

Расчет и конструирование

УДК 681.121

DOI: 10.14529/engin150401

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГИДРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ВИХРЕВОГО РАСХОДОМЕРА

А.Л. Карташев, А.А. Кривоногов

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Исследованы трехмерные гидрогазодинамические эффекты, создаваемые изменениями геометрической формы тела обтекания, в частности различной формой поперечного сечения по длине тела обтекания. Актуальность обусловлена недостатком информации по этому направлению на данный момент.

Проведен анализ современных источников информации по исследованию трехмерных гидрогазодинамических эффектов в проточной части вихревого расходомера и других подобных устройств. Приведено краткое описание процесса вихреобразования за телом обтекания, расположенном в трубопроводе круглого сечения.

Проведено исследование влияния тела обтекания с переменным поперечным сечением, расположенным в проточной части вихревого расходомера, на трехмерную структуру турбулентного потока вблизи тела обтекания и на расположенный ниже по потоку чувствительный элемент. Проточная часть была смоделирована в программном комплексе ANSYS в модуле CFX для жидкости и газа. Кроме численных расчетов проводились физические эксперименты на проливочных установках и на газовом стенде на базе ЗАО «ПГ «МЕТРАН».

Исследовано изменение рабочей безразмерной характеристики числа Струхала от числа Рейнольдса $Sh(Re)$, вызванное различиями геометрических параметров тела обтекания, в частности изменяемой формой поперечного сечения по длине тела обтекания. Для этого были изготовлены и протестированы образцы тел обтекания с переменным поперечным сечением и соответствующие им численные модели.

По результатам исследований было установлено, что тело обтекания с переменным поперечным сечением создает разрыв единого вихря в определенной точке в зависимости от скорости потока, в результате чего происходит изменение пространственной структуры вихревого потока и его амплитудно-частотной характеристики, что, в свою очередь, влияет на рабочую характеристику вихревого расходомера.

Ключевые слова: вихревые расходомеры, тело обтекания, трехмерная структура вихря.

Введение. Измерение расхода жидких и газообразных сред занимает важное место в системе производственных отношений. Требования, предъявляемые к средствам измерения расхода, возрастают с внедрением в промышленность ресурсосберегающих технологий. Среди таких, зачастую противоречивых требований – надежность и низкая стоимость, широкий динамический диапазон измерения и высокая точность, частотный выходной сигнал и отсутствие подвижных частей. На данный момент времени этим требованиям удовлетворяют вихревые расходомеры с обтекаемым телом [1, 2].

Принцип действия вихревого расходомера с обтекаемым телом (далее – вихревой расходомер) основан на зависимости частоты срывающихся с тела регулярных крупномасштабных вихрей (дорожка Кармана) от скорости потока и последующим детектированием вихрей при помощи сенсора [3].

При создании измерительной системы вихревого расходомера основными проблемами являются обеспечение стабильности процесса вихреобразования в достаточно широком диапазоне скоростей. Особенно остро встают эти проблемы при измерении малых и больших расходов

Расчет и конструирование

жидкости и газа относительно среднего. Эффективность решения этих проблем напрямую зависит от того, насколько глубоко понятен механизм вихреобразования и дальнейшего распространения вихрей в потоке. В настоящее время накоплен достаточно обширный материал о процессе упорядоченного вихреобразования за плохообтекаемыми телами [4–6]. Однако еще многие вопросы остаются открытыми, особенно те, которые связаны с влиянием на процесс вихреобразования различных факторов, таких как ограниченность течения (обтекаемое тело вихревого расходомера находится в канале), неравномерность профиля скорости, турбулентность набегающего потока, пульсация скорости в потоке и влияние трехмерных эффектов в процессе вихреобразования на стабильность работы расходомера [7]. В связи с этим, тема настоящего исследования связана с изучением процесса срыва вихрей с тела обтекания, имеющего переменное по высоте поперечное сечение, находящегося в трубе (проточная часть вихревого расходомера), и распространение вихрей от него по потоку, представляется весьма актуальной.

