

А. П. Винокуров^{1,2}, 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, Россия² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: alexey_vin@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ*

Работа посвящена экспериментальному и численному исследованию нестационарных вихревых процессов в изотермической модели осесимметричной вихревой горелки. Получены пульсационные характеристики прериссцирующего вихревого ядра, из которых выявлены зависимости частоты прериссции прериссцирующего вихревого ядра от расхода жидкости, параметра крутки завихрителя и диаметра сопла. Проведено исследование перепадов давления в камере от тех же параметров. Посредством лазерного доплеровского анемометра измерены профили осредненной осевой скорости. Численное моделирование проведено с использованием коммерческого пакета Star-CCM+. Для расчетов использовался метод отсоединенных вихрей с моделью Спаларта – Аллмараса. Результаты сравнения экспериментальных и численных данных показали адекватность использованного численного метода. Комбинация экспериментального и математического моделирования обеспечила получение детальных данных, дающих достаточно полное представление о структуре пространственно сложного нестационарного течения с прериссцирующим вихревым ядром.

Ключевые слова: вихрь, турбулентность, прериссцирующее вихревое ядро, распад вихря, метод отсоединенных вихрей.

Введение

В настоящее время закрученные потоки стали неотъемлемой составляющей различных технических приложений. Так в скрубберах и циклонных сепараторах закрученные потоки используются для очистки газов и деаэрации топлив [1,2]. В горелочных устройствах интенсивная закрутка потока, ведущая к распаду вихря и образованию приосевой зоны возвратного течения, широко применяется для стабилизации пламени и улучшения процессов смешения. Однако подчас в сильно закрученных течениях ге-

нерируются нестационарные вихревые структуры, такие как прериссцирующее вихревое ядро, препятствующие работе промышленных вихревых аппаратов. В частности, при возникновении прериссцирующего вихревого ядра в камерах сгорания возможен резонанс с термоакустическими модами, следствием чего являются шумы и снижение эффективности и срока действия аппарата [3]. Частота периодических пульсаций давления, генерируемых вихревыми структурами за рабочим колесом турбины гидроэлектростанции, может совпасть с собственными частотами гидроагрегата, что

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 11-08-01063), грантов Правительства России (№ 11.G34.31.0046) и Минобрнауки РФ в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (грант № 8225) и ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы» (ГК № 14.516.11.0048).

в свою очередь, может повлечь за собой сильные вибрации, представляющие серьезную опасность для гидроэлектростанций.

Несмотря на многочисленные исследования данного явления, конкретные причины и механизмы образования прецессирующего вихревого ядра до сих пор не определены. Это связано со сложной нестационарной трехмерной структурой потока и его непредсказуемым поведением в зоне распада вихря. Создание адекватной теории таких течений и разработка эффективных методов управления данным явлением требуют, прежде всего, опытных данных по режимам течения и внутренней структуре потока. В данной работе представлено экспериментальное исследование сильнозакрученного вихревого потока в модельной камере сгорания с изменяемой геометрией, включающее в себя изучение частотных характеристик прецессирующего вихревого ядра и перепадов давления в осесимметричной камере, а также влияния на них геометрии камеры и режимов вихревого течения.

В связи с большим прогрессом вычислительной техники в течение последних десятилетий, численное моделирование становится основным инструментом при проектировании технологических установок [4]. Однако даже сегодня численные расчеты непредставительны без экспериментальных данных и нуждаются в верификации. В связи с этим в настоящей работе представлены также результаты численного моделирования сильнозакрученного потока в вихревой камере, полностью повторяющей геометрию экспериментального рабочего участка, что дает возможность сравнения экспериментальных и численных данных. Такой комплексный подход позволяет, с одной стороны, оценить адекватность использованного численного метода, а с другой, дополнить картину нестационарного трехмерного течения в присутствии прецессирующего вихревого ядра данными, которые не были получены в эксперименте, включая мгновенные поля скоростей и давлений.

