

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГИДРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ВИХРЕВОГО РАСХОДОМЕРА И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.Л. Карташев, А.А. Кривоногов

Проведено исследование научных работ в которых описывается процесс вихреобразования, в частности влияние изменения геометрии проточной части вихревого расходомера, на трехмерную структуру турбулентного потока вблизи тела обтекания. Проведены испытания вихревых расходомеров на воздушных и водных стендах, построены характеристики $Sh(Re)$, проведены предварительные численные расчеты и представлено сравнение результатов.

Ключевые слова: вихревые расходомеры, трехмерная структура вихря, численное моделирование

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, с точки зрения удовлетворения этим требованиям, являются 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 (дорожкой Кармана) от скорости потока и последующим детектированием вихрей при помощи сенсора [1, 2].

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 жидкости, и газа. 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 [3]. Однако многие вопросы остаются еще 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, турбулентности набегающего потока, пульсации скорости в потоке и влияние трехмерных эффектов в процессе вихреобразования на стабильность работы расходомера. В связи с этим, тема настоящего исследования связана с изучением процесса срыва вихрей с тела обтекания, находящегося в трубе (проточная часть вихревого расходомера) и распространение вихрей от него по потоку, представляется весьма актуальной.

Постановка задачи

Преобразователь представляет собой отрезок трубопровода, с установленным в его диаметральной плоскости неподвижным телом обтекания специальной 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 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.

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

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 10000 до 200000.

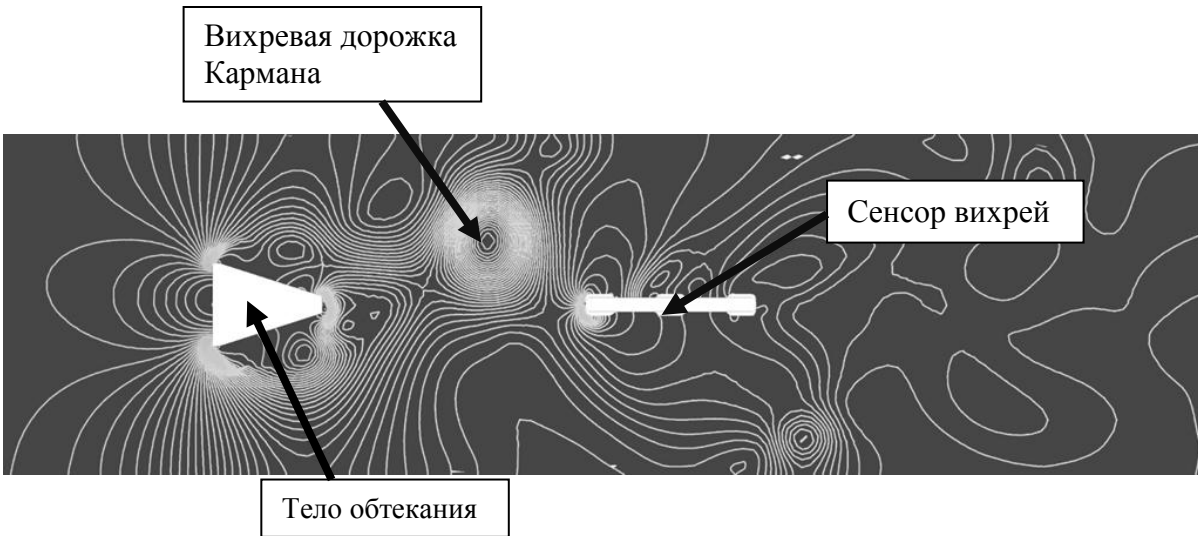


Рис. 1. Проточная часть вихревого расходомера во время работы

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

$$Sh = \frac{V_{cp} \cdot d}{f}, \quad (2)$$

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

При проведении очередных испытаний (в ЗАО ПГ Метран) расходомера с телом обтекания, у которого выступала цилиндрическая часть (рис. 2), был обнаружен эффект от влияния данной геометрической особенности тела обтекания на рабочую характеристику расходомера, причем на определенных скоростях потока (рис. 3), что свидетельствовало о возможном изменении процесса вихреобразования на определенных скоростях за счет выступающей цилиндрической части. В результате чего 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 проточной части, а также исследовать трехмерную структуру вихревого течения.