1. Постановка задачи. Преобразователь представляет собой отрезок трубопровода с установленным в его диаметральной плоскости неподвижным телом обтекания призматической формы (рис. 1), ось которого перпендикулярна оси трубопровода. При обтекании тела потоком вязкой жидкости или газа в следе за ним образуются вихревые структуры, которые регулярно отрываются с противоположных сторон (краюк) обтекаемого тела. Чувствительный элемент (крыло) преобразует энергию импульса давления регулярных вихрей в выходной электрический сигнал. Частота преобразования в широком диапазоне скоростей пропорциональна объемному расходу газа, а количество импульсов – объему газа, прошедшему через преобразователь [2].

Структура течения и закономерности формирования регулярных вихрей в широком диапазоне параметров однозначно определяются двумя числами гидродинамического подобия: число Струхала (Sh) и число Рейнольдса (Re) [1].

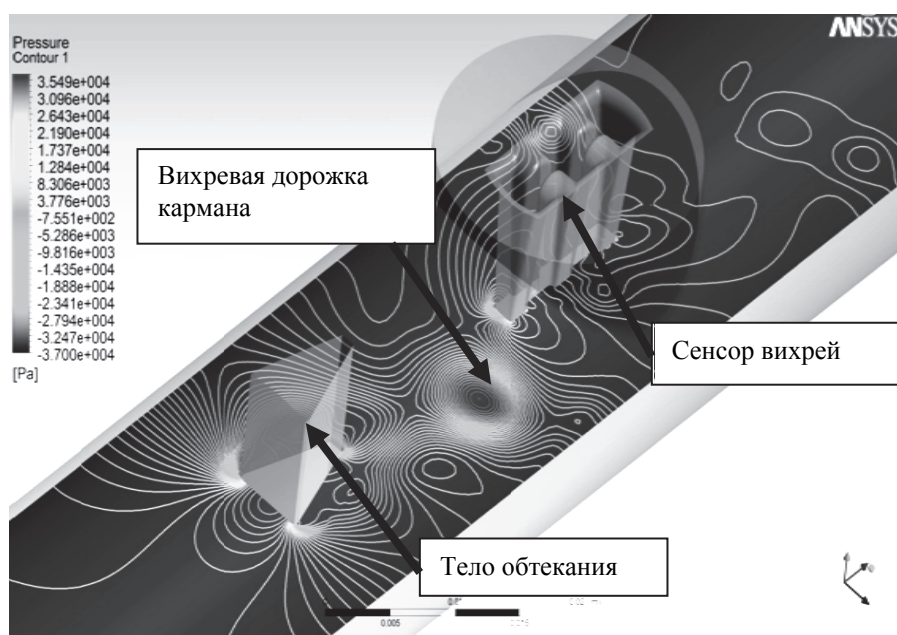


Рис. 1. Процесс вихреобразования в проточной части вихревого расходомера

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

$$Re = \frac{V_{cp} \cdot D}{\nu}, \quad (1)$$

где ν – кинематическая вязкость; D – диаметр проточной части; V_{cp} – средняя скорость потока. Рабочий диапазон чисел для расходомера от 10 000 до 200 000.

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

$$Sh = \frac{V_{cp} \cdot d}{f}, \tag{2}$$

где f – частота генерации вихрей; d – размер генератора вихрей; V_{cp} – среднее значение скорости в трубе.

При проведении очередных испытаний расходомера с телом обтекания, с выступающей в поток цилиндрической частью (рис. 2), было обнаружено влияние данной геометрической особенности тела обтекания на рабочую характеристику расходомера (рис. 3), что свидетельствовало о возможном изменении процесса вихреобразования на определенных скоростях за счет выступающей цилиндрической части. В результате была поставлена цель – исследовать влияние изменения геометрии тела обтекания расположенного в проточной части вихревого расходомера на трехмерную структуру турбулентного потока вблизи тела обтекания. Из цели была поставлена задача – определить изменение характеристики $Sh(Re)$, вызванное различиями геометрических параметров тела обтекания, в частности, формой поперечного сечения, а также исследовать трехмерную структуру вихревого течения.

