

Расчет и конструирование

УДК 681.121

DOI: 10.14529/engin160201

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКРУГЛОЙ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ВИХРЕВОГО ДАТЧИКА РАСХОДА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИИ НА АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

И.С. Шулев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Изложены результаты исследования проточной части вихревого расходомера. Произведена верификация результатов численного моделирования течения в проточной части вихревого расходомера с физическим экспериментом. При моделировании течения в пакете COSMOS FlowWorks использовалась «k-ε»-модель турбулентности. Расчет выполнялся на прямоугольной расчетной сетке, содержащей до 3,5 млн расчетных ячеек на заданной проточной части. Относительная погрешность численного моделирования составляет не более $\pm 10,0\%$ для крайних точек скоростей потока и не более $\pm 5\%$ для середины диапазона скоростей потока. При моделировании гидрогазодинамических процессов в проточной части вихревого расходомера для получения результата с относительной погрешностью не более $\pm 5\%$ достаточно ограничиться числом расчетных ячеек не более 3,0 млн. Представлены результаты численного эксперимента с деформированной проточной частью в форме овала, а также с литейными уклонами и радиусами и показана степень влияния деформации проточной части вихревого расходомера для сжимаемой (воздух) и несжимаемой среды (вода) на амплитудно-частотные характеристики. Выявлено, что проточная часть, деформированная в направлении тела обтекания в эллипс, обладает наибольшей стабильностью и постоянством критериального числа Струхала по сравнению с расчетной геометрией. Данные выводы послужили основанием для создания нового типа проточной части для вихревого расходомера (Патент на полезную модель № 140006 «Проточная часть для формирования потока в системах измерения расхода жидких и газообразных сред»). В качестве направлений будущих исследований целесообразно сосредоточиться на исследовании влияния деформированной геометрии на стабилизацию генерацию вихрей при малых числах Рейнольдса, а также поиска оптимальной геометрии, способной расширить диапазон генерации стабильных вихрей в области малых чисел Re.

Ключевые слова: вихревой расходомер, тело обтекания, дорожка кармана, моделирование внутренних течений, CFD.

Введение. Повышение цен на нефтегазовое сырье приводит к увеличению спроса на средства точного измерения расхода. Все производимые расходомеры можно разделить на 2 типа: традиционные (устройства дифференциального давления) и расходомеры новых технологий. Качество таких расходомеров, как правило, в области точности и надежности работы находится на более высоком уровне, по сравнению с традиционными расходомерами. В настоящее время лидерами на рынке среди расходомеров, являются Кориолисовы, ультразвуковые и вихревые расходомеры [1]. Преимуществом вихревого расходомера над двумя другими является его низкая стоимость и невысокие эксплуатационные требования. Вихревой расходомер не чувствителен к физическим свойствам жидкости, таким как плотность и вязкость, что делает его универсальным. Они широко используются в промышленности, применяются при измерении жидкостей, газов и пара в широком диапазоне измерения расхода.

Однако существует ряд неизбежных вопросов, возникающих при разработке нового типа-размера расходомера, связанных с влиянием геометрических особенностей на стабилизацию вихреобразования.

Замена полной механообработки на технологию литья неизбежно приводит к образованию литейных уклонов и радиусов, которые меняют расчетную геометрию проточной части вихревого

Расчет и конструирование

расходомера. Кроме того, механообработка литой заготовки приводит к образованию небольших уступов перед телом обтекания.

Влияние геометрии проточной части на метрологические характеристики вихревого расходомера представляют собой суть задачи, решаемой в настоящем исследовании. Для решения используется метод сравнительных численных расчетов для двух сред и трех типов проточных частей для нескольких характерных скоростей потоков.

Статья посвящена проблеме сокращения затрат на разработку новых или модернизацию существующих вихревых расходомеров путем использования программного обеспечения, реализующего моделирование гидрогазодинамических процессов в многомерной постановке (CFD-технология) с привлечением вычислительных возможностей современных многопроцессорных вычислительных устройств.



