

Е. С. Анохина^{1,2}, Д. А. Дектерев¹, 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

E-mail: anohina_liza@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В МОДЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ*

Экспериментально и численно исследованы стационарные вихревые структуры в модели вихревой топочной камеры тангенциального типа. Эксперименты включали в себя визуализацию вихревых структур в рабочем участке с помощью лазерного источника света и цифровой камеры высокого разрешения. Расчеты проводились с использованием коммерческого пакета STAR-CCM+. Из известных моделей турбулентности были выбраны наиболее подходящие для исследуемой задачи. Получены результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными, что подтверждает адекватность использованной численной модели.

Ключевые слова: моделирование, вихревая нить, вихревая структура, тангенциальная камера, турбулентное течение.

Введение

Закрученные потоки широко используются во многих технических приложениях. Полезные свойства закрутки находят применение в камерах сгорания, топках, циклонных сепараторах для очистки газовых и жидких сред [1; 2]. Исследование вихревых течений представляет также большой интерес в научном плане, поскольку в них реализуются различные физические эффекты, в том числе нелинейность, сингулярность, неустойчивость, генерация организованных (когерентных) образований. К числу последних относятся протяженные вихри с концентрированным полем завихренности – вихревые нити, динамика которых характе-

ризуется необычайным разнообразием. Можно отметить такие явления, как самоиндуцированное движение, волнообразование, распад вихря [3]. Типичным проявлением указанных эффектов является спиральная, или винтовая, форма оси вихря. Это, в частности, было продемонстрировано в работе [4], представляющей впечатляющие картины визуализации концентрированных вихрей, включая стационарные винтовые одно- и двуспиральные. Следует отметить, что к настоящему времени результаты исследования подобных структур, реализующихся в реальных закрученных течениях, ограничиваются в основном качественной информацией, полученной на основе визуальных наблюдений. Однако для развития теорети-

* Работа выполнена при финансовой 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 (госконтракты № 16.518.11.7010, 16.516.11.6036, 16.516.11.6057), РФФИ (гранты № 11-08-01063, 10-08-01096, 10-08-01093) и Правительства России (грант № 11.G34.31.0046 для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах. Ведущий ученый – К. Ханьялич, НГУ).

ческих подходов к динамике таких структур необходимы данные по их характеристикам, которые должны быть получены методами детального физического и численного моделирования. В этом контексте данная работа включает в себя численное моделирование стационарных вихревых структур в модельной вихревой камере, повторяющей геометрию экспериментального рабочего участка, что, в частности, дает возможность сравнения результатов численного моделирования с экспериментальными наблюдениями.

Экспериментальная техника

На рис. 1 показана схема вихревой камеры – уменьшенной модели топочной камеры тангенциального типа [4]. Рабочий участок изготовлен из оргстекла и представляет собой вертикальную камеру квадратного сечения с размерами $188 \times 188 \times 625$ мм. Прямоточные прямоугольные сопла с выходным сечением 14×23 мм расположены в три яруса и объединены в угловые блоки. Закрученное течение организовывалось с помощью тангенциальной подачи жидкости в рабочий участок, т. е. путем направления осей сопел по касательной к некоторой условной окружности с диаметром d_t .

Геометрические условия в рабочем участке варьировались путем изменения угла поворота сопел α и формы дна, диафрагмирования выхода и смещения выходного отверстия диафрагмы. Режимы течения харак-

теризовались безразмерными параметрами, такими как число Рейнольдса Re и параметр крутки S . Число Рейнольдса определялось по поперечному размеру b и среднерасходной скорости V_b вихревой камеры:

$$Re = \frac{b V_b}{\nu}$$

(ν – кинематическая вязкость).

Параметр крутки варьировался изменением угла поворота сопел α и вычислялся на основе площади входных сопел Σ_n , диаметра условной окружности d_t и ширины канала b [4]:

$$S = \frac{b d_t}{\Sigma_n}$$

В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода, циркулирующая по замкнутому гидравлическому контуру. Расход регулировался изменением напряжения на электродвигателе постоянного тока, который приводит в действие центробежный насос (в пределах до $25 \text{ м}^3/\text{ч}$), и измерялся с помощью ультразвукового расходомера.