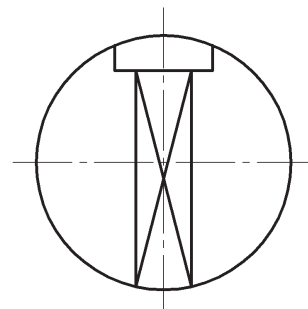


Рис. 2. Проточная часть с телом обтекания с выступающей цилиндрической частью

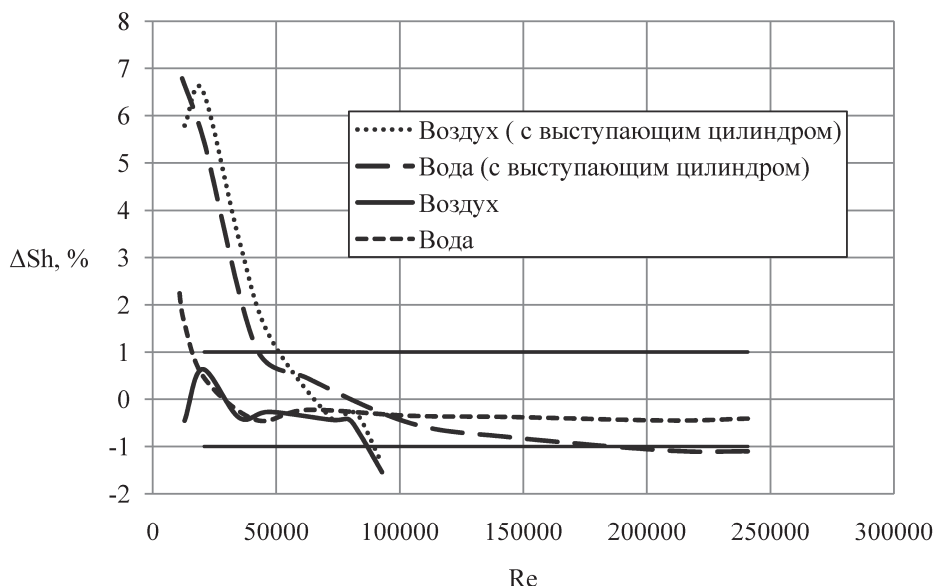


Рис. 3. Результаты испытаний тела обтекания с выступающей цилиндрической частью

Некоторые исследователи [8–11] уже вносили корректировки в число Струхалия для потока в трубе с препятствием путем введения эмпирических зависимостей и приведенных параметров характерного размера вихревого следа:

$$Sh = \frac{V_{cp} \cdot d_{vc}}{f}, \tag{3}$$

где d_{vc} – характерный размер вихревого следа.

$$Sh = 0,2 \cdot \left(1 + 7,25 \cdot K_q^{3,3}\right), \text{ при } 10^4 < Re < 10^6, \tag{4}$$

где $K_q = d / D$ – коэффициент загроможденности канала.

Но в рассмотренных формулах (4) и (5) нет учета трехмерных эффектов, происходящих в процессе вихреобразования в загроможденном канале, за счет изменения поперечного сечения тела обтекания по его длине.

Расчет и конструирование

При изучении литературы было установлено, что подобный вопрос уже рассматривался в работе Д.В. Кратирова [10]. В указанной работе описываются испытания пластин с переменным и постоянным поперечным сечением, которые были установлены в трубе. В результате было определено, что на пластине с переменным поперечным сечением процесс вихреобразования отличается от пластины с постоянным поперечным сечением (рис. 4).

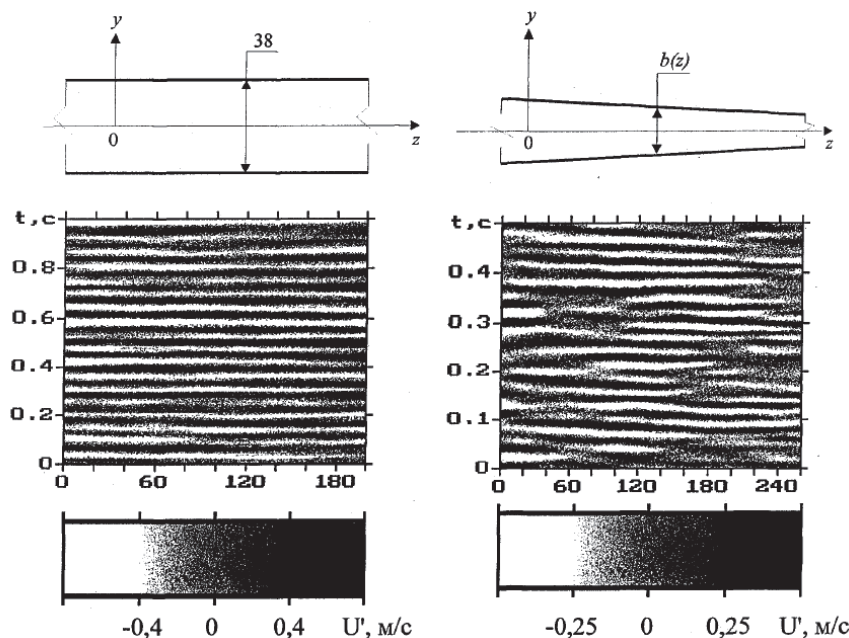


Рис. 4. Пространственно-временное поле пульсаций скорости вблизи кромки пластины постоянной ширины и сужающейся пластины

