствительность вихревых расходомеров с ультразвуковым детектированием вихрей (вихреакустические расходомеры) значительно выше, чем у традиционных вихревых расходомеров [11], поэтому для таких расходомеров возможно увеличение диапазона измерений в сторону малых расходов. При этом значение числа Струхалия в диапазоне измерения расходомера изменяется в широких границах. Возникает необходимость исследования зависимости числа Струхалия от частоты вихреобразования (величины расхода), а также температуры измеряемой среды.

2. Экспериментальные данные

В работах [12, 13] описана методика испытаний и приведены результаты опытов на специальной расходомерной установке, позволяющей осуществлять нагрев измеряемой среды. Таким испытаниям подверглись десять образцов вихреакустических расходомеров двух различных диаметров условного прохода (D_u): 32 мм, 50 мм. Эксперименты проводились при семи различных значениях температуры измеряемой среды: от 30 до 90 °С, с шагом в 10 °С. Точность установки температуры измеряемой среды ± 3 °С. На каждой из температурных точек проводились измерения на 14 режимах расхода.

В результате проведенных испытаний был получен массив данных, подобный описанному в работе [13]. На рис. 1 представлено семейство кривых числа Струхалия при различных температурах для одного из вихреакустических расходомеров с диаметром условного прохода (D_u) 32 мм.



Анализ полученных результатов показал, что при малых расходах значение числа Струхалия изменяется нелинейно в зависимости от частоты вихреобразования f и в зависимости от температуры измеряемой среды t .

3. Исследование зависимости числа Струхала

Внешний вид семейства кривых, приведенных на рис. 1, позволяет предположить, что зависимость числа Струхала от частоты образования вихрей имеет гиперболический характер, а его зависимость от температуры можно описать полиномом. Для анализа были выбраны 10 математических моделей, результаты применения которых сведены в таблицу.

Исследуемые модели и их показатели качества

№	Модель	σ^2	R^2	$\delta, \%$
1	$a_0 + \frac{a_1}{f} + b_1 t$	52,75 e-05	0,9345	1,864
2	$a_0 + \frac{b_1 t}{f} + \frac{a_2}{f^2}$	428,4 e-05	0,4678	7,004
3	$a_0 + \frac{b_0 + b_1 t}{f} + \frac{a_2}{f^2}$	15,38 e-05	0,9809	1,432
4	$a_0 + \frac{b_0 + b_1 t + b_2 t^2}{f} + \frac{a_2}{f^2}$	10,67 e-05	0,9867	6,947
5	$a_0 + \frac{b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3}{f} + \frac{a_2}{f^2}$	10,36 e-05	0,9871	6,524
6	$(b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3) + \frac{a_1}{f} + \frac{a_2}{f^2} + \frac{a_3}{f^3}$	46,7 e-05	0,9419	1,729
7	$a_0 + \frac{b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3}{f} + \frac{a_2}{f^2} + \frac{a_3}{f^3}$	1,23 e-05	0,9986	0,350
8	$a_0 + \frac{a_1}{f} + \frac{b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3}{f^2} + \frac{a_3}{f^3}$	31,84 e-05	0,9604	1,356
9	$a_0 + \frac{a_1}{f} + \frac{a_2}{f^2} + \frac{b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3}{f^3}$	50,33 e-05	0,9375	1,645
10	$a_0 + \frac{b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4}{f} + \frac{a_2}{f^2} + \frac{a_3}{f^3} + \frac{a_4}{f^4}$	0,98 e-05	0,9987	0,355

Поиск значений коэффициентов исследуемых моделей производился с помощью взвешенного метода наименьших квадратов [14]. Качество модели оценивалось с помощью следующих показателей: суммы квадратов ошибок σ^2 , коэффициента детерминации R^2 [15], относительной погрешности аппроксимации δ модели (максимальное отклонение зависимости значения числа Струхала от частоты и температуры, полученного с использованием модели, от его зависимости, полученной экспериментальным путем, выраженное в процентах)

$$\delta = \max \left(\frac{St_{\text{модели}} - St_{\text{опыт}}}{St_{\text{опыт}}} \cdot 100 \% \right), \tag{4}$$

где $St_{\text{модели}}$ – значение числа Струхала, рассчитанное с использованием модели; $St_{\text{опыт}}$ – значение числа Струхала, полученное в результате эксперимента.