Рис. 1. Схема проточной части расходомера

тановленным в его диаметральной плоскости неподвижным телом обтекания специальной формы (рис. 2), ось которого перпендикулярна оси трубопровода. При обтекании тела потоком в следе за ним образуются вихревые структуры, которые регулярно отрываются с противоположных сторон обтекаемого тела. Чувствительный элемент (крыло) преобразует локальные изменения давления, вызванные вихрями, в выходной электрический сигнал. Частота вихрей в широком диапазоне скоростей потока пропорциональна скорости [2].

Структура течения и закономерности формирования регулярных вихрей в широком диапазоне параметров среды однозначно определяются тремя числами гидродинамического подобия: число Струхалия (Sh), число Рейнольдса (Re) и число Маха (M) [3, 4].

Число Струхалия представляет собой безразмерную частоту вихреобразования, нормированную по скорости набегающего потока, и определяется соотношением:

$$Sh = \frac{f \cdot \bar{d}}{\bar{W}}, \quad (1)$$

где f – частота генерации вихрей (табл. 1), \bar{d} – характерный размер вихревого следа, \bar{W} – среднее значение скорости в трубе.

Характерный размер при обтекании тела принято определять по расстоянию между двумя вихревыми дорожками, образующимися при срыве потока на кромках тела. Как правило, при свободном обтекании характерный размер совпадает с поперечным размером тела обтекания:

$$\bar{d} = d. \quad (2)$$

При течении в трубах проявляется влияние пристеночного слоя, поэтому характерный размер определяют соотношением [4, 5]:

$$\bar{d} = d \cdot \left(1 - 4 \frac{d}{\pi \cdot D} \right), \quad (3)$$

где d – поперечный размер тела обтекания, D – диаметр трубопровода.

Число Рейнольдса характеризует соотношения вязких и инерционных сил, определяется соотношением:

$$Re = \frac{\bar{W} \cdot D}{\nu}, \quad (4)$$

где ν – кинематическая вязкость среды при температуре потока.

Объектом исследования является деформированная проточная часть вихревого расходомера, внутри которой установлено тело обтекания и датчик частоты вихреобразования (сенсор) (рис. 1).

Принцип работы вихревого расходомера основан на образовании вихрей за телом обтекания, установленном в проточной части расходомера и последующем их учете (измерении).

Измерительная часть расходомера представляет собой отрезок трубопровода, с установленным в его диаметральной плоскости неподвижным телом обтекания специальной формы

1. Расчетная схема, принятые допущения при верификации численного моделирования. При разработке вихревых расходомеров с цельнолитой конструкцией проточной части возникает ряд вопросов, связанных с повторяемостью метрологических характеристик расходомеров, оптимизацией их конструкции как для производства, так и для обеспечения достоверности результатов на разных средах.

Для решения всех этих проблем широко используется как натурное испытание расходомеров на различных проливочных и продувочных стендах, так и численное моделирование гидрогазодинамических процессов с использованием программных пакетов вычислительной гидродинамики (CFD – computational fluid dynamics).

Численное моделирование гидродинамических процессов началось с развитием CFD. В работах [6–8] дается представление о математических моделях, используемых для моделирования процессов в проточном тракте вихревых расходомеров. Анализ результатов численного и физического экспериментов с вихревыми расходомерами представлен в [9–12].

Верификация численного моделирования производилась путем сравнения результатов численного моделирования с физическим экспериментом. Геометрия, используемая для численного моделирования, представлена на рис. 2 и соответствует реальному вихревому датчику расхода DN40.