Автором работы [10] были сделаны следующие выводы: формирование единых вихрей с переменной частотой срыва по длине пластины не может быть продолжительным, поскольку такой механизм приводит к увеличению угла наклона оси каждого последующего вихря к плоскости пластины. Это, в свою очередь, приводит к разрыву единого вихря и формированию нового вихря в узкой части пластины. Разрыву вихря (рис. 4, справа), сопутствуют пульсации скорости пониженной амплитуды. Местоположение зон разрыва вихрей является случайным, а относительная частота появления разрывов изменяется по длине пластины приблизительно пропорционально местной частоте следования вихрей.

Тем не менее, в работе [10] не рассматривается дальнейшее распространение вихрей по проточной части, не рассматриваются случаи вихреобразования вокруг тела обтекания более сложной формы. Кроме этого во время выполнения данных исследований было достаточно сложно численно смоделировать процесс вихреобразования, происходящий в канале.

2. Описание эксперимента. Для исследования влияния тела обтекания с переменным поперечным сечением на процесс вихреобразования, в проточной части вихревого расходомера, были изготовлены 3 варианта призматических тел обтекания, по два экземпляра на каждый вариант. Клинообразные призматические тела обтекания (рис. 5), вариант 1 и вариант 2 имеют одинаковую форму призмы, но склинивание происходит в противоположных направлениях. Кроме этого было изготовлено тело обтекания 3, имеющее постоянное поперечное сечение.

Для испытаний был создан макет проточной части вихревого расходомера (рис. 6) с внутренним диаметром 25 мм. Детектирование пульсаций вихрей осуществлялось при помощи механического сенсора «крыла». Испытания проводились на воздушном и водном стендах, при различных скоростях потока [11].

Из результатов испытаний на водном стенде (рис. 7) видно, что на низких расходах тело обтекания № 2 работает с более высокой частотой, чем тело обтекания № 1, а на высокой скорости картина противоположна. При этом оба варианта клинообразных тел обтекания отличаются от тела обтекания с постоянным поперечным сечением.

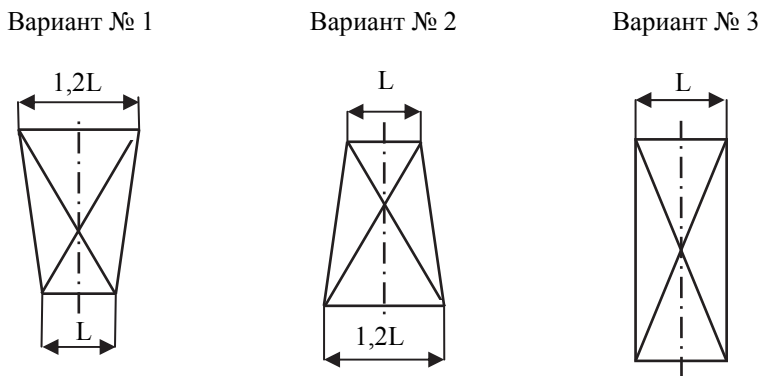


Рис. 5. Тело обтекания – 3 варианта трапецидального профиля $L = 5,8 \text{ мм}$

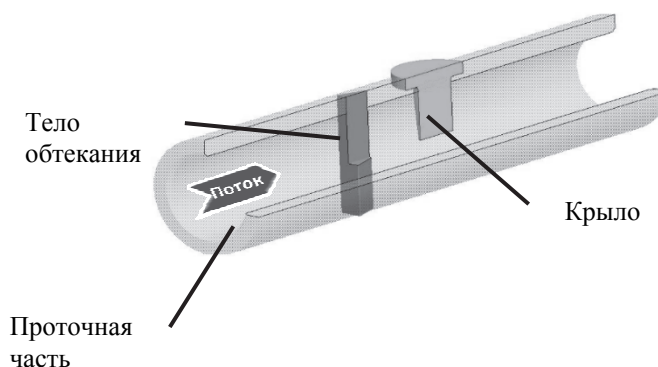


Рис. 6. Макет проточной части вихревого расходомера

Из этого результата можно сделать вывод о том, что в зависимости от направления изменения поперечного сечения рабочая характеристика расходомера изменяется по-разному, но, скорее всего, это присуще только расходомерам с механическим сенсором [12].