Визуализация течения осуществлялась мелкими пузырьками воздуха, которые подавались в контур перед рабочим участком. Преимуществом использования воздушных пузырьков в качестве маркеров потока, кроме их хорошей отражательной способности, является также то, что они собираются вдоль оси вихря, образуя тонкую воздушную нить, и наглядно визуализируют, таким

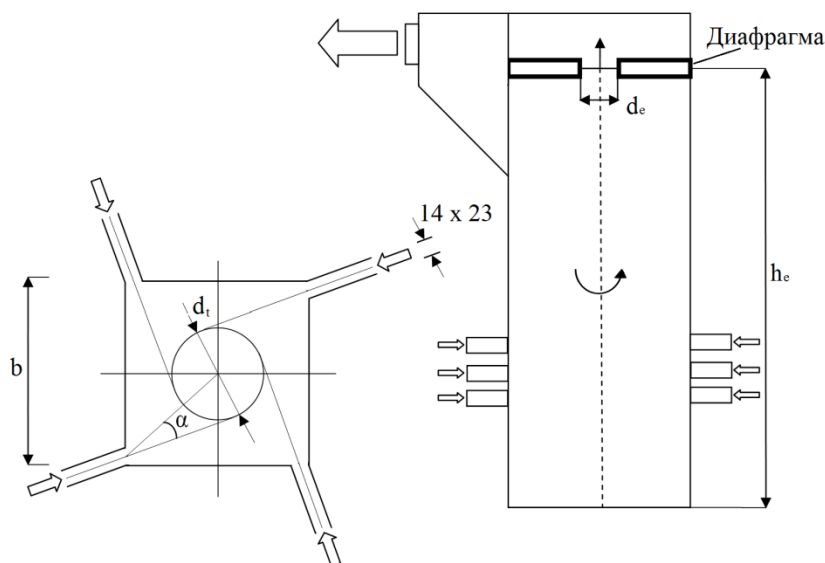


Рис. 1. Схема прямоугольной гидравлической камеры тангенциального типа

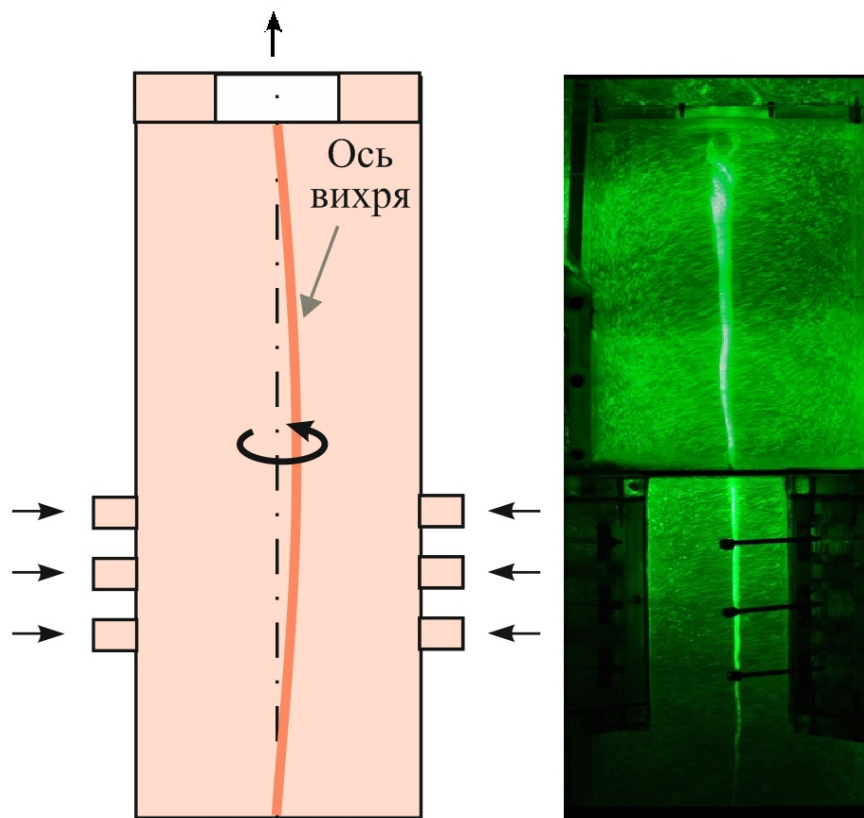


Рис. 2. Прямолинейная вихревая нить ($h_e = 560$ мм, $d_e = 70$ мм, $Re = 20\,000$, $S = 3$)

