

6. Центер Б. И., Лызлов Н. Ю. Металл-водородные электрохимические системы. Теория и практика. Л.: Химия, 1989.

7. Лелеков А. Т. Управление энергетическим состоянием никель-водородных аккумуляторных батарей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: защ. 29.12.2005: утв. 18.09.2006. Красноярск, 2005.

8. Физические величины: справ. / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Брагковский и др.; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.

9. Simulink User's Guide. The MathWorks. Inc. 2009.

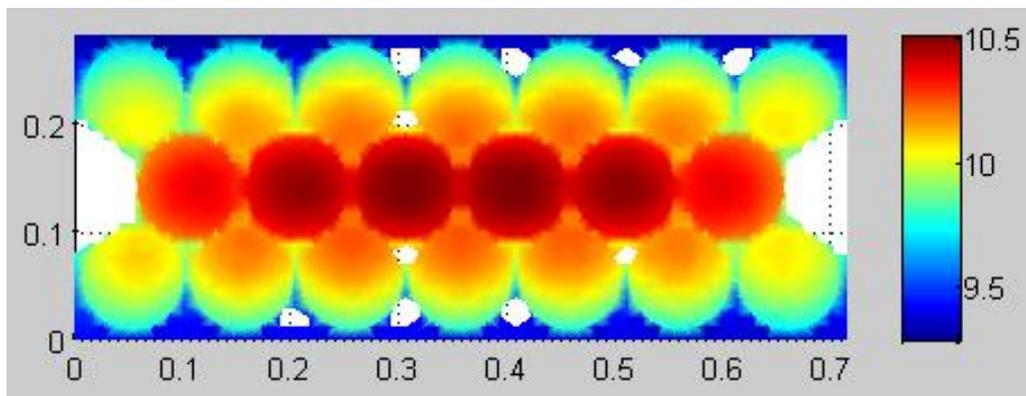


Рис. 7. Вид окна s -функции динамической визуализации

M. Y. Sahnov, A. T. Lelekov, S. A. Galochkin

DISTRIBUTED PARAMETERS ENERGY-HEAT MODEL OF SPACE NICKEL-HYDROGEN STORAGE BATTERY

Method of construction of dynamical models of Nickel-Hydrogen storage battery is described. Features of modeling connected with co-operative usage of COMSOL Multiphysics and Simulink packages are discussed. Results of calculation of the typical mode of operation of the battery, as a part of spacecraft design, are given.

Keywords: modeling, storage battery, nickel-hydrogen accumulator, spacecraft, heat transfer, distributed parameters objects, COMSOL Multiphysics, Simulink.

© Сахнов М. Ю., Лелеков А. Т., Галочкин С. А., 2010

УДК 532

С. В. Алексеенко, Д. А. Дектерев, С. И. Шторк

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕЦЕССИРУЮЩЕГО ВИХРЕВОГО ЯДРА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ*

Работа посвящена численному и экспериментальному исследованию нестационарных режимов течения в модельной вихревой камере с формированием прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ). Изучено влияние геометрических особенностей камеры на частотные характеристики ПВЯ и структуру вторичных вихрей, образующихся в выходной секции рабочего участка. Проведена оптимизация вихревой камеры для изучения ПВЯ в канонических условиях. Результаты данной работы создают основу для дальнейших исследований ПВЯ, которые будут направлены на проведение детальных измерений нестационарного поля течения с использованием современных оптических измерительных систем, таких как PIV и ЛДА.

Ключевые слова: вихревое ядро, прецессия, моделирование, частотные характеристики.

Актуальность исследования процессов вихреобразования связана с широким использованием закрученных

потоков в технических приложениях. В промышленности используются скрубберы и циклонные сепараторы для

*Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Федерального агентства по образованию и Федерального агентства по науке и инновациям.

очистки газов, гидроциклонные сепараторы для деаэрации топлива, сушильные аппараты и т. д. [1; 2]. В горелочных устройствах при помощи закрутки потока добиваются стабилизации пламени вблизи корня факела [3; 4]. При эксплуатации практических устройств с закруткой особое внимание уделяется устойчивости течения и нестационарным явлениям [5]. Одним из наиболее опасных видов неустойчивости закрученного течения является прецессия вихревого ядра (ПВЯ). ПВЯ особенно опасно при возникновении в камерах сгорания потому, что индуцированные им пульсации потока могут многократно усиливаться за счет термоакустической неустойчивости [6]. Прецессия вихревого жгута за рабочим колесом гидротурбины может служить причиной мощных вибраций гидротурбинного оборудования [7]. ПВЯ в циклонных сепараторах снижает эффективность работы сепаратора [8]. Явление ПВЯ представляет и большой научный интерес как один из режимов, реализующийся при распаде вихря – эффекта, до конца неисследованного к настоящему времени, несмотря на полувековую историю изучения [9].

