

МЕТОДЫ И ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИХРЕВЫХ РАСХОДОМЕРОВ

К.В. Альшева

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Применение вихревых расходомеров в промышленности весьма популярно ввиду их надежности и низкой стоимости, однако существует необходимость расширения диапазона измерения в сторону малых расходов. Ввиду специфики конструкции и принципа работы вихревые расходомеры имеют существенные физические ограничения при измерении расхода при малых скоростях потока. Коммерческим исследованием вихревых расходомеров ученые занимались в течение нескольких десятилетий, и немало внимания было уделено повышению точности измерения расхода. Авторы критически осмыслили ставшие уже традиционными методы улучшения метрологических характеристик таких расходомеров: методы исследования тела обтекания и проточной части расходомера, методы исследования датчика и устройства обработки сигналов измерительной информации вихревого расходомера, а также алгоритмические методы повышения точности измерения расхода. Особое внимание было уделено алгоритмическим методам повышения точности измерения расхода, так как применение таких методов требует лишь изменения программы работы встроенного в расходомер микроконтроллера, что весьма целесообразно экономически. Проведенное авторами экспериментальное исследование уравнения измерения расходомера показало, что значение числа Струхала при малых скоростях потока не является константой и, следовательно, оказывает влияние на точность измерения расхода на данном диапазоне. Последующие исследования и выбор функции преобразования, учитывающей реальное значение числа Струхала, позволили снизить погрешность измерения на малых расходах с 3 до 0,5 %.

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

Введение

В настоящее время лидерами на рынке расходомеров являются кориолисовые, ультразвуковые, электромагнитные и вихревые расходомеры [1]. Низкая стоимость и невысокие эксплуатационные требования вихревых расходомеров сделали их весьма популярными в промышленности с 70-х годов XX века [2], что вызвало широкий интерес к ним научной общественности [3]. Расходомеры данного типа были исследованы разными способами, начиная с исследования конструкции [4, 5] и аппаратных средств [6], математических методов обработки цифровых данных [7, 8] и заканчивая моделированием явления вихреобразования с помощью математических и компьютерных средств [9]. Целью этих исследований было повышение точности измерения расхода. Кроме того, существуют определенные трудности расширения диапазона измерения в сторону малых расходов, исследованные в работах [10–12]. Авторы статьи предлагают решать данную проблему с помощью алгоритмических методов, так как они являются наименее затратными и недостаточно отмечены другими учеными в своих исследованиях.

Принцип работы вихревого расходомера

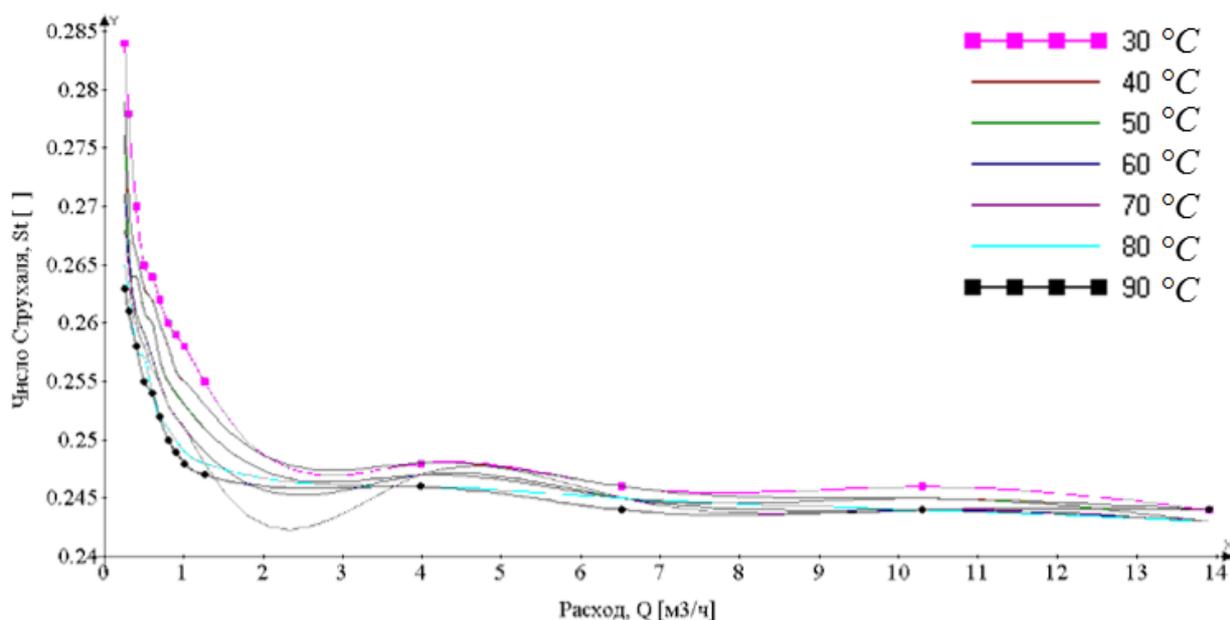
Принцип работы вихревого расходомера основан на образовании вихрей за телом обтекания, установленном в проточной части расходомера и последующем их учете. Частота вихреобразования за телом обтекания зависит от скорости потока:

