УДК 532.5

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВИХРЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ

Винокуров А.П., Шторк С.И., Алексеенко С.В.

Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 11-08-01063, 10-08-01096, 10-08-01093), грантов Правительства России (№11.G34.31.0046) и Минобрнауки 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».

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена экспериментальному и численному исследованию нестационарного закрученного потока в модели осесимметричной вихревой горелки. Посредством пьезоэлектрических датчиков давления измерены пульсационные характеристики прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ), в том числе зависимости частоты прецессии ПВЯ от расхода жидкости, параметра крутки завихрителя и диаметра сопла. Также с использованием тензодатчиков давления проведены исследования перепадов давления внутри камеры. С помощью лазерного доплеровского анемометра (ЛДА) построены профили осредненной осевой скорости. Проведено численное моделирование нестационарных явлений на оснвое CFD-программы Star-CCM+ с использованием метода Detached Eddy Simulation (DES). Проведено сравнение численных и экспериментальных данных.

ВВЕДЕНИЕ

Закрученные потоки представляют собой важный раздел современной гидро- и аэродинамики в связи с их многочисленными практическими приложениями [1].Так в скрубберах и циклонных сепараторах закрутку потока используют для очистки газов и деаэрации топлив. В горелочных устройствах интенсивную закрутку потока, приводящую к распаду вихря и образованию приосевой зоны обратного течения, применяют для стабилизации пламени. Однако, имея очевидные положительные свойства, возвратное течение характеризуется развитием спиральной моды неустойчивости потока, которая наблюдается как прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ) [2]. С одной стороны, ПВЯ улучшает процессы смешения, что может быть полезным для обеспечения надежной стабилизации пламени при сжигании низкокалорийных топлив или обедненных топливно-воздушных смесей, позволяющих радикальное снижение выбросов окислов азота. С другой стороны, динамическая неустойчивость течения представляет собой потенциальную опасность из-за возможности резонанса с термоакустическими модами камеры сгорания [3]. Немало внимания уделяется изучению нестационарных когерентных вихревых структур, в частности ПВЯ, за рабочим колесом турбины ГЭС, возникающих при неоптимальных режимах работы станции. Совпадение частоты прецессии ПВЯ с одной из собственных частот гидроагрегата может повлечь за собой сильные резонансные вибрации, представляющие серьезную опасность для всей конструкции ГЭС.

На сегодняшний день явление ПВЯ описано достаточно подробно, в частности в [4-6]. Однако, влияние различных геометрических параметров закручивающего устройства и характеристик потока на ПВЯ, а также методы управления прецессией вихря до сих пор изучены слабо. Кроме того, несмотря на мно-

© Винокуров А.П., Шторк С.И., Алексеенко С.В.

голетние исследования данного явления, на настоящий момент нет достаточной информации для конкретного определения причин и механизмов образования данного явления. По этим причинам детальное исследование эффекта ПВЯ по-прежнему остается актуальной задачей.

Работа включает в себя экспериментальное и численное исследование закрученного потока в осесимметричной гидродинамической вихревой камере, в частности, изучение влияния параметра крутки завихрителя, диаметра сопла и параметров потока на характеристики ПВЯ, а также получение представления о структуре потока.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Экспериментальный стенд представляет собой замкнутый гидродинамический контур и состоит из рабочего участка в виде осесимметричной вихревой камеры, бака, емкостью 600 литров, и системы полиэтиленовых труб диаметром 40 мм. Напор жидкости создается с помощью химического насоса Х100-80-160Т153 с номинальной производительностью 100 м^3/ч. Расход жидкости в контуре регулируется с помощью частотного преобразователя Е2-8300-030Н, производства фирмы Веспер, измеряется посредством стандартного сужающего устройства в комплекте с дифференциальным манометром Сапфир-М и варьируется от 0 до 6 л/с. Также предусмотрена подача воздуха в контур из накопительного ресивера. Расход газовой фазы измеряется ротаметрами Aalborg.

Рабочий участок, предназначенный для исследования нестационарных когерентных вихревых структур, является осесимметричной цилиндрической вихревой камерой (Рис.1). Закрутка потока создается с помощью лопаточного завихрителя. Затем, через сопло, жидкость поступает в цилиндрическую камеру диаметром 104 мм. В установке используются съемные завихрители с параметрами крутки 0.53, 0.87 и 1.33 (15, 14 и 14 лопаток, соответственно), а также съемные сопла диаметром 30, 40 и 52 мм. Параметр крутки рассчитывается по формуле, представленной в [1]:

$$S = \frac{2}{3}\left(\frac{1-(d_1/d_2)^3}{\left(1-(d_1/d_2)^2\right)}\right)\tan(\phi) \qquad (1)$$

где d_1 и d_2 – диаметры втулки и завихрителя соответственно, а φ - угол наклона лопаток. Камера изготовлена из оргстекла, длина рабочего участка – 236 мм. Имеется сменная центральная часть с плоскими наружными гранями, предназначенная для проведения оптических бесконтактных методов изучения поля течения, в частности ЛДА.