Для выяснения причин и условий появления ПВЯ, полей течения, частотных и других его характеристик на базе института теплофизики им С. С. Кутателадзе СО РАН создан экспериментальный гидродинамический стенд с

модельной вихревой камерой. Камера изготовлена из прозрачного оргстекла, что позволяет эффективно визуализировать различные режимы течения с помощью стандартной аппаратуры, а также использовать современные оптические измерительные системы, такие как PIV (particle image velocimetry) и ЛДА (лазерный доплеровский анемометр). Целью работы является исследование нестационарных явлений в течении жидкости, в частности, прецессирующего вихревого ядра, образующегося в области истечения интенсивно закрученного потока из цилиндрического сопла.

Исходная геометрия камеры состояла из следующих элементов: тангенциальный вход, завихритель тангенциального типа, профилированное сопло, рабочая цилиндрическая область с увеличенным радиусом выходной части, тангенциальный выход. Геометрия такой камеры представлена на рис. 1.

Первые эксперименты показали большое влияние ориентации выхода относительно входа на структуру течения жидкости в камере. Было также обнаружено присутствие мощного вторичного вихря (рис. 2), присоединенного к задней стенке рабочей камеры, который затруднял оптический доступ к исследуемой области и, кроме того, оказывал существенное влияние на структуру