Методика проведения эксперимента и численного моделирования

Экспериментальный стенд представляет собой замкнутый гидродинамический контур и состоит из рабочего участка в виде осесимметричной вихревой камеры, бака,

емкостью 600 л, и системы соединительных полиэтиленовых труб диаметром 40 мм. Подача жидкости в рабочий участок производится с помощью насоса, частота вращения вала которого регулируется посредством частотного преобразователя. Расход жидкости измеряется расходомером переменного перепада давления Сапфир-М и варьируется от 0 до 6 л/с.

Рабочий участок является осесимметричной цилиндрической вихревой камерой, изготовленной из оргстекла (рис. 1). Закрутка потока создается с помощью лопаточного завихрителя. Через сопло закрученная жидкость попадает в цилиндрическую камеру диаметром 104 мм и длиной 104 мм. Используются сменные завихрители с параметрами крутки $S = 0,6, 1$ и $1,4$ (15, 14 и 14 лопаток, соответственно), а также сменные сопла диаметром 30, 40 и 52 мм. Параметр крутки завихрителя рассчитывался по формуле, представленной в [1]:

$$S = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - \left(\frac{d_h}{d}\right)^3}{1 - \left(\frac{d_h}{d}\right)^2} \right] tg\phi$$

где d и d_h - диаметры завихрителя и втулки соответственно, а ϕ - угол наклона лопаток. На выходе из рабочего участка установлена крестовина, препятствующая возникновению вторичных вихревых структур.

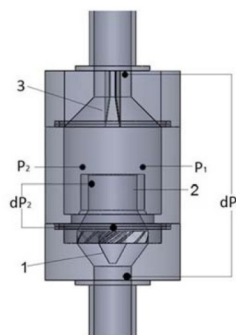


Рис. 1. Схема рабочего участка: 1 – лопаточный завихритель, 2 – сопло, 3 – крестовина; P1, P2 – точки измерения пульсаций давления; dP1, dP2 – измеряемые перепады давления

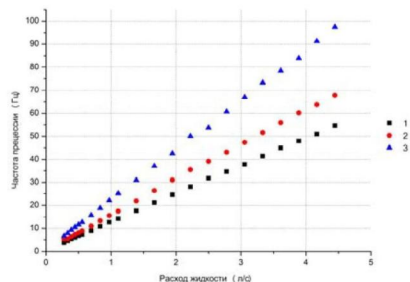
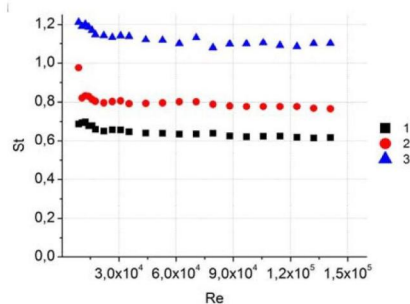
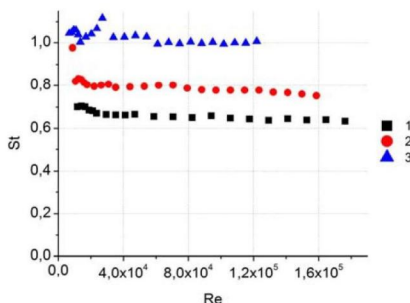


Рис. 2. Зависимость частоты прецессии от расхода жидкости и параметра крутки завихрителя S для сопла диаметром 40 мм. 1 – $S = 0.53$, 2 – $S = 0.87$, 3 – $S = 1.33$



а



б

Рис. 3. Зависимость числа Струаля St от числа Рейнольдса Re для различных геометрических вариаций установки. а – фиксированный диаметр сопла $d = 40$ мм, параметры крутки завихрителя S : 1 – $S = 0.53$; 2 – $S = 0.87$; 3 – $S = 1.33$. б – фиксированный параметр крутки завихрителя $S = 0.87$, диаметры сопла d : 1 – $d = 30$ мм; 2 – $d = 40$ мм; 3 – $d = 52$ мм

Над соплом диаметрально противоположно установлены 2 пьезодатчика, которые фиксируют пульсации давления внутри камеры. При таком расположении датчиков колебания давления, генерируемые непосредственно прецессирующим вихревым ядром, регистрируются ими в противофазе, что позволяет избавиться от посторонних вибраций путем вычитания сигналов. Частота прецессии прецессирующего вихревого ядра определяется посредством преобразования Фурье полученного разностного сигнала. Время проведения каждого измерения составляет 120 секунд, за которые происходит порядка 5000 пульсаций давления.