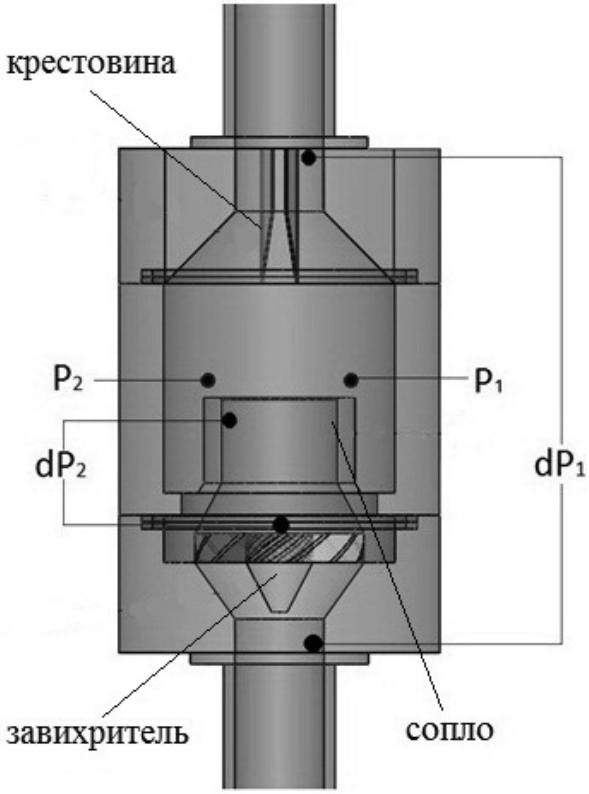

Рис.1 Вихревая гидродинамическая камера.

Пульсации давления, порождаемые ПВЯ, детектируются двумя пьезодатчиками давления P_1 и P_2, установленными над соплом диаметрально противоположно. При такой утановке датчиков пульсации давления регистрируются в противофазе. Вычитание одного сигнала из другого позволяет избавиться от шумов, а взятие преобразования Фурье от полученного разностного сигнала дает возможность определить частоту прецессии вихря.

Два дифференциальных тензодатчика давления предназначены для измерения перепадов давления внутри камеры – dP_1 между торцом завихрителя и краем сопла, т.е. между центром и

окраиной вихря, что позволяет судить о его всасывающей силе, и dP_2 между входом и выходом из камеры, дающего представление об интесивности процессов вихреобразования.

Измерения скоростей производится с помощью 2-х компонентной системы ЛДА “ЛАД-06и” [7], включающей в себя анемометр, КПУ (координатно-перемещаемое устройство) и компьютер с оригинальным программным обеспечением. Система ЛДА работает в режиме обратного светорассеяния. Погрешность измерения средней скорости составляет не более 0.5%. КПУ позволяет с высокой точностью перемещать измерительный объем ЛДА в указанные точки, где в течение времени, необходимого для набора статистики, производится измерение скорости.

Численное моделирование проводится в коммерческой CFD-программе Star-CCM+. Для решения нестационарного процесса на объемной сетке из 400000 многогранных ячеек используется метод отсоединенных вихрей (Detached Eddy Simulation - DES) и модель Спаларта-Аллмареса (Spalart-Allmaras model - SA). DES, являющийся комбинацией метода больших вихрей (LES) и решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), хорошо зарекомендовал себя в решении подобных задач [8, 9].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Были получены зависимости частоты прецессии ПВЯ в зависимости от расхода жидкости, а также параметра крутки завихрителя и диаметра сопла. Зависимость от расхода имеет линейный вид, при этом наклон прямой растет с увеличением параметра крутки и уменьшением диаметра сопла. Сравнение экспериментальных и численных данных (Рис.2) показывает весьма хорошее совпадение частот прецессии при малой закрутке потока, однако с увеличением параметра крутки расхождение увеличивается.