Выбор вида математической модели осуществлялся на основе анализа величины показателей, приведенных в таблице. Наилучшей из исследованных моделей признана модель № 7. Следует отметить, что увеличение степеней частоты образования вихрей f и температуры измеряемой среды t (модель № 10), входящих в модель, не дает улучшения качества модели.

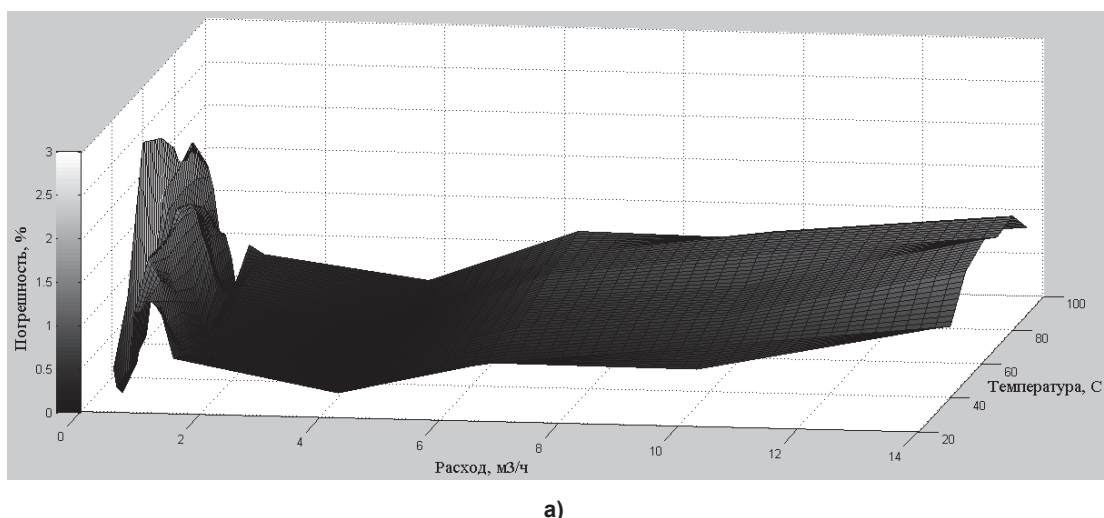
Зависимость числа Струхала от температуры и частоты принимает следующий вид:

$$St(f, t) = a_0 + \frac{b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3}{f} + \frac{a_2}{f^2} + \frac{a_3}{f^3}. \quad (5)$$

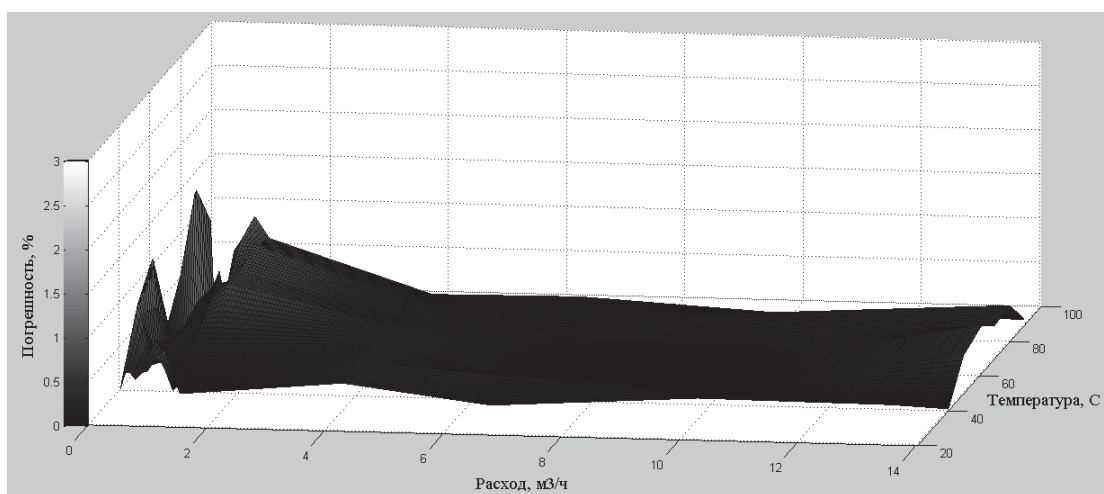
С учетом данного исследования модель уравнения измерения (3) может быть описана выражением (6):