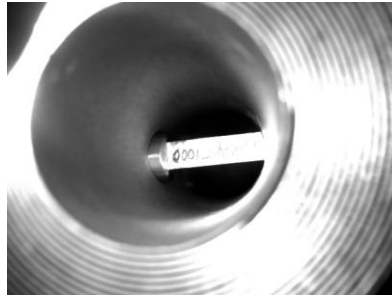


Рис. 2. Тело обтекания с выступающей цилиндрической частью

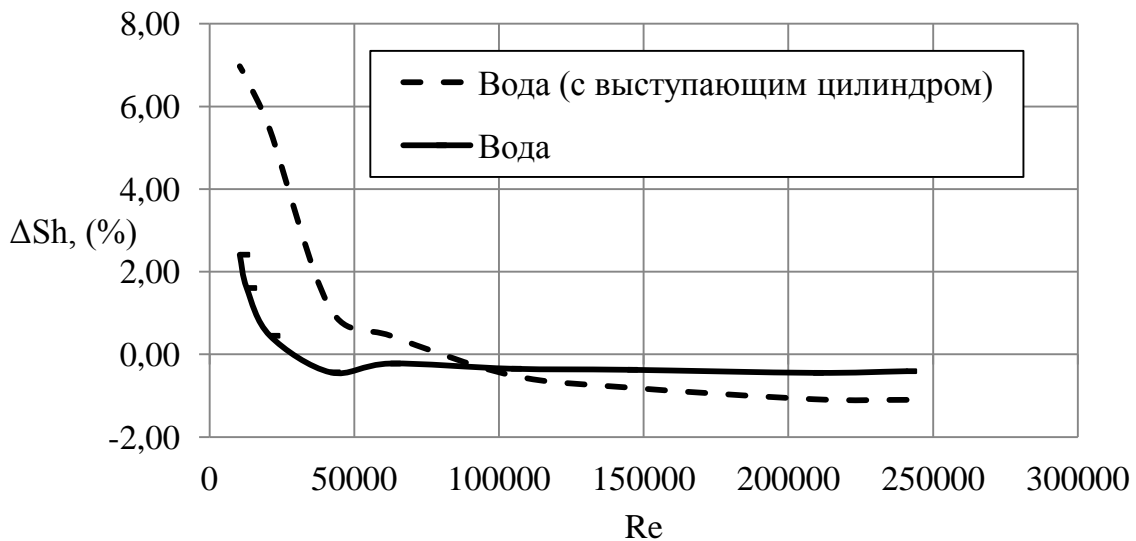


Рис. 3. Результаты испытаний тела обтекания с выступающей цилиндрической частью

Некоторые исследователи [4, 5] уже вносили корректировки в число Струхалия для потока в трубе с препятствием, путем введения эмпирических зависимостей и приведенных параметров характерного размера вихревого следа:

$$Sh = \frac{V_{cp} \cdot d_{вс}}{f}, \quad (4)$$

где $d_{вс}$ – характерный размер вихревого следа;

$$Sh = 0,2 \cdot (1 + 7,25 \cdot K_q^{3,3}), \text{ при } 10^4 < Re < 10^6, \quad (5)$$

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 неустойчивости поперечного сечения тела обтекания по его длине.

При изучении литературы было установлено, что подобный вопрос уже рассматривался в работе Кратирова Д. В. [6]. Проводились тесты пластины 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).

Автором [6] 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.