При этом на графике испытаний по воздуху (рис. 8) особого различия нет, это свидетельствует о том, что изменение поперечного сечения тела обтекания оказывает меньший эффект, чем на воде.

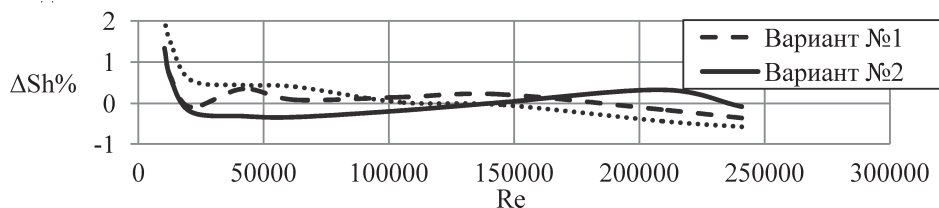


Рис. 7. Результаты испытаний на водном стенде

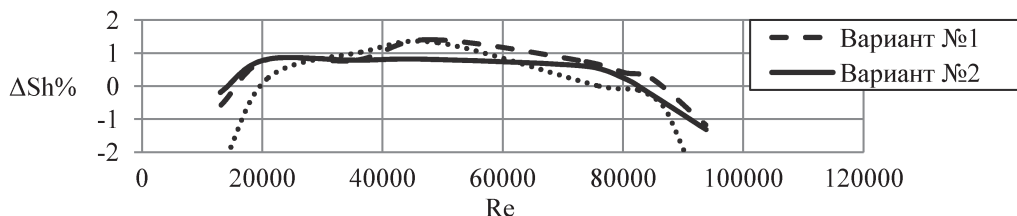


Рис. 8. Результаты испытаний на воздушном стенде

3. Численное моделирование процесса вихреобразования в проточной части вихревого расходомера. Для того чтобы более детально понять процесс влияния отклонения формы, тела обтекания от параллельности были проведены численные расчеты в ANSYS CFX [13–15].

