

УДК 532.528

## **Экспериментальное и численное исследование прецессирующего вихревого ядра в условиях сильной закрутки потока**

**Д.А. Дектерев\***,

**А.А. Дектерев, С.И. Шторк**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН  
Россия 630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1<sup>1</sup>*

Received 06.09.2012, received in revised form 13.09.2012, accepted 20.09.2012

---

*Статья посвящена численному и экспериментальному исследованию нестационарных режимов закрученного течения в модельной вихревой камере с формированием прецессирующего вихревого ядра. Эксперименты по исследованию пульсационных характеристик течения проводили с помощью гидроакустических датчиков, скоростной визуализации и бесконтактной PIV-системы. Численные расчеты вели с использованием гибридной модели турбулентности DES, реализованной в коммерческом CFD-пакете Star-CCM+.*

*Ключевые слова: прецессия вихревого ядра, закрученные потоки.*

---

### **Введение**

В современных технологических процессах нередко встречаются закрученные потоки газов и жидкостей [1]. Формирование закрученных течений происходит за колёсами гидротурбин ГЭС [2], в следе самолетных и гребных винтов, а также ветрогенераторов и пр. [3]. Циклоны, сепараторы, вихревые расходомеры – во всех этих устройствах используется закрутка потока рабочей среды. Полезные свойства закрученных течений широко применяются в теплоэнергетике, например, с помощью неё добиваются стабилизации пламён в горелочных устройствах. Однако закрученные течения имеют не только положительные особенности. В сильнозакрученных потоках часто происходит формирование нестационарных структур, таких как прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ). Низкие частоты прецессии вихревого ядра, образуящегося, к примеру, за колесом гидротурбины ГЭС, могут привести к резонансу с собственными частотами гидроагрегата, что в свою очередь повлечет за собой сильные вибрации, представляющие серьезную опасность для всей конструкции ГЭС. Образование ПВЯ в вихревых камерах сгорания может быть причиной термоакустического резонанса [4], следствием чего также являются сильные вибрации и шум. Кроме того, было установлено, что ПВЯ может влиять на эффективность работы вихревых аппаратов [5]. Несмотря на многолетние исследования данного явления, на настоящий момент нет достаточной информации для построения теории ПВЯ и,

---

\* Corresponding author E-mail address: dekterev\_da@mail.ru

<sup>1</sup> © Siberian Federal University. All rights reserved

соответственно, для разработки эффективных методов управления данным явлением. По этой причине исследование эффекта ПВЯ по-прежнему остается актуальной задачей.

В ранних работах авторов эффект прецессии вихря был рассмотрен в моделях вихревых горелочных устройств, в которых закрутка производится с помощью лопаточного завихрителя с наибольшими значениями параметра крутки  $S$  порядка 1-1.5 [6, 7]. Целью настоящей работы служит численное и экспериментальное моделирование эффекта ПВЯ в цилиндрической гидродинамической камере с тангенциальным типом закручивающего устройства, дающим высокие показатели степени закрутки потока до  $S=2.4$ .

### Экспериментальная установка и модели CFD

Работа проводилась на экспериментальном стенде, представляющем собой замкнутый гидравлический контур (рис. 1а), состоящий из бака ёмкостью 500 л (1), центробежного химического насоса X100-80-160T153 номинальной производительностью 100 м<sup>3</sup>/ч и напором 3,2 атм с двигателем 22 кВт (2), частотного преобразователя ВЕСПЕР Е2-8300-030Н 22 кВт 380В (3), шарового крана (4), системы подводящих пластиковых труб (ПЭ80, ПЭ100) (5), расходомерного узла с преобразователем давления САПФИР-22 (6), рабочего участка (тангенциальной вихревой камеры) (7) и системы отводящих труб (8).