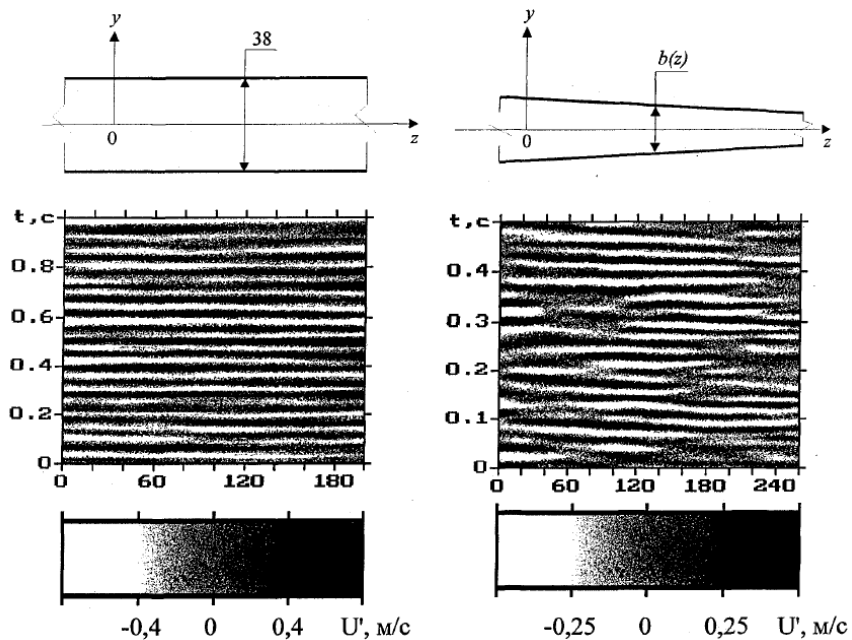


Рис. 4. Пространственно временное поле пульсаций скорости вблизи кромки пластины постоянной ширины и сужающейся пластины

Но в работе [6] не рассматривается дальнейшее распространение вихрей по проточной части, не тестируются тела обтекания более сложной формы. Кроме этого, во время выполнения данных исследований было достаточно сложно численно смоделировать процесс вихреобразования, происходящий в канале.

Верификация численных расчетов

Для того чтобы более детально понять процесс вихреобразования в проточной части расходомера, было принято решение проводить численные расчеты в программном пакете ANSYS CFX [7] так как возможности данного комплекса позволяют моделировать задачи подобного рода. Но перед тем как анализировать результаты расчетов необходимо верифицировать адекватность работы численной модели.

Для тестирования численной модели были проведены эксперименты. Для испытаний был создан макет проточной части вихревого расходомера (рис. 5) с внутренним диаметром 25 мм. Детектирование пульсаций вихрей осуществлялось при помощи механического сенсора «крыла». Испытания проводились на водном стенде, при различных скоростях потока. Численная модель соответствовала экспериментальной.