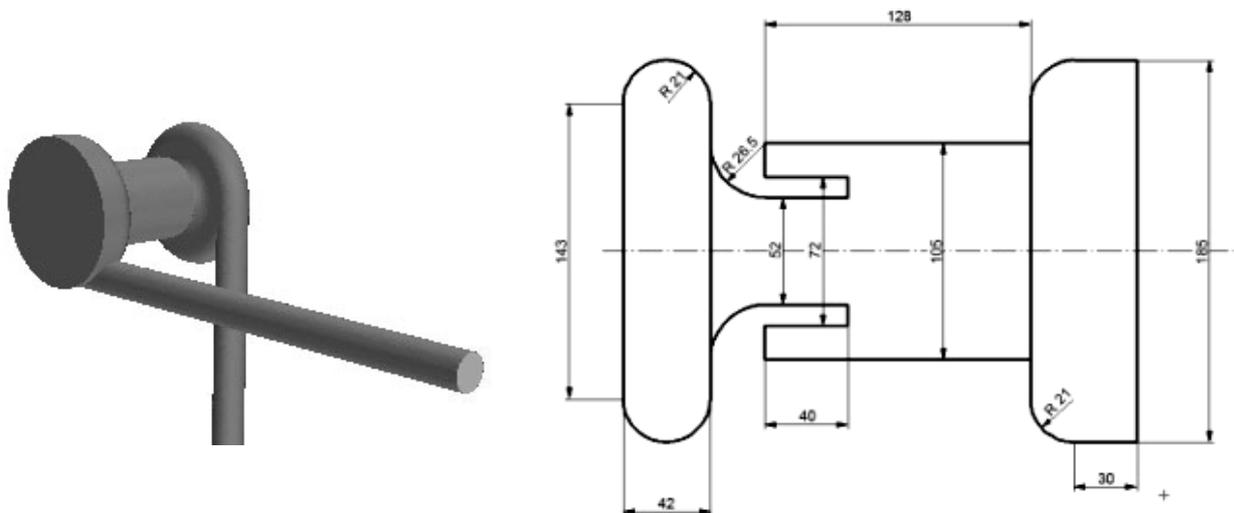


Рис. 1. Исходная геометрия камеры

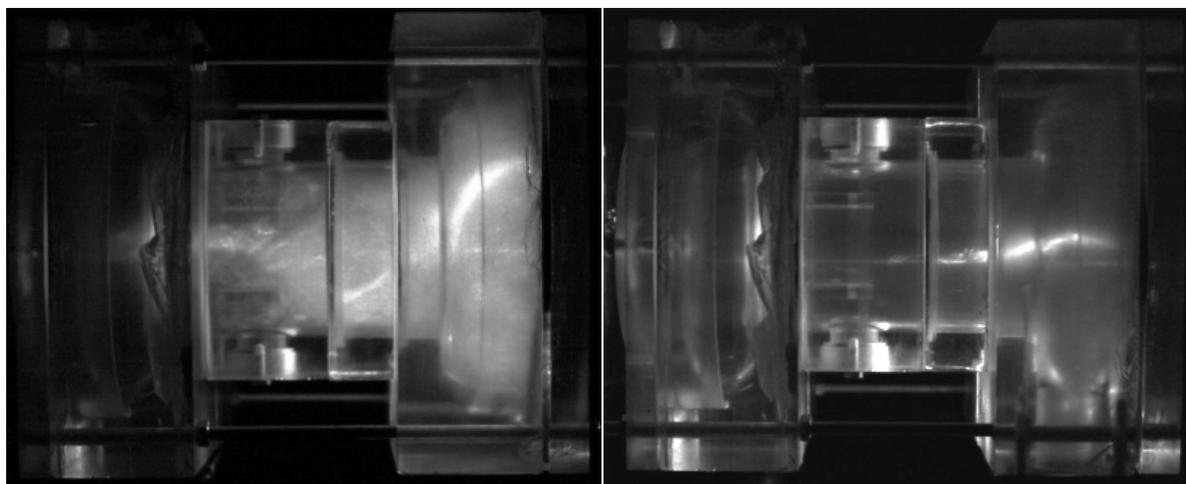


Рис. 2. Положение второстепенных вихревых жгутов в камерах с выходом, ориентированным параллельно входу (левая картинка) и перпендикулярно (правая картинка)

основного исследуемого вихря. Визуализация проводилась посредством использования лазерного ножа, скоростной камеры и пузырьков воздуха в роли трассеров.

Оптимизацию геометрии было решено проводить с предварительным численным моделированием, что позволяло сократить физические и материальные затраты. Моделирование проводилось на пакете программ STAR-CCM+. Расчеты делались на многогранной сетке с усиленной детализацией в районе наблюдения ПВЯ. Для решения стационарной задачи использована стандартная «k-ε» модель турбулентности, а при решении нестационарной задачи – метод отсоединенных вихрей DES (detached eddy simulation) и модель турбулентности Spalart-Allmaras Detached Eddy. Для аппроксимации пространственных и временных дифференциальных уравнений выбраны схемы второго порядка точности. Визуализация вихревых структур производилась при помощи критерия $\lambda_{\lambda 2}$ [10].

Результаты расчетов моделей камер с одним и двумя тангенциальными входами, четырьмя осесимметричными выходами и измененными параметрами рабочего цилиндрического объема показали, что для улучшения симметрии потока необходимо использовать камеры с двумя входами (рис. 3).

Решение нестационарной задачи выявило присутствие интенсивного центрального вторичного вихря (рис. 4). Аналогичный вихрь обнаружен и в эксперименте. Также было отмечено сильное влияние вторичного вихря на первичный. Это приводило к неустойчивости основного вихря и разбиению его на пару жгутов.

Для борьбы с вторичным вихрем была реализована система лопаток, гасящих закрутку потока в районе выходных отверстий. Геометрия и расчетная сетка камеры с лопатками изображена на рис. 5.

Численные расчеты подтвердили отсутствие центрального вихря в камере с лопатками, однако пара слабовыраженных вторичных вихревых структур продолжала формироваться за краем сопла. В эксперименте наблюдалась аналогичная картина течения. Визуализация этих структур приведена на рис. 6 (расчетные данные представлены для двух различных показателей $\lambda_{\lambda 2}$, соответствующих различным интенсивностям вихрей).

Для выяснения причины образования вторичных вихрей, а также изучения их влияния на частоту ПВЯ были проведены следующие модификации экспериментальной рабочей камеры: добавление крестовины, полностью разделяющей поток в районе выхода на четыре сектора, увеличение длины рабочей области, изменение профиля сопла (без изменения диаметра), изменение диаметра сопла. При варьировании данных параметров, были получены частотные характеристики и данные визуализации для ряда геометрий. В результате было выявлено, что добавление крестовины не влияет на картину течения, а удлинение камеры приводит к увеличению интенсивности вторичных вихревых структур, в результате чего пара вышеупомянутых вихрей сливалась в один вихревой жгут, имеющий выраженную частоту прецессии, много меньшую частоты первичного вихря (рис. 7). Также для определения влияния входных условий на структуру течения было проведено численное моделирование камеры с четырьмя входами,