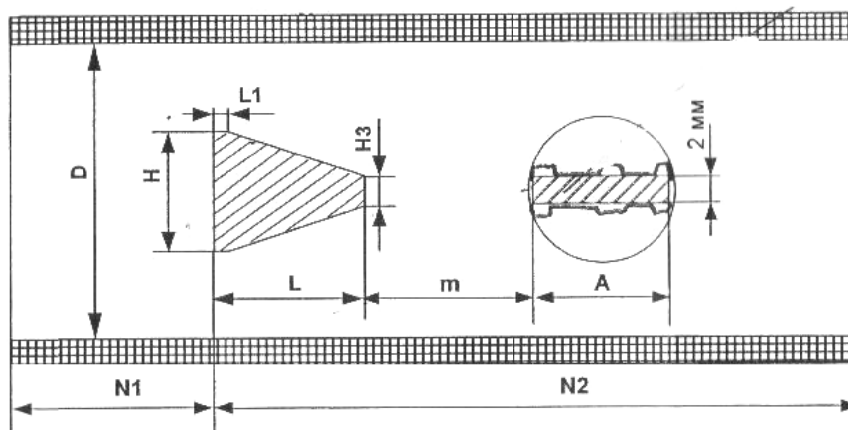


Рис. 2. Эскиз проточной части с идеальной геометрией:
D – диаметр проточной части; H – высота тела; L1 – уступ; H3 – высота; L – длина тела;
m – шаг; A – ширина сенсора; N1 – прямой участок; N2 – прямой участок

Моделирование проводилось с укороченными входными участками для проточных частей вихревых расходомеров, на входе которых задавалось развитое турбулентное течение, что позволило экономить расчетное время и максимально дробить расчетную сетку в зоне расположения тела обтекания и крыла сенсора вихрей. Вычислительные мощности и используемые программные компоненты описаны в табл. 1.

Таблица 1

Аппаратная платформа экспериментов

Параметр	Персональная многопроцессорная рабочая станция (DEPO STORM)
Процессор	Intel® Xeon® CPU X5680 @ 3.33GHz (2 ядра)
Количество процессоров	12
Объем ОЗУ	24 GB
Операционная система	Windows 7 (64 bit) Professional
Программное обеспечение	Flow Simulation (COSMOS FlowWorks)

Течение на входе проточной части расходомера предполагалось полностью развитым с присущими ему турбулентными пульсациями. В общем случае развитый профиль скорости среды зависит от режима течения и с высокой степенью точности для турбулентной области ($Re > 2100$) может аппроксимироваться степенным законом (5), (6):

Расчет и конструирование

$$\frac{V}{V_{\max}} = \left(1 - \frac{r}{0,5D}\right)^n, \quad (5)$$

$$V_{\max} = \frac{(n+1)(n+2)}{2} \cdot V_{\text{ср}}, \quad (6)$$

где D – диаметр трубы проточной части; r – текущая радиальная координата; V_{\max} – максимальная и средняя скорости среды на входе проточной части; $n=1/7$ – показатель.

Численное моделирование течения жидкости и газа в проточной части вихревых расходомеров проводилось для условий, представленных в табл. 2.

Таблица 2

Параметры моделируемых сред

Параметр	Величина	
	Вода	Воздух
Среда	Вода	Воздух
Давление статическое на выходе проточной части (абс.)	300 000 Па	101 325 Па
Температура среды	20 °С	20 °С
Средняя скорость среды на входе проточной части	0,6 и 7 м/с	6 и 70 м/с
Кинематическая вязкость среды при 20 °С	$1,006 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	$1,506 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$

При моделировании течения в пакете COSMOS FlowWorks использовалась «k-ε»-модель турбулентности. Расчет выполнялся на прямоугольной расчетной сетке, содержащей до 3,5 млн расчетных ячеек на заданной проточной части.

Результаты численного моделирования проточной части расходомеров и физического эксперимента представлены на рис. 3 в виде зависимости числа Струхалия от числа Рейнольдса.

