

УДК 532.51, 532.52

## **АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА В МОДЕЛИ ВИХРЕВОГО ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА**

*Литвинов И.В., Шторк С.И., Алексеенко С.В.*

*Новосибирский государственный университет  
Институт теплофизики СО РАН  
г. Новосибирск*

### **Введение**

Течения с сильной закруткой часто встречаются в различных горелочных устройствах, в том числе, пылеугольных горелках. Для закрутки потока в таких устройствах часто используются тангенциальные завихрители, которые позволяют получить высокие параметры крутки по сравнению с другими типами генераторов закрутки. На выходе из вихревых горелочных устройств возникает зона рециркуляции, которая способствует стабилизации факела, однако приводит к развитию неустойчивости закрученного потока в виде прецессии вихревого ядра (ПВЯ). Данный тип неустойчивости вызывает паразитные вибрации, шум и даже может возбудить мощные термоакустические колебания [1]. Поэтому для разработки и проектирования практических горелочных устройств важно уметь предсказывать параметры неустойчивости течения, включая частотные и амплитудные характеристики пульсаций потока.

Текущее состояние проблемы ПВЯ дано в монографиях [2] и [3], а также в недавнем обзоре [4]. Современные экспериментальные и численные исследования, связанные с этим эффектом и использующие современные бесконтактные методы LDA и PIV, изложены в работах [5-7].

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию закрученного течения в модели вихревого горелочного устройства. Эксперименты включают в себя измерения полей скоростей при варьировании параметра закрутки потока и расходного режима, измерения частотных характеристик возникающих вихревых структур, а также измерение поля статического давления методом фазового осреднения. При помощи аналитической теории [3], были рассчитаны геометрические характеристики вихрей и построена модель, позволяющая рассчитывать частоту прецессии вихря.

### **Описание экспериментальной установки**

Исследования проводились на вихревой камере тангенциального типа. Она является моделью типичных вихревых горелочных устройств. Завихритель представляет собой осесимметричную камеру с двумя входными патрубками и одним выходным соплом (рис. 1).

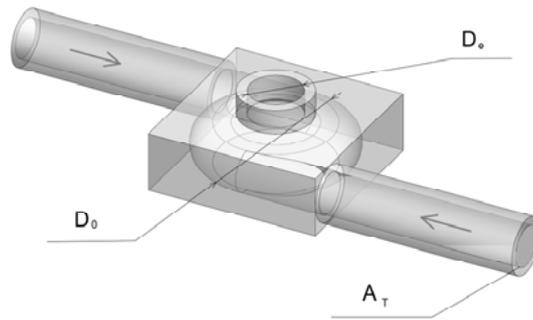


Рис. 1. Геометрия тангенциального завихрителя.

Согласно работе [4], определяющими параметрами для такой геометрии выбраны: конструктивный параметр закрутки  $S$  и расходный параметр – число Рейнольдса  $Re = \frac{D_e U_0}{\nu}$  ( $U_0$  – среднерасходная скорость на срезе сопла,  $\nu$  – кинематическая вязкость). Конструктивный параметр закрутки определялся со-

гласно [2], аналогично циклонным камерам:  $S = \frac{\pi D_e D_0}{4A_T}$ , где  $D_e$  и  $D_0 = 145$  мм – диаметры выходного сопла и основной части циклонной камеры соответственно,  $A_T$  – площадь тангенциальных входных патрубков с диаметром 40 мм. С помощью трех сменных выходных сопел с  $D_e$  равным 30, 40 и 52 мм варьировался параметр  $S$  ( $S = 1.4, 1.8, 2.4$  соответственно). Экспериментальная установка представляла собой открытый аэродинамический контур (рис. 2).

В качестве рабочей среды использовался атмосферный воздух, который подавался в рабочий участок (5) воздуходувкой (7). Расход в системе контролировался за счет изменения частоты вращения двигателя воздуходувки с помощью частотного преобразователя (2) и поддерживался постоянным в пределах точности расходомера (8) (сужающее устройство с дифференциальным манометром).