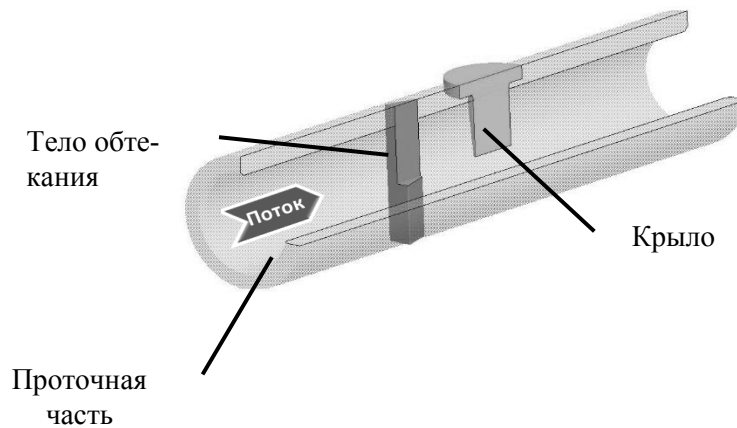


Рис. 5. Макет проточной части вихревого расходомера

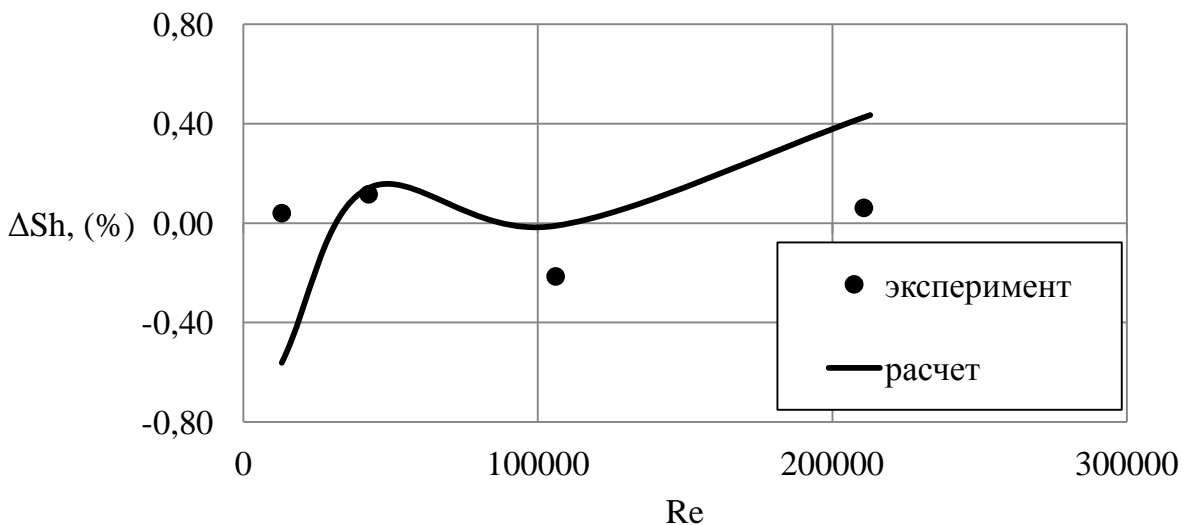


Рис. 6. Результаты численных расчетов

Из результатов численных расчетов (рис. 6) видно, что они соответствуют экспериментальным, колебания погрешности не превышает $\pm 0,4\%$, а самое главное в том, что расчетная и экспериментальная кривые согласуются между собой, что свидетельствует о возможности анализа процессов вихреобразования по результатам численных расчетов в ANSYS CFX.

Заключение

При анализе литературы и экспериментальных данных стало ясно, что даже небольшое отклонение геометрических параметров проточной части может значительно исказить рабочую характеристику вихревого расходомера. При этом исследований по влиянию геометрических параметров проточной части на рабочую характеристику расходомера проведено мало, особенно учитывающих влияние трехмерных эффектов.

Для этого было принято решение использовать численную модель, реализованную в программном пакете ANSYS CFX, при верификации которой с экспериментом было установлено, что она достаточно хорошо с ним согласуется.

Библиографический список

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. Жукаускас, А.А. Конвективный перенос в теплообменниках / А.А. Жукаускас. – М.: Наука, 1982. – 472 с.
5. Еронин, М.В. Дорожка Кармана за обтекаемым телом вихревого расходомера в возмущенном потоке: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.В. Еронин. – Казань, 2010. – 18 с.
6. Кратиров, Д.В. Структура течения и процесс вихреобразования вблизи обтекаемого тела вихревого расходомера: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д.В. Кратиров. – Казань, 2000. – 12 с.
7. Богданов, В.Д. Использование численных методов моделирования при разработке вихревых расходомеров / В.Д. Богданов, А.В. Конюхов, А.А. Кривоногов, Е.В. Сафонов, В.А. Дорохов // Датчики и системы. – 2012. – № 8(159). – С. 40–43.

[К содержанию](#)