

Е. С. Гешева¹, С. И. Шторк^{1,2}, С. В. Алексеенко^{1,2}

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

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

gesheva_es@itp.nsc.ru; shtork@itp.nsc.ru; aleks@itp.nsc.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОНЦЕНТРИРОВАННОГО ВИХРЯ В ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ КАМЕРЕ С ПОМОЩЬЮ PIV ТЕХНИКИ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ*

Работа направлена на детальное изучение характеристик вихревого потока в камере тангенциального типа, моделирующей, в частности, распространенные топки пылеугольных котлов. Было показано, что вихревая структура, образующаяся в диафрагмированной камере, является вихревой нитью с относительным радиусом $r_m/R = 0,1$ и протяженностью относительно размера камеры $l/R = 6$. В ходе исследований были измерены поля скорости и завихренности с помощью бесконтактного метода диагностики потока PIV, а также проведена верификация расчетных данных, полученных с использованием LES и DES методов моделирования турбулентных потоков в CFD пакете Star CCM+. Расчетные профили скорости и частота прецессии вихря согласуются с экспериментальными данными, что говорит о корректности выбранного подхода моделирования турбулентного закрученного потока.

Ключевые слова: вихревые структуры, вихревая нить, закрученный поток, моделирование турбулентности, камера сгорания.

Введение

Течения с сильной закруткой широко используются в технике, в том числе в пылеугольных горелках, камерах сгорания, тангенциальных топках [1–2]. Для получения данных, необходимых для управления работой действующих и проектирования новых топков, применяют как математическое, так и физическое моделирование [3–7]. В качестве первоначального этапа физического моделирования топочных камер, как правило, используют приближенное изотермическое моделирование на подобных уменьшенных моделях [8; 9]. Детальные экспериментальные данные, полученные на моделях, могут

быть использованы для верификации математических моделей, используемых для расчета топочных камер. Актуальность проведения совместного физического и численного моделирования еще больше возрастает применительно к исследованию характеристик потоков с закруткой, анализ которых усложняется формированием трехмерных и подчас нестационарных вихревых структур [10].

Данная работа является продолжением цикла предыдущих исследований вихревого течения в гидравлической модели тангенциальной топочной камеры [7; 11–13]. Особенностью течения в тангенциальной модели является формирование крупномасштабных

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00093).

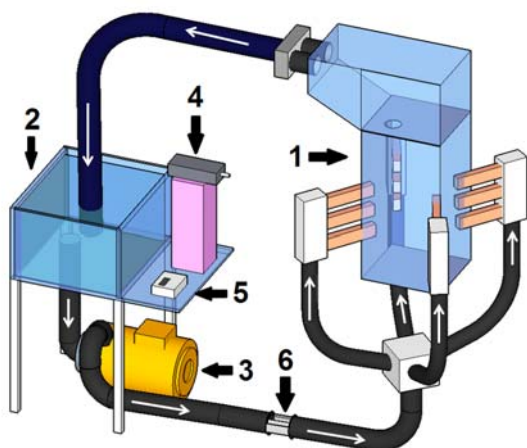


Рис. 1. Экспериментальная установка

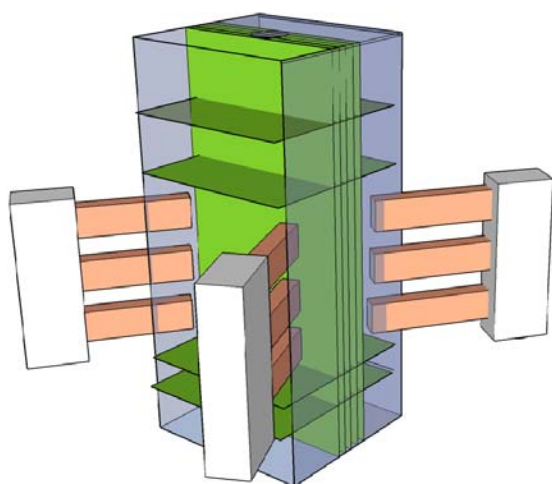


Рис. 2. Плоскости сечения рабочего участка для измерений полей скорости

вихрей, полностью определяющих глобальную структуру потока. В зависимости от граничных условий в рабочем участке наблюдались вихри с различной геометрией оси вращения: прямолинейный вихрь, стационарные одно- и двухспиральные вихри. Эксперименты текущего этапа исследований с использованием бесконтактного PIV метода включают измерение количественных характеристик базовой вихревой структуры с прямолинейной осью вращения. Экспериментальные исследования дополнены расчетами параметров закрученного потока, выполненными с помощью коммерческого пакета Star CCM+. Адекватность результатов математического моделирования проверялась сопоставлением с полученными данными физического эксперимента.

Эти исследования будут продолжены в дальнейшем в плане измерения параметров более сложных течений с формированием вихревых структур со спиральными осями вращения.