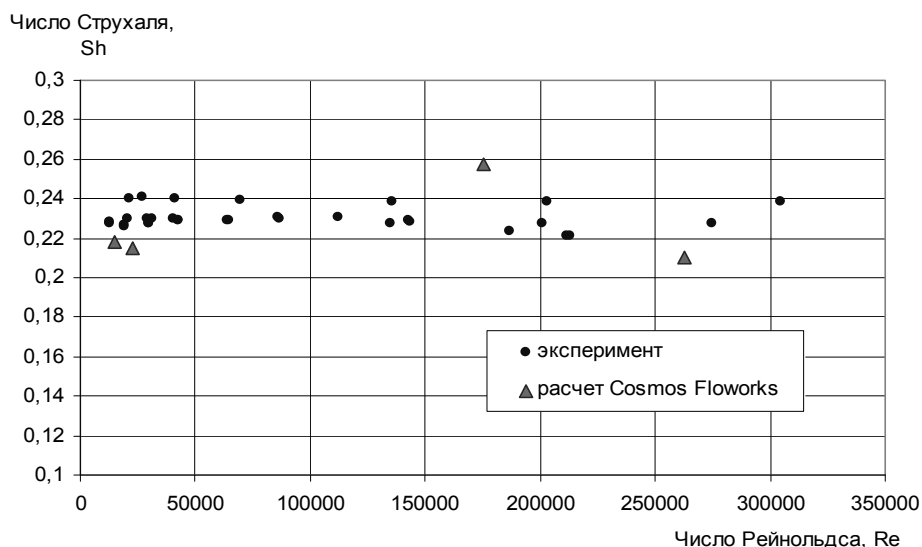


Рис. 3. Критериальная зависимость безразмерных комплексов $Sh(Re)$ для DN40

Сравнение численного моделирования и физических экспериментов показывает удовлетворительную точность. Относительная погрешность численного моделирования составляет не более $\pm 10,0\%$ для крайних точек скоростей потока и не более $\pm 5\%$ для середины диапазона скоростей потока.

Таким образом, при моделировании гидрогазодинамических процессов в проточной части вихревого расходомера для получения результата с относительной погрешностью не более $\pm 5\%$ достаточно ограничиться числом расчетных ячеек не более 3,0 млн.

2. Расчетная модель при исследовании деформированной проточной части. Оптимизация геометрии проточного тракта и тел обтекания рассмотрена в работах [13, 14]. В статьях [15–20] дается представление о влияющих факторах на амплитудно-частотные характеристики проточной части вихревого расходомера.

После верификации численного моделирования с физическим экспериментом в работе исследуется деформированная проточная часть. Численное моделирование течения несжимаемой жидкости (вода) и сжимаемого газа (воздух) по деформированной проточной части вихревого расходомера исследуется на трех типах проточек:

1) проточная часть, соответствующая расчетной геометрии, верифицированной с физическим экспериментом (см. рис. 2);

2) проточная часть, деформированная в эллипс в направлении тела обтекания, представлена на рис. 4, а);

3) проточная часть, деформированная в эллипс и дополнительно содержащая неустраняемые радиусы скруглений, литейные уклоны величиной до 1° к телу обтекания и уступы перед телом обтекания, образующиеся после механической обработки отливки, представлена на рис. 4, б).

Моделирование проводилось для двух сред, характеристики которых приведены в табл. 2. В результате численного исследования проточной части расходомеров выбранного типоразмера установлено, что во всех случаях генерируется устойчивый вихревой след за телом обтекания. Результаты представлены на рис. 5–8, в виде зависимостей чисел Струхала (Sh) от числа Рейнольдса (Re). Безразмерные числа определялись по параметрам потока перед телом обтекания.

Анализ полученных результатов указывает на незначительную нелинейность характеристик.