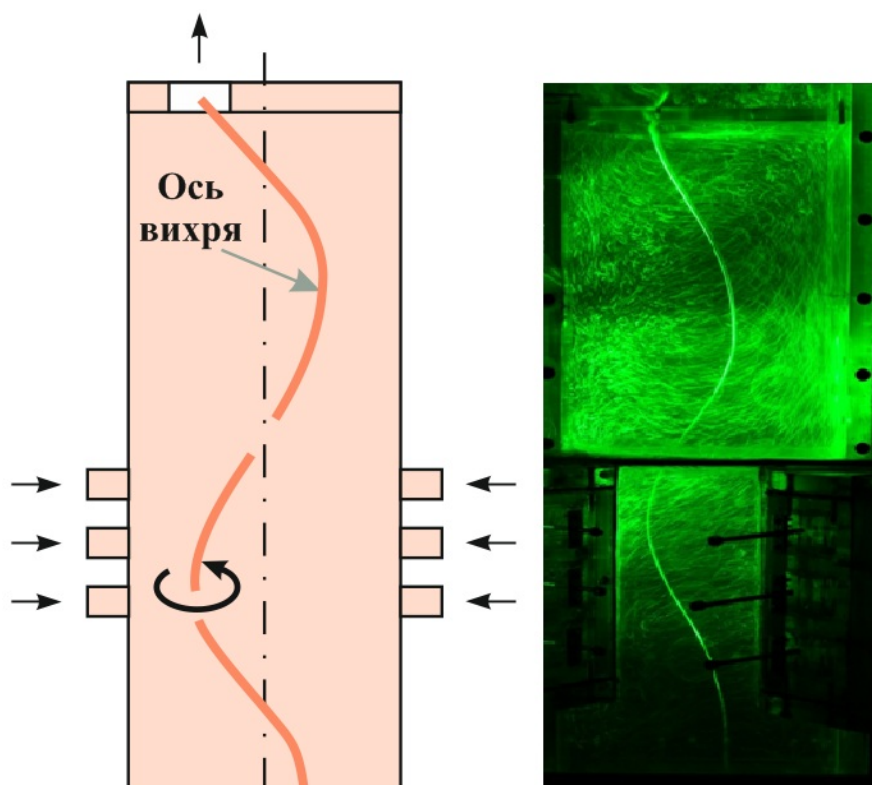


Рис. 3. Геометрическая особенность камеры (а) и вихревая структура, образующаяся в ней (б)
($h_e = 560$ мм, $d_e = 70$ мм, $\delta_e = 60$ мм, $Re = 13\,000$, $S = 3,6$)

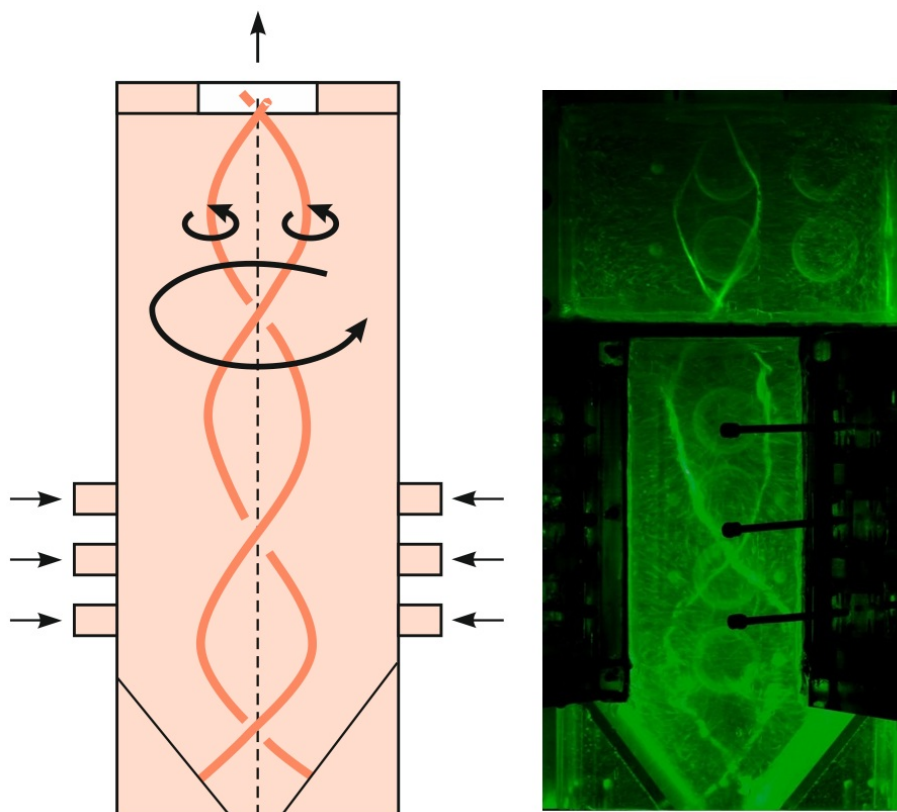


Рис. 4. Двойная спираль ($h_e = 420$ мм, $d_e = 70$ мм, $Re = 40\,000$, $S = 4,5$)

образом, вихревые структуры. Подсветка потока производилась с помощью лазерного ножа от 3 Вт непрерывного твердотельного лазера. Для регистрации картины течения использовалась 19-мегапиксельная зеркальная цифровая камера, имеющая функцию записи видео с частотой 60 кадров в секунду.

Экспериментальное наблюдение стационарных вихревых структур

Пусть в нижней части вихревой камеры установлено плоское дно, а в выходном сечении на высоте h_e установлена диафрагма с выходным отверстием d_e . Центральное положение отверстия приводит к образованию устойчивого прямолинейного вихря (рис. 2).

Смещение выходного отверстия на расстояние δ_e относительно оси камеры приводит к радикальным изменениям в структуре течения (рис. 3). Воздушная нить, визуализирующая ось вихря, сворачивается в виток спирали. Анализ видеозаписи режима показывает, что ось вихря совершает медленные

колебания относительно среднего положения, но в целом данная структура является неподвижной. Частицы жидкости при этом движутся вокруг спиральной оси, совершая, таким образом, двойное спиральное движение. При варьировании расхода жидкости вихревая структура остается устойчивой.

Описанные экспериментальные наблюдения винтовых структур относятся к одиночным вихревым нитям. Теоретический анализ допускает образование любого количества вихревых нитей [3; 4], однако на практике наблюдение вихревых структур, состоящих более чем из одной вихревой нити, затруднено из-за неустойчивости взаимодействия вихрей. Это, в частности, объясняет уникальность полученной в тангенциальной камере стационарной двуспиральной структуры. Такая двойная спираль возникает в вихревой камере с центрально расположенным выходным отверстием и двумя плоскими скатами на дне камеры (рис. 4).

Структура представляет собой две переплетенные винтовые вихревые нити одного знака. В отличие от весьма стабильного од-

носпирального вихревого течения двуспиральный режим следует рассматривать как квазистационарный. Воздушные нити, визуализирующие оси вихрей, несколько размыты, хаотично колеблются и иногда распадаются. Анализируя видеозапись течения, можно заметить, что данное течение проходит несколько фаз. Сначала формируются два вихря, затем один из них стремится доминировать, что приводит к разрушению другого. Наконец доминирующая вихревая нить разрушается, и далее все периодически повторяется. По причине неустойчивости взаимодействия вихрей для выделения двойной спирали требуется тонкая регулировка направления сопел и расходов через отдельные сопла. Используя такую регулировку можно добиться условий, когда двуспиральный режим вихревого движения фиксируется достаточно отчетливо (см. рис. 4). Числа Рейнольдса, как и в других опытах, не оказывают заметного влияния на картину течения.

Описание моделей турбулентности

В данной работе расчеты проводились с использованием коммерческого CFD пакета, который, как показали тестовые расчеты, обеспечивает адекватное моделирование сложных вихревых течений.

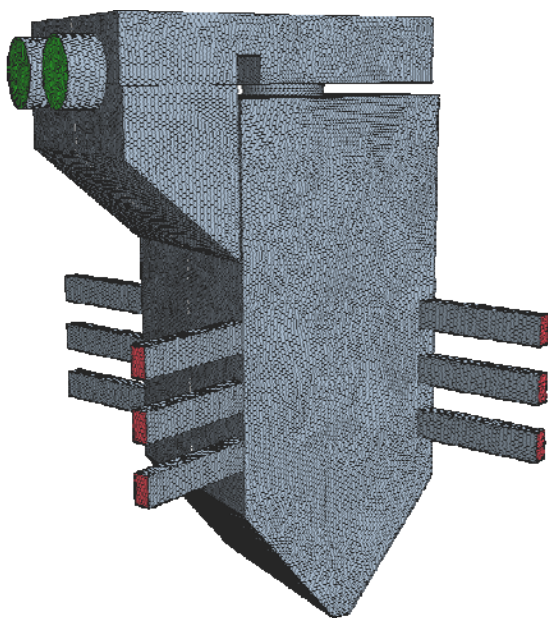


Рис. 5. Геометрия камеры

Использован общий подход, основанный на решении осредненных по числу Рейнольдса уравнений Навье – Стокса. Суть этого подхода заключается в представлении мгновенных значений всех гидродинамических величин в виде суммы осредненных (по времени или по ансамблю) и пульсационных (турбулентных) составляющих. Стандартная k - ϵ -модель турбулентности состоит из двух уравнений модели, в которой транспортные уравнения решаются для кинетической энергии турбулентности и для скорости ее диссипации.

Уравнения переноса кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации ϵ записываются соответственно следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{3\epsilon} P_b) - \\ - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon, \end{aligned}$$

где константы: $C_{1\epsilon} = 1,44$, $C_{2\epsilon} = 1,92$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\epsilon = 1,3$.

После решения тестовых задач, используя разные модели турбулентности, был сделан вывод, что стандартная k - ϵ -модель турбулентности наиболее точно описывает данного рода течения. Это связано с универсальностью k - ϵ -модели для турбулентных течений с высокими числами Рейнольдса ($Re \sim 1,3 \cdot 10^4 - 4 \cdot 10^4$).

Моделирование вихревых структур

В редакторе Star-Design была построена расчетная геометрия камеры (рис. 5), идентичная экспериментальному рабочему участку. Для построения сетки использовались полиэдральные ячейки с призматическими слоями, позволяющими хорошо разрешать

пограничные слои. Количество ячеек – порядка 800 000.

Граничные условия определялись исходя из скорости подачи жидкости, углов поворота сопел, геометрических параметров: смещение диафрагмы, форма и наклон дна. Визуализация течения осуществлялась при помощи построения изоповерхности постоянного давления и критерия Λ_2 [5]. Результаты численного моделирования представлены для чисел Рейнольдса, соответствующих значениям, для которых проводились эксперименты.

При численном моделировании течения в камере с центральной диафрагмой и плоским дном, число Рейнольдса для которого составляло $Re = 20\,000$, была получена вихревая структура течения, визуализированная на рис. 6 с помощью построения изоповерхности постоянного давления со значением $P_{iso} = 0,0976$ МПа. Рассчитанная структура представляет собой вихревую нить, идущую от дна камеры до выходного отверстия (рис. 6).

Рассмотрим поперечные сечения камеры на различной высоте h от дна (рис. 7). В центре камеры тангенциальная компонента скорости достигает нулевого значения, в то же время давление уменьшается от стенок камеры к центру, что подтверждает наличие локализованного вихревого ядра в центре камеры. Видно, что с увеличением высоты поперечный размер вихря несколько увеличивается, но в целом вихревое ядро представляет собой квазицилиндрическую поверхность круговой формы. При этом заметное искажение траекторий движения жидкости за счет квадратной формы поперечного сечения происходит только для периферии течения.

На рис. 8 показана рассчитанная картина течения, полученная в камере со смещенной диафрагмой и плоским дном, число Рейнольдса для которого составляло $Re = 13\,000$. В частности, на рис. 8 структура течения построена с помощью поверхности постоянного давления со значением давления $P_{iso} = 0,094$ МПа. Данная изоповерхность отображает наличие стационарной винтовой вихревой структуры. Также показано поле скорости, из которого видна структура потока, в частности наличие области отрицательных осевых скоростей, реализующихся при круговом движении жидкости вокруг наклоненной оси вихря.

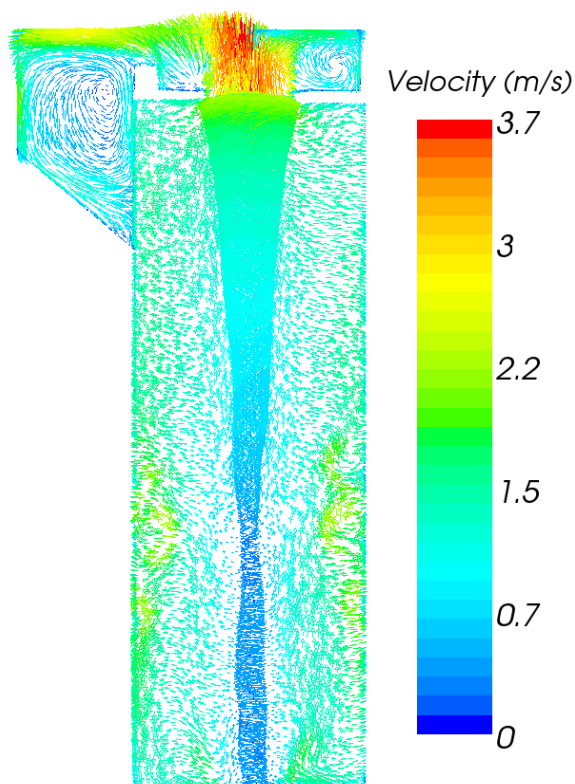


Рис. 6. Поле скорости в центральном вертикальном сечении и изоповерхность давления для вихря с прямолинейной осью вращения

Далее проанализируем картины поперечного сечения камеры со смещенной диафрагмой и плоским дном. На рис. 9 представлены проекции скорости на горизонтальную плоскость и распределения давлений. Видно, что с изменением высоты поперечного сечения центр вихря смещается. Аналогично предыдущей картине с увеличением высоты сечения растет поперечный размер вихря.

При расчете течения в камере с двускатным дном и центрально расположенной диафрагмой ($Re = 40\,000$), получена структура потока с образованием двуспирального вихря. На рис. 10 представлена визуализация вихревой структуры при помощи критерия Λ_2 [5], а также поле скорости в центральном сечении камеры.

Для двуспирального режима течения поперечные сечения на различной высоте заметно различаются (рис. 11). Так, на высоте $h = 80$ мм хорошо видны два центра вихря как на картине с полем скоростей, так и на картине с полем давлений. Далее, при увеличении высоты ($h = 160$ и 260 мм), области

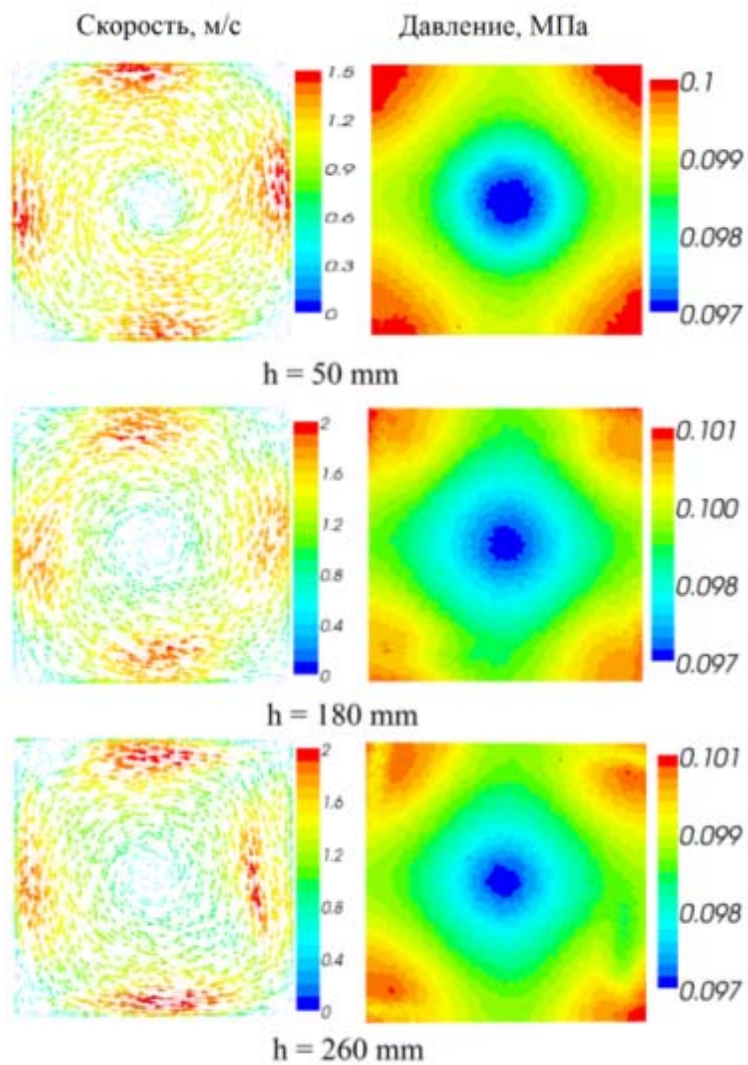


Рис. 7. Поля скоростей и давлений для камеры с центральной диафрагмой и плоским дном (вид сверху)

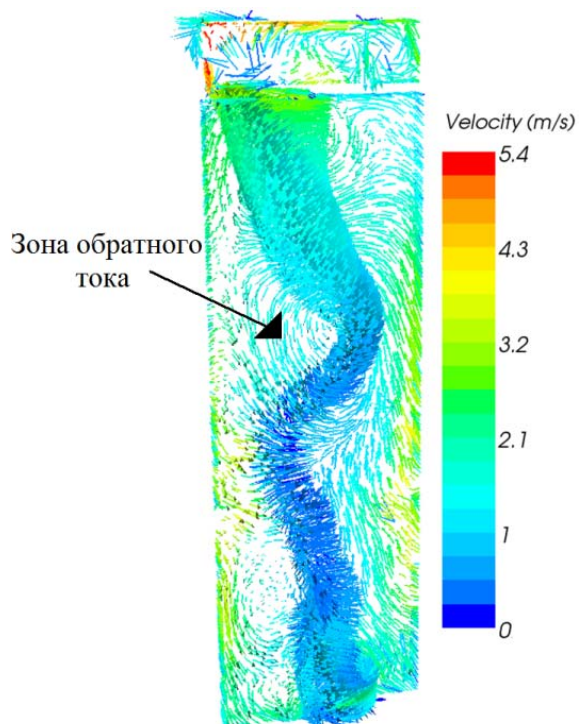


Рис. 8. Поле скорости в центральном вертикальном сечении и изоповерхность давления для стационарного вихря с винтовой осью вращения

Рис. 9. Поля скоростей и давлений для одиночного винтового вихря на разной высоте от дна камеры (вид сверху)

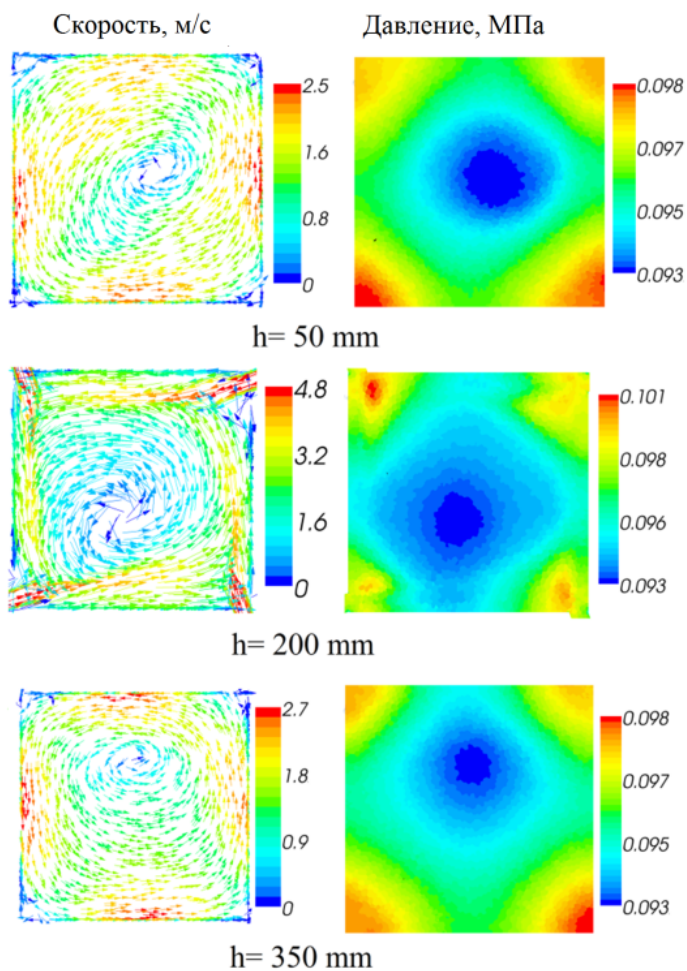
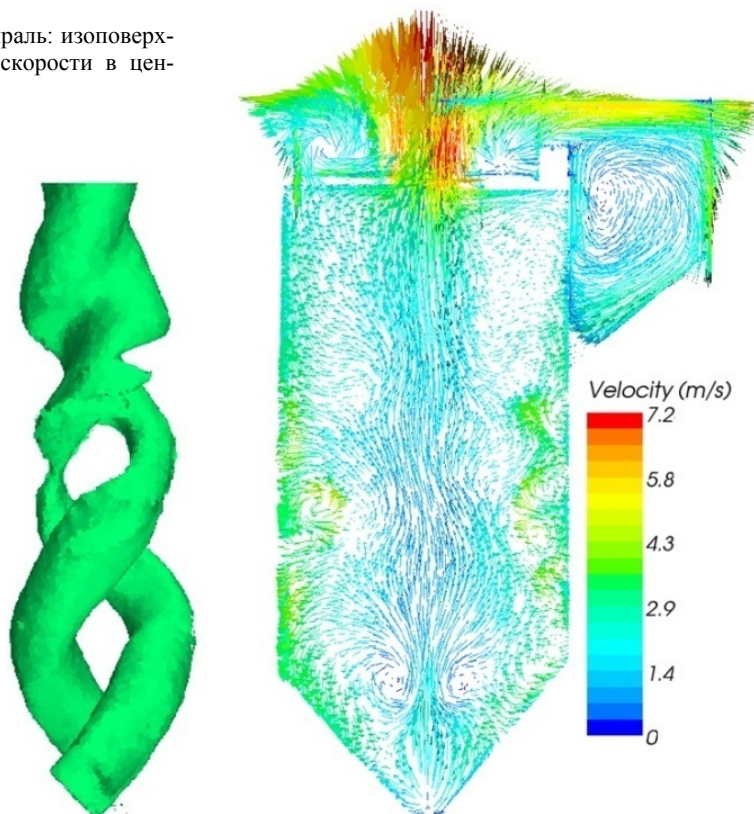


Рис. 10. Стационарная двойная спираль: изоповерхность критерия Λ^2 и поле скорости в центральном вертикальном сечении



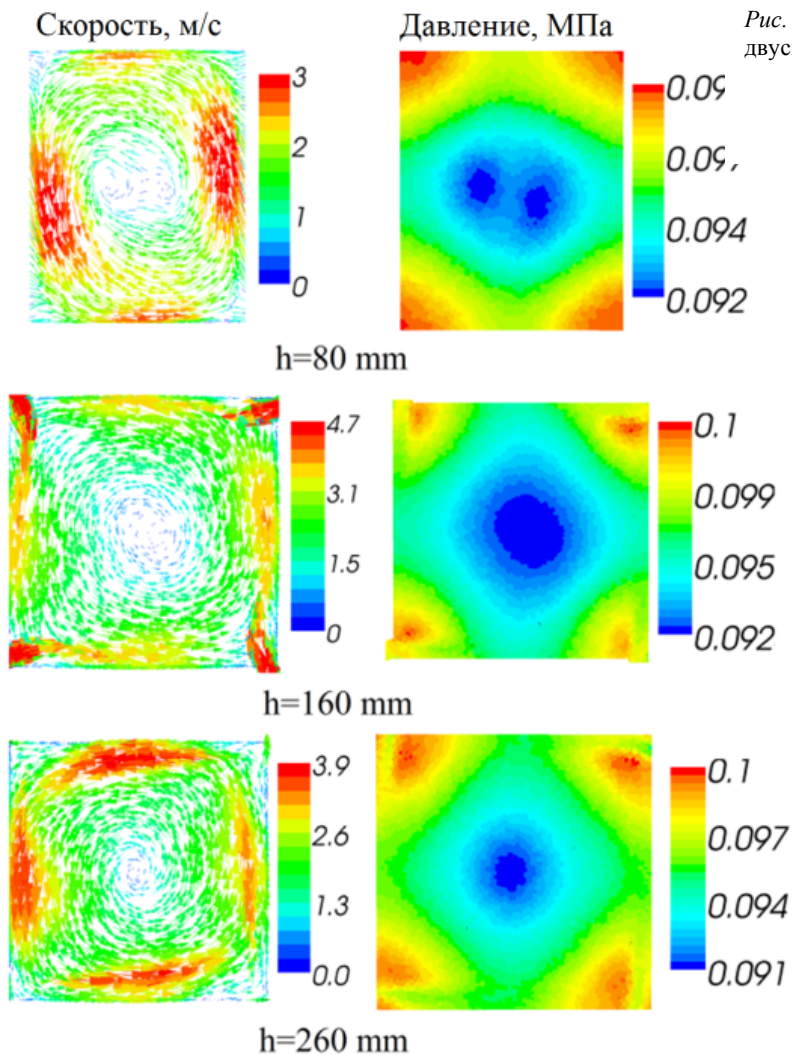


Рис. 11. Поля скоростей и давлений для двуспирального режима (вид сверху)

низких давлений практически сливаются, принимая форму овала. Однако, как видно из визуализации посредством Lambda2, каждый из вихрей представляет собой отдельные вихревые структуры вплоть до выходного отверстия диафрагмы.

Отметим также, что представленные выше результаты численного моделирования стационарной двойной спирали были получены впервые.

Заключение

В ходе работы с использованием экспериментальной техники и CFD процедур было проведено физическое и математическое моделирование турбулентного закрученного течения в вихревой камере тангенциального типа. Исследованы вихревые течения для

нескольких вариантов геометрии, в частности, течения с образованием сложных стационарных одиночных и двухвинтовых вихревых структур. Впервые проведено численное моделирование уникальной вихревой структуры в виде стационарной двойной спирали.

Сопоставление рассчитанных картин течения с полученными экспериментальными данными позволяет сделать вывод о хорошем качественном соответствии результатов. Дальнейшие численные и экспериментальные исследования будут направлены на получение детальной информации, которая позволит количественно сопоставить расчетные и опытные данные. В частности, планируется использовать бесконтактные оптические методы, такие как PIV, для измерения поля течения, индуцированного

сложными спиральными вихревыми структурами.

Список литературы

1. Гупта 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. Алексеенко С. В., Куйбин П. А., Окулов В. Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск, 2003. 504 с.
4. Alekseenko S. V., Kuibin P. A., Okulov V. L., Shtork S. I. Helical Vortices in Swirl Flow // J. Fluid Mech. 1999. Vol. 382. P. 195–243.
5. Jeong J., Hussain F. On the Identification of a Vortex // J. Fluid Mech. 1995. Vol. 285. P. 69–94.

Материал поступил в редколлегию 17.01.2012

E. S. Anokhina, D. A. Dekterev, S. I. Shtork, S. V. Alekseenko

INVESTIGATION OF STATIONARY VORTEX STRUCTURES IN THE MODEL COMBUSTION CHAMBER

This work focuses on experimental and numerical study of stationary vortex structures in a model of vortex combustion chamber of the tangential type. The experiments included the visualization of vortex structures in the work area using a laser light source and a digital high-definition cameras. The calculations were performed using a commercial package STAR-CCM+. From known turbulence models have been chosen the most suitable for the problem under investigation. In the calculations we obtained results that agree well with experimental data, which confirms the adequacy of employed numerical model.

Keywords: simulation, vortex thread, vortex structure, tangential chamber, turbulent flow.