УДК 532.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВИХРЕВЫХ ЯВЛЕНИЙ

Дектерев А.А., Дектерев А.А., Дектерев Д.А., Шторк С.И.

Институт Теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ
(гранты №№ 11-08-01063, 10-08-01096, 10-08-90032, 10-08-01093)
и Министерства образования и науки РФ в рамках реализации ФЦП
«Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена численному моделированию нестационарных режимов течения в модельной вихревой камере с формированием прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ). Применение методов DES моделирования позволяет в достаточной мере качественно предсказать поведение сильнозакрученного потока. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными PIV.

ВВЕДЕНИЕ

Использование закрученных потоков газов, жидкостей и различных родов смесей стало неотъемлемой составляющей современного приборостроения [1, 2]. Полезные свойства закрутки в большой мере нашли себе применение в энергетике. С помощью закрутки потока добиваются стабилизации пламён в горелочных устройствах [3, 4]. Формирование закрученных течений неизбежно за колёсами гидротурбин ГЭС или турбинами самолётов. Циклоны, вихревые расходомеры, сепараторы - все эти устройства работают на принципе закрученных потоков. Однако подобные течения имеют не только положительные особенности. В сильнозакрученных потоках имеет место быть формирование нестационарных явлений [5], например, вихревых жгутов. К ним относится так называемое прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ), именно об этом эффекте и пойдёт речь в данной статье.

Исследование эффекта ПВЯ является актуальной задачей в связи с частым присутствием этого явления во многих технологических процессах [6]. Низкие частоты прецессии жгута, образованного, к примеру, за колесом гидротурбины ГЭС могут привести к резонансу с собственными частотами гидроаппарата [7], что в свою очередь может повлечь за собой сильные вибрации, ведущие к разрушению рабочего агрегата. Также ПВЯ различным образом может влиять на КПД аппаратов [8].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Задачей данной работы было численное моделирование эффекта ПВЯ в цилиндрической камере с тангенциальным типом закручивающего устройства. Геометрия расчётной вихревой камеры в точности совпадала с геометрией экспериментального стендов в институте теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе. Сопоставление результатов моделирования также производилось с результатами экспериментов на этом стенде.

Ранее численное моделирование закрученных потоков выявило значительные преимущества методов DES (detached eddy simulation - моделирование отсоединенных вихрей) над RANS (Навье-Стокс осреднённые по Рейнольдсу) [9]. По этим причинам моделирование в работе производилось именно методом DES с использованием модели турбулентности MSST Menter's k-omega.

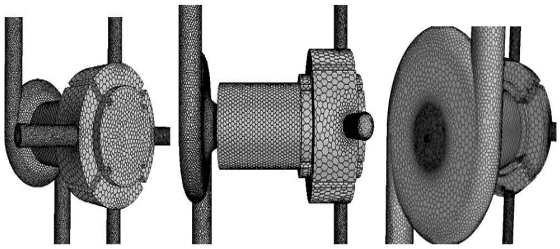

Рис.1 Расчётная сетка

На рисунке 1 представлена рачётная геометрия и сетка установки. Параметр крутки, заявленный в эксперименте, S=3. Для расчётов использовалась полигидральная сетка со значительным сгущением ячеек в районе наблюдения ПВЯ и усиленной детализацией пристеночных слоёв. Общее количество ячеек - порядка одного миллиона.

Начальные условия задавались следующим образом: расход масс на входе и давление на выходе, рабочая среда – вода. Для экономии временного и компьютерного ресурса изначально решалась стационарная задача со стандартной k-e моделью турбулентности, после формирования установившегося потока происходила смена на решение нестационарной задачи неявной схемы методом DES и моделью турбулентности MSST Menter's k-omega второго порядка аппроксимации пространства и времени.

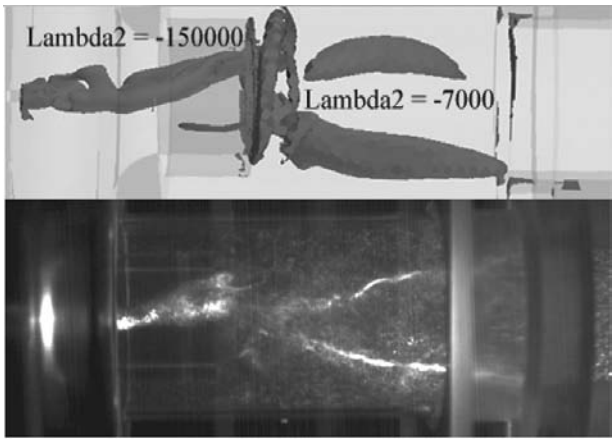

Рис.2 Характерные картины течения в эксперименте и расчёте.

