

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА В ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ КАМЕРЕ С ПОМОЩЬЮ PIV ТЕХНИКИ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Гешева Е.С.¹, Шгорк С.И.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Исследованию вихрей посвящено большое число теоретических, в том числе, аналитических и численных, и экспериментальных исследований [1-3]. Интерес к изучению вихревых течений обусловлен, прежде всего, распространенностью вихрей в природе. Вихревые структуры в природе оказывают большое влияние на жизнь человека, как, например, циклоны и смерчи, которые зачастую являются причинами бедствий и приносят огромный ущерб [4-6]. Большое внимание к данной тематике обусловлено также широким применением вихревых потоков в технике.

Особенностью закрученного течения в модели тангенциальной топки является формирование пространственно-сложных крупномасштабных вихрей, полностью определяющих глобальную структуру течения. Эксперименты включают измерение частотных характеристик вихревых структур при варьировании чисел Рейнольдса, а также измерения полей скоростей бесконтактным PIV методом. Экспериментальные исследования дополнены расчетами характеристик закрученного потока, выполненными с помощью коммерческого пакета Star CCM+.

Исследования вихревых структур проводились на замкнутом гидродинамическом контуре (рис. 1), обеспечивающий режимы работы в пределах числа Рейнольдса $Re=10\ 000 - 35\ 000$.

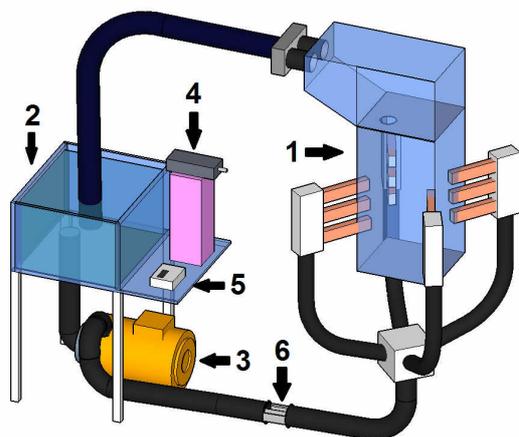


Рис. 1. Экспериментальная установка.

Жидкость из бака 2 подается в рабочую камеру 1 с помощью центробежного насоса 3 с двигателем постоянного тока. Двигатель подключен к электрической сети через регулирующий автотрансформатор и диодный выпрямитель. Расход жидкости измеряется ультразвуковым расходомером 5 на участке 6. Тангенциально направленные прямоугольные сопла с выходным сечением $14 \times 23 \text{ мм}^2$ создают в рабочей камере вихревой поток с вертикальной осью вращения.

Режим течения в камере характеризуется числом Рейнольдса Re , которое определяется по поперечному размеру m и среднерасходной скорости в вихревой камере W . Представленные в статье результаты получены при достаточно больших турбулентных числах Рейнольдса Re .

Нестационарный турбулентный поток моделируется с использованием трех основных подходов моделирования RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes), LES (Large Eddy Simulation) и DES (Detached Eddy Simulation).

RANS требует меньше всего вычислительных ресурсов и хорошо разрешает пристеночные слои, но в тоже время занижает турбулентные пульсации в закрученном потоке. Чтобы улучшить моделирование нестационарных турбулентных закрученных течений используют вихреразрешающие методы, как, например, метод моделирования крупных вихрей LES. Однако его применение требует очень детальной сетки, особенно вблизи стенок. Чтобы соединить достоинства этих подходов был предложен метод моделирования отсоединенных вихрей (DES).

При моделировании вихревого потока в тангенциальной камере использовались все из представленных подходов. Для камеры с центральной диафрагмой была построена сетка с многогранными ячейками и призматическим слоем. Также была произведена дополнительная детализация сетки в приосевой области (область вихря), таким образом, сетка состояла из 1,6 млн. ячеек. Граничные условия задавались исходя из расхода жидкости на входе и несжимаемости жидкости. В работе был использован алгоритм segregated flow для нестационарной неявной задачи.

В камере с тангенциальной закруткой потока и диафрагмированным отверстием образуется прямолинейная вихревая нить, идущая от дна камеры до выходной диафрагмы. Параметр крутки $S=4,5$ в данном случае не менялся, а диаметр выходного отверстия был равен 60 мм. Вихревое ядро совершает малые колебания вокруг оси, которые называют прецессией вихревого ядра. В целом же вихревая структура устойчива и квазистационарна.

Моделирование закрученного потока с помощью RANS подхода в нашем случае не дало адекватных результатов, что так же наблюдается в аналогичных работах по моделированию закрученных потоков [7-9]. Методы LES и DES дают весьма схожие между собой результаты, которые в свою очередь верифицируются экспериментальными данными. Из рисунка 2 видно, что расчетный профиль, полученный методом LES, лучше описывает экспериментальный профиль скорости. На небольших расстояниях от дна

камеры h (см. рис. 2а) видно, что экстремум скорости, рассчитанный методом DES существенно ниже экспериментального профиля, это говорит о том, что данный метод не позволяет рассчитывать пульсации скорости из-за осреднений, допущенных в методе. Однако с увеличением высоты, максимумы тангенциальной скорости, полученные с помощью моделирования методами LES, DES и PIV эксперимента различаются незначительно.