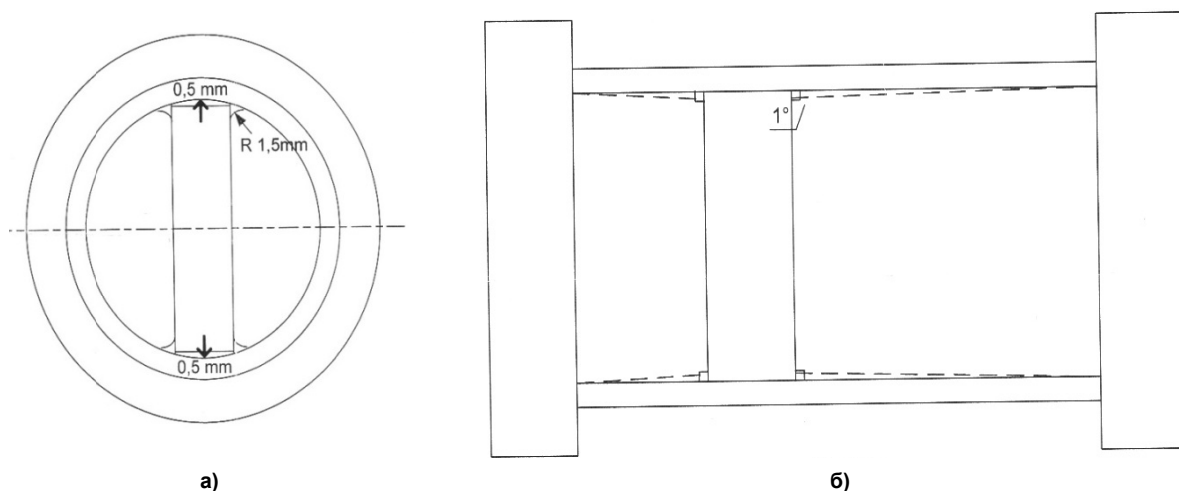


Рис. 4. Эскиз деформированной проточной части: а – эллипс в зоне тела обтекания; б – литейные уклоны

После серии расчетов, можно сделать вывод, что деформация проточной части практически не оказывает влияния на расчетные частотные характеристики вихревого расходомера по сравнению с проявлением особенностей технологии литейного производства, в частности, наличие уклонов к телу обтекания и радиусов скруглений в зоне примыкания тела обтекания к проточной части. Отмечается значительное увеличение частоты генерации вихрей.