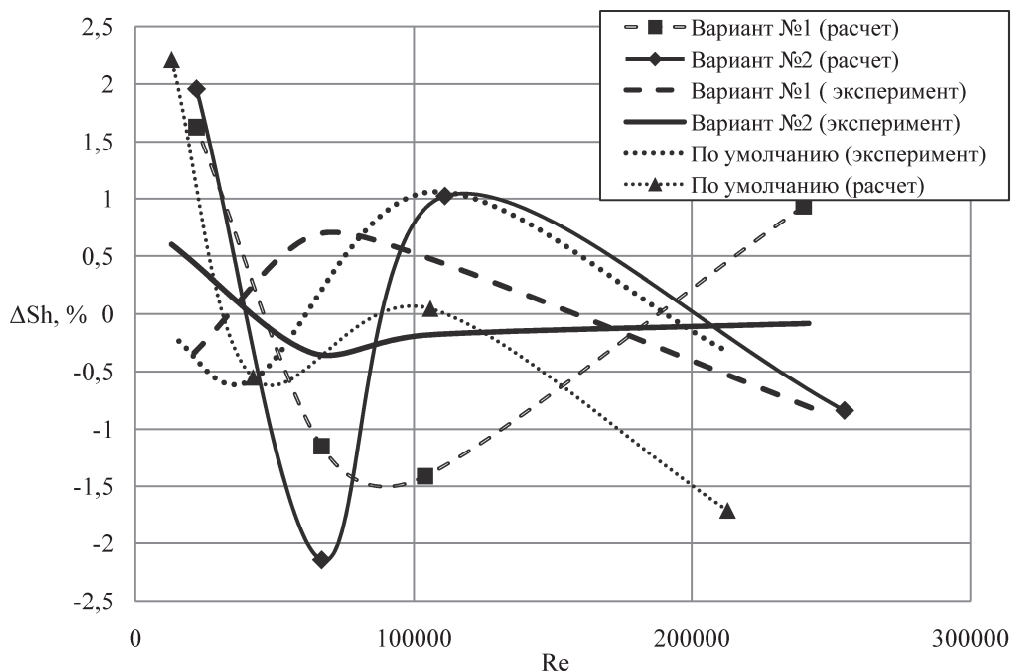


Рис. 9. Результаты численных расчетов

Из результатов численных расчетов (рис. 9) видно, что не все результаты соответствуют экспериментальным данным. Это отклонение может быть вызвано недостаточным разрешением сеточной модели в связи с ограниченностью вычислительных ресурсов, но для качественной оценки процесса данных результатов достаточно.

На графиках видно, что кривые сужающегося (вариант № 1) и расширяющегося (вариант № 2) тел обтекания имеют противоположные характеристики (зеркальный вид), что свидетельствует о взаимосвязи переменного поперечного сечения тела обтекания и трехмерной структуры потока.

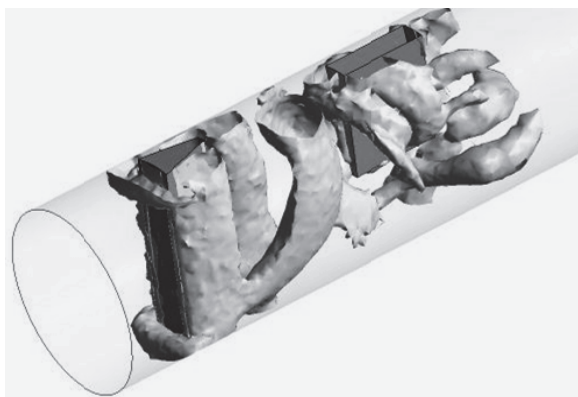


Рис. 10. Изоповерхности границ вихревых ядер в проточной части расходомера при $V_{ср} = 2,5$ м/с, Вариант № 2

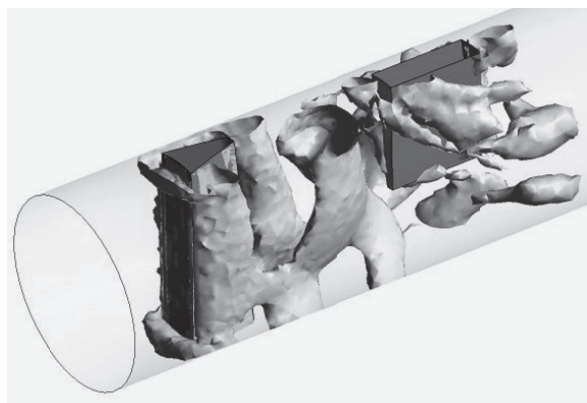


Рис. 11. Изоповерхности границ вихревых ядер в проточной части расходомера при $V_{ср} = 9,2$ м/с, Вариант № 2

Для того чтобы понять, как влияет на структуру вихревого потока тело обтекания с переменным поперечным сечением, были построены изоповерхности границ вихревых регионов (области ядра вихря) с использованием метода идентификации Swirlingstrain [13], границы регулируются уровнем силы вихревого ядра (в нашем случае минимальное значение 3 %) вокруг локальных центров вихря, в результате анализа которых (рис. 10, 11) стало ясно, что образуется разрыв единого вихря в области более широкого поперечного сечения тела обтекания. Это частично подтверждается результатами исследований проводимых ранее [10, 11], где упоминается о возможности разрыва единого вихря. Но предположение о том, что место его разрыва случайно, не соответствует результатам расчета. При постоянной скорости вихрь разрывается в определен-

ном месте. На низкой скорости он имеет более вытянутую форму, в отличие от вихря, образующегося на более высокой скорости, благодаря этому эффекту, возможно, и происходит изменение рабочей характеристики вихревого расходомера.

Заключение. Тело обтекания с переменным поперечным сечением создает разрыв единого вихря в определенной точке, в результате чего происходит изменение пространственной структуры вихревого потока и его амплитудно-частотной характеристики, что, в свою очередь, влияет на рабочую характеристику вихревого расходомера.