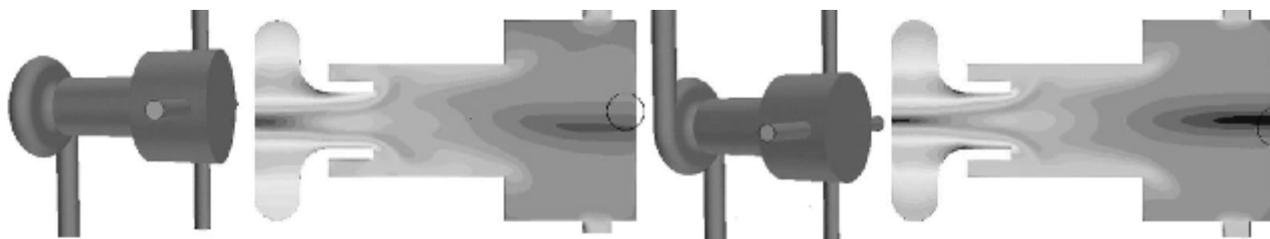


Рис. 3. Отображение магнитуд скоростей при решении стационарной задачи для соответствующих геометрий камеры

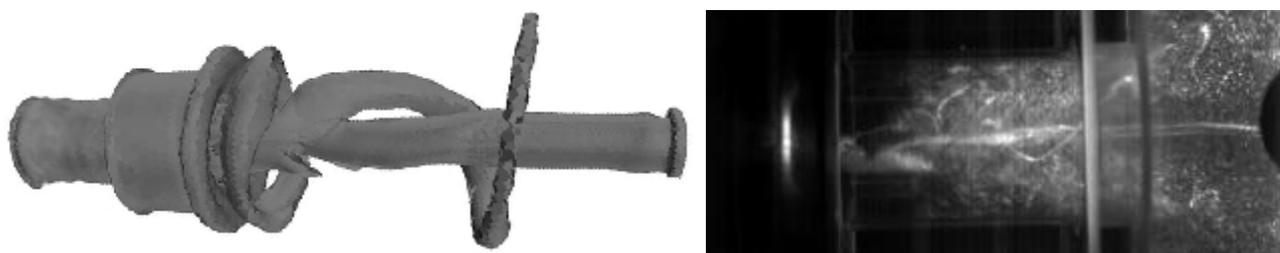


Рис. 4. Визуализация вторичного вихря (расчет и эксперимент)



Рис. 5. Расчетная сетка и геометрия камеры с тормозящими лопатками

при этом общая площадь входов оставалась неизменной, относительно камеры с двумя входами, что приводило к сохранению параметра крутки. Результаты не дали какого-либо качественного изменения картины, поэтому экспериментально этот вариант не рассматривался.

Для различных модификаций камеры с одним диаметром сопла были построены зависимости частот ПВЯ от расхода воды. Частоты для пяти модификаций не имеют значительных отличий (рис. 8). Это говорит о том, что имеющиеся вторичные вихри не приводят к значительному изменению частотных характеристик основного ПВЯ.

Частота прецессии вихря и число Струхалия, полученные в расчете, довольно неплохо совпадают с экспериментальными данными, это видно из графиков зависимости частоты прецессии от расхода и числа Струхалия от числа Рейнольдса (рис. 9). Это говорит об адекватности моделей, выбранных для решения поставленной задачи.

Таким образом, численные расчеты и экспериментальные наблюдения были использованы для изучения влияния геометрических граничных условий на нестационарные режимы течения в модельной вихревой камере. В частности, выяснено, что тангенциальный завихритель с одним входом генерирует существенно несимметричное среднее по времени поле течения в сопле вихревой камеры. Применение двойного входа обеспечивает практически осесимметричное осредненное по времени поле скоростей. Четыре входа дают близкую картину течения той, что наблюдалась для двойного входа.

Расчеты и эксперименты показали, что прецессия основного вихревого ядра при истечении закрученного потока из сопла вихревой камеры сопровождается образованием вторичных вихревых структур в выходной части камеры. Структура вторичных вихрей существенно зависит от конструкции выходной секции камеры. При использовании развихрителя с односторонним тангенциальным выходом или секции с четырехсторонним радиальным выходом наблюдался выраженный центральный вихревой жгут. Мощный вторичный жгут удалось разрушить использованием лопаток, ориентированных радиально в выходной секции вихревой камеры. При этом происходило образование пары более слабо выраженных вторичных вихрей. Предполагается, что эти вторичные вихри оказывают достаточно слабое влияние на характеристики основного ПВЯ. Это, в частности, было подтверждено измерениями частоты прецессии ПВЯ.