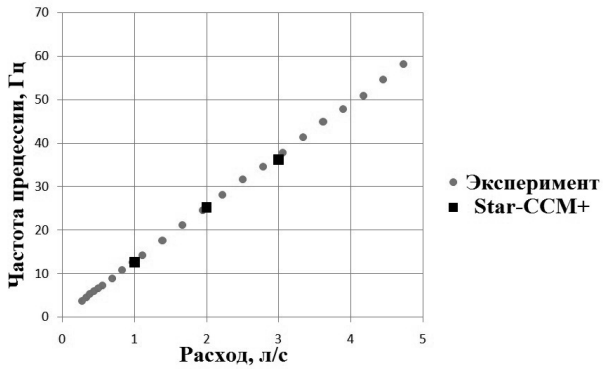

Рис.2 Зависимость частоты прецессии от расхода.

Зависимости осредненных по времени перепадов давления dP_1 и dP_2 от расходов жидкости имеют квадратичный вид. Перепад возрастает при увеличении параметра крутки (Рис.3) и уменьшении диаметра сопла. График зависимости в безразмерных величинах (безразмерное давление от Re) показывает, что при Re, превышающем 50000, безразмерное давление перестает зависеть от Re, т.е. процесс является автомодельным.

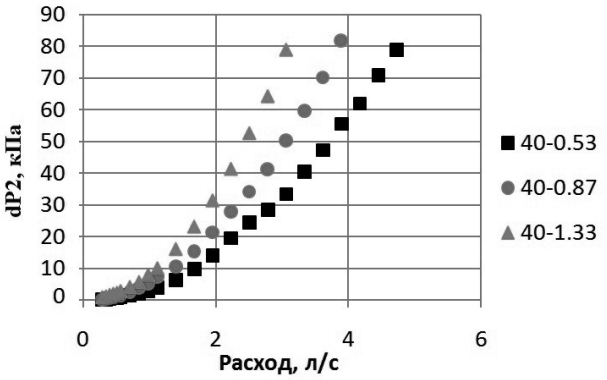

Рис.3 Зависимость dP_2 от расхода.

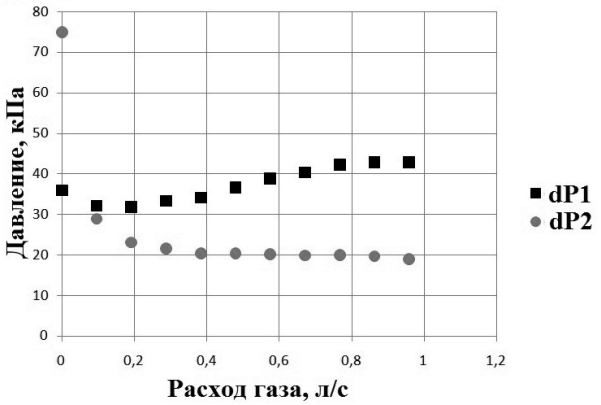

Рис.4 Зависимость осредненных перепадов давления от расхода газовой фазы.

Были произведены измерения осредненных перепадов давления dP_1 и dP_2 при добавлении газовой фазы (Рис.4). Газосодержание в потоке регулировалось изменением расхода газа при

фиксированном расходе жидкости. С появлением второй фазы в потоке, перепад dP_1 сначала претерпевает скачок вниз, а с увеличением газосодержания плавно увеличивается. Для перепада dP_2 характерно резкое падение при появлении газа. При увеличении расхода газа перепад продолжает плавно уменьшаться.

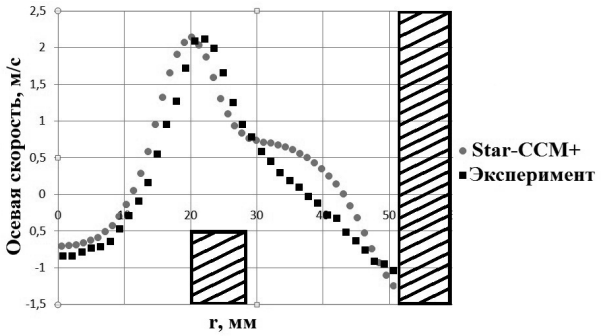

Рис.5 Распределение осредненной осевой компоненты скорости над соплом.

Посредством ЛДА получены профили распределения средней осевой скорости по радиусу внутри камеры – обнаружена рециркуляционная зона вблизи оси симметрии, пик скорости располагается около края сопла, затем скорость убывает и вблизи стенки камеры опять становится отрицательной. Распределение аксиально симметрично. С увеличением высоты над соплом наблюдается расширение струи, которое проявляется в увеличении ширины зоны рециркуляции и сдвиге максимума скорости. Численное моделирование весьма точно повторяет эксперимент (Рис.5) – вблизи сопла практически совпадают как форма профиля, так и положение зоны рециркуляции и пика максимума скорости. На большем расстоянии от сопла профили отличаются сильнее.