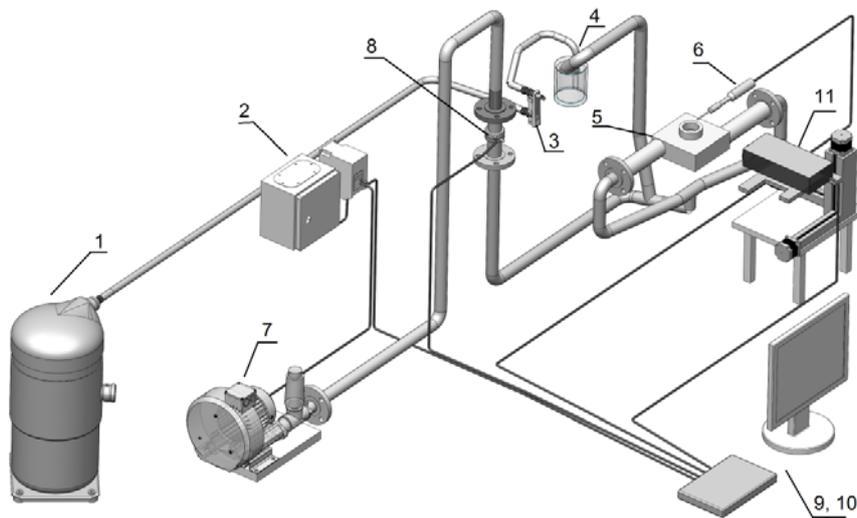


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

В качестве рабочей среды использовался атмосферный воздух, который подавался в рабочий участок (5) воздуходувкой (7). Расход в системе контролировался за счет изменения частоты вращения двигателя воздуходувки с помощью частотного преобразователя (2) и поддерживался постоянным в пределах точности расходомера (8) (сужающее устройство с дифференциальным манометром).

метром), т.е. порядка 1–1.5%. Расход задавался на персональном компьютере (10) по интерфейсу RS-485. С помощью системы, состоящей из двухкомпонентного лазерно-доплеровского анемометра ЛАД-06и и координатно-перемещающего устройства (КПУ) (11), в автоматизированном режиме измерялись профили в турбулентном потоке ( $\approx 5$  тыс. вспышек в каждой точке). В качестве рассеивающих частиц для получения доплеровского сигнала использовались капли парафинового масла, которые производились с помощью генератора аэрозоля (4). Подача воздуха в генератор осуществлялась с помощью компрессора (1), расход аэрозоля измерялся ротаметром (3). Полученный аэрозоль инжестировался в основной поток воздуха перед входом в рабочий участок. И использованный генератор аэрозоля позволил получить частицы масла размером порядка 1–2 мкм, которые хорошо следуют за потоком воздуха. Для измерения пульсаций статического давления на срезе сопла камеры был установлен микрофон со специальным наконечником в виде тонкого капилляра (рис. 3).

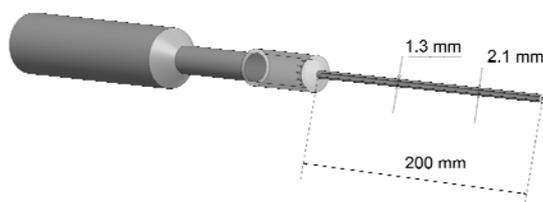


Рис. 3. Микрофон с отборником.

Известно, что такой отборник изменяет амплитуду и фазу выходного сигнала [8], поэтому проводилась соответствующая калибровка. Таким образом, тонкий отборник позволил, минимально возмущая поток, измерить частоту пульсаций давления, соответствующую частоте ПВЯ. Выходной сигнал микрофона оцифровывался с помощью АЦП (9).

Сигнал пульсаций давления, полученный с помощью акустических датчиков, регистрировался в течение 60 секунд с частотой дискретизации АЦП 9 кГц. Далее полученные массивы данных обрабатывались с использованием численного Фурье-преобразования. Основная гармоника с максимальной амплитудой в полученных спектрах соответствовала частоте ПВЯ. Также с помощью ЛДА были измерены профили осевой  $U = V_z$  и тангенциальной скорости  $W = V_x$  в сечении  $y$ - $z$  (рис.4).