Схема и размеры камеры приведены на рис. 1б. Различными тонами отмечены четыре условные секции: 1 – завихритель тангенциального типа с двумя входными патрубками, 2 – сопло, 3 – область внезапного расширения и 4 – выходная секция с четырьмя отводами и систе-

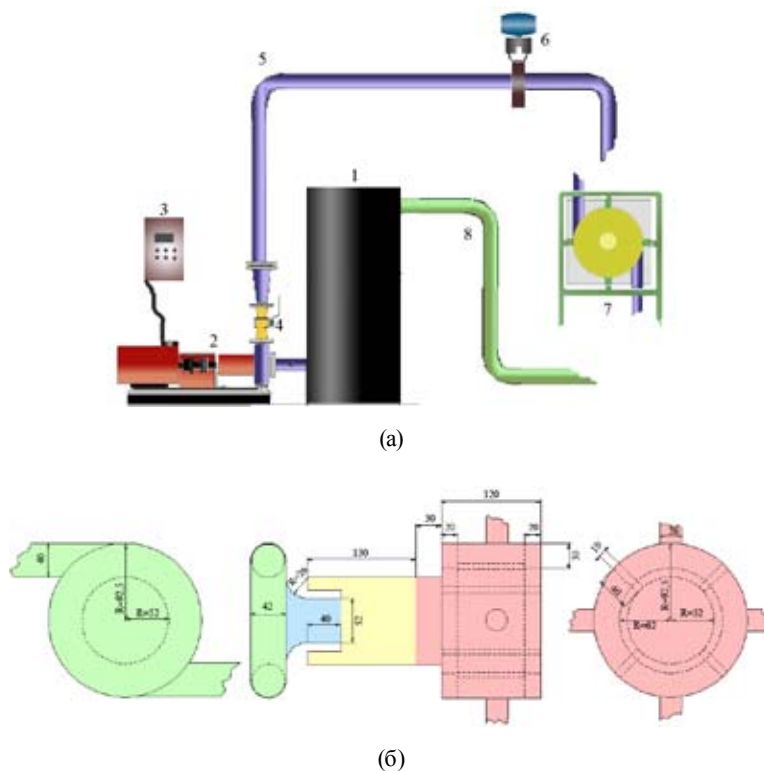


Рис. 1. Схема установки (а) и вихревой камеры (б)



Рис. 2. Расчетная геометрия и сетка, 1 млн ячеек

мой лопаток, разбивающих закрученный поток. Вихревая камера была выполнена из прозрачного оргстекла, что позволяло использовать оптические методы исследования потока.

Численное моделирование производилось с использованием CFD-пакета STAR-CCM+. Геометрия расчётной вихревой камеры (рис. 2) соответствовала геометрии экспериментального рабочего участка. Для расчетов использовалась полиэдральная сетка с общим количеством ячеек равным 1 млн, с детализацией в районе наблюдения ПВЯ и пристеночных слоев.

В работе Сентябова и др. [8] по результатам численного моделирования закрученных потоков сделан вывод о значительном преимуществе метода отсоединенных вихрей (DES) над методом URANS (нестационарные уравнения Навье-Стокса, осреднённые по Рейнольдсу). В то же время ограниченный компьютерный ресурс не позволял использовать более совершенные методы моделирования, такие как DNS (прямое численное моделирование) и LES (моделирование крупных вихрей), поэтому в данной работе использовался гибридный RANS/LES подход, а именно DES-метод. На входе в расчетную область задавался расход жидкости и турбулентные характеристики потока, а на выходе из нее – давление. Для экономии вычислительных ресурсов изначально производился расчет стационарной задачи со стандартной  $k$ - $\epsilon$ -моделью турбулентности после формирования установившегося потока, решалась нестационарная задача DES-методом с использованием модели SST Menter's  $k$ - $\omega$ . При этом для аппроксимации производных по пространству и времени применялись схемы второго порядка точности.

### Визуализация потока

Для визуализации течения в эксперименте применялись: 3 Вт непрерывный твердотельный лазер с диодной накачкой KLM-532/h-3000, луч которого с помощью цилиндрической линзы преобразовывался в тонкий световой нож, скоростная видеокамера ВИДЕО СПРИНТ, а также цифровая фотокамера CANON EOS 20D. Для наглядности в поток инжестрировался воздух, который, как наиболее лёгкая фаза, собирался в зонах наименьшего давления – на осях вихревых структур, тем самым делая их хорошо видимыми при подсветке лазерным ножом.