Экспериментальная техника

Исследования вихревых структур проводились на замкнутом гидродинамическом контуре (рис. 1), обеспечивающем режимы работы в пределах чисел Рейнольдса $Re = 10\,000\text{--}35\,000$.

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. Белыми стрелками указано направление потока жидкости.

За основу геометрии модельного рабочего участка, представляющего собой канал квадратного сечения с размерами $188 \times 188 \times 625 \text{ мм}^3$, взята конструкция тангенциальной топки E-500 [10]. Квадратная форма поперечного сечения в случае крупных тангенциальных топок связана с тем, что плоские боковые стенки проще изготавливать, чем цилиндрические. Экспериментально показано, что использование квадратной формы не приводит к разрушению или искажению вихря [11]. Немаловажно также, что плоские боковые стенки модели не дают оптических искажений, позволяя использовать бесконтактные оптические методы исследования течения. Поэтому данная установка используется не только для моделирования течений в тангенциальных топках, но и для исследования общих закономерностей динамики вихревых течений.

Тангенциально направленные прямоугольные сопла с выходным сечением $14 \times 23 \text{ мм}^2$ создают в рабочей камере вихревой поток с вертикальной осью вращения. Степень закрутки потока задается геометрическим параметром крутки $S = \frac{2Rd}{s_n}$ [11], где R – по-

луширина камеры; d – диаметр условной окружности, по касательной к которой направлены входные сопла; s_n – площадь входных сопел. Конструкция сопловых блоков дает возможность менять угол поворота

сопел, который определяет d , и варьировать таким образом степень закрутки потока от относительно небольших, при которых работают тангенциальные топки, до больших значений, характерных для циклонных камер сгорания. Для управления структурой вихревого потока на выходе камеры имеется диафрагмированное отверстие. Как было установлено ранее специальными опытами [11], форма отверстия диафрагмы не оказывает существенного влияния на характер течения, а определяющим параметром является степень сужения потока. В частности, при сильной степени сужения происходит образование интенсивного вихря с локализованным вихревым ядром. Режим течения в камере характеризуется числом Рейнольдса Re , которое определяется по поперечному размеру $2R$ и среднерасходной скорости W в соплах $Re = \frac{2RW}{\nu}$ (ν – кинематическая вязкость).

Измерение частоты прецессии вихря проводилось с использованием высокочувствительного гидрофона, а также рассчитывалось исходя из покадрового анализа видеозаписей.

Для измерения полей скорости и завихренности был поставлен эксперимент с использованием современной PIV (Particle Image Velocimetry) техники. Метод PIV – оптический метод измерения мгновенных полей скорости жидкости или газа в выбранном сечении потока [14]. Импульсный лазер создает тонкий световой нож и освещает мелкие частицы, взвешенные в исследуемом потоке. Положения частиц в момент двух последовательных вспышек лазера регистрируются на два кадра цифровой камеры. Скорость потока определяется расчетом перемещения, которое совершают частицы за время между вспышками лазера. Определение перемещения основано на применении корреляционных методов к трассерным картинкам, с использованием регулярного разбиения на элементарные области [14].

Измерения полей скорости для прямолинейного вихря проводились в пяти вертикальных сечениях, в том числе центральном, и четырех поперечных, как показано на рис. 2. Для засева потока использовались полиамидные частицы (средний диаметр 10–20 мкм). Управление PIV-системой, сбор, хранение и обработка изображений и полей

скорости осуществлялась при помощи программного обеспечения «ActualFlow». PIV система состояла из двойного импульсного лазера и КМОП камеры. Система работала в двухкадровом режиме с частотой измерений в 270 Гц. Задержка между двумя вспышками, определяющая смещение частиц на паре кадров, – 100 мкс. Погрешность измерений составляла не более 4 %.

Численное моделирование

Моделирование турбулентных закрученных потоков в общем случае является сложнейшей задачей, и на данный момент нет общего метода моделирования турбулентности. Выбор подхода моделирования среди множества моделей турбулентности зависит от конкретных условий задачи и требует тщательного анализа. В связи с этим одной из важных задач остается верификация расчетных данных. В нашей работе моделирование закрученного течения осуществляется с помощью CFD (Computation Fluid Dynamics) пакета Star CCM+. Это современный программный комплекс, предназначенный для решения задач механики сплошных сред. Он включает в себя новейшие численные алгоритмы, возможности построения различных сеток, большой набор физических моделей, мощные средства визуализации и прочее.