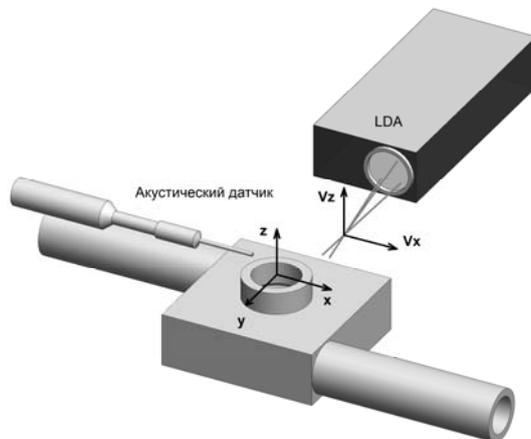


Рис. 4. Расположение отборника давления и измерительных лучей ЛДА.

## Результаты

Частота ПВЯ была измерена в большом диапазоне расхода для трех различных параметров закрутки. Как видно, частота ПВЯ линейно растет с расходом (рис.5).

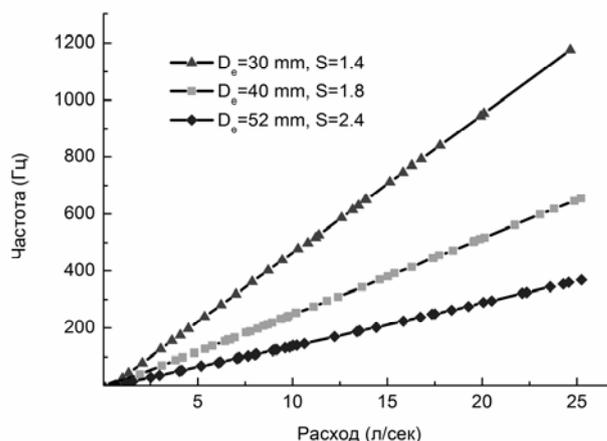


Рис. 5. Зависимость частоты ПВЯ от расхода воздуха.

Видно также, что различным параметрам закрутки соответствуют различные углы наклона прямой. Ниже приведем график зависимости числа Струхала

$St = \frac{fD_e}{U_0}$ , имеющего смысл безразмерной частоты, от числа Рейнольдса (рис. 6).

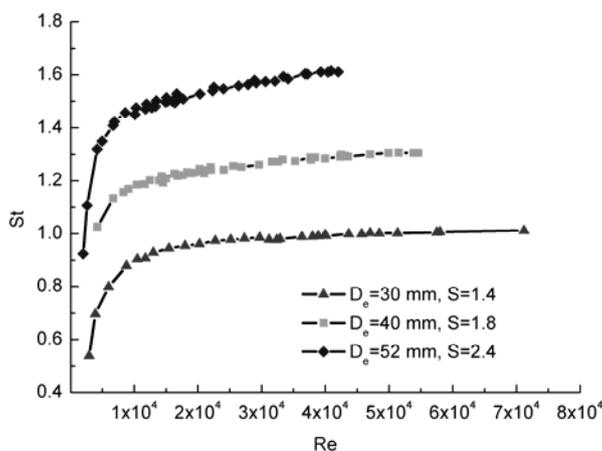


Рис. 6. Зависимость  $St$  от  $Re$ .

Можно говорить об автомодельности  $St$  относительно  $Re$ , начиная с  $Re \approx 10^4$ . Эта зависимость дает возможность, например, применения вихревой камеры в качестве расходомера. Лопаточные завихрители уже используются для измерения расхода влажного газа в промышленности [9], что позволяет рассчитывать на перспективы использования тангенциальных завихрителей в данной области, поскольку в тангенциальных завихрителях отсутствуют гидродинамические потери, связанные с обтеканием лопаток, и проблемы эрозионного износа лопаток из-за химической агрессивности сред или наличия абразивных примесей.

Характерные режимы течения, выявленные при акустических измерениях, были исследованы с помощью ЛДА. Все приведенные далее данные обезразмерены на диаметр выходных сопел  $D_e$  и среднерасходные скорости  $U_0$ . Было исследовано влияние числа Рейнольдса на профили осредненных компонент скорости

в поперечном сечении на высоте 30 мм от сопла (при  $D_e = 30$  мм,  $S = 1.4$ ; рис. 7). Результаты демонстрируют уже отмеченную автомодельность течения при больших  $Re$ .