$$f = St \cdot \frac{v}{d}, \quad (1)$$

Краткие сообщения

где v – скорость потока; d – характерный размер тела обтекания; St – безразмерная величина, называемая числом Струхала.

Кривая зависимости числа Струхала от величины расхода, полученная в результате исследований, приведена на рисунке. Число Струхала постоянно в определенном диапазоне расходов, что обеспечивает на этом диапазоне линейность выражения (1). При малых расходах зависимость числа Струхала становится нелинейной. Форма кривой для каждого тела обтекания отличается и может быть уточнена только путем исследований конкретных тел обтекания. Более общие выводы о характере изменения числа Струхала можно сделать на основе анализа моделей процесса вихреобразования [13, 14].



Зависимость числа Струхала от величины расхода для трапециевидного тела обтекания [10]

В современных вихревых расходомерах расход вычисляется с помощью микропроцессора на основе информации о частоте вихреобразования, при этом используется функция преобразования расходомера, которая также является уравнением измерения вихревого расходомера.

Методы улучшения метрологических характеристик вихревого расходомера

Методы исследования тела обтекания и проточной части расходомера

Тело обтекания должно обеспечивать формирование сильных и стабильных вихрей. На первых порах исследовались, в основном, цилиндрические и призматические тела. С целью обеспечения более устойчивого отрыва вихрей в конструкциях вихревых расходомеров начали использовать тела обтекания с острыми краями [4, 5]. Производители вихревых расходомеров предпочитают использовать тела обтекания простых в изготовлении форм, таких как трапециевидная призма. Выбор конкретных геометрических параметров при конструировании производится на основании особенностей эксплуатации конкретной марки расходомера.

Методы исследования датчика и устройства обработки сигналов измерительной информации вихревого расходомера

Данные методы направлены на повышение точности детектирования частоты вихреобразования за телом обтекания и призваны обеспечить наилучшее соотношение сигнал/шум для сигналов, получаемых с датчика. Исторически выделяют три направления:

– *Выбор наилучшего места установки сенсора.* Проблема выбора оптимального места установки сенсора решается путем проведения экспериментов или моделирования. Сенсор датчика должен быть расположен в области формирования максимально развитого вихревого потока для получения максимально возможного полезного сигнала.

– *Усовершенствование аппаратных средств.* Среди методов повышения точности определения частоты вихреобразования с помощью аппаратных средств можно выделить два основных направления. Это увеличение количества каналов измерения, которое дает возможность значительно уменьшить шумовые составляющие, оказывающие воздействие на сигнал [4] и применение фильтрующих элементов, которое позволяет повысить соотношение сигнал/шум, что является важным при измерении малых расходов.

– *Аппаратно-программные методы.* Основными элементами, составляющими метод, являются аналогово-цифровой преобразователь и микропроцессор, а также различные математические методы обработки цифровых данных. Наиболее разработанным и изученным методом при исследовании вихревых расходомеров является спектральный анализ, основанный на преобразовании Фурье. В работах [6] показано, что применение рассматриваемого метода в аппаратной части вихревого расходомера позволяет выделить полезный сигнал, несущий информацию о расходе на фоне шума, тем самым обеспечивается стабильное распознавание полезного сигнала, что является важным при измерении малых расходов. Данные методы являются перспективными, однако они требуют достаточно мощных вычислительных средств или усложнения конструкции, что экономически оправдывается в высокоточных и дорогостоящих расходомерах.