Нестационарный турбулентный поток моделируется с использованием трех основных подходов моделирования: RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes), LES (Large Eddy Simulation) и DES (Detached Eddy Simulation). Наиболее распространенным способом моделирования турбулентности является решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса, когда вместо уравнений для мгновенных значений параметров используются уравнения для некоторых осредненных величин. При использовании LES подхода крупные вихри рассчитываются, а мельчайшие вихри подсеточного масштаба моделируются. Основной предпосылкой такого подхода является то, что наибольшие вихри, которые находятся под прямым воздействием граничных условий, несут максимум энергии и должны быть рассчитаны [15]. DES метод представляет собой гибридный подход к моделированию, сочетающий черты RANS и LES моделирования. Модели DES построены так,

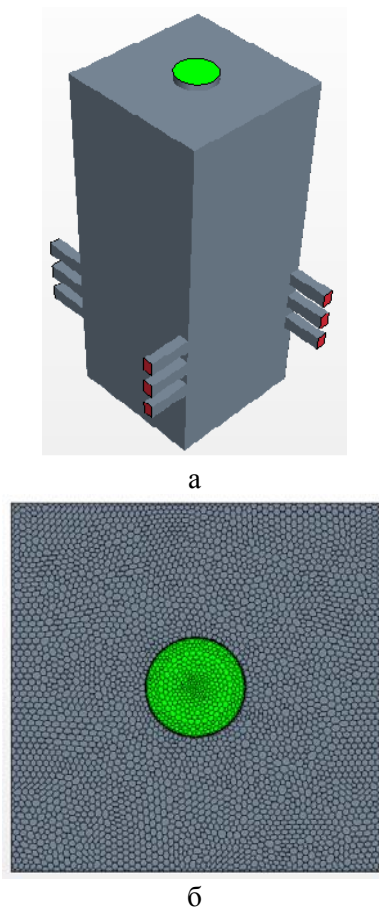


Рис. 3. Расчетная геометрия (а) и сетка в поперечном сечении камеры (б)

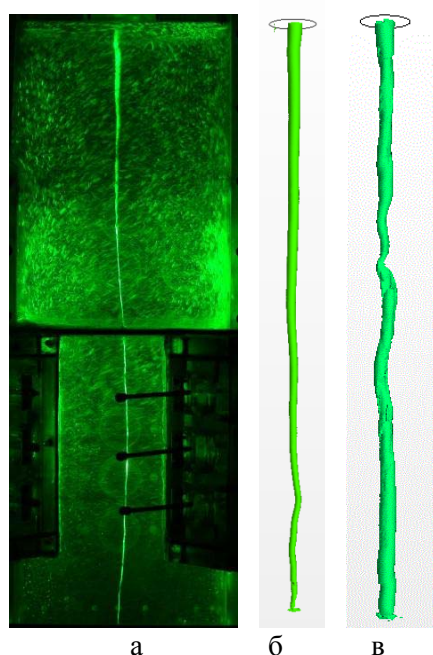


Рис. 4. Визуализация вихревой структуры, $Re = 19\,200$, $S = 4,5$: а – эксперимент; Расчетные изоповерхности критерия $\Lambda_{\lambda 2}$, полученные методами DES (б) и LES (в)

что сдвиговые слои решаются базовым замыканием RANS моделей. Однако модель турбулентности модифицирована так, что, если сетка достаточно детальная, будет использоваться базовая модель подсеточного масштаба. В таком случае получаем лучшее из двух подходов: моделирование RANS в поперечных слоях и моделирование LES в нестационарных разделенных областях [16].

В свою очередь, RANS требует меньше всего вычислительных ресурсов и хорошо разрешает пристеночные слои, но в то же время занижает турбулентные пульсации в закрученном потоке. Чтобы улучшить моделирование нестационарных турбулентных закрученных течений, используют вихре-разрешающие 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). Первая версия DES базировалась на модели Спаларта – Алмароса. В дальнейшем метод DES стал использоваться с другими моделями турбулентности, появились различные его модификации [17].

При моделировании вихревого потока в тангенциальной камере использовались все представленные подходы. 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 (рис. 3). Граничные условия задавались исходя из расхода жидкости на входе и несжимаемости жидкости. В работе был использован алгоритм segregated flow для нестационарной неявной задачи.

Результаты экспериментальных исследований и численного моделирования

В камере с тангенциальной закруткой потока и диафрагмированным отверстием образуется прямолинейная вихревая нить (рис. 4), простирающаяся от дна камеры до выходной диафрагмы [12]. Параметр крутки $S = 4,5$ в данном случае не менялся, а диаметр выходного отверстия был равен 50 мм.

В целом вихревая структура достаточно устойчива, хотя более внимательное наблюдение показывает, что ось вихря совершает малые колебания, а именно прецессирует относительно геометрического центра канала.

Проведение эксперимента с использованием бесконтактной методики измерения полей скорости позволяет получать мгновенную картину поля скорости, не внося при этом возмущений в поток. Определяющими характеристиками для закрученного потока с образованием прямолинейной вихревой нити являются профили тангенциальной и аксиальной компонент скорости, а также осевая компонента завихренности.