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 \frac{1}{a_0 + \frac{b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3}{f} + \frac{a_2}{f^2} + \frac{a_3}{f^3}} d f. \quad (6)$$

Было проведено исследование новой модели функции преобразования, полученной на основе выражения (6), путем сравнения с существующей моделью функции преобразования, используемой в настоящее время в серийном производстве расходомеров. На рис. 2 и 3 представлена зависимость погрешности измерения от величины расхода и температуры для расходомеров с диаметрами условного прохода 32 и 50 мм. Результаты проведенного исследования показали, что применение новой модели функции преобразования для вихреакустического расходомера позволит снизить погрешность измерения на малых расходах – с 3 до 1,5 %, на больших расходах – с 1 до 0,7 %.

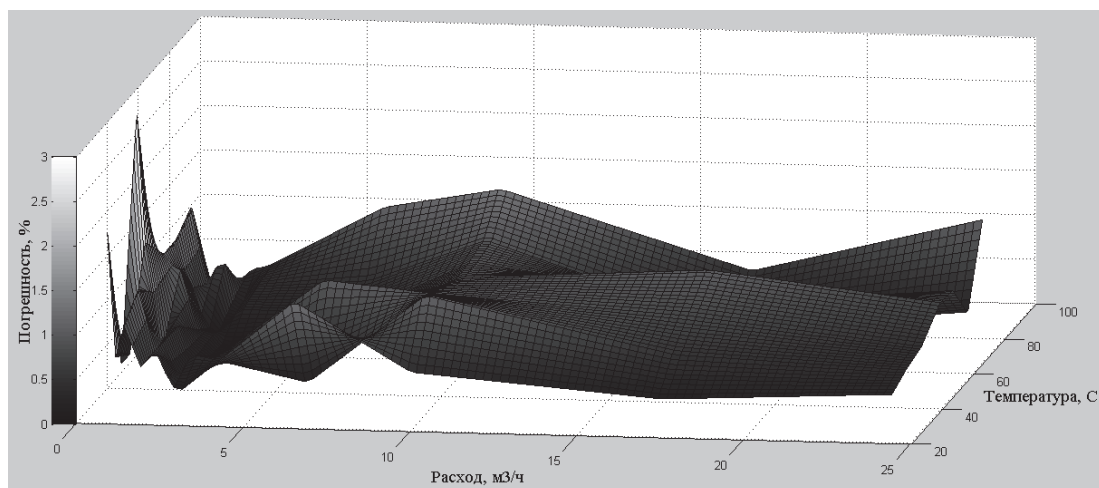


а)