Утверждать, что выявленный эффект оказывает положительное или отрицательное действие на рабочую характеристику расходомера на данный момент сложно, так как в этом направлении проведено недостаточно исследований.

Для более точного определения влияния геометрических отклонений тела обтекания, расположенного в проточной части расходомера, необходимо проводить комплексное исследование с использованием теории планирования эксперимента.

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: handbook / R.C. Baker. – New York: Cambridge University Press, 2000. – 524 p.
3. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа: учеб. для вузов / Л.Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
4. Лапин, А.П. Вихревой метод измерения расхода: модели вихреобразования и современные средства моделирования / А.П. Лапин, А.М. Дружков, К.В. Кузнецова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии управление, радиоэлектроника». – 2014. – Т. 14, № 3. – С. 19–28.
5. Von Karman, T. Über den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erzeugt / T. von Karman // Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse. – 1911. – P. 509–517.
6. Strouhal, V. Über eine besondere Art der Tonerregung / V. Strouhal // Annalen der Physik und Chemie. Neue Folge. – 1878. – Bd. V. – S. 216–251.
7. Miller, R.W. A vortex flowmeter – calibration results and application experience / R.W. Miller, J.P. De Carlo, J.T. Cullen // Proc. Flow-Con, Brighton, UK. – 1977. – P. 549–570.
8. Жукаускас, А.А. Конвективный перенос в теплообменниках / А.А. Жукаускас. – М.: Наука, 1982. – 472 с.
9. Вихреобразование за плохообтекаемым телом с шероховатой лобовой поверхностью в ограниченном потоке / М.В. Еронин, Д.В. Кратиров, Н.И. Михеев, В.М. Молочников // Тепловые процессы в технике. – 2012. – № 1. – С. 2–12.
10. Вихри кармана за плохообтекаемым телом в ограниченном турбулизированном потоке и при турбулизации пограничного слоя на теле / О.В. Дунай, М.В. Еронин, Д.В. Кратиров и др. // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2010. – № 4. – С. 97–106.
11. 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.
12. Оптимизация расположения сенсора пульсаций давления в проточной части вихревого расходомера / Е.В. Сафонов, К.А. Бромер, В.Д. Богданов, А.В. Конюхов // Датчики и системы. – 2012. – № 8 (159). – С. 38–39.
13. ANSYS CFD – Post User's Guide: User's Guide / ANSYS, inc-Pennsylvania.: ANSYS, inc, Southpointe 275 Technology Drive, 2013. – 348 p.
14. Использование численных методов моделирования при разработке вихревых расходомеров / В.Д. Богданов, А.В. Конюхов, А.А. Кривоногов и др. // Датчики и системы. – 2012. – № 8 (159). – С. 40–43.
15. Сафонов, Е.В. Разработка виртуального испытательного стенда для численного моделирования гидродинамических течений в бесфланцевых вихревых расходомерах с использованием высокопроизводительных вычислений / Е.В. Сафонов, К.А. Бромер, В.А. Дорохов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика». – 2013. – Т. 2, № 4. – С. 109–115.

Карташев Александр Леонидович. Доктор технических наук, профессор кафедры летательных аппаратов и автоматических установок, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), al_kartashev@mail.ru.

Кривоногов Алексей Александрович. Аспирант кафедры летательных аппаратов и автоматических установок, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), alexeykrivonogov@mail.ru.

Поступила в редакцию 6 мая 2015 г.

DOI: 10.14529/engin150401

RESEARCH OF SPATIAL HYDRODYNAMIC EFFECTS IN THE METERBODY OF THE VORTEX FLOWMETER

A.L. Kartashev, al_kartashev@mail.ru,

A.A. Krivonogov, alexeykrivonogov@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The article investigates the three-dimensional hydrodynamic effects produced by variations of geometrical shape of the shedder bar, in particular a variable cross-sectional shape along the length of shedder. Actuality is due to lack of special information at this time.

Modern sources of information on the study of three-dimensional hydrodynamic effects in the flow part of the vortex flowmeter and other similar devices were investigated. A brief description of the process of vortex behind a shedder bar located in a pipe-line of circular cross section given in this article.

The research has been performed for the influence of geometry of the variable cross section shedder bar located in the meter body of a vortex flowmeter, on three-dimensional structure of turbulent flow near shedder bar and the downstream sensor. Flowing part was simulated in the software package ANSYS in the CFX module for liquid and gas. In addition to numerical calculations physical experiments on liquid and gas stands located at "Industrial group "METRAN" were performed.