Алгоритмические методы повышения точности измерения расхода

Алгоритмические методы позволяют повысить точность измерения расхода за счет анализа уравнения измерения и правильного выбора и обоснования функции преобразования расходомера. Данные методы являются наиболее перспективными и наименее затратными в задачах измерения малых расходов, поэтому их изучение и разработка актуальны. В настоящее время четкие и универсальные алгоритмы для выбора функций преобразования средств измерений не разработаны, однако в отдельных областях достигнуты значительные успехи. Оригинальный подход к поиску ФП вихревых расходомеров продемонстрирован в исследовании [10]. Модель ФП строится на основе анализа уравнения измерения расхода, составные части которого исследуются обособленно.

Исследование уравнения измерения вихревого расходомера

Уравнение измерения (2) вихревого расходомера имеет вид:

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

где Q – объемный расход; D – диаметр проточной части; f – частота образования вихрей; d – характерный размер тела обтекания; St – число Струхала. Авторами была исследована и аппроксимирована зависимость числа Струхала от частоты вихреобразования, полученная на основе экспериментальных исследований вихревых расходомеров при различных температурах течения жидкости. Анализ зависимости показал, что при малых расходах значение числа Струхала изменяется нелинейно в зависимости от частоты вихреобразования f и температуры измеряемой среды t . С учетом вида зависимости была предложена функция преобразования вихревого расходомера [10]:

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

Применение новой модели функции преобразования (3) в сравнении с существующей моделью, используемой в настоящее время в серийном производстве расходомеров, позволяет снизить погрешность измерения на малых расходах с 3 до 1,5 %. Полученная экспериментальная кривая зависимости числа Струхала дает представление о том, что применяемая серийно методика экспериментальных исследований не учитывает область переходных расходов, где число Струхала переходит из линейной области в нелинейную. Авторами была предложена новая методика проведения экспериментальных исследований [11]. Особенностью такой методики было изменение режимов испытаний, с учетом особенностей конструкции исследуемого расходомера, а также вида кривой зависимости числа Струхала от частоты вихреобразования и температуры среды. В результате примененной методики были уточнены коэффициенты ФП (3) и снижена погрешность измерения на малых расходах до 0,5 %.

Авторами было проведено исследование новой модели ФП методом Монте-Карло [12]. В ходе исследования были генерированы данные, моделирующие работу 100 виртуальных расходомеров при различных режимах расхода. На основе полученных псевдослучайных данных выполнено моделирование предложенной модели функции преобразования. Также дополнительно выполнено моделирование функции преобразования на реальных экспериментальных данных, что позволило подтвердить корректность применения метода Монте-Карло. В ходе исследования подтверждена адекватность предложенной авторами функции преобразования вида (3) для применения в вихревых расходомерах в области малых расходов.

Заключение

Тема исследования вихревых расходомеров и увеличения диапазона их измерения в сторону малых расходов является популярной. Поэтому имеют место множество различных методов улучшения метрологических характеристик вихревых расходомеров. В настоящее время при существовании большого количества конструкций вихревых расходомеров на первый план выходят алгоритмические методы повышения точности измерения расхода, такие как выбор и обоснование функции преобразования расходомера. Данные методы за счёт детального анализа конструкции и принципа работы вихревого расходомера позволяют повысить точность его измерения, не внося изменений в его конструкцию. Алгоритмические методы повышения точности требуют лишь изменения программы работы встроенного в расходомер микроконтроллера, что весьма целесообразно экономически. Авторами была предложена и исследована новая модель ФП вихревого расходомера, которая позволила снизить погрешность измерения на малых расходах с 3 до 0,5 %.