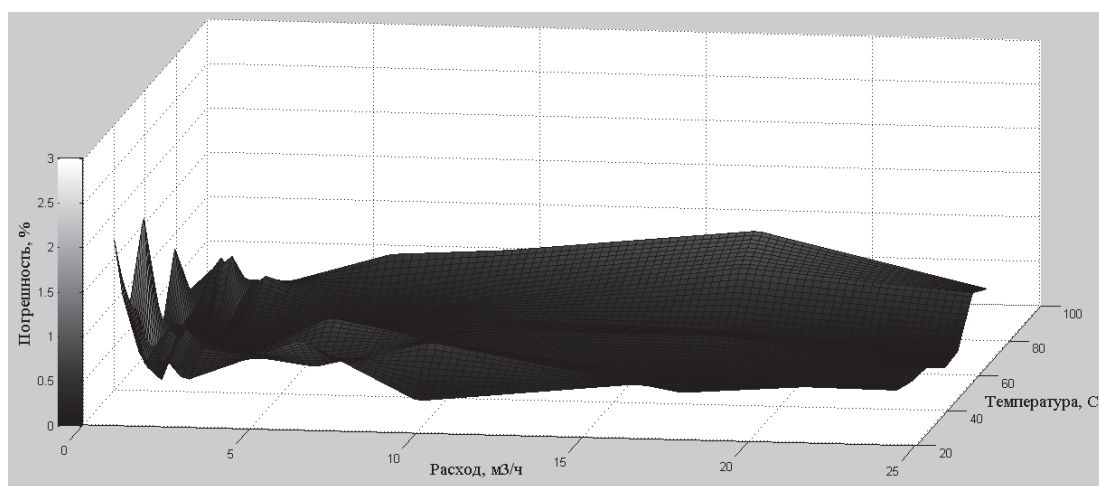


б)

**Рис. 2. Зависимость погрешности измерения от величины расхода и температуры:
а – для используемой модели ФП; б – новой модели ФП (Ду = 32 мм)**



а)



б)

Рис. 3. Зависимость погрешности измерения от величины расхода и температуры:
а – для используемой модели ФП; б – новой модели ФП (Ди = 50 мм)

4. Адаптация модели функции преобразования для расходомеров с большим диаметром проточной части

Испытание расходомеров при различных температурах измеряемой среды является дорогостоящим и протяженным во времени экспериментом. С увеличением диаметра условного прохода расходомера испытания на горячеводном стенде становятся сложными с технической точки зрения и еще более дорогостоящими. Вследствие этого, актуальной становится задача моделирования течения жидкости через проточную часть расходомера с большими диаметрами условного прохода.

Преимуществом полученного уравнения измерения вида (6) является возможность получения функции преобразования расходомера на этапе его проектирования. С помощью средств численного моделирования можно найти зависимость числа Струхала для вихреакустического расходомера в широких пределах измерения, а затем использовать ее для построения функции преобразования.

Ввиду отсутствия технической возможности проведения испытаний для расходомеров с большими Ду, требуется создать адекватную модель расходомера для малых Ду (до 50 мм), поведение которой можно проверить экспериментально для различных температур измеряемой среды. Масштабируя геометрические размеры проточной части расходомера, можно провести численные эксперименты для больших Ду с целью установления зависимости числа Струхала. На основе полученных данных, согласно методике описанной в настоящей статье, можно построить функции преобразования для расходомеров с большим диаметром условного прохода.

Заключение

Проведено исследование зависимости числа Струхалия в широком диапазоне измерения расходомера при различных температурах измеряемой среды. Установлено, что значение числа Струхалия не является постоянным на всем диапазоне измерения и обладает значительной нелинейностью в области малых расходов. Описание числа Струхалия в виде выражения (5) в зависимости от частоты образования вихрей и температуры измеряемой среды позволяет значительно сократить погрешность измерения на малых расходах.

В уравнение измерения вихреакустического расходомера также входят и геометрические параметры проточной части (характерный размер тела обтекания и диаметр проточной части). В работе [16] показано влияние температуры измеряемой среды на линейные размеры проточной части расходомера, что также заслуживает изучения.