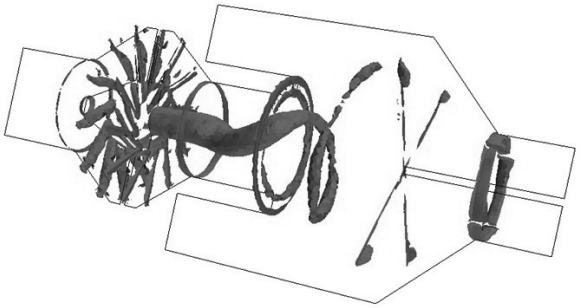

Рис.6 Визуализация ПВЯ.

С помощью численного моделирования получены мгновенные распределения различных величин на срезе сопла. Центр вихря совпадает с зонами пониженного давления и высокой завихренности, области высокой положительной и отрицательной скоростей располагаются по разные стороны от вихря, т.е. вихревое ядро прецессирует вдоль границы зоны рециркуляции. Визуализация ПВЯ при помощи λ_2-критерия показывает характерную левоспиральную форму ядра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено экспериментальное и численное исследование нестационарных вихревых процессов в осесимметричной гидродинамической камере. На основании экспериментальных и численных данных получено представление о структуре потока. Обнаружено возникновение обширной зоны рециркуляции вдоль оси симметрии, а также областей обратного тока вблизи стенок камеры. Внутри сопла поток прижат к стенкам, после выхода в цилиндрическую камеру он расширяется. Внутри камеры существует ПВЯ, прецессирующее в направлении закрутки потока. При больших расходах численное моделирование показывает возникновение вторичных вихревых структур в камере.

Анализ пульсаций давления показал, что частота прецессии ПВЯ линейно зависит от расхода жидкости. При этом увеличение параметра крутки ведет к увеличению частоты прецессии, что согласуется с [1]. Проведено исследование влияния диаметра сопла на частоты прецессии ПВЯ. Уменьшение диаметра ведет к увеличению угла наклона линейной зависимости частоты прецессии от расхода жидкости. Очевидно, что диаметр сопла влияет на закрутку потока. Однако до сих пор не существует аналитических методов расчета параметра крутки завихрителя, учитывающих последующие сужения и расширения потока. Возможно, систематизация полученных данных поможет в этом. Эксперимент показал, что влияние диаметра сопла на частоту прецессии уменьшается с увеличением параметра крутки завихрителя.

Проведено численное моделирование потока в CFD программе Star-CCM+. Сравнение результатов численного моделирования и эксперимента показало удовлетворительное соответствие как частот прецессии, так и полей скорости. Однако при больших расходах и параметрах крутки завихрителя расхождения возрастают. Для достижения большего соответствия в будущем возможно проведение моделирования с помощью других CFD программ и численных методов, например LES.

Эксперимент, проведенный с двухфазным потоком, показал значительное влияние газа на параметры закрученного потока. Полученные результаты согласуются с [10]. Добавление дисперсной газовой фазы представляется важным механизмом влияния на процессы вихреобразования и будет исследоваться в дальнейшем на основе полученных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лили Д., Сайред Н. Закрученные потоки. – М.: Мир, 1987, 590 с.
2. Шторк С.И., Комас О., Фернандес Э.К., Хейтор М.В. Теплофизика и аэромеханика.- 2005.- Т. 12, №2.-С. 229-241.
3. Syred N. A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems // Prog. Energy Combust. Sc. – 2006. - Vol. 32 (2), pp. 93–161.
4. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2003. 504 с.
5. Shtork S.I., Cala C.E., Fernandes E.C. Experimental characterization of rotating flow field in a model vortex burner. Experimental thermal and fluid science, 2007, 31: P.-779-788.
6. Martinelli F., Cozzi F., Coghe A. Phase-locked analysis of velocity fluctuation in a turbulent free swirling jet after vortex breakdown. Experiments in Fluids, 2012.
7. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ЛАД 06-и, Новосибирск: Институт оптикоэлектронных информационных технологий, 2006 (URL:http://www.ioit.ru).
8. Spalart P.R. Detached Eddy Simulation. Fluid Mechanics, 2009, 41. 181-202.
9. Paik J., Sotiropoulos F. Numerical simulation of strongly swirling turbulent flows through an abrupt expansion. International journal of heat and fluid flow, 2010, 31: P.390-400.
10. Alekseenko S.V., Kuibin P. A., Okulov V. L., Shtork S. I. Vortex Precession in a Gas-Liquid Flow // Heat Transfer Research. 2010. Vol. 41 / Issue 4. pp. 465-478.