Литература/References

1. Venugopal A. Review on Vortex Flowmeter – Designer Perspective. *Sensors and Actuators*, 2011, vol. 170, pp. 8–23. DOI: 10.1016/j.sna.2011.05.034
2. Yamasaki H., Rubin M. The Vortex Flowmeter. *Flow Measurement and Control in Science and Industry*, 1974, pp. 975–983.
3. Pankanin G.L. The Vortex Flowmeter: Various Methods of Investigating. *Measurement Science and Technology*, 2005, no. 16, pp. 1–16.
4. Miller R.W., De Carlo J.P., Cullen J.T. A Vortex Flowmeter – Calibration Results and Application Experience. *Proc. Flow-Con 1977*, Brighton, UK, 1977, pp. 549–570.
5. Bentley J.P., Mudd J.W. Vortex Shedding Mechanisms in Single and Dual Bluff Bodies. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2003, vol. 14, № 1, pp. 23–31. DOI: 10.1016/s0955-5986(02)00089-4
6. Volker H., Windorferb H. Comparison of Pressure and Ultrasound Measurements in Vortex Flow Meters. *Measurement*, 2003, no. 33, pp. 121–133. DOI: 10.1016/s0263-2241(02)00057-x
7. Chen J., Min K., Zhong L. Vortex Signal Processing Method with Dual Channel. *Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 2011, pp. 2833–2837.
8. Jianbo M., Zu L., Liang D., Liang X. Adaptive Frequency Measurement (AFM) for Vortex Flowmeter Signal. *Industrial Electronics, Proceedings of the IEEE International Symposium*, 1992, no. 2, pp. 832–835.
9. Pankanin G.L., Berlinski J., Chmielewski R. Numerical Modelling of Vortices Development in Tapered Duct. *Proc. of the International Symposium on Flow Measurement FLOMEKO XI*. Groningen, The Netherlands, 2003.
10. Lapin A., Alsheva K. Investigation of the Strouhal Number in the Conversion Function for Vortex Sonic Flowmeters. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2017. DOI: 10.1109/icieam.2017.8076401
11. Lapin A., Alsheva K. Modification Features of the Measurement Equation for Vortex Sonic Flowmeters. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2016. DOI: 10.1109/icieam.2016.7911634
12. Lapin A., Alsheva K. Investigation of Conversion Function for Vortex Sonic Flowmeter Using Monte-Carlo Method. *2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon)*, 2017. DOI: 10.1109/uralcon.2017.8120686

13. Gerrard J.H. The Mechanics of the Formation Region of Vortices behind Bluff Bodies. *J. Fluid Mech.*, 1966, no. 25, pp. 401–413. DOI: 10.1017/s0022112066001721

14. Lucas G.P., Turner J.T. Influence of Cylinder Geometry on the Quality of its Vortex Shedding Signal. *Proc. Int. Conf. on Flow Measurement FLOMEKO'85*. Melbourne, Australia, 1985, pp. 81–88.

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

Поступила в редакцию 30 апреля 2018 г.

DOI: 10.14529/ctcr180312

METHODS AND FEATURES OF VORTEX FLOWMETERS INVESTIGATION

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

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The use of vortex flowmeters in industry is very popular due to their reliability and low cost, but there is a need to expand the measuring range towards low flows. Due to the specific design and operation principle, the vortex flowmeters have significant physical limitations when measuring flow at low flow rates. Commercial research of vortex flowmeters lasted for several decades and much attention was paid to improving the accuracy of flow measurement. Authors critically comprehended the traditional methods of improving the metrological characteristics of such flowmeters: methods of flow body and flow part investigation, methods of sensor and device for processing the signals of the measuring information investigation and algorithmic methods for increasing the accuracy of flow measurement. Attention was paid to algorithmic methods for increasing the accuracy of flow measurement, since the use of such methods requires only a change in the program of operation of the flowmeter's microcontroller. Experimental investigation of the flowmeter measurement equation shows that the value of the Strouhal number at low flow rates is not constant, and consequently affects on the accuracy of flow measurement in this range. Subsequent investigations and the choice of the conversion function, considering the actual value of the Strouhal number, reduced the measurement error at low flows from 3 % to 0.5 %.

Keywords: vortex sonic flowmeters, conversion functions, the Strouhal number.

Received 30 April 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Альшева, К.В. Методы и особенности исследования вихревых расходомеров / К.В. Альшева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 119–123. DOI: 10.14529/ctcr180312

FOR CITATION

Alsheva K.V. Methods and Features of Vortex Flowmeters Investigation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 119–123. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr180312