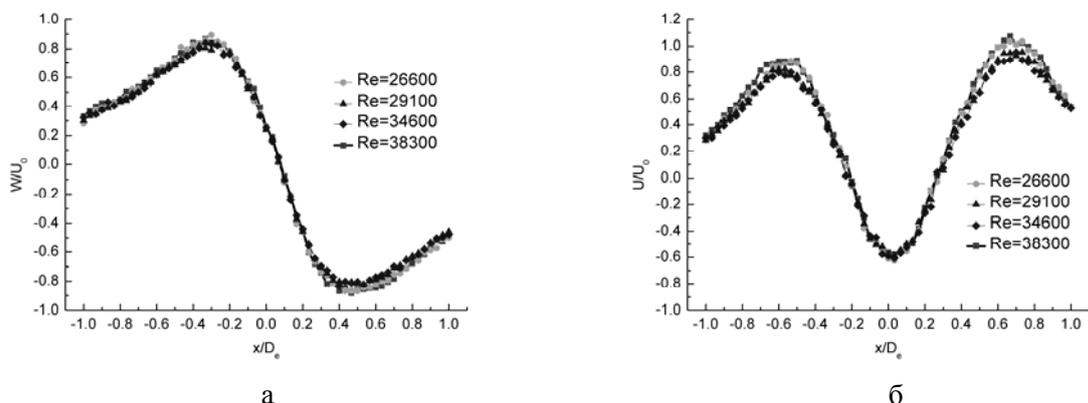


Рис. 7. Автомодельность профилей скорости по расходу (сопло  $D_e = 30$  мм): а - тангенциальной скорости, б- осевой скорости.

Было исследовано влияние параметра крутки при фиксированном расходе (рис. 8). Измерения производились на высоте 1 мм над соплом ( $z = 0.03D_e$ ). Видно, что увеличение закрутки наряду с ростом тангенциальной компоненты скорости приводит к увеличению интенсивности возвратного течения.

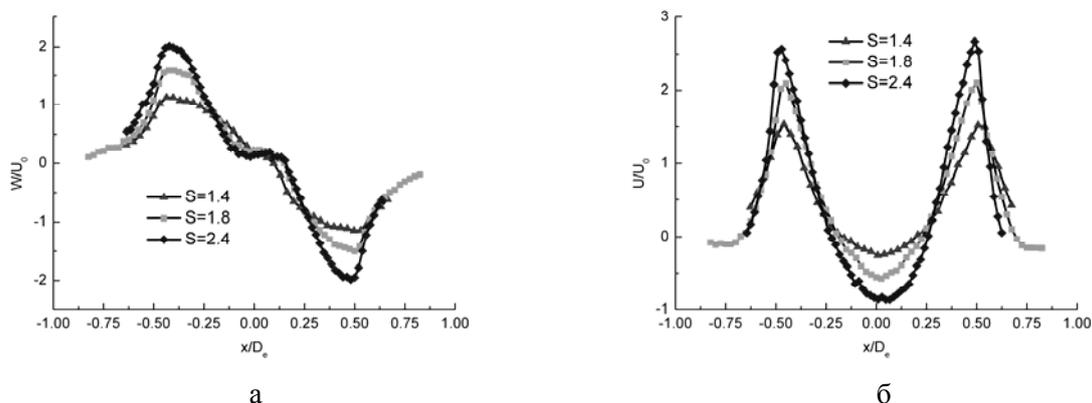


Рис. 8. Профили осредненной скорости при изменении  $S$ : а - тангенциальной скорости, б – осевой скорости (расход  $Q = 9$  л/сек).

Влияние ПВЯ на осредненные характеристики течения наиболее заметно для тангенциальной компоненты скорости (рис. 8,а). Изменение  $W$  вдоль радиуса отличается от линейного, с явным прогибом профиля вниз. Здесь заниженный (по сравнению с квазитвердым распределением) уровень средней тангенциальной скорости есть результат того, что ПВЯ индуцирует тангенциальную скорость разного знака в разных фазах прецессии вокруг центра координат. Соответственно, при осреднении скорости противоположного знака взаимно компенсируются. Полученные профили осредненной скорости использовались для расчета частоты ПВЯ.