На рис. 5 представлены осредненные по времени данные, отнесенные к среднерасходной скорости в соплах W , профили тангенциальной скорости V_t в центральном сечении на различных высотах h от дна камеры при варьировании числа Рейнольдса Re . На оси камеры, где в данном случае расположен центр вихря, значение тангенциальной скорости достигает нуля. Далее тан-

генциальная компонента скорости резко возрастает с увеличением расстояния и достигает максимального значения в окрестности центра камеры. При отдалении от центра камеры тангенциальная скорость уменьшается обратно пропорционально расстоянию. С изменением высоты профиль скорости меняется незначительно (рис. 5, z).

На рис. 6 представлены осредненные профили аксиальной скорости V_a . На оси камеры имеется выраженный пик аксиальной скорости, в то же время наблюдается некоторая асимметрия профиля с наличием зон возвратного течения.

Следует отметить, что полученные осредненные профили тангенциальной и аксиальной скорости автомодельны по числу Рейнольдса.

Тангенциальный профиль скорости вихря в закрученном потоке в большинстве случаев хорошо описывается вязкой моделью вихря Бюргерса [18]. Вихрь Бюргерса принадлежит к классу осесимметричных точных решений уравнений Навье – Стокса, где тангенциальная компонента описывается формулой

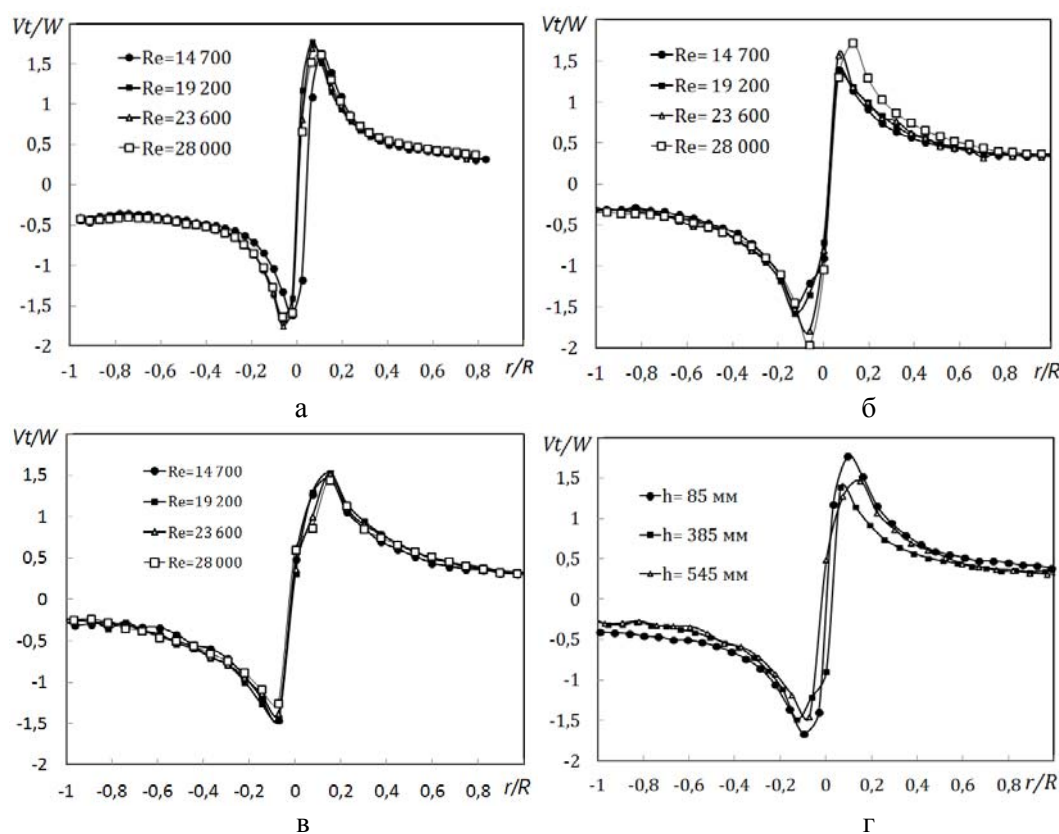
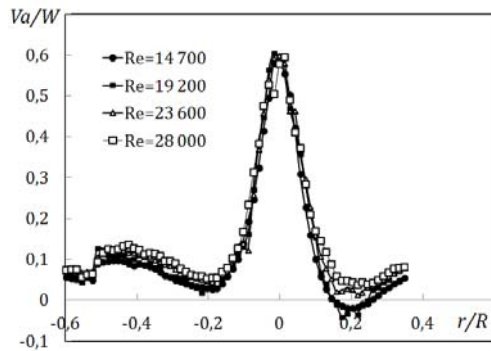
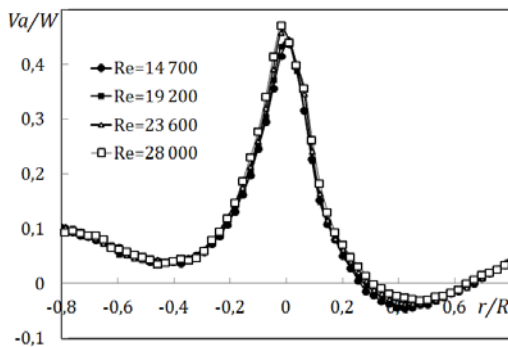