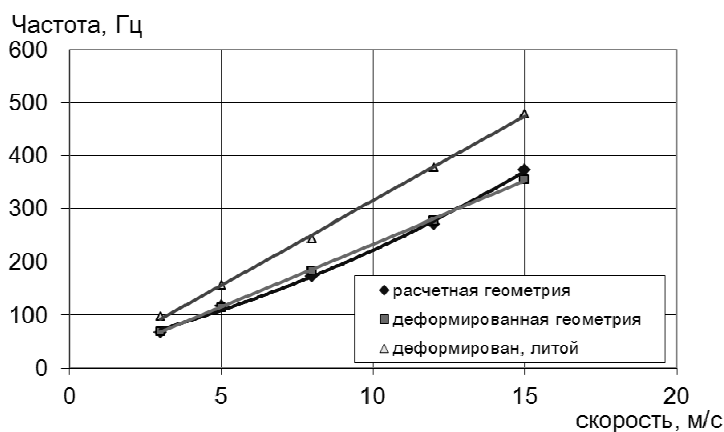


Рис. 5. Зависимость частоты отрыва вихрей от скорости воздуха

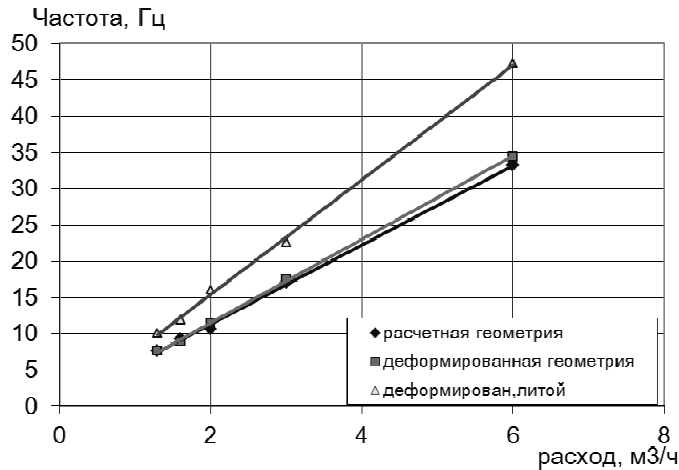


Рис. 6. Зависимость частоты отрыва вихрей от скорости воды

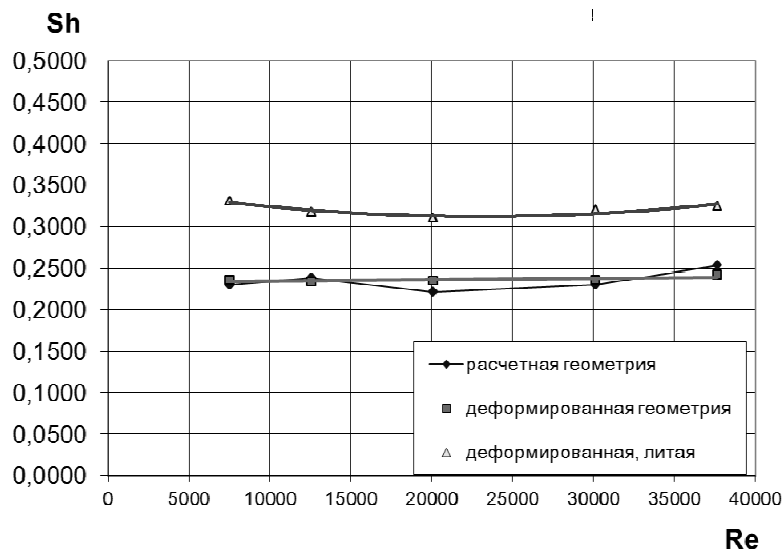


Рис. 7. Расчетные зависимости числа Струхала от числа Рейнольдса для воздуха

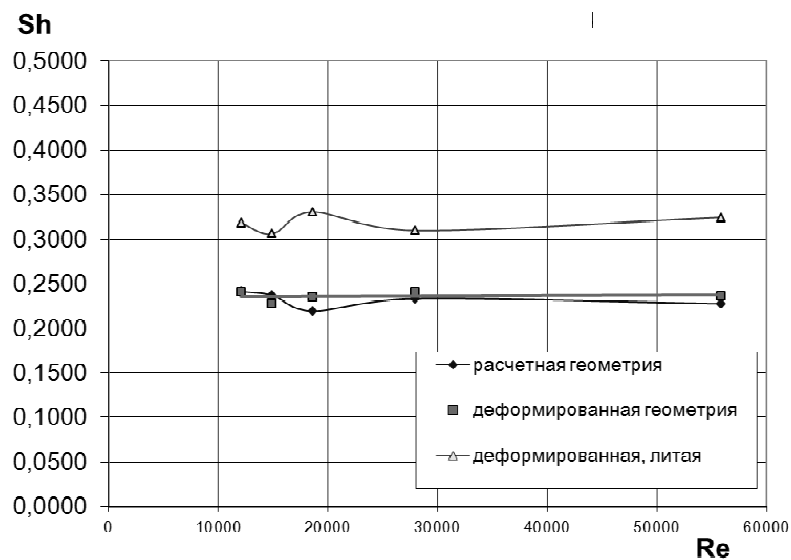


Рис. 8. Расчетные зависимости числа Струхала от числа Рейнольдса для воды

Выводы

1. Анализ графических зависимостей числа Струхалия от числа Рейнольдса для трех типов проточных частей позволяет установить, что в области малых расходов воды и воздуха при числе Рейнольдса менее 30 000 начинает проявляться нестабильность показаний и непостоянство числа Струхалия. Наиболее наглядно это проявляется при моделировании вихревого следа в проточной части на воде (рис. 8).

2. Анализ графических зависимостей выявил также следующую особенность – проточная часть, деформированная в направлении тела обтекания в эллипс, обладает наибольшей стабильностью и постоянством критериального числа Струхалия даже по сравнению с расчетной геометрией.