Перепад давления между входом и выходом из камеры $dP1$, дающий представление об интенсивности вихреобразования внутри камеры, а также перепад давления между торцом завихрителя и краем сопла, характеризующий интенсивность прецессирующего вихревого ядра, измерялись с помощью дифференциальных тензодатчиков давления. Каждое измерение проводилось в течение 120 секунд, что позволило надежно усреднить полученные данные.

Измерение осредненной осевой скорости осуществляется с использованием двухкомпонентного лазерного доплеровского анемометра ЛАД-06И. Определение скорости в каждой точке выполнялось на основе анализа 2000 вспышек.

Численное моделирование проводилось с помощью коммерческого CFD-пакета Star-CCM+. Для расчета нестационарного процесса использовался метод отсоединенных вихрей [5], замыкание осуществлялось использованием модели Спаларта-Аллмараса. Геометрическая модель является точной копией экспериментальной установки, и состоит из 400000 многогранных ячеек с 3 призматическими слоями.

Экспериментальное наблюдение стационарных вихревых структур

Ниже представлены экспериментально полученные зависимости частоты прецессии прецессирующего вихревого ядра f от расхода жидкости для геометрических вариаций установки с диаметром сопла $d = 40$ мм и параметрами крутки завихрителей $S = 0.57, 0.83$ и 1.33 (рис. 2). Видно, что частота прецессии линейно зависит от расхода жидкости. При этом угол наклона прямой

растет с увеличением параметра крутки завихрителя.

На основе полученных данных были построены графики зависимости в безразмерных параметрах – число Струхала ($St = \frac{fL}{u}$,

в качестве характерного размера L и скорости u используются диаметр и среднерасходная скорость сопла, соответственно) от числа Рейнольдса ($Re = \frac{uL}{\nu}$) (рис. 3а). Заме-

тим, что после достижения определенного числа Рейнольдса значение числа Струхала перестает от него зависеть, т.е. имеет место автомодельность вихревого течения по числу Рейнольдса. Из рис. 3б видно, что диаметр сопла также влияет на частоту прецессии – число Струхала возрастает с увеличением диаметра сопла при том же самом числе Рейнольдса, что означает уменьшение частоты прецессии.

Измеренные средние значения перепадов давления между входом и выходом из камеры dP_1 показаны на рис. 4а. Зависимость имеет квадратичный вид, скорость роста давления увеличивается с возрастанием параметра крутки завихрителя и уменьшением диаметра сопла. Ниже представлены зависимости dP_1 , обезразмеренного на гидродинамическое давление $\frac{\rho u^2}{2}$, от числа Рей-

нольдса (рис. 4б). Из графиков видно, что после достижения определенного числа Рейнольдса безразмерное давление перестает от него зависеть.

Полученные зависимости среднего значения перепада давления между торцом завихрителя и краем сопла dP_2 приведены на рис. 5а. Данные в безразмерном виде показаны на рис. 5б. Как и в предыдущем случае, зависимость в размерном виде имеет квадратичный вид, скорость роста давления увеличивается с возрастанием параметра крутки завихрителя и уменьшением диаметра сопла. Также наблюдается автомодельность безразмерного перепада по числу Рейнольдса.

С помощью лазерного доплеровского анемометра проведены измерения средней осевой компоненты скорости в камере на разных высотах над соплом. Надежных данных для тангенциальной компоненты скорости получить не удалось вследствие оптиче-

ских искажений на цилиндрической стенке камеры. Распределения осевой скорости вдоль радиуса приведены на Рис. 6. Эксперимент проведен с соплом диаметром $d = 40$ мм и завихрителем с параметром крутки $S = 0,87$. Расход жидкости поддерживался равным 2.2 л/с. Результаты демонстрируют наличие зоны рециркуляции в центре камеры. Над краем сопла располагается максимум скорости, затем скорость уменьшается и вблизи стенки становится отрицательной. С увеличением высоты измерительного сечения над соплом наблюдается расширение струи, которое проявляется в увеличении ширины зоны рециркуляции и радиальном смещении максимума скорости к боковой стенке камеры.