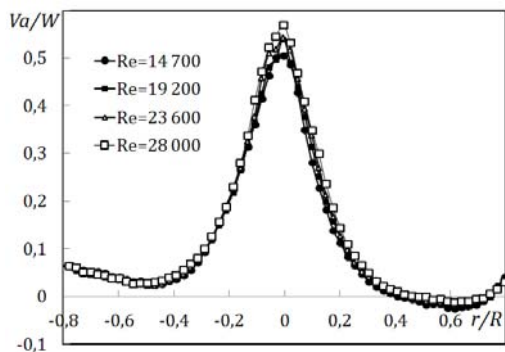
Рис. 5. Профили тангенциальной скорости:
 $a - h = 85$ мм; $б - h = 385$ мм; $в - h = 545$ мм; $г - Re = 19\,200$



а



б



в

Рис. 6. Профили аксиальной скорости:
а – $h = 85$ мм, б – $h = 385$ мм, в – $h = 545$ мм

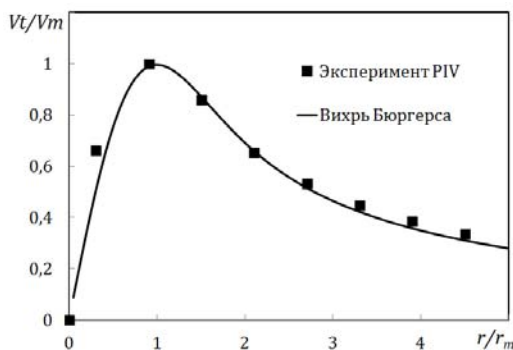


Рис. 7. Тангенциальная компонента скорости.
Сравнение эксперимента с моделью вихря Бюргерса

$$v = \frac{\Gamma}{2\pi r} [1 - \exp(-\alpha r^2/4\nu)],$$

а значения

$$r_m = 2,242\sqrt{\nu/\alpha},$$

и

$$v_m = 0,16 \frac{\Gamma}{\pi} \sqrt{\frac{\alpha}{\nu}} = \frac{0,36\Gamma}{\pi r_m}$$

соответствуют экстремуму тангенциальной скорости, где r – расстояние от центра вихря, ν – кинематическая вязкость, а α – константа. Величину r_m принято интерпретировать как эффективный радиус вихря [18].

На рис. 7 представлено сравнение экспериментальных данных в центральном сечении камеры на высоте $h = 385$ мм, при $Re = 19200$ и $S = 4,5$, с моделью Бюргерса, где экспериментальные точки с хорошей точностью интерполируются кривой, описывающей вихрь Бюргерса.

Моделирование закрученного потока с помощью RANS подхода в нашем случае не дало адекватных результатов, что также наблюдается в аналогичных работах по моделированию закрученных потоков [19–23]. Методы LES и DES дают качественно схожие между собой результаты, которые, в свою очередь, сравниваются здесь с экспериментальными данными для того, чтобы оценить, какой из методов дает более точные значения расчетных параметров. Из рис. 8 видно, что расчетный профиль, полученный методом LES лучше описывает экспериментальный профиль скорости. На небольших расстояниях от дна камеры (рис. 8, а) видно, что экстремум скорости, рассчитанный методом DES, заметно ниже экспериментально полученного профиля. Однако с увеличением высоты максимумы тангенциальной скорости, полученные с помощью моделирования методами LES, DES и PIV эксперимента, различаются незначительно.

При построении профиля аксиальной компоненты завихренности, нормированной на среднее значение завихренности ω , также наблюдается низкий максимум для DES метода на небольшой высоте от дна камеры (рис. 9, а). Это связано с особенностью RANS метода, который используется в методе DES, занижающего локальные максимумы скорости путем осреднения значений скорости вблизи некоторой точки. В целом же поле завихренности локализовано вблизи оси камеры. Рассчитанные профили завих-