3. Данный эффект можно объяснить следующим: для малых Du кривизна внутреннего контура проточной части достаточна велика, поэтому поперечное сечение проточной части в области расположения тела обтекания характеризуется высокой неравномерности профиля скорости и давления, при деформации проточной части в эллипс кривизна внутреннего контура уменьшается и профиль скорости и давления становятся более равномерными. Это приближает режим течения в трубе к условиям свободного внешнего обтекания, обладающего высокой стабильностью в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

4. Данные выводы послужили основанием для создания нового типа проточной части для вихревого расходомера (Патент на полезную модель № 140006 «Проточная часть для формирования потока в системах измерения расхода жидких и газообразных сред»).

Обсуждение и применение. Сравнение экспериментальных данных численного и физического экспериментов показывают удовлетворительное количественное совпадение. Таким образом, применение CFD, реализующего моделирование гидрогазодинамических процессов в проточной части расходомера, позволяет сократить затраты на создание и модернизацию вихревых расходомеров при разработке и серийном производстве.

В качестве направлений будущих исследований целесообразно сосредоточится на исследовании влияния деформированной геометрии на стабилизацию генерации вихрей при малых числах Рейнольдса, а также поиска оптимальной геометрии, способной расширить диапазон генерации стабильных вихрей в области малых чисел Re .

Литература / References

1. Venugopal A. Review on Vortex Flowmeter – Designer Perspective. *Sensors and Actuators*, 2011, iss.170, pp. 8–23.
2. Von Karman T. Über den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erzeugt. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, ser. Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1911, pp. 509–517.
3. Yamasaki H., Rubin M. The Vortex Flowmeter. *Flow Measurement and Control in Science and Industry*, USA, 1974, pp. 975–983.
4. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества: справ. Л.: Машиностроение, 2004. 701 с. [Kremlevsky P.P. *Rashodomery I schetchiki kolichestv* [All Types of Flowmeters]. Leningrad, Mashinostroenie, 2004. 701 p.]
5. Pankanin G. L. The Vortex Flowmeter: Various Methods of Investigating Phenomena. *Measurement Science and Technology*, 2005, no. 16(3), pp. 1–16.
6. Chaplin, J.R. Computer Model of Vortex Shedding from a Cylinder. *Journal of the Hydraulics Division*, 1973, pp.155–165.
7. Igarashi T. Fluid Flow Around a Bluff Body Used for a Karman Vortex Flowmeter. *Proc. of International Symposium on Fluid Control and Measurement FLUCOME TOKYO'85*, 1985, pp. 1017–1022.
8. Johnson W., Sproston J.L., Wahed A.E. Numerical Study of Vortex Shedding from Different Shaped Bluff Bodies. *Flow Measurement Instruments*, 1993, vol. 4 (4), pp. 233–240.
9. Hebrard P., Malard L., Strzelecki A. Experimental Study of a Vortex Flowmeter in Pulsatile Flow Conditions. *Flow Measurement Instruments*, 1992, vol. 3, pp. 173–186.
10. Jan Y., Sheu J.T.W.H. A Numerical Confirmation of the Dual Body Vortex Flowmeter Design. *Comput. Fluids*, 2004, vol. 33, pp. 1157–1174.