По результатам визуализации можно видеть формирование стабильного прецессирующего вихревого ядра в области завихрителя и сопла. При истечении потока из сопла происходит распад вихря с дальнейшим образованием вторичных вихревых структур. Стоит отметить, что вторичные вихри также имеют выраженную частоту вращения, однако они имеют нестабильную одно-, двухвинтовую структуру. Также отметим, что интенсивность вторичных вихрей значительно ниже интенсивности основного ПВЯ, на это указывает сравнение характерных расчётных уровней функции  $\lambda$ -2 [9] и давления. Учитывая большую разницу

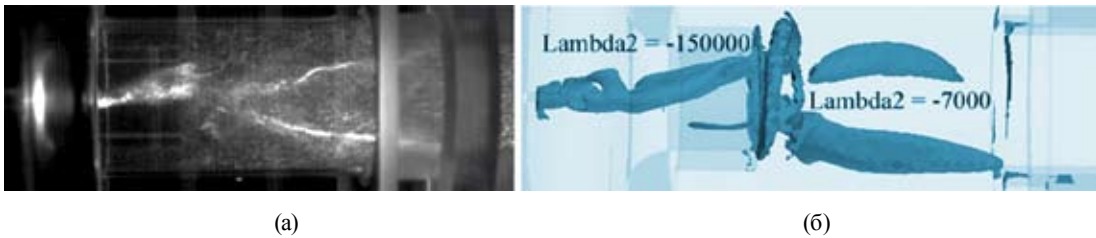


Рис. 3. Мгновенная картина течения (а – эксперимент, б – расчет)

в интенсивности, предполагают, что вторичные вихри не оказывают существенного влияния на характеристики ПВЯ. На рис. 3 изображено сопоставление расчетной и экспериментальной картин течения. При представлении численных результатов визуализация вихревого ядра производилась с использованием изоповерхностей  $\lambda_{\lambda-2}$ .

### Определение частотных характеристик ПВЯ

Для определения частотных характеристик ПВЯ на выходе из сопла производилась запись пульсаций давления. В эксперименте эту функцию выполняли два пьезоэлектрических датчика давления 014-МТ, установленных в поток геометрически противоположно друг другу. При таком расположении датчиков пики отрицательного давления, соответствующие прохождению вихревого ядра вблизи датчиков, находились в противофазе, что позволяло получить разностный сигнал, исключающий шумы и посторонние колебания.

По спектрам пульсаций давления при помощи быстрого Фурье-преобразования были определены частоты прецессии вихря. На рис. 4 представлено сопоставление экспериментальных (exp) и численных (calc) данных в размерных (частота от расхода) и безразмерных (Струхаль от Рейнольдса) величинах. Можно видеть достаточно хорошее соответствие этих результатов.

На графике рис. 4(а) видно, что частота прецессии имеет линейную зависимость от расхода, а график рис. 4(б) указывает на то, что в измеряемом диапазоне скоростей эффект ПВЯ