Литература

1. Кремлевский, П.П. *Расходомеры и счетчики количества: справ.* / П.П. Кремлевский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.
2. Baker, R.C. *Flow measurement handbook* / R.C. Baker. – New York: Cambridge University Press, 2000. – 524 p.
3. Pankanin, G.L. *The vortex flowmeter: various methods of investigating phenomena* / G.L. Pankanin // *Measurement science and technology*. – 2005. – No. 16. – P. R1–R16.
4. *Improvement of the HHT method and application in weak vortex signal detection* / D. Zheng, T. Zhang, J. Xing, J. Mei // *Measurement science and technology*. – 2007. – №18 – P. 2769–2776.
5. Sun, H. *Digital signal processing based on wavelet and statistics method for vortex flowmeters* / H. Sun, T. Zhang // *Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. – 2004. – P. 3160–3163.
6. Poremba, A. *Robust vortex flowmeter based on a parametric frequency estimator* / A. Poremba, F. Blischke // *International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation. Power Electronics and Motion Control*. – 1992. – Vol. 3. – P. 1541–1544.
7. *Ultrasonic vortex flowmeter ultra yewflo-ULF200* / T. Kawano, Y. Matsunaga, T. Andon, A. Yasu-matsu // *Yokogawa Technical Report English Edition*. – 1998. – No. 25. – P. 23–25.
8. De-ming, H. *A Vortex Flowmeter Based on Multiprocessor Technique* / H. De-ming, L. Wen-jun, Zh. Yong-jun // *International Conference on Networking and Information Technology*. – 2010. – P. 322–325.
9. Лапина, Е.А. *Алгоритмы обработки информации при выборе и обосновании функции преобразования измерительных преобразователей давления для АСУ ТП: автореф. дис. ... канд. техн. наук.* – Челябинск, 2011. – 21 с.
10. РМГ 29-99 ГСИ. *Метрология. Основные термины и определения.* – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 59 с.
11. Volker, H. *Comparison of pressure and ultrasound measurements in vortex flow meters* / H. Volker, H. Windorferb // *Measurement*. – 2003. – № 33. – P. 121–133.
12. Лапин, А.П. *Выбор модели функции преобразования вихреакустических расходомеров* / А.П. Лапин, А.М. Дружков // *Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Компьютерные технологии управление, радиоэлектроника»*. – 2012. – Вып. 17, № 35 (294). – С. 161–164.
13. Лапин, А.П. *Выбор и исследование двухфакторной модели функции преобразования вихреакустических расходомеров* / А.П. Лапин, А.М. Дружков // *Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Компьютерные технологии управление, радиоэлектроника»*. – 2013. – Т.13, № 3. – С. 4–12.
14. Лапин, А.П. *Применение взвешенного метода наименьших квадратов при исследовании функции преобразования вихреакустических расходомеров* / А.П. Лапин, А.М. Дружков // *Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Компьютерные технологии управление, радиоэлектроника»*. – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 109–112.
15. Дрейпер, Н. *Прикладной регрессионный анализ: в 2 кн.* / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Финансы и статистика, 1986. – Кн. 2. – 351 с.
16. *Calibration of an ultrasonic flowmeter for hot water* / K. Tawackolian, O. Bükler, J. Hogen-doorn, T. Lederer // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2012. – No. 33. – P. 166–173.

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

Дружков Александр Михайлович, аспирант кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); sandrurz@gmail.com.

Кузнецова Кристина Витальевна, магистрант кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); kristi.kuznetsova@gmail.com.

Bulletin of the South Ural State University
Series "Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics"
2013, vol. 13, no. 4, pp. 70–77

ANALYSIS OF THE DEPENDENCE OF THE STROUHAL NUMBER IN THE MEASUREMENT EQUATION FOR VORTEX SONIC FLOWMETERS

A.P. Lapin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
a_lapin@mail.ru,

A.M. Druzhkov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
sandrurz@gmail.com,

K.V. Kuznetsova, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
kristi.kuznetsova@gmail.com

The article describes a study of the Strouhal number in a wide range of flow measurement at different temperatures of the medium. It is established that the value of the Strouhal number is not constant over the entire range of measurement and has significant non-linearity at low flow. With the use of quality indicators was done choosing the best mathematical model describing the dependence of the Strouhal number of the flow rate at different temperatures.

A comparison of the chosen mathematical model conversion function with the currently used in mass production flow was done. Description of Strouhal number in the form of non-linear functions, depending on the frequency of vortex shedding and fluid temperature, can significantly reduce the measurement error at low flow. We proposed a method for adapting a nonlinear conversion function of the investigated flow for meters with a large diameter flow section.