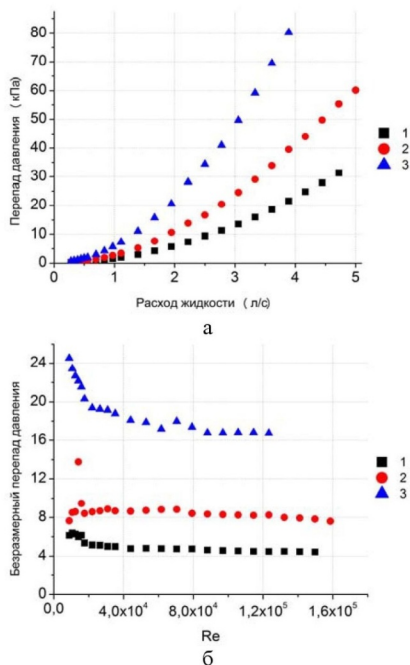


Рис. 4. а – зависимость перепада давления в камере от расхода жидкости. б – зависимость обезразмеренного перепада давления в камере от числа Рейнольдса Re . Диаметр сопла $d = 40$ мм, параметр крутки завихрителя S : 1 – $S = 0,53$; 2 – $S = 0,87$; 3 – $S = 1,33$

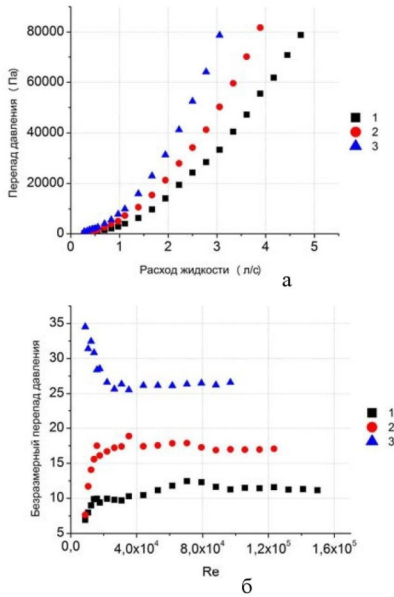


Рис. 5. а – зависимость перепада давления между стенкой сопла и торцом завихрителя. б – зависимость обезразмеренного перепада давления от числа Рейнольдса Re . Диаметр сопла $d = 40$ мм, параметр крутки завихрителя S : 1 – $S = 0.53$; 2 – $S = 0.87$; 3 – $S = 1.33$

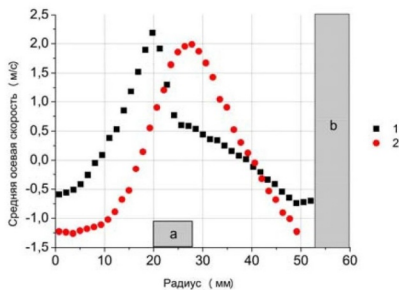


Рис. 6. Распределение осредненной осевой компоненты скорости по радиусу. Высота над соплом: 1 – 5 мм, 2 – 20 мм. а, б – стенки сопла и камеры соответственно

Далее представлены мгновенные распределения давления (рис. 7а) и мгновенной

осевой скорости (рис. 7б) на срезе сопла при диаметре сопла $d = 40$ мм, параметре крутки завихрителя $S = 0.87$ и расходе жидкости $Q = 3$ л/с, полученные с помощью численного расчета. Стрелками показаны радиально-тангенциальные компоненты скорости, позволяющие определить центр вихря. Из распределения давления видно, что существует локализованная область пониженного давления, совпадающая с центром вихря. Области высокой положительной и отрицательной осевой скорости находятся по разные стороны от вихревого ядра – это соответствует тому, что вихрь пересекает рассматриваемую плоскость не ортогонально, а под углом. Центр ядра вращается (прецессирует) по направлению закрутки потока.

На рис. 8 показано распределение осредненной осевой скорости в продольном сечении камеры при диаметре сопла в 40 мм, завихрителе с параметром крутки $S = 0.87$ и расходом жидкости $Q = 2.2$ л/с. Заметно наличие обширной центральной зоны рециркуляции, проникающей в сопло. В самом сопле поток прижат к стенкам.