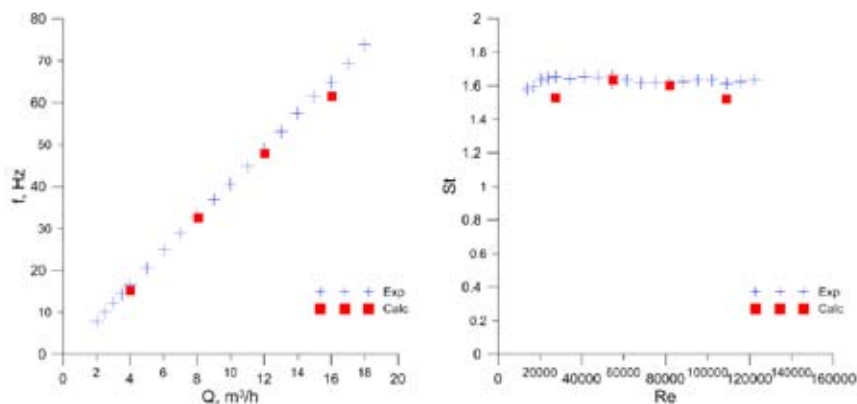


Рис. 4. Частотные характеристики в размерном (а) и безразмерном (б) виде

находится в области автомодельности. Отметим, что характер зависимостей частоты прецессии от объемного расхода, представленный на графиках, аналогичен результатам, полученным для закрученного течения с относительно низким параметром крутки  $S=1$  [6].

### Поля скорости и завихренности

Экспериментальное исследование структуры потока производилось с использованием PIV (Particle Image Velocimetry) – оптического метода измерения мгновенного поля скорости жидкости или газа в выбранном сечении потока. В работе использовалась PIV-система ПОЛИС, включающая в себя: двойной импульсный Nd:YAG лазер POLIS v3.3 с оптической насадкой, формирующей лазерный нож, две кросскорреляционные камеры 1MPix POLIS v1.0 на базе камеры «ВИДЕОСКАН-205-2001», синхронизирующий процессор POLIS, а также набор объективов для камер. Для удобства измерений система была размещена на координатном устройстве. В качестве трассеров в поток добавлялись полиамидные частички фирмы Dantec Dynamics диаметром 20 мкм. Сбор и обработка данных производились на персональном компьютере с использованием программного обеспечения ActualFlow.

Представленные ниже результаты соответствуют расходу воды, равному  $12 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $Re=81700$ ), для сечения внутри сопла на 20 мм ниже его кромки. На рис. 5 приведен снимок, полученный PIV камерой, и условно осреднённое поле завихренности (осреднение производилось по двадцати кадрам, для которых вихревое ядро находилось в одной фазе).

На рис. 6 изображено сопоставление расчетного поля мгновенных скоростей в поперечной плоскости с полем мгновенной скорости, полученным техникой PIV. Предполагая, что структура потока имеет периодический характер, для сравнения используют картины течения в разные моменты времени, но с нахождением вихревого ядра в одной фазе. Данные демонстрируют характерные особенности неосесимметричного мгновенного поля течения с вихревым ядром, смещенным относительно геометрического центра. Можно видеть распределение минимумов и максимумов скоростей относительно вихревого ядра: максимальные скорости наблюдаются вблизи стенки сопла, по направлению к которой отклоняется центр вихря; минимальные скорости наблюдаются в противоположном направлении, непосредственно за осью вихря. Подобная структура потока была зафиксирована в предыдущих

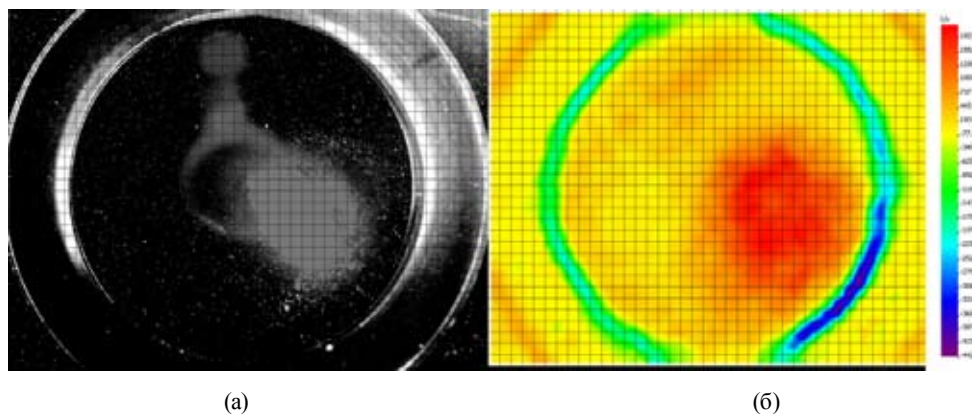


Рис. 5. Картина течения (а) и соответствующее поле завихренности (б)

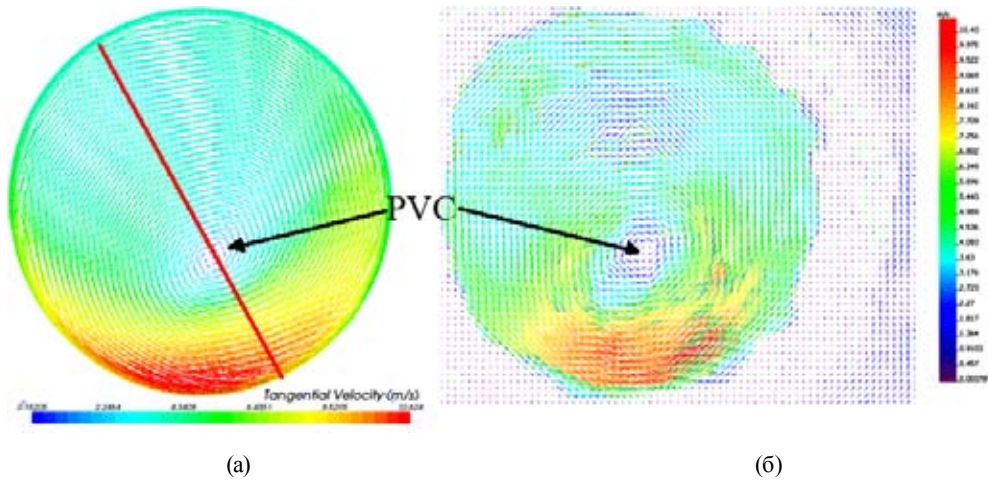


Рис. 6. Сопоставление расчетных (а) и экспериментальных (б) радиально-тангенциальных компонент скорости

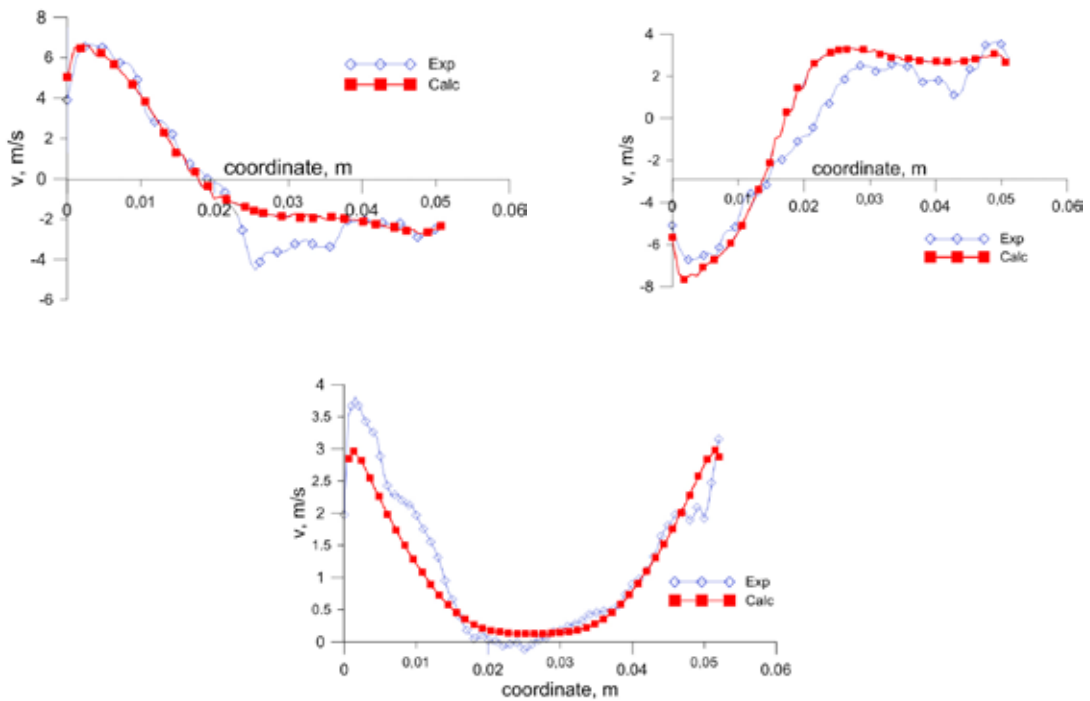


Рис. 7. Сопоставление профилей  $x$ -,  $y$ - и  $z$ -компонент скорости

исследованиях для  $S=1$  [6]. Также нужно отметить большой градиент скорости: минимальная 1 м/с, а максимальная 10 м/с.

На рис. 7 показаны расчетные и измеренные профили  $x$ ,  $y$  и  $z$ -компонент скорости вдоль линии, пересекающей центр вихря и геометрический центр камеры (сплошная линия на рис. 6).

### Заключение

Было проведено комплексное численное и экспериментальное исследование нестационарных режимов вихревого течения в модельной вихревой камере. В отличие от экспериментальных работ, встречающихся в литературе, данная работа направлена на исследование ПВЯ в канонических условиях, при больших параметрах закрутки потока. Эксперименты по измерению характеристик нестационарного течения проводились с помощью гидроакустических датчиков, скоростной визуализации и бесконтактной PIV-системы. Как показало сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными данными, применение метода DES позволяет в достаточной мере адекватно предсказать характеристики нестационарного сильно закрученного потока. Результаты физического и математического моделирования будут в дальнейшем использоваться для развития теоретических подходов и получения на их основе аналитических решений, позволяющих описать условия возникновения и поведение прецессирующих вихревых структур [10, 11].

*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», 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).*

### Список литературы

- [1] Гунта А., Лили Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. 590 с.
- [2] Muntean S., Susan-Resiga R.F., Bosioc A.I. Proc. 3th IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, October 14-16, 2009, Brno, Czech Republic.
- [3] Okulov V.L., Sorensen J.N. // J. Fluid Mech. 2010. Vol. 649, pp. 497-508.
- [4] Syred N. // Prog. Energy Combust. Sc. 2006. Vol. 32 (2), pp. 93-161.
- [5] Derksen J.J. // AIChEJ., 2003. Vol. 49. No. 6, pp. 1359-1371.
- [6] C.E. Cala, E.C. Fernandes, M.V. Heitor and S.I. Shtork // Exp. Fluids. 2006. Vol. 40, pp. 267-276,
- [7] Shtork S.I., Vieira N.F., Fernandes E.C. // Fuel. 2008. Vol. 87 (10-11), pp. 2314-2321
- [8] Сентябрьов А.В., Гаврилов А.А., Дектерев А.А. // Теплофизика и аэромеханика. 2011. №1. С. 81-93
- [9] Jeong J., Hussain F. // J. Fluid Mech. 1995. 285: pp. 69-94/
- [10] Alekseenko S.V., Kuibin P.A., Okulov V.L., Shtork S.I. // J. Fluid Mech. 1999. Vol. 382. pp. 195-243.
- [11] Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Наука, 2003. С. 420-424.



# **An Experimental and a Numerical Study of Precessing Vortex Core in the High Swirl Number Flow Conditions**

**Dmitry A. Dekterev,  
Alexander A. Dekterev and Sergey I. Shtork,**  
*Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS  
1 Lavrentieva, Novosibirsk, 630090 Russia*

---

*The paper is devoted to a numerical and an experimental study of non-stationary modes of the swirled flow in the modeling vortex chamber with precessing vortex core (PVC) formation. The experimental research of flow pulsation characteristics were spent with use of hydroacoustic sensors, high-speed visualization and contactless PIV systems. Numerical simulations were spent with use of hybrid turbulentDES (Detached Eddy Simulation) model realized in the commercial CFD packet Star-CCM+.*

*Keywords: Swirled flows, precessing vortex core.*

---