С помощью двух акустических датчиков и техники фазового осреднения была получена картина мгновенного распределения давления в поперечном сечении вихревой камеры. На микрофоны обоих датчиков были установлены одинаковые отборники, идентичные использованным для частотных измерений

(рис. 3). Конец отборника опорного сигнала помещался в фиксированном положении заподлицо с соплом тангенциального завихрителя, а измерительный датчик, установленный на координатном устройстве, перемещался вдоль линии соединяющие отборники. Реализации сигналов с обоих датчиков записывались с помощью АЦП в течение 30 секунд с частотой дискретизации 2 кГц. Далее сигнал измерительного датчика, разбивался на окна, равные по размеру одному периоду опорного сигнала и, таким образом, производилось усреднение по большому количеству периодов. Учитывая симметрию вихревого течения и переходя от временной переменной к угловой, удалось получить зависимость статического давления от азимутального угла. Таким образом, была произведена обработка сигналов для разных точек, и было получено распределение статического давления в пространстве.

Для правильного применения процедуры фазового осреднения с помощью специальной процедуры калибровки была найдена передаточная функция отборника давления, включающая амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и фазово-частотную характеристику (ФЧХ). Для калибровки использовался специальный калибровочный участок, включающий в себя динамик, микрофон, усилитель и АЦП. Снятие характеристик производилось методом нарастающего синусоидального сигнала с 2 до 2000 Гц. Таким образом, определялись усредненные по нескольким реализациям АЧХ и ФЧХ микрофона с отборником и без него, и вычислялась передаточная функция. Эти калибровочные характеристики учитывались при анализе акустического сигнала.

С помощью описанной техники фазового осреднения была получена картина распределения статического давления в поперечной плоскости над соплом для  $S = 2.4$  при расходе 9 л/сек (рис. 9).

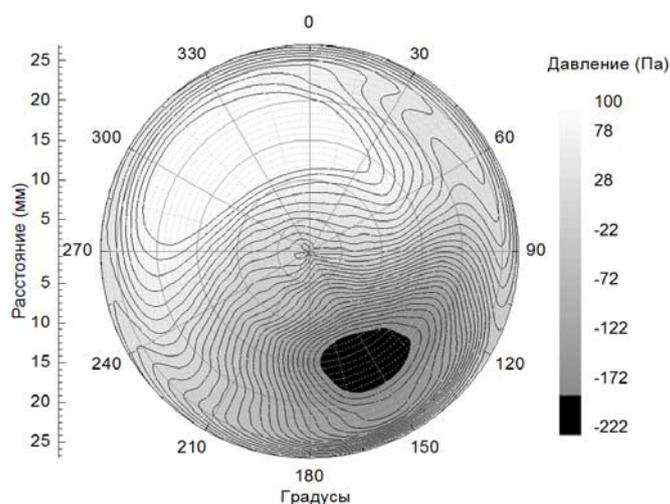


Рис. 9. Распределение статического давления.

Хорошо выраженная область пониженного давления (рис. 9), очевидно, соответствует прецессирующему вихревому ядру. Можно оценить размер ядра вихревой структуры (значение на полувысоте в радиальном направлении), а также её отклонение от центра (размер винта). Радиус ядра  $\approx 8$  мм, отклонение  $\approx 17$  мм, значения этих геометрических характеристик подтверждается также аналитической теорией.

Наиболее полное и детальное изложение теории движения винтового вихря в цилиндрической трубе с анализом влияния различных факторов изложено в работе [10], здесь же приводятся только используемые для расчета формулы. Формула для расчета частоты ПВЯ на выходе из сопла вихревой камеры имеет вид:

$$f(\Gamma, a, \ell, \varepsilon, R, u_0) = -\frac{\Gamma}{8\pi^2} \frac{Wb(\Gamma, a, \ell, \varepsilon, R, u_0)}{\ell \sqrt{\ell^2 + a^2}},$$

где  $\varepsilon$  – радиус ядра вихря,  $a$  – радиус винта,  $h = 2\pi l$  – шаг винта,  $\Gamma$  – интенсивность вихря,  $R$  – радиус сопла,  $u_0$  – скорость на оси сопла,  $Wb(\Gamma, a, \ell, \varepsilon, R, u_0)$  – би-нормальная скорость вихря, согласно [10].

Для расчета частоты необходимо определить пространственные параметры вихревой структуры (рис. 10). Они были найдены напрямую из экспериментальных профилей (рис. 7, 8) с помощью метода наименьших квадратов.

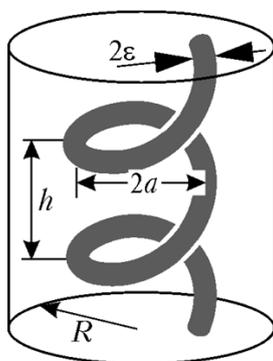


Рис. 10. Винтовая структура вихря.