Прецессирующее вихревое ядро было визуализировано с помощью изоповерхности λ_2 -критерия [6]. Вихревое ядро имеет характерную форму левовинтовой спирали и берет свое начало у торца завихрителя (рис. 9). Направление вращения вихревого ядра соответствует направлению закрутки потока.

Ниже представлено сопоставление численных и экспериментальных данных: распределение осредненной осевой компоненты скорости по радиусу (рис. 10а) при диаметре сопла $d = 40$ мм, параметре крутки завихрителя $S = 0.87$, расходе жидкости $Q = 3$ л/с, высота над соплом составляет 10 мм. Также приведено сравнение зависимостей частоты прецессии от расхода жидкости (рис. 10б) при диаметре сопла $d = 40$ мм и параметре крутки завихрителя $S = 0.53$.

Моделирование весьма точно повторяет эксперимент – вблизи сопла практически совпадают как структура течения, так и положения зоны рециркуляции и пика максимума скорости. На большем расстоянии от сопла профили отличаются сильнее. Частота прецессии практически одинакова в эксперименте и моделировании. Итак, можно констатировать, что использованный чис-

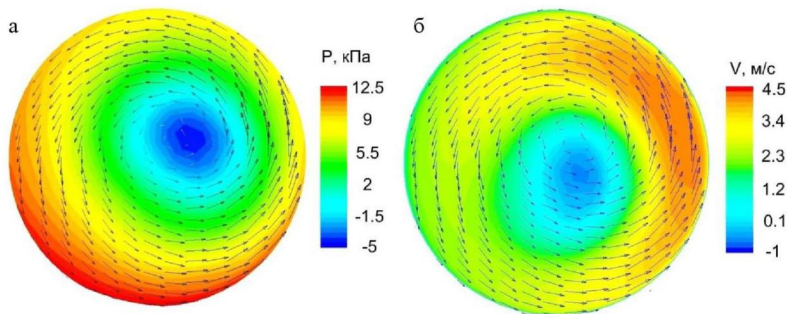


Рис. 7. Мгновенные распределения давления (а) и модуля осевой скорости в поперечном сечении сопла. Стрелками показаны ортогональные оси симметрии компоненты скорости