В результате проведенных исследований можно с одной стороны сделать вывод об адекватности примененных методов математического моделирования для расчета пространственно сложного нестационарного течения с образованием крупномасштабных когерентных структур. Исследования также позволили провести выбор оптимальной геометрии модельной вихревой камеры, в которой созданы канонические условия для генерации ПВЯ. Дальнейшие исследования будут направлены на проведение детальных измерений нестационарного поля течения с использованием современных оптических измерительных систем, таких как PIV и ЛДА.

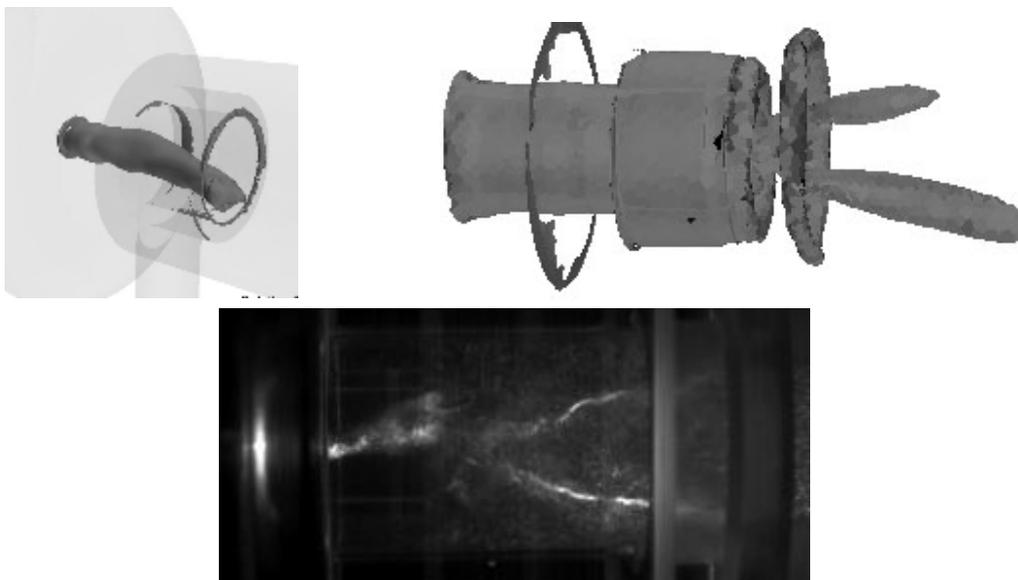


Рис. 6. Визуализация первичной и вторичных вихревых структур (расчет и эксперимент)

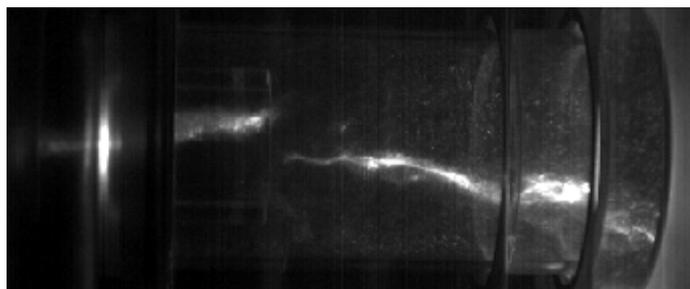


Рис. 7. Изменение структуры вторичного вихря при удлинении камеры

Библиографические ссылки

1. Гупта А., Лили Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987.
2. Алексеенко С. В., Куйбин П. А., Окулов В. Л. Введение в теорию концентрированных вихрей: монография. М., 2003. С. 420–424.
3. Swirl flow structure and flame characteristics in a model lean premixed combustor / P. M. Anacleto [et al.] // Combust. Sc. Technol. 2003. Vol. 175. № 8. P. 1369–1388.
4. Shtork S. I., Vieira N. F., Fernandes E. C. On the identification of helical instabilities in a reacting swirling flow // Fuel. 2008. Vol. 87 (10–11). P. 2314–2321.
5. Алексеенко С. В., Окулов В. Л. Закрученные потоки в технических приложениях (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 1996. Т. 3. № 2. С. 101–138.
6. Syred N. A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems // Prog. Energy Combust. Sc. 2006. Vol. 32 (2). P. 93–161.
7. Experimental study and numerical simulation of the FLINDT draft tube rotating vortex / G. D. Ciocan [et al.] // J. Fluids Eng. 2007. Vol. 129. P. 146–158.
8. Derksen J., Van den Akker H. E. A. Simulation of vortex core precession in a reverse-flow cyclone // AIChEJ. 2000. № 46(7). P. 1317–1331.
9. Lucca-Negro O., O’Doherty T. Vortex breakdown: a review // Prog. Energy Combust. Sc. 2001. № 27. P. 431–481.
10. Jeong J., Hussain F. On the identification of a vortex // J. Fluid Mech. 1995. № 285. P. 69–94.