Было сделано сопоставление частоты ПВЯ, полученной с помощью аналитической теории с экспериментально измеренной в эксперименте (рис. 11). Среднее отклонение от экспериментальных данных менее 10-20%, поэтому можно говорить об адекватном описании закрученного течения представленной формулой.

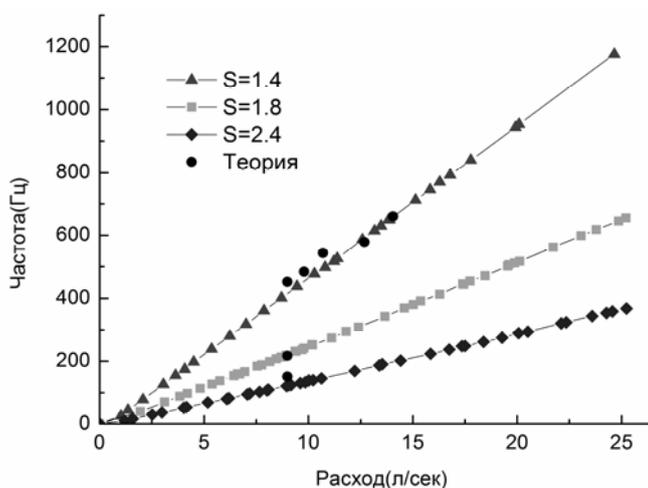


Рис. 11. Сравнение теории и эксперимента.

## Заключение

- Эксперименты показали, что сильная закрутка потока приводит к генерации выраженной нестационарности течения в форме прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ); частота прецессии линейно зависит от расхода; существует автомодельность  $St$  от  $Re$  после  $Re \approx 10^4$ , как было показано с помощью скоростных профилей и частотных зависимостей.

- Акустические датчики позволяют напрямую определить пространственные характеристики вихревых структур.

- Аналитический подход к ПВЯ хорошо согласуется с экспериментом.

Представленные в работе экспериментальные данные могут быть полезны для построения теоретических подходов к описанию ПВЯ, а также для верификации численных расчетов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 годы» и ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы», РФФИ (гранты №№ 11-08-01063, 10-08-01096, 10-08-01093), гранта Правительства России № 11.G34.31.0046 для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах (ведущий ученый – К. Ханьялич, НГУ). Авторы выражают также благодарность д.ф.-м.н. Куйбину П.А. за помощь в подготовке материала.

## Литература

1. Froud, D., O'Doherty, T., Syred, N., 1995. Phase averaging of the precessing vortex core in a swirl burner under piloted and premixed combustion conditions. *Comb. and Flame.*, Vol. 100, pp. 407–412
2. Gupta, A.K., Lilley, D.G., Syred, N., 1984. *Swirl Flows*. Abacus Press.
3. Алексеенко, С.В., Куйбин, П.А., Окулов, В.Л., 2005. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Изд. Ин-та теплофизики СО РАН, 504 с.
4. Syred, N., 2006. A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems. *Prog. energy combust.* Vol. 32 (2), pp. 93–161.
5. Valera-Medina, Syred, Griffiths, 2009. Visualisation of isothermal large coherent structures in a swirl burner. *Combustion and Flame*. № 156, pp. 1723–1734
6. Mak, Balabani, 2007. Near field characteristics of swirling flow past a sudden expansion *Chemical Engineering Science*, №62, pp.6726 – 6746
7. Ranga Dinesh, Kirkpatrick, Jenkins, 2010. Investigation of the influence of swirl on a confined coannular swirl jet. *Computers & Fluids*, № 39, pp. 756–767
8. Cala, C.E., Fernandes, E.C., Heitor, M.V., Shtork, S.I., 2006. Coherent structures in unsteady swirling jet flow. *Exp. Fluids*, Vol. 40, No. 2, 267-276.
9. Chenquan, H., Yanfeng, G., 2012. Wet gas meter based on the vortex precession frequency and differential pressure combination of swirlmeter. *Measurement*, doi:10.1016/j.measurement.2011.12.013
10. Kuibin, P.A., Okulov, V.L., 1998. Self-induced motion and asymptotic expansion of the velocity field in the vicinity of helical vortex filament. *Phys. Fluids.*, Vol. 10, № 3, 607–614.