

УДК 532.527(2)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАМЕР СГОРАНИЯ ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО ТИПА

*Анохина Е.С.<sup>1</sup>, Шторк С.И.<sup>1,2</sup>, Алексеенко С.В.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН*

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет*

*E-mail: anohina\_liza@mail.ru*

Данная работа направлена на экспериментальное и численное исследование стационарных вихревых структур 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. В процессе расчетов были получены результаты, хорошо согласующиеся полученными экспериментальными данными, что подтверждает адекватность использованной численной модели.

### **Введение**

Камеры сгорания являются важной частью малой энергетики. Они широко используются на отопительных станциях, таким образом, их изучение и повышение эффективности использования топлива представляется важной задачей. Закрутка потока обладает полезными свойствами, позволяющими увеличить эффективность камер. Закрученные потоки находят применение в камерах сгорания, сепараторах, топках и прочее [1, 2]. В закрученном потоке образуются вихревые структуры, которые подлежат подробному изучению. 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 характеризуется чрезвычайным 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 вихри. 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 теоретических подходов динамики таких структур необходимы данные по их харак-

теристикам, которые должны быть получены методами детального физического и численного моделирования.

Данная работа направлена на повышение эффективности работы камеры сгорания с закрученным потоком, путем выбора наиболее оптимальной геометрии рабочего участка и граничных условий для камеры сгорания (диафрагмирование выходного отверстия, изменение формы дна). В этой связи необходимо подробное изучение вихревых структур, что в свою очередь является важной фундаментальной задачей.

### Постановка эксперимента

Экспериментальный стенд является замкнутым гидравлическим контуром и обеспечивает производительность до 8 л/с с напором до 1 атм. На рис. 1 приведена структурная схема гидродинамического стенда, предназначенного для экспериментального исследования вихревых структур, образующихся в рабочей камере с тангенциальной закруткой потока. Жидкость из бака 2 подается в рабочую камеру 1 с помощью насоса 3, через систему вентиля и распределителей. Насос подключен через автотрансформатор РНО. Расход жидкости измеряется ультразвуковым расходомером 5, измерительный участок расходомера обозначен цифрой 6. Регулировка расхода жидкости осуществляется путем изменения силы тока.

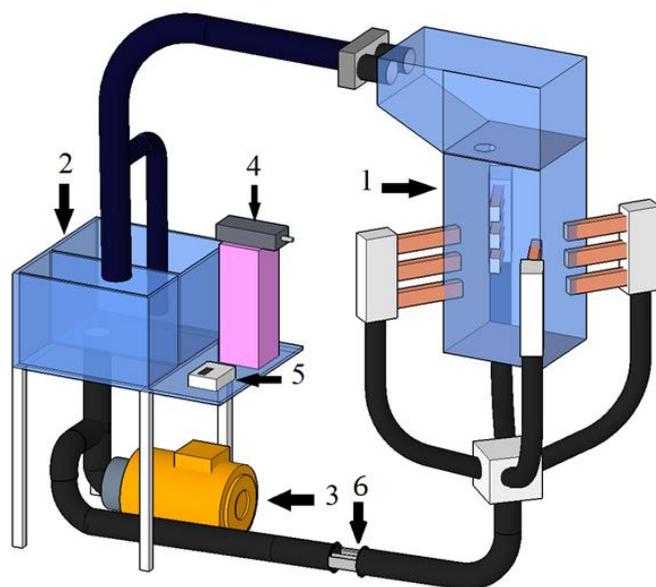


Рис. 1. Экспериментальная установка.

Рабочий участок изготовлен из оргстекла и представляет собой вертикальную камеру квадратного сечения с размерами 188×188×625 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. Геометрические условия в рабочем участке варьировались путем изменения угла поворота сопел и формы дна, диафрагмирования выхода и смещения выходного

отверстия диафрагмы. Режимы течения характеризовались безразмерными параметрами, такими как число Рейнольдса  $Re$  и параметр крутки  $S$ . Число Рейнольдса определялось по поперечному размеру и среднерасходной скорости вихревой камеры. Параметр крутки варьировался изменением угла поворота сопел. 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. 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.

### Экспериментальные данные

При постановке эксперимента были получены визуализации различных режимов течений. 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. 2а). Смещение выходного отверстия на расстояние  $\delta_e$  относительно оси камеры приводит к радикальным изменениям в структуре течения (рис. 2б). 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.

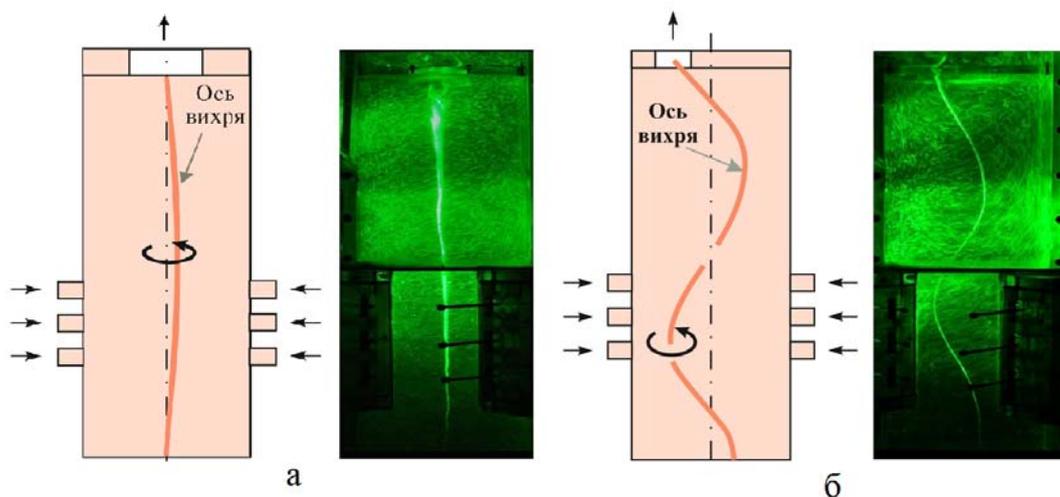


Рис. 2. а - прямолинейная вихревая нить:  $h_e=560 \text{ мм}$ ,  $d_e=70 \text{ мм}$ ,  $Re=20000$ ,  $S=3$ ; б - геометрическая особенность камеры и вихревая структура, образующаяся в ней.  $h_e= 560 \text{ мм}$ ,  $d_e=70 \text{ мм}$ ,  $\delta_e=60 \text{ мм}$ ,  $Re=13000$ ,  $S=3,6$

Описанные выше 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. 3). Анализируя видеозапись, можно заметить, что данное течение проходит несколько фаз. Сначала происходит формирование двух вихрей, затем один из них стремится доминировать, что приводит к разрушению другого вихря. И наконец, доминирующая вихревая нить разрушается и далее все периодически повторяется.

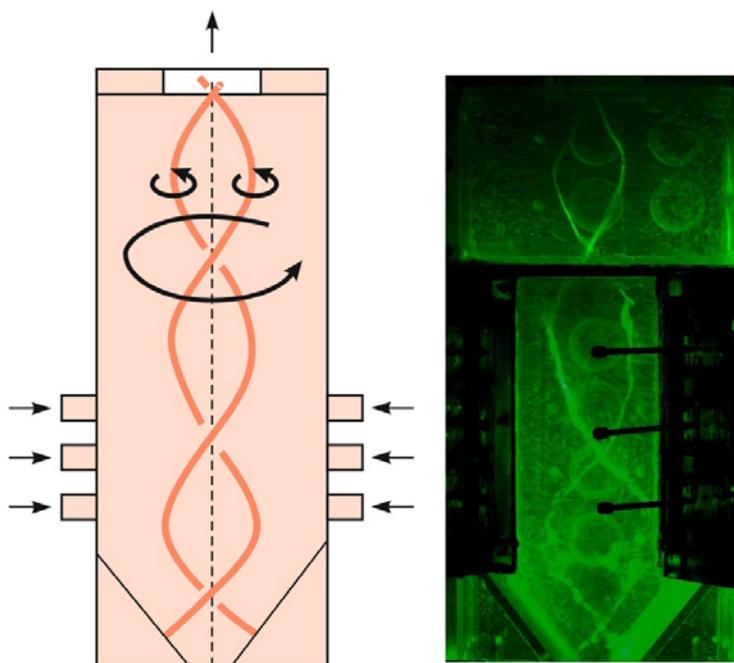


Рис. 3. Двойная спираль.  $H_e = 420$  мм,  $d_e = 70$  мм,  $Re = 40000$ ,  $S = 4,5$ .

Для определения частот колебаний вихрей, был проведен анализ видеозаписей. При помощи раскадровки видео, записанного с частотой 60 кадров в секунду, были подсчитаны частоты колебаний вихрей. Одиночные вихревые структуры являются устойчивыми и квазистационарными. Вихревая нить совершает периодические колебания с частотой прямо пропорциональной расходу жидкости (рис. 4).

При двуспиральном режиме течения зависимость частоты колебаний так же остается линейной, но в отличие от одиночных вихрей частоты колебаний существенно выше. При экстраполяции данных частота колебаний обращается в ноль при нулевом расходе. Если говорить об амплитуде колебаний, то она уменьшается с увеличением расхода жидкости.

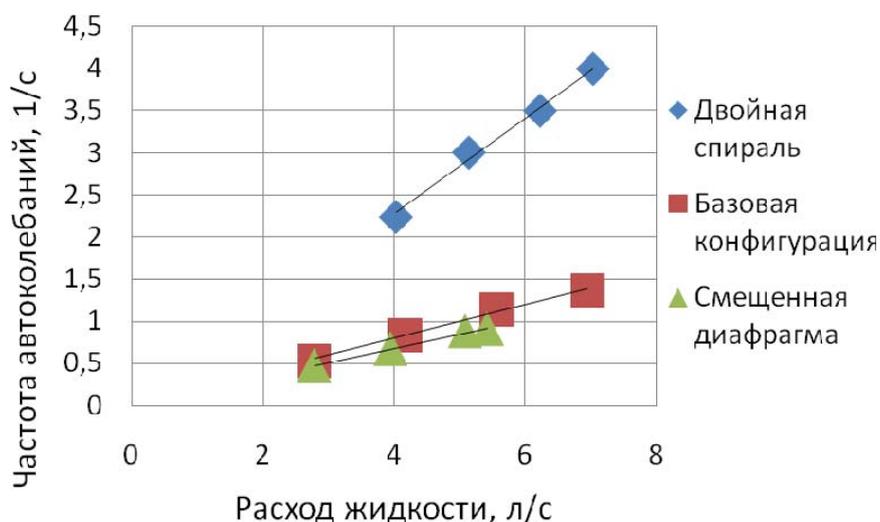


Рис. 4. Зависимость частоты колебаний вихрей от расхода жидкости.

Вращающиеся концентрированные вихри, образующиеся в неустойчивом закрученном потоке, обычно называют прецессирующим вихревым ядром [3]. Как было показано ранее, вихревые структуры совершают периодические колебания. Проведя анализ видеозаписи снятой снизу вихревой камеры с центральной диафрагмой и плоским дном, можно говорить о прецессии вихревой нити вокруг оси камеры.

### Описание моделей турбулентности

В настоящее время существует множество программных комплексов для моделирования разного рода течений, в том числе турбулентных течений. Все они содержат основные модели турбулентности. В данной работе вихревые структуры моделируются в пакете STAR CCM+. Это универсальный программный комплекс для решения задач механики жидкости и газов, который обеспечивает адекватное моделирование сложных вихревых течений.

Выбор модели турбулентности основывался на анализе статей, в которых сравнивались различные модели турбулентности, в частности работа «Численное моделирование 3D турбулентного потока в камере сгорания», целью которой было определить, какая модель турбулентности является наиболее подходящей для получения достоверных результатов [5]. В статье проведено сравнение различных моделей турбулентности (k-ε, RSM и LES) исходя из предполагаемой степени зоны рециркуляции. Как итог, было показано, что k-ε модель турбулентности является наиболее оптимальной для данного рода течений.

Таким образом, в данной работе был использован общий подход, моделирования турбулентности, основанный на решении осредненных по Рейнольдсу 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 скорости ее диссипации.

В редакторе Star-Design была построена расчетная геометрия камеры (рис. 11), идентичная экспериментальному рабочему участку. Для построения сетки использовались полиэдральные ячейки с призматическими слоями, позволяющими хорошо разрешать пограничные слои. Количество ячеек было порядка 950 000.

Граничные условия определялись исходя из скорости подачи жидкости, углов поворота сопел, геометрических параметров: смещения диафрагмы, формы и наклона дна. Скорость потока на выходе рассчитывалась относительно скорости входного потока исходя из условия несжимаемости жидкости. Визуализация течения осуществлялась при помощи построения изоповерхности постоянного давления и критерия  $\lambda_2$ . 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 (рис. 5), число Рейнольдса для которого составляло  $Re = 20000$ , была получена расчетная вихревая структура течения, визуализированная на рис. 6 с помощью построения изоповерхности постоянного давления со значением  $P_{iso} = 0,0976$  МПа. Расчетная структура представляет собой вихревую нить, идущую от дна камеры до выходного отверстия.

При моделировании течения в камере со смещенной диафрагмой и плоским дном (рис. 6), число Рейнольдса для которого составляло  $Re = 13000$ , построена вихревая структура течения с помощью поверхности постоянного давления со значением давления  $P_{iso} = 0,094$  МПа. Данная изоповерхность отображает наличие устойчивой стационарной винтовой вихревой структуры. На рисунке 6 также показано поле скорости, из которого видна структура потока, в частности распределение минимальных скоростей на изоповерхности давления.

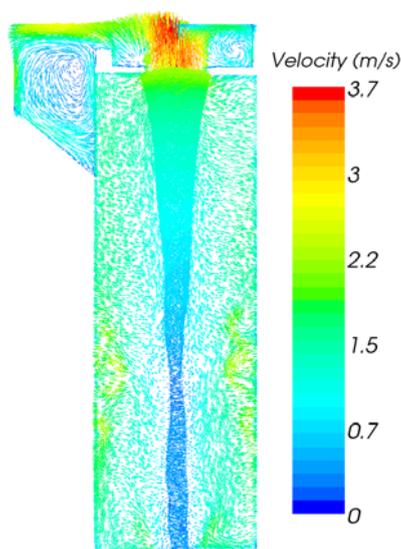


Рис. 5. Поле скорости и вихревая структура с прямолинейной осью вращения.

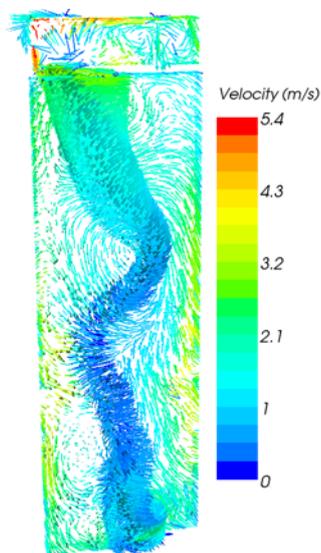


Рис. 6. Одиночный вихрь.

При расчете геометрии с двускатным дном и центрально расположенной диафрагмой ( $Re = 40000$ ), получена структура потока с образованием двуспирального вихря. На рис. 7 представлена визуализация вихревой структуры при помощи критерия  $\lambda_2$  [6], а также поле скорости в центральном сечении камеры.

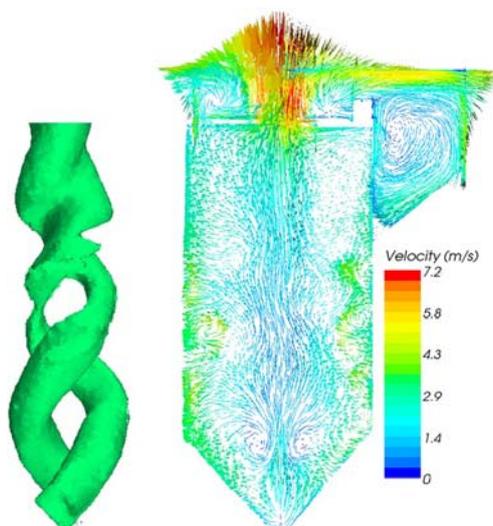


Рис. 7. Двойная спираль и поле скорости.

### Результаты и выводы

При моделировании течений были получены вихревые структуры, совпадающие с экспериментальными картинками течений, что в свою очередь подтверждает правильность выбора модели турбулентности. Таким образом, в ходе работы с использованием CFD процедур впервые были получены расчетные структуры течений. Проведено численное исследование турбулентного закрученного течения в модельной вихревой камере тангенциального типа. Промоделированы вихревые течения для нескольких вариантов геометрии, в частности течения с образованием сложных стационарных одиночных и двухвинтовых вихревых структур. Сопоставление расчетных картин течения с экспериментальными данными, позволяет сделать выводы о хорошем качественном соответствии результатов. Так же были рассчитанные поля скоростей и давлений, что позволяет более подробно изучать и описывать вихревые структуры.

### Литература

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 // Монография, 2003, с. 420-424.
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. Окулов В.Л., Наумов И.В., Соренсен Ж.Н. Вихревой триплет // ДАН, 2006. Т. 409
6. Hoerner S.F. Fluid-dynamic drag. Practical information on aerodynamic drag and hydrodynamic resistance // Bakersfield: Hoerner fluid dynamics. 1965.

Работа выполнена при 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» (госконтракт № 16.518.11.7010), РФФИ (гранты №№ 11-08-01063, 10-08-01096, 10-08-01093), гранта Правительства России № 11.G34.31.0046 для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах (ведущий ученый – К. Ханьялич, НГУ).