Keywords: vortex sonic flowmeters, conversion functions, the Strouhal number, weighted least squares method.

References

1. Kremlevskiy P.P. *Raskhodometry i schetchiki kolichestva: spravochnik* [Flowmeters and Counters: Hand-book]. Leningrad: Mashinostroenie, 1989. 701 p.
2. Baker R.C. *Flow Measurement Handbook*. New York: Cambridge University Press, 2000. 524 p.
3. Pankanin G.L. The Vortex Flowmeter: Various Methods of Investigating Phenomena. *Measurement Science and Technology*, 2005, no. 16, pp. R1–R16.
4. Zheng D., Zhang T., Xing J., Mei J. Improvement of the HHT Method and Application in Weak Vortex Signal Detection. *Measurement Science and Technology*, 2007, no. 18, pp. 2769–2776.
5. Sun H., Zhang T. Digital Signal Processing Based on Wavelet and Statistics Method for Vortex Flowmeters. *Proc. of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2004, pp. 3160–3163.
6. Poremba A., Blischke F. *Robust Vortex Flowmeter Based on a Parametric Frequency Estimator*. International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation, Power Electronics and Motion Control, 1992, vol. 3, pp. 1541–1544.

7. Kawano T., Matsunaga Y., Andon T., Yasumatsu A. Ultrasonic Vortex Flowmeter ultra Yewflo-ULF200. *Yokogawa Technical Report English Edition*, 1998, no. 25, pp. 23–25.
8. De-ming H., Wen-jun L., Yong-jun Zh. A Vortex Flowmeter Based on Multiprocessor Technique. *International Conference on Networking and Information Technology*, 2010, pp. 322–325.
9. Lapina, E.A. *Algoritmy obrabotki informatsii pri vybore i obosnovanii funktsii preobrazovaniya izmeritel'nykh preobrazovateley davleniya dlya ASU TP* [Information Processing Algorithms at a Choice and Justification of Transformation Function of Pressure Measuring Converters for Industrial Control System]: *avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk*. Chelyabinsk, 2011. 21 p.
10. RMG 29-99 GSI. *Metrologiya. Osnovnye terminy i opredeleniya* [Main thermions and definitions]. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2000. 59 p.
11. Volker H., Windorferb H. Comparison of Pressure and Ultrasound Measurements in Vortex Flow Meters. *Measurement*, 2003, no. 33, pp. 121–133.
12. Lapin, A.P., Druzhkov A.M. Selection of Model for Conversion Function of Vortex Sonic Flowmeters [Vybor modeli funktsii preobrazovaniya vikhreakusticheskikh raskhodomerov]. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Computer Technologies, Automatic Control & Radio Electronics"*, 2012, vol. 17, no 294, pp. 161–164. (in Russian)
13. Lapin, A.P., Druzhkov A.M. Selection and Research of Two-factor Model for Conversion Function of Vortex Sonic Flowmeters [Vybor i issledovaniye dvuhfaktornoy modeli funktsii preobrazovaniya vikhreakusticheskikh raskhodomerov]. *Bulletin of the South Ural State University. Series «Computer Technologies, Automatic Control & Radio Electronics»*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 4–12. (in Russian)
14. Lapin, A.P., Druzhkov A.M. Usage of Weighted Least Squares Method Conversion Functions for Vortex Sonic Flowmeters Research [Primeneniye vzveshennogo metoda naimen'shikh kvadratov pri issledovanii funktsii preobrazovaniya vikhreakusticheskikh raskhodomerov]. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Computer Technologies, Automatic control & Radio Electronics"*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 109–112.
15. Draper N. *Prikladnoy regressionnyy analiz: v 2 kn.* [Applied Regression Analysis]. Moscow, Finansy i statistika, 1986, kn. 2. 351 p.
16. Tawackolian, K. Calibration of an Ultrasonic Flowmeter for hot water / K. Tawackolian, O. Bükler, J. Hogendoorn, T. Lederer. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2012, no. 33, pp. 166–173.

Поступила в редакцию 2 сентября 2013 г.