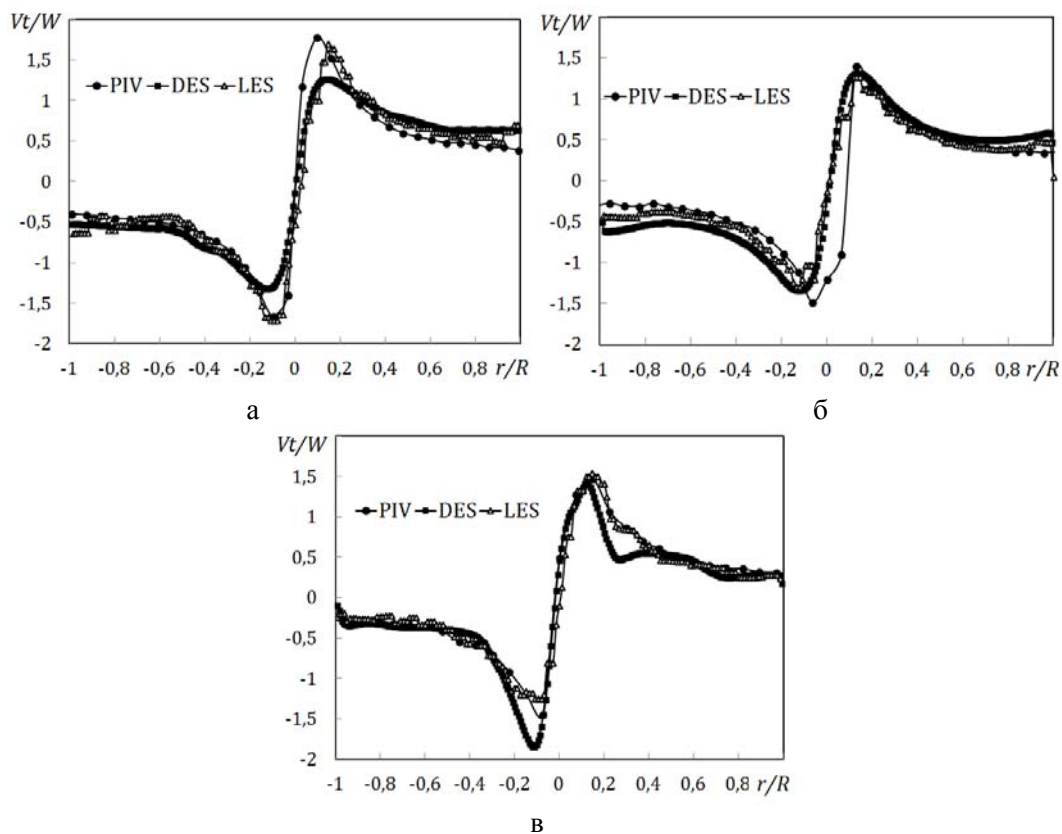


Рис. 8. Поля тангенциальной компоненты скорости, $Re = 19\,200$, $S = 4,5$:
 а – $h = 85$ мм, б – $h = 385$ мм, в – $h = 545$ мм. Сравнение эксперимента с расчетами методами LES и DES