The variation of the working characteristics of the dimensionless Strouhal number on the Reynolds number $Sh(Re)$, caused by deviations of shedder bar geometrical parameters, in particular a variable cross-sectional shape along the length of shedder, calculated from the straight shape was investigated. To do this were made and tested samples with geometry deviations and their associated numerical models.

By results of the research, it was found that shedder bar with variable cross section along the length of bluff body in contradistinction from the straight design creates a gap continuous vortex at a certain point. As a result, a change in the spatial structure of the vortex flow and the amplitude-frequency characteristic occurs affecting the performance of the vortex flowmeter.

Keywords: vortex flowmeters, shedder bar, three-dimensional structure of the vortex.

References

1. Kremlevskiy P.P. *Raskhodometry i schetchiki kolichestva: spravochnik* [Flowmeters and Counters: Handbook]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989. 701 p.
2. Baker R.C. *Flow Measurement Handbook*. New York, Cambridge University Press, 2000. 524 p.
3. Lojczanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid Mechanics]. Moscow, Drofa Publ., 2003. 840 p.
4. Lapin A.P., Druzhkov A.M., Kuznetsova K.V. [Vortex Method of Flow Measurement: History and Line of Development]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 19–28. (in Russ.)

5. Von Karman T. Über den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erzeugt. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1911, S. 509–517.
6. Strouhal V. Über eine besondere Art der Tonerregung. *Annalen der Physik und Chemie. Neue Folge*, 1878, Bd. V, S. 216–251. DOI: 10.1002/andp.18782411005
7. Miller R.W., De Carlo J.P., Cullen J.T. A Vortex Flowmeter – Calibration Results and Application Experience. *Proc. Flow-Con*, Brighton, UK, 1977, pp. 549–570.
8. Zhukauskas A.A. *Konvektivnyy perenos v teploobmennikakh* [Convective Transfer in Heat Exchangers]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 472 p.
9. Eronin M.V., Kratirov D.V., Miheev N.I., Molochnikov V.M. [Vortex Generation Behind a Bluff Body with Rough Frontal Area in a Restricted Flow]. *Thermal Processes in Engineering*, 2012, no. 1, pp. 2–12. (in Russ.)
10. Dunaj O.V., Eronin M.V., Kratirov D.V., Miheev N.I., Molochnikov V.M. [Von Karman Vortices after the Bluff Body in a Limited Turbulent Flow and Turbulence in the Boundary Layer on the Shedder]. *Journal of Russian Academy of Sciences. Fluid Dynamics*, 2010, no. 4, pp. 97–106. (in Russ.)
11. 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 Technology, Control, Radioelectronics*, 2013, vol. 13, no. 4, pp. 70–77. (in Russ.)
12. Safonov E.V., Bromer K.A., Bogdanov V.D., Konyukhov A.V. [Optimization of the Location of Pressure Pulsations Sensor in Flow Part of Vortex Flow Meter]. *Sensor and Systems*, 2012, no. 8 (159), pp. 38–39. (in Russ.)
13. *ANSYS CFD – Post User's Guide*. Pennsylvania: ANSYS, Inc. Southpointe 275 Technology Drive, 2013. 348 p.
14. Bogdanov V.D., Konyukhov A.V., Krivonogov A.A., Safonov E.V., Dorohov V.A. [Using of Numerical Simulation Methods in the Development of Vortex Flow Meters]. *Sensor and Systems*, 2012, no. 8 (159), pp. 40–43. (in Russ.)
15. Safonov E.V., Bromer K.A., Dorohov V.A. [Development of Virtual Test Bench for CFD in Flagless Vortex Flowmeter with Application of High-Performance Computing]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computational Mathematics and Software Engineering*, 2013, vol. 2, no. 4, pp. 109–115. (in Russ.)

Received 6 May 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Карташев, А.Л. Исследование пространственных гидрогазодинамических эффектов в проточной части вихревого расходомера / А.Л. Карташев, А.А. Кривоногов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 5–13. DOI: 10.14529/engin150401

FOR CITATION

Kartashev A.L., Krivonogov A.A. Research of Spatial Hydrodynamic Effects in the Meterbody of the Vortex Flowmeter. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 5–13. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin150401