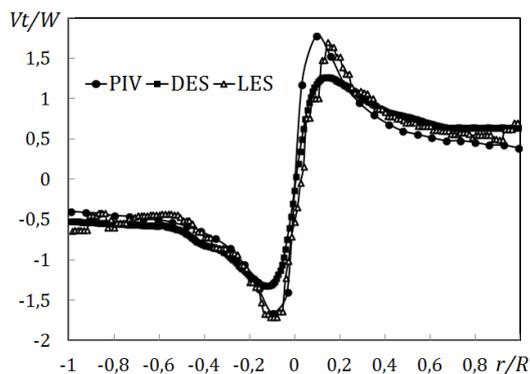


Рис. 2. Поля тангенциальной компоненты скорости, $Re=19\ 200$, $h=85$ мм.

При построении профиля аксиальной компоненты завихренности, также наблюдается низкий максимум для DES метода на небольшой высоте от дна камеры. В целом же поле завихренности сильно локализовано вблизи оси камеры и хорошо согласуется с рассчитанными профилями завихренности (см. рис. 3).

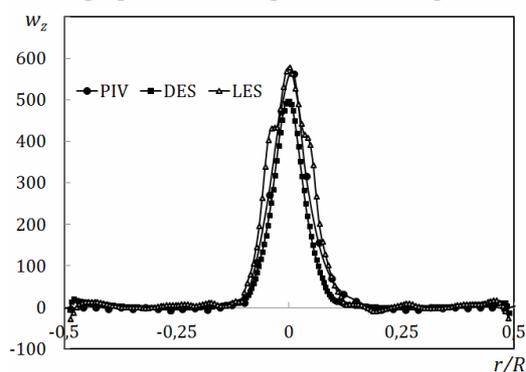


Рис. 3. Профиль аксиальной компоненты завихренности, $Re=19\ 200$, $h=385$ мм.

Как было описано ранее, вихревое ядро прецессирует вокруг своей оси, и частота прецессии линейно зависит от расхода жидкости. При этом было показано, что исследуемые режимы течения находятся в зоне автомодельности по числу Рейнольдса [10].

На рисунке 4 представлены зависимости частоты ПВЯ от расхода жидкости, полученные с помощью анализа видеозаписей, снятых на скоростную камеру, высокочувствительного гидрофона и также представлены точки, полученные с помощью моделирования в пакете Star CCM+, которые совпадают с данными полученными с помощью гидрофона и подтверждают корректность расчетных данных.

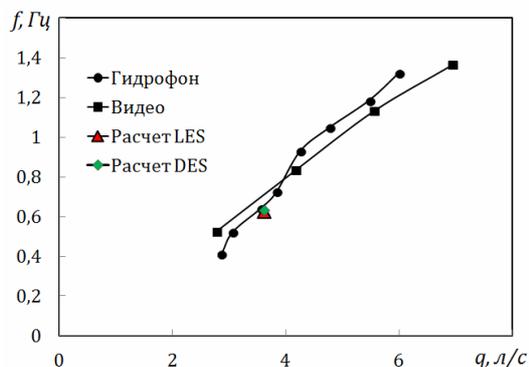


Рис. 4. Зависимость частоты прецессии от расхода жидкости.

В ходе работ были получены экспериментальные данные по полям скорости и завихренности, а также исследованы частотные характеристики вихря. Наряду с этим было проведено моделирование закрученного потока в рабочей камере с использованием методов DES и LES моделирования турбулентных потоков. Как показало сравнение профилей тангенциальной скорости и завихренности метод LES лучше описывает вихревой закрученный поток, в то время как метод DES фиксирует заниженный максимум скорости вблизи дна камеры, хотя в остальном дает результаты схожие с LES моделированием. Частоты прецессии, полученные с помощью моделирования потока, согласуются с полученными экспериментальными точками.

Список литературы:

1. Escudier M.P. // Exps. in Fluids. 1984. Vol. 2. pp.189-196.
2. Gelfgat A.Y., Bar-Yoseph P.Z., Solan A. Three-dimensional instability of axisymmetric flow in rotating lid-cylinder enclosure // J. Fluid Mech. 2001. Vol. 438. P. 363-377.
3. Okulov V.L., Sorensen J.N. Stability of helical tip vortices in rotor far wake // J. Fluid Mech. 2007. Vol. 576. P. 1 - 25.
4. Isaev S.A., Leont'ev A.I., Baranov P.A. Simulation tornado-like enhancement of heat transfer for low-velocity motion of air in a rectangular channel with cavities. Part 2: Results of parametric studies // Thermal Engineering. 2007. Vol. 54. No. 8. P. 655-663.
5. Hoffmann A.C., Groot M. De, Peng W., Dries H.W.A., Kater J. Advantages and risks in increasing cyclone separator length // AIChE J. 47. 2001. pp. 2452-2460.
6. Hu L.Y., Zhou L.X., Zhang J., Shi M.X. Studies on strongly swirling flows in the full space of volute cyclone separator // AIChE J. 51 (3). 2005. pp. 740-749.
7. Bo Zhang, Shien Hui Numerical Simulation and PIV Study of the Turbulent Flow in a Cyclonic Separator // International Conference on Power Engineering - 2007, p. 1347-1351
8. Widenhorn A., Noll B., Aigner M. Numerical Characterization of the Reacting Flow in a Swirled Gasturbine Model Combustor // 11th Results and Review Workshop on High Performance Computing in Science and Engineering Locatio, 2008. p. 365-380.
9. Kempf A., Malalasekera W., Ranga-Dinesh K. K. J., Stein O. Large Eddy Simulations of Swirling Non-premixed Flames With Flamelet Models: A Comparison of Numerical Methods // Flow Turbulence Combust. 2008. p. 523-561
10. Gesheva E. S., Litvinov I. V., Shtork S. I., Alekseenko S. V. Analyzing the Aerodynamic Structure of Swirl Flow in Vortex burner Models // Thermal Engineering, 2014, Vol. 61, No. 9, pp. 649-657.