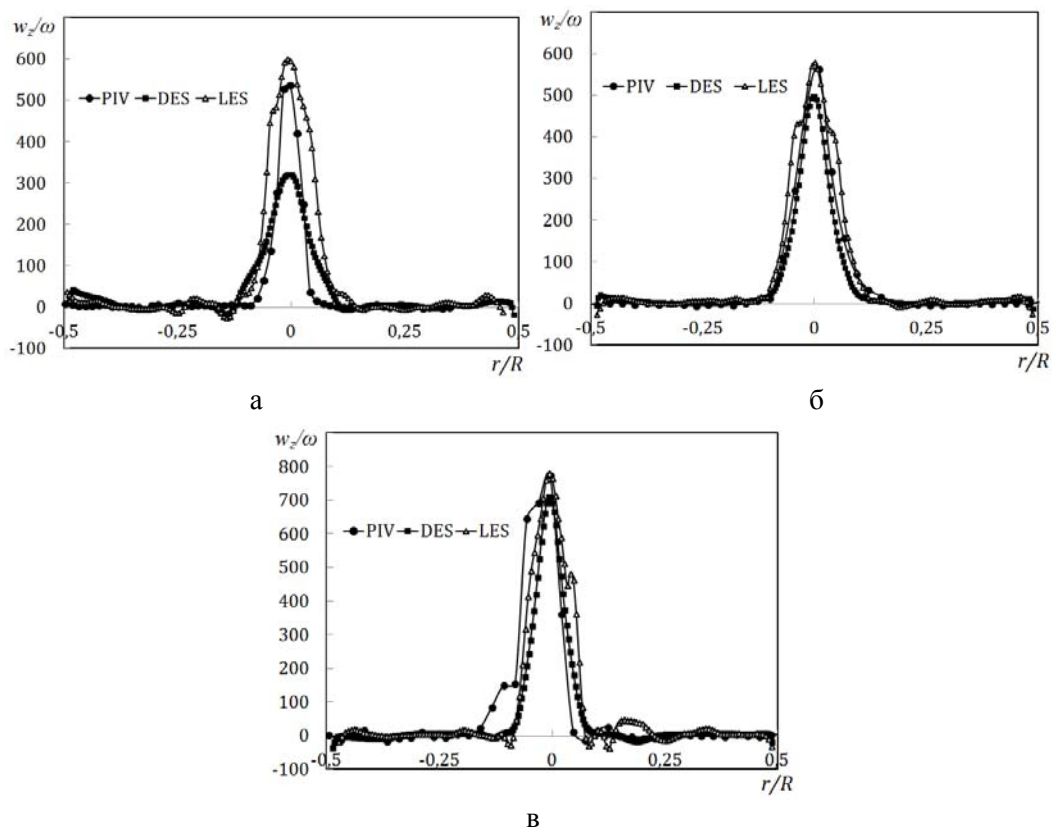


Рис. 9. Поля аксиальной компоненты завихренности, $Re = 19\,200$, $S = 4,5$:
 а – $h = 85$ мм, б – $h = 385$ мм, в – $h = 545$ мм. Сравнение эксперимента с расчетами методами LES и DES

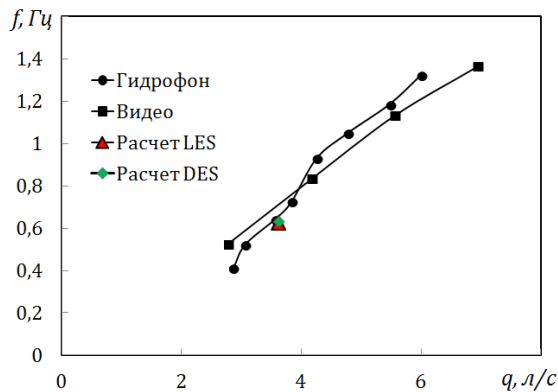


Рис. 10. Зависимость частоты прецессии от расхода жидкости

ренности хорошо согласуются с экспериментальными данными (см. рис. 9).

Как было описано ранее, вихревое ядро прецессирует вокруг своей оси. Частота прецессии линейно зависит от расхода жидкости (рис. 10), что отмечалось в работах [10; 11], а исследуемые режимы течения находятся в зоне автомодельности по числу Рейнольдса [13].

На рис. 10 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+. Расчетные значения частоты прецессии совпадают с экспериментальными данными, что также подтверждает корректность результатов моделирования. Заметим, что характерные значения частот прецессии много меньше локальной частоты вращения жидкости в области вихревого ядра ($f_{loc} = 47\text{--}119$ 1/с), которую можно определить исходя из данных, показанных на рис. 9.

Заключение

В данной работе получены количественные данные по полям скорости и завихренности, а также исследованы частотные характеристики вихревого течения в гидравлической камере с тангенциальной закруткой потока. Показано, что диафрагмирование выходного отверстия приводит к образованию устойчивой локализованной вихревой нити с относительным радиусом $r_m/R = 0,1$ и протяженностью относительно размера камеры $l/R = 6$ от дна камеры до выходного отвер-

стия. Профиль тангенциальной скорости в вихре хорошо описывается вязкой моделью вихря Бюргера. Анализ аксиального профиля скорости показывает наличие зоны сильного осевого течения в области эффективного радиуса вихря. Генерируемая вихревая нить является на самом деле квазистационарной, поскольку вихревое ядро совершает прецессионное движение с небольшой амплитудой. Анализ этого эффекта показал, что частота прецессии вихря линейно зависит от расхода жидкости. Уровень характерных частот прецессии существенно ниже локальной частоты вращения жидкости в области вихревого ядра. Это дает основание полагать, что в первом приближении при анализе динамики вихревой нити эффектом прецессии можно пренебречь.

Наряду с экспериментом было проведено численное моделирование закрученного потока в рабочей камере с помощью CFD пакета с использованием методов DES и LES. Как показало сравнение профилей тангенциальной скорости и завихренности, метод LES лучше описывает вихревой закрученный поток, в то время как при расчете методом DES наблюдается заниженный максимум скорости вблизи дна камеры, хотя в остальном метод дает результаты близкие к LES моделированию. Частоты прецессии, полученные с помощью математического моделирования потока, согласуются с экспериментально измеренными значениями.

Таким образом, измерения и расчеты подтверждают, что в данной модельной установке генерируется вихревая структура с локализованным вихревым ядром, характерный радиус которого много меньше ширины канала и продольного размера вихря, что позволяет интерпретировать такую структуру как вихревую нить. Поле скорости в вихре может быть представлено классическим профилем Бюргера. Полученные в работе результаты являются, в частности, обоснованием использования экспериментальной установки с целью изучения фундаментальных проблем динамики вихревых нитей, в том числе исследования стационарных спиральных вихрей.

Список литературы

1. Гунта А., Лили Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. 590 с.