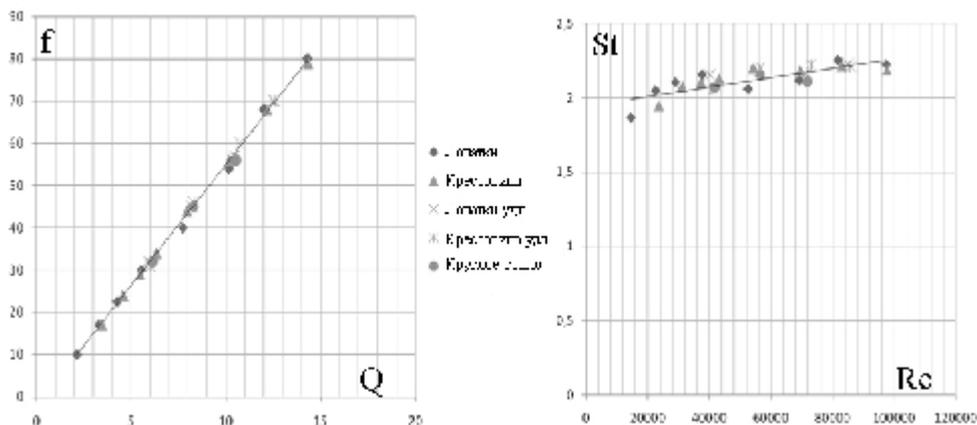


Рис. 8. Графики зависимостей частоты прецессии от расхода и числа Струхала от числа Рейнольдса

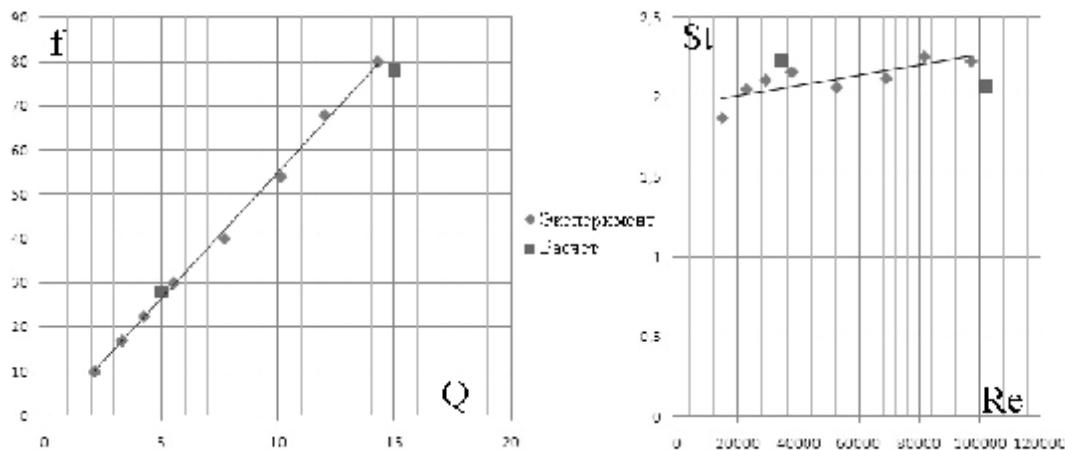


Рис. 9. Сравнение экспериментальных и численных результатов

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

STUDY OF PRECESSING VORTEX CORE IN A CYLINDRICAL CHAMBER

The work is devoted to numerical and experimental study of unsteady flow in a model vortex chamber with formation of precessing vortex core (PVC). Influence of the vortex chamber geometry on vortex precession frequency and structure of secondary vortices generated in exit section of the chamber has been revealed. Optimization of the vortex chamber geometry for the PVC study in canonical conditions has been carried out. The results obtained will be a base for further studies of PVC which will be targeted on detailed measurements of unsteady flowfield making use of modern measurement systems such as LDA and PIV.

Keywords: vortex core, precession, modeling, frequency, characteristics.