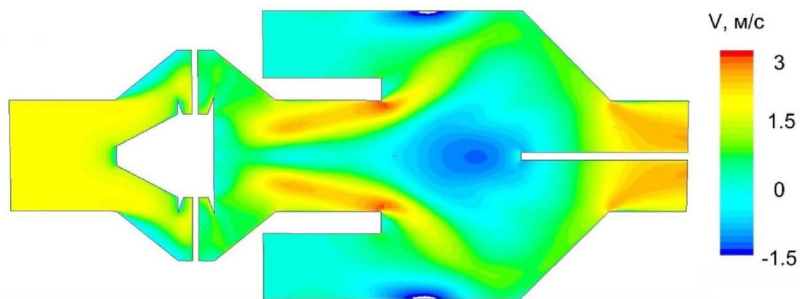


Рис. 8. Распределение осредненной осевой скорости в камере

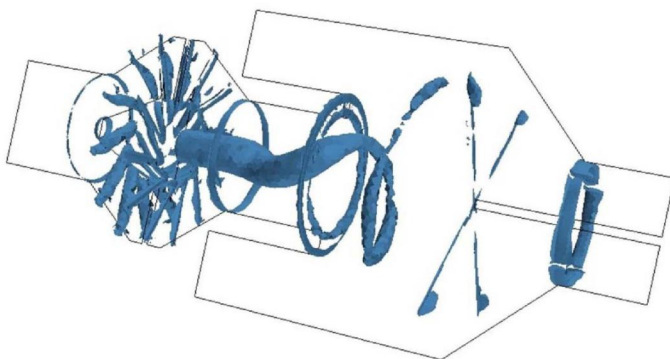


Рис. 9. Прецессирующее вихревое ядро

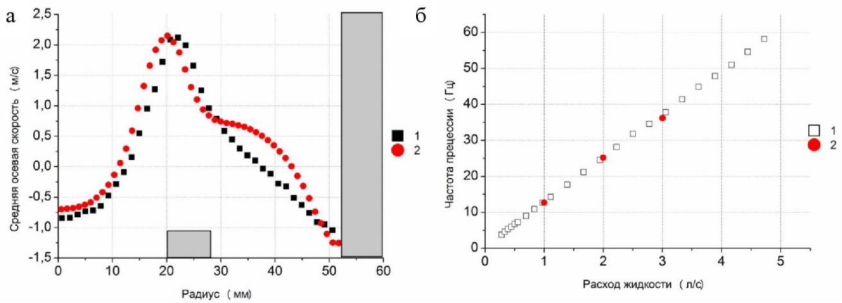


Рис. 10. Сравнение экспериментальных и расчетных данных. а – распределение осевой компоненты скорости; б – зависимость частоты прецессии от расхода. 1 – эксперимент, 2 – моделирование

ленный метод достаточно адекватно описывает исследуемое течение.

Заключение

Таким образом, в данной работе было проведено исследование нестационарного закрученного потока в осесимметричной гидродинамической камере для режимов с формированием прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ). С применением датчиков давления, методики ЛДА и численного моделирования с использованием коммерческого кода Star-CCM+ и метода отсоединенных вихрей на основе модели Спаларта-Аллмараса были получены осредненные и мгновенные характеристики течения с ПВЯ.

Обнаружено возникновение обширной зоны рециркуляции вдоль оси симметрии, а также областей обратного тока вблизи стенок камеры. Внутри сопла поток прижат к стенкам, после выхода в цилиндрическую камеру он расширяется. В результате происходит распад вихря, ведущий к образованию ПВЯ.

Измерены пульсации, генерируемые ПВЯ, и перепады давления внутри камеры. Анализ этих данных показал, что зависимость частоты прецессии от расхода жидкости имеет линейный вид, а зависимость падения давления в камере – квадратичный. При этом увеличение параметра крутки завихрителя и уменьшение диаметра сопла ведет к росту частоты прецессии и перепада давления.

Сопоставление экспериментальных и численных данных показало хорошее качественное и количественное соответствие, что подтверждает адекватность использованного численного метода.

Список литературы

1. Гунта А., Лили Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. С. 17–24.
2. Алексеевко С. В., Куйбин П. А., Окулов В. Л. Введение в теорию концентрированных вихрей: Моногр. Новосибирск, 2003. 504 с.
3. Shtork S.I., Cala C.E., Fernandes E.C. Experimental characterization of rotating flow field in a model vortex burner. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, 31: P.-779-788.
4. Paik J., Sotiropoulos F. Numerical Simulation of Strongly Swirling Turbulent Flows through an Abrupt Expansion // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2010. Vol. 31. P. 390–400.
5. Spalart P. R. Detached Eddy Simulation // *Fluid Mechanics*. 2009. Vol. 41. P. 181–202.
6. Jeong J., Hussain F. On the Identification of a Vortex // *J. Fluid Mech*. 1995. Vol. 285. P. 69–94.

A. P. Vinokurov, S. I. Shtork, S. V. Alekseenko

**STUDY OF UNSTEADY VORTICAL STRUCTURES
IN AXISYMMETRIC HYDRODYNAMIC CHAMBER**

The paper is devoted to experimental and numerical investigation of unsteady vortical processes in the isothermal model of axisymmetric vortex burner. Obtained characteristics of precessing vortex core (PVC) show the dependences of PVC's frequency on flowrate, swirl number and nozzle's diameter. Pressure drops inside the chamber also have been measured. Laser Doppler Anemometer (LDA) has been used to explore spatial distribution of mean axial velocity. Numerical simulation has been carried out by using computational fluid dynamic (CFD) program Adapco Star-CCM+. Detached Eddy Simulation approach and Spalart-Allmaras model have been used for calculating the flow. Results of comparison of experimental and numerical data have shown validity of used numerical method. Combination of experimental and mathematical modeling gives the possibility of obtaining detailed information representing comprehensive description of spatially complex unsteady flow with the PVC.

Keywords: vortex, turbulence, precessing vortex core, vortex breakdown, detached eddy simulation.