



Аникин Юрий Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА В КУБИЧЕСКОМ
КОНТЕЙНЕРЕ ДОПЛЕРОВСКИМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ
АНЕМОМЕТРОМ ДЛЯ ЖИДКОСТЕЙ С ПЛОХОЙ ОПТИЧЕСКОЙ
РАЗРЕШИМОСТЬЮ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Институте теплофизики им. С.С.Кутателадзе Сибирского отделения Российской Академии Наук.

Научные руководители – доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
Меледин Владимир Генриевич.

доктор физико-математических наук,
доцент,
Окулов Валерий Леонидович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор,
Соболев Виктор Сергеевич

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Евсеев Алексей Романович

Ведущая организация – Федеральное государственное унитарное
предприятие
"Всероссийский научно-исследовательский
институт метрологии им. Д.И. Менделеева"

Защита состоится «13» мая 2011 г. в 9:30 час. на заседании диссертационного совета Д003.035.02 в Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН по адресу: 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТПМ им. С. А. Христиановича СО РАН.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим выслать по адресу: Ученому секретарю диссертационного совета Д003.035.02, ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1. Вопросы автору направляйте по адресу yury.anikin@gmail.com.

Автореферат разослан «11» апреля 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

 д.т.н. И.М. Засыпкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Интенсивное использование установок с закрученными потоками в промышленности – вихревых смесителей, сепараторов, адсорберов, энергоразделителей, вакуум-насосов и эжекторов, камер сгорания, гидро- и газотурбин и пр. - обусловлено возможностью создания во вращающихся потоках поля центробежных сил, существенно превышающих гравитационные силы, и увеличением траекторий движения частиц. Однако в настоящее время разностороннее применение закрученных потоков и вихревых технологий опережает процесс их детального исследования. В результате имеется много высокоэффективных единичных циклонно-вихревых установок, но их широкое распространение сдерживается отсутствием научно обоснованных рекомендаций для перехода на другую производительность и режимы работы. Исследователи соглашались, что проблема связана, главным образом, с потерей устойчивости осесимметричных закрученных потоков и возникновением в них разного рода сложных трехмерных вихревых структур, существенно влияющих на все процессы в вихревых аппаратах.

Желание интенсифицировать процессы в вихревых аппаратах приводит к необходимости существенного увеличения закрутки потока. Потокам с сильной закруткой свойственна потеря устойчивости, что выражается в распаде осесимметричного вихревого ядра и возникновении после зоны распада нескольких типов возмущенного движения (одиночные или двойные неподвижные либо прецессирующие винтообразные вихри). Согласно данным J.H. Falger и S. Leibovich (1977), местоположение распада вихря и сама возможность его появления определяются значениями числа Рейнольдса и параметром закрутки. В 1984 году A.K. Gupta, D.G. Lilley и N. Syred провели параллель между классическими экспериментами по наблюдению распада вихревого ядра в закрученном потоке в трубе и процессами, происходящими в вихревых аппаратах. Авторы сделали выводы: а) увеличение закрутки потока приводит к более раннему возникновению распада, т.е. расширяет границы неустойчивой работы вихревых камер; б) без изучения границ распада для конкретной геометрии вихревых аппаратов невозможен правильный переход от высокоэффективных лабораторных установок к крупномасштабным промышленным аппаратам и прогнозирование их работы на переходных режимах.

Таким образом, главной задачей в области применения вихревых технологий на современном этапе является изучение устойчивости закрученных потоков. Согласно мнению A.K. Gupta с соавторами, в вихревых аппаратах важно обеспечить такие условия, чтобы при данном параметре закрутки число Рейнольдса всегда находилось вне пределов диапазона, отвечающего стадии распада вихря. Если режим работы соответствует зоне после распада, то реализуются потоки либо с вращающимся, либо с неподвижным вихрем, обычно имеющим винтовую форму. На современном этапе исследований стало ясно, что при возникновении неустойчивости основную роль играют прецессирующие трехмерные вихревые

структуры винтовой формы. Поскольку процесс образования вихрей зависит от конструкции вихревого аппарата, то для каждой конструкции вихревого аппарата необходимо комплексное исследование его работы с составлением карты рабочих режимов. Карта режимов должна не только содержать границы зон возникновения распада, но и отражать границы устойчивого существования стационарных винтообразных вихревых структур при больших крутках за распадом, где предполагается эксплуатировать аппарат.

В вихревых аппаратах первое наблюдение винтообразного вихря связано с его самоиндуцированным вращением. Были обнаружены интенсивные низкочастотные окружные пульсации потока, которые назвали прецессией вихревого ядра. То, что прецессия вызывается вращением винтового вихря (жгута), по-видимому, впервые было показано при изучении закрученных потоков в отсасывающих трубах гидротурбин. Одно из первых наиболее полных описаний прецессирующего вихря с воспроизведением его винтовой структуры сделал R.C. Chanaud (1965). Изучению прецессии вихревого ядра в вихревой камере с удлиненным рабочим участком методами лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) посвящен цикл работ R.F. Guarga с соавторами (1985). Они также измеряли частоту пульсаций давления на стенке (частоту прецессии) и одновременно визуализировали трехмерную структуру вращающегося винтового вихря, порождающего эти пульсации. Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И., (1987) успешно визуализировали закрученный поток, как прецессирующий, так и с подавленной прецессией (с неподвижным винтовым вихрем).

Интенсивные пульсации давления, связанные с прецессией вихревого жгута, являются причиной износа установок и ухудшения рабочих характеристик вихревых аппаратов. Поэтому для повышения эффективности и надежности работы установок необходимо научиться правильно диагностировать нестационарные явления, возникающие в их рабочих участках. