

УДК 532.527(2)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР

Анохина Е.С.<sup>1,2</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, Новосибирск, Россия*

<sup>2</sup>*Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, Россия*

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» (госконтракты №№ 16.518.11.7010, 16.516.11.6036, 16.516.11.6057), 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. Ханъялич, НГУ).

### АННОТАЦИЯ

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 с полученными экспериментальными данными, что подтверждает адекватность использованной численной модели.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследованию вихрей, специфической формы течения жидкостей в ограниченной области пространства посвящено огромное число теоретических и экспериментальных исследований. Интерес к изучению данной формы течений обусловлен несколькими взаимно дополняющими факторами.

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 завихрен-

ности – 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.

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

В этом контексте, данная работа направлена на экспериментальное и численное исследование стационарных вихревых структур

в вихревой камере, моделирующей топочные камеры тангенциального типа.

Эксперименты включали в себя визуализацию вихревых структур в рабочем участке с помощью лазерного источника света и циф-

ровой камеры высокого разрешения. Расчеты проводились с использованием коммерческого пакета STAR-CCM+. Из представленных моделей турбулентности были подобраны наиболее подходящие для исследуемой задачи.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР

Для выполнения эксперимента была проведена модернизация гидродинамического стенда, созданного ранее в ИТ СО РАН для исследования турбулентных закрученных течений. Экспериментальный стенд является замкнутым гидравлическим контуром и обеспечивает производительность до 8 л/с с напором до 1 атм.

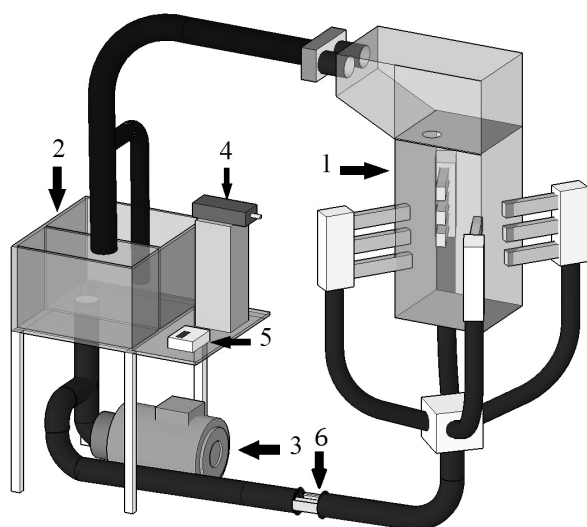


Рис.1 Схема гидродинамического стенда.

На рисунке 1 приведена структурная схема гидродинамического стенда. Гидродинамический стенд предназначен 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. Так же для проверки работы расходомера имеется дополнительный бак. Регулировка расхода жидкости осуществляется путем изменения силы тока.

Рабочий участок изготовлен из оргстекла и представляет собой вертикальную камеру квадратного сечения с размерами 188×188×625 мм. Закрученное течение организовывалось с помощью тангенциальной подачи жидкости в рабочий участок, т.е. путем направления осей сопел по касательной к некоторой условной окружности.

В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Расход регулировался изменением напряжения на электродвигателе постоянного тока, который приводит в действие центробежный насос.

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  $S$  варьировался изменением угла поворота сопел и вычислялся на основе площади входных сопел, диаметра условной окружности и ширины канала [4].

Визуализация течения осуществлялась мелкими пузырьками воздуха. Подсветка потока производилась с помощью лазерного ножа. Для регистрации картины течения использовался цифровой зеркальный фотоаппарат.

При экспериментальном моделировании вихревых структур в рабочей камере менялись геометрические условия, что приводило к образованию в камере различных вихревых структур.

Пусть в нижней части вихревой камеры установлено плоское дно, а в выходном сечении на высоте  $h_c$  установлена диафрагма с выходным отверстием  $d_c$ . Центральное положение отверстия приводит к образованию устойчивого прямолинейного вихря (рис.2). Вихревая структура представляет собой тонкую вихревую нить, идущую от дна камеры до выходного отверстия. Визуализирующая воздушная вихревая нить

расширяется при приближении к выходному отверстию.

Частицы в вихревой камере совершают движение по спирали. Вихревая структура фиксируется при всех реализуемых расходах жидкости и при этом не меняет свою форму.

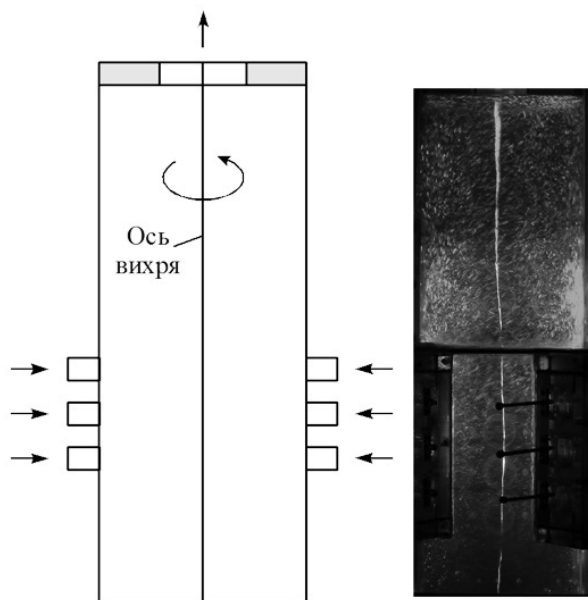
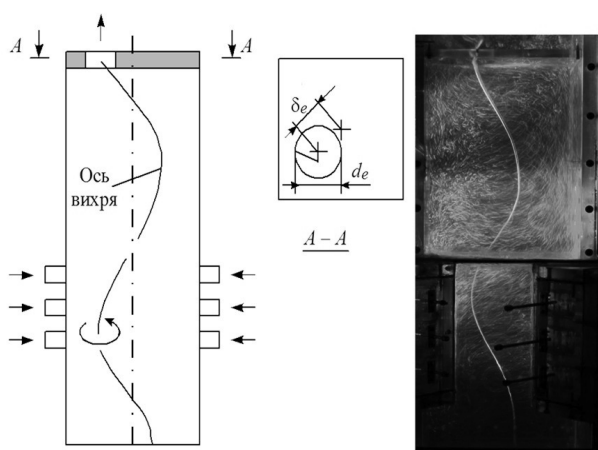


Рис.2 Прямолинейная вихревая нить:  
 $h_e=560$  мм,  $d_e=70$  мм,  $Re=20000$ ,  
 $S=3$ .

Смещение выходного отверстия на расстояние  $\delta_e$  относительно оси камеры приводит к радикальным изменениям в структуре течения (рис.3).



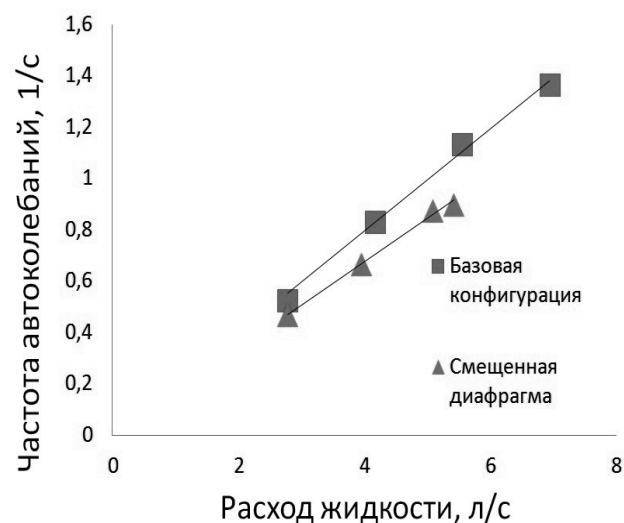
Воздушная нить, визуализирующая ось  
Рис.3 Геометрическая особенность камер (а) и вихревая структура, образующаяся в ней (б).  $h_e=560$  мм,  $d_e=70$  мм,  $\delta_e=60$  мм,  $Re=13000$ ,  $S=3,6$ .

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. Также фиксируются области с возвратным течением.

Одиночные вихревые структуры являются устойчивыми и совершают периодические колебания вокруг устойчивого состояния.

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).



Вращающиеся концентрированные вихри,  
Рис.4 Зависимость частоты колебаний от расхода жидкости.

образующиеся в неустойчивом закрученном потоке, обычно называют прецессирующим вихревым ядром [3].

Проведя анализ видеозаписи снятой снизу вихревой камеры с центральной диафрагмой и плоским дном, было показано, что вихревая нить прецессирует вокруг оси камеры.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР

В настоящее время практика порождает различного рода задачи, полное исследование которых может быть проведено в большинстве случаев лишь путём вычислительного эксперимента и с помощью тщательно поставленного физического эксперимента. Однако представляющие практический интерес явления и технологические процессы либо не поддаются всестороннему физическому моделированию, либо затраты на проведение таких экспериментов чрезмерно велики.

В настоящее время существует множество программных комплексов для моделирования разного рода течений. Все они используют 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.

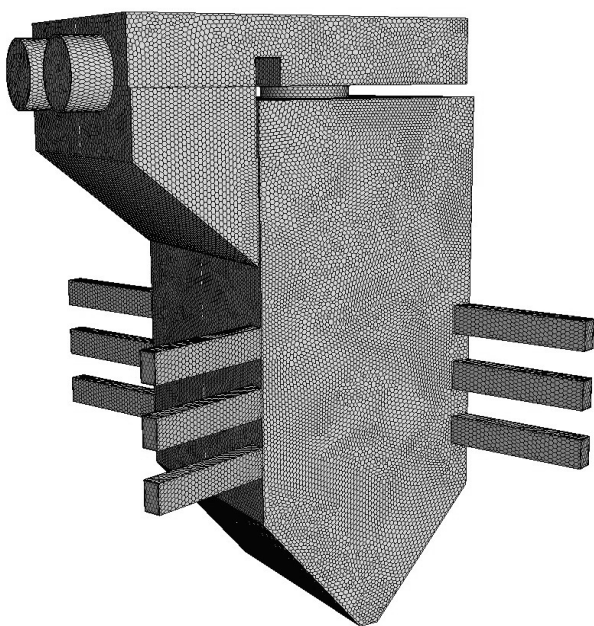


Рис.5 Расчётная геометрия камеры.

В данной работе был использован общий подход, моделирования турбулентности, основанный на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (RANS).

Стандартная  $k-\epsilon$  модель турбулентности (модель Лаундера-Ханьялича [5]) 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.5), идентичная экспериментальному рабочему участку. Для построения сетки использовались полиэдральные ячейки с призматическими слоями, позволяющими хорошо разрешать пограничные слои. Количество ячеек было порядка 950 000.

При численном моделировании течения в камере с центральной диафрагмой и плоским дном (рис.6а), число Рейнольдса для которого составляло  $Re=20000$ , была получена расчетная вихревая структура течения, визуализированная 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.

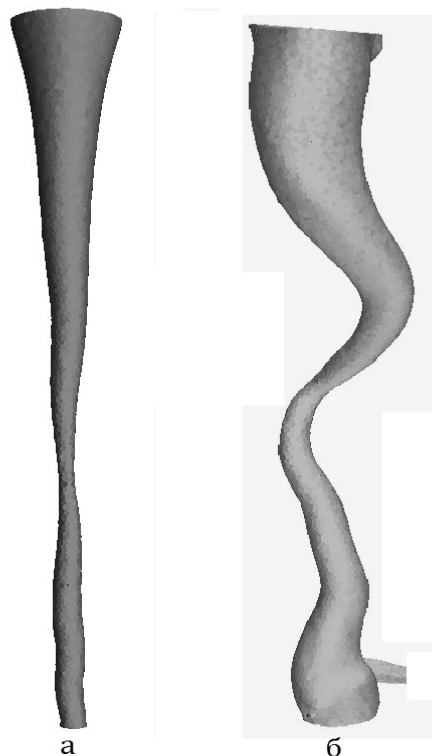


Рис.6 Одиночные вихри.

В камере со смещенной диафрагмой и плоским дном (рис.6б), 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 винтовой вихревой структуры, совпадающей по форме с экспериментальным вихрем.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 эксперименталь-

ными данными, позволяет сделать выводы о хорошем качественном соответствии.

Дальнейшие численные и экспериментальные исследования будут направлены на получение детальной информации, позволяющей количественное сопоставление расчетных и опытных данных. В частности, планируется использование бесконтактных оптических методов, таких как PIV, для измерения поля течения, индуцированного сложными спиральными вихревыми структурами.

## 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. Гушин В.А., Матюшин П.В. Классификация режимов отрывных течений жидкости около сферы при умеренных числах Рейнольдса // Математическое моделирование: проблемы и результаты. — М.: Наука, 2003. — С. 199–235.
5. Hanjalic K., Launder B.E., Schiestel R. Multiple-Time-Scale Concepts in Turbulent Transport Modelling // Turbulent Shear Flows 2. 1980. pp. 36-49.