2. Алексеенко С. В., Окулов В. Л. Закрученные потоки в технических приложениях (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 1996. Т. 3, № 2. С. 101–138.
3. Salomatov V. V., Krasinskii D. V., Anikin Yu. A., Anufriev I. S., Sharypov O. V., Enzhargal Kh. Experimental and Numerical Investigation of Aerodynamic Characteristics of Swirling Flow in a Model of the Swirling-Type Furnace of a Steam Generator // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2012. P. 282–293.
4. Lecic M. R., Cocic A. S., Cantrak S. M. Original Measuring and Calibration Equipment for Investigation of Turbulent Swirling Flow in Circular Pipe // Experimental Techniques. MAY-JUN 2014. Vol. 38. P. 54–62.
5. Luo Rui, Zhan Yafei, Li Na. Experimental Study on Flow and Combustion Characteristic of a Novel Swirling Burner Based on Dual Register Structure for Pulverized Coal Combustion // Experimental Thermal and fluid Science. APR. 2014. Vol. 54. P. 136–150.
6. Modlinski N. Computational Modeling of a Utility Boiler Tangentially-Fired Furnace Retrofitted with Swirl Burners // Fuel Processing Technology. 2010. Vol. 91. P. 1601–1608.
7. Alekseenko S. V., Burdukov A. P., Dekterev A. A., Markovich D. M., Shtork S. I. Physical and Mathematical Simulation of Aerodynamics and Combustion in the Furnace Chambers of Power Installations // Thermal Engineering. 2011. Vol. 58. No. 9. P. 779–785.
8. Anufriev I. S., Sharypov O. V., Shadrin E. Yu. Flow Diagnostics in a Vortex Furnace by Particle Image Velocimetry // Technical Physics Letters. 2013. Vol. 39. No. 5. P. 466–468.
9. Алексеенко С. В. Аэродинамические эффекты в энергетике // Препринт. 216 ИТ СО АН СССР. Новосибирск, 1990. 58 с.
10. Cala C. E., Fernandes E. C., Heitor M. V., Shtork S. I. Coherent Structures in Unsteady Swirling Jet Flow // Exp. Fluids. 2006. Vol. 40. No. 2. P. 267–276.
11. Alekseenko S. V., Kuibin P. A., Okulov V. L., Shtork S. I. Helical Vortices in Swirl Flow // J. Fluid Mech. 1999. Vol. 382. P. 195.
12. Анохина Е. С., Дектерев Д. А., Шторк С. И., Алексеенко С. В. Исследование стационарных вихревых структур в модельной камере сгорания // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2012. Т. 7, вып. 2. С. 56–65.
13. 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. P. 649–657.
14. Руководство пользователя Программы «ActualFlow» Версия 1.16. Новосибирск, 2007. 165 с.
15. Молчанов А. М. Математическое моделирование задач газодинамики теплообмена. М.: МАИ, 2013. 206 с.
16. User Guide STAR-CCM+ Version 4.04.011. CD-Adapco. 2009. 5066 p.
17. Платонов Д. В., Минаков А. В., Дектерев А. А., Сентябов А. В. Численное моделирование пространственных течений с закруткой потока // Компьютерные исследования и моделирование. 2013. Т. 5, № 4. С. 635–648.
18. Алексеенко С. В., Куйбин П. А., Окулов В. Л. Введение в теорию концентрированных вихрей: Моногр. Новосибирск, 2003. 503 с.
19. 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.
20. 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.
21. 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
22. Wen-Tao Su, Xiao-Bin Li, Feng-Chen Li, Xian-ZhuWei, Zhi-Ying Zheng, Xin Zhang. Comparisons of LES and RANS Computations with PIV Experiments on a Cylindrical Cavity Flow // Advances in Mechanical Engineering. 2013. P. 10.
23. Xiyun Lu, Shanwu Wang, Hong-Gye Sung, Shin-Yang Hsieh, Vigor Yang. Large-Eddy Simulations of Turbulent Swirling Flows Injected into a Dump Chamber // J. Fluid Mech. 2005. Vol. 527. P. 171–195.

E. S. Gesheva, S. I. Shtork, S. V. Alekseenko

**INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF CONCENTRATED VORTEX
IN THE TANGENTIAL CHAMBER USING PIV TECHNIQUE AND COMPUTER SIMULATION**

The work is focused on a detailed study of the characteristics of the vortex flow in the chamber tangential type, modeling, in particular, the common furnace coal-fired boilers. It was shown that the vortex structure formed in the chamber with diaphragm is a vortex filament with the relative radius $r_m / R = 0,1$ and a length of about the size of the camera $l / R = 6$. During researches it was measured the velocity field and vortices using a static method of diagnosis flow PIV, and performed the verification of calculated data obtained using the LES and DES methods for simulation of turbulent flows in the CFD package Star CCM+. Calculated velocity profiles and vortex precession frequency agree with experimental data, which indicates the correctness of chosen approach of modeling of turbulent swirling flow.

Keywords: vortex structures, vortex filament, swirl flow, turbulence modeling, combustion chamber.