11. Pankanin G.L. Experimental and Theoretical Investigations Concerning the Influence of Stagnation Region on Karman Vortex Shedding. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2007, pp. 55–57.
12. Cambier P., Vandermar S., Lavante E.V., Banaszak U., Krisch H., Tournillon S. Numerical and Experimental Study of Effects of Upstream Disturbance on Accuracy of Vortex-Shedding Flow Meter. *XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology*, 2009, vol. 1, pp. 15–18.
13. Benson R.A., Bentley J.P. The Optimization of Blockage Ratio for Optimal Multiple Bluff Body Vortex Flowmeters. *Fluid Measurement and Visualization FLUCOME'94*, 1994, pp. 887–891.
14. Kalkhof H.G. Influence of the Bluff Body Shape on the Measurement Characteristics of Vortex Flowmeters. *Proc. Conf. on Metering of Petroleum and its Products*, 1985, pp. 45–56.
15. Volynkin V.N., Lur'e M.S., Sheinin E.M. The Effect of Roughness of the Inner Surface of the Pipeline on the Error of Measurement Using Immersed Vortex Flowmeter. *Measurement Technology*, 2006, iss. 49 (2), pp. 158–162.
16. Igarashi T. Fluid Flow Around a Bluff Body Used for a Karman Vortex Flowmeter. *Proc. International Symposium on Fluid Control and Measurement FLUCOME TOKYO'85*, 1985, pp. 1017–1022.
17. von Lavante E., Nath B. Influence of Shape Deviations on the Measurement Precision of Vortex Flow Meters. *Proc. International Conference of Flow Measurement FLOMEKO*, 2003, pp. 208–213.
18. Bentley J.P., Benson R.A., Shanks A.J. The Development of Dual Bluff Body Vortex Flowmeters. *Flow Measurement and instrumentation*, 1996, vol. 7, no. 2, pp. 85–90.
19. Cousins T.A., Foster S.A., Johnson P.A. Linear and Accurate Flowmeter Using Vortex Shedding. *Proc. Power Fluid for Process Control Symposium*, 1973, pp. 45–56.
20. Ghaoud T., Clarke D.W. Modeling and Tracking a Vortex Flow-Meter Signal. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2002, vol. 13, no. 3, pp. 103–117.

Шулев Игорь Станиславович, инженер НОЦ «Аэрокосмические технологии», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, shulev.igor@mail.ru.

Поступила в редакцию 10 мая 2016 г.

DOI: 10.14529/engin160201

INVESTIGATION OF NONROUND FLOW PART OF VORTEX FLOWMETER AND DETERMINATION OF DEFORMATION INFLUENCE ON FREQUENCY RESPONSE

I.S. Shulev, shulev.igor@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The paper presents the results of research flow of the vortex flowmeter. Produced verification of the results of numerical simulation of the flow of the vortex flowmeter with a physical experiment. In the simulation of flow in the COSMOS FlowWorks package used “k-e” turbulence model. The calculation was carried out on a rectangular computational grid, containing up to 3.5 million cells at a flow part. The relative numerical simulation error is less than $\pm 10.0\%$ for the extreme points of the flow rate and no more than $\pm 5\%$ for the mid-range of flow rates. In the simulation, hydro-flow processes in the vortex of the flow-meter to produce a result with a relative error of $\pm 5\%$ is sufficient to restrict the number of computational cells is not more than 3.0 million. The results of the numerical experiment with a deformed part of the flow in the form of an oval, as well as casting slopes and radii and shows the degree of influence of the deformation of the flow vortex flowmeter for compressed (air) and incompressible medium (water) on the amplitude-frequency characteristics. It was revealed that the flow part, deformed in the direction of flow of the body into an ellipse, has higher stability and permanence criterion

Strouhal number compared to the estimated geometry. These findings have led to the creation of a new type of flow part for vortex flowmeter (utility model patent № 140006 “Flow part for the formation of the flow rate of liquids and gases measurement systems”). As the directions of future research should be focused on the study of the influence of the deformed geometry to stabilize the generation of vortices at low Reynolds numbers, and find the optimal geometry that can extend the range of stable vortex generation in small numbers Re.

Keywords: vortex flowmeter, blunt body, Karman vortex street, simulation of fluid, CFD.

Received 10 May 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Шулев, И.С. Исследование некруглой проточной части вихревого датчика расхода и определение степени влияния деформации на амплитудно-частотные характеристики / И.С. Шулев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 5–13. DOI: 10.14529/engin160201

FOR CITATION

Shulev I.S. Investigation of Nonround Flow Part of Vortex Flowmeter and Determination of Deformation Influence on Frequency Response. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 5–13. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin160201