В результате моделирования были получены структуры, качественно совпадающие со структурами, наблюдаемыми в эксперименте. На рисунке 2 представлена визуализация прецессирующего вихревого ядра с использованием изоповерхности lambda-2 [10]. Также можно наблюдать зону распада вихря в области внезапного расширения за соплом и вторичные вихревые структуры. Однако интенсивность вторичных вихрей значительно ниже интенсивности основного ПВЯ, и в данной статье внимание на них обращено не будет.

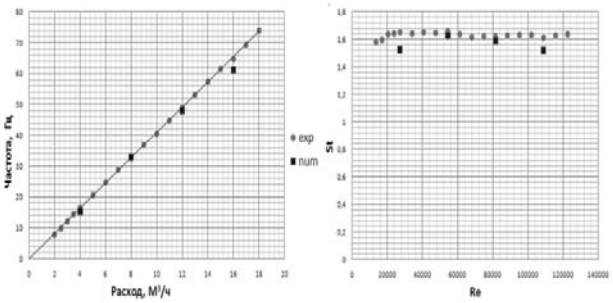

Рис.3 Сопоставление расчетных частот ных характеристик с экспериментальными

На выходе из сопла была расположена точка записи пульсаций давления. По спектрам пульсации давления при помощи ФФТ преобразования были получены частотные характеристики ПВЯ. Оценки частоты прецессии вихревого ядра выявили хорошее соответствие расчетных данных с данными, полученными экспериментально. На рисунке 3 представлено сопоставление этих данных в размерных (частота от расхода) и безразмерных (Струхаль от Рейнольдса) величинах.

Далее приводится количественное сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными, все представленные ниже результаты соответствуют расходу воды равному 12 м^3/ч для плоскости, пересекающей сопло в двух от его края. На рисунке 4 приведено сопоставление расчетного поля мгновенных радиальных компонент скорости с полем полученным техникой PIV.

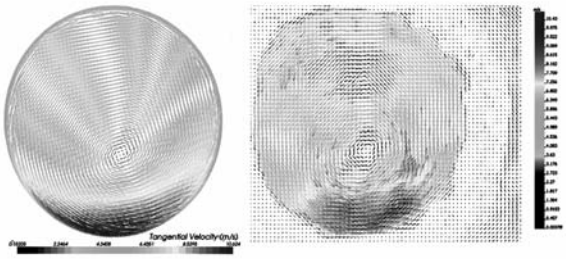

Рис.4 Сопоставления расчетной и экспериментальной картин течения

На линии, пересекающей центр завихренности и геометрический центр камеры, были получены профили компонент скоростей (рисунок 5). Для сопоставления данных брался один расчётный профиль и три случайных экс-

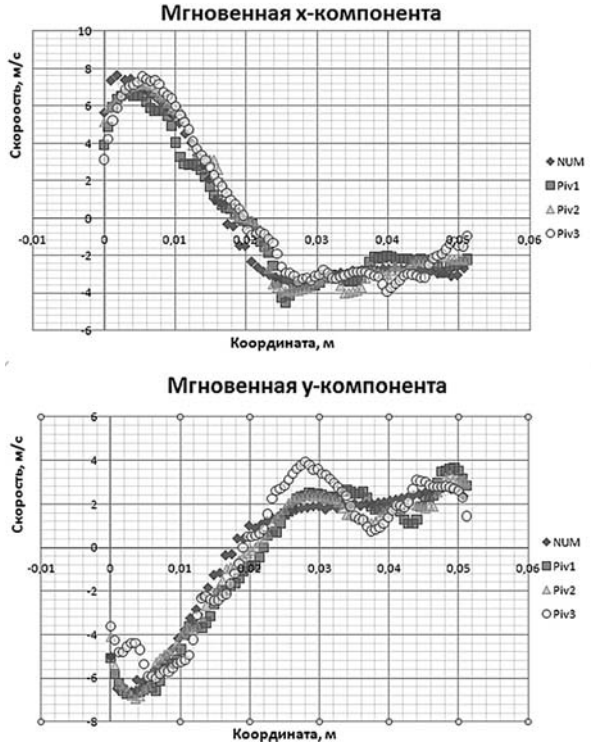

Рис.5 Сопоставления расчетной и экспериментальной картин течения

периментальных профиля, визуально совпадающих по фазе картин течения.

Наблюдается хорошее соответствие расчётных данных с экспериментальными, однако для более информативного сравнения также производилось сопоставление средних полей скоростей, на рисунке 6 представлены графики для всех трёх компонент.

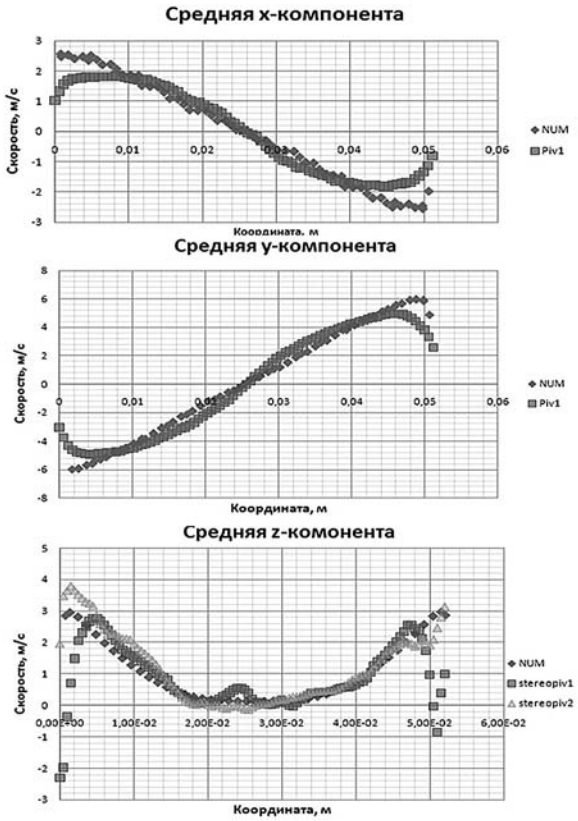

Рис.6 Сопоставления расчетной и экспериментальной картин течения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно видеть закономерное расхождение графиков в крайних областях, а именно в зонах близких к стенке сопла. Расхождение можно объяснить погрешностью экспериментальных результатов, так как, в силу оптического доступа и процедур обработки PIV данных, скорости в пристеночных областях поддаются большим искажениям и сглаживаниям. Также нельзя не брать во внимание, что осреднение скоростей в численном моделировании происходило по нескольким оборотам ПВЯ, соответствующее реальное время осреднения – доли секунды, а осреднение скоростей в эксперименте происходило по данным полученным в течение нескольких минут, за это время структура потока могла претерпевать некоторые изменения. Тем не менее, результаты моделирования можно считать адекватными, возможность правильного предсказывания только одной частоты прецессии может решить ряд вопросов прикладного характера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гупта А., Лили Д., Сайред Н. Закрученные потоки // М.: Мир, 1987.-590 с.
2. Алексеенко С.В., Куйбин П.А, Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей // Монография, 2003, с. 420-424.

3. Anacleto P.M., Fernandes E.C., Heitor M.V. and Shtork S.I. Swirl flow structure and flame characteristics in a model lean premixed combustor // Combust. Sc. Technol. – 2003. -V. 175, N 8, pp. 1369 – 1388.
4. Shtork S.I., Vieira N.F., Fernandes E.C. On the identification of helical instabilities in a reacting swirling flow // Fuel, 2008, Vol. 87 (10-11), pp. 2314-2321.
5. Алексеенко С.В, Окулов В.Л. Закрученные потоки в технических приложениях (обзор) // Теплофизика и аэромеханика.- 1996.- Т. 3, №2. –С. 101-138.
6. 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.
7. Ciocan G.D., Iliescu M.S., Vu T.C., Nennemann B., Avellan F. Experimental study and numerical simulation of the FLINDT draft tube rotating vortex // J. Fluids Eng., 2007, Vol. 129, pp. 146-158.
8. Derksen J., Van den Akker H.E.A. Simulation of vortex core precession in a reverse-flow cyclone // AIChEJ. 2000. - 46(7): 1317–1331.
9. Сентябов А.В., Гаврилов А.А., Дектерев А.А. Исследование моделей турбулентности для расчета закрученных течений. Теплофизика и аэромеханика. №1, 2011, с. 81-93.
10. Jeong J., Hussain F. On the identification of a vortex // J. Fluid Mech. - 1995. - 285: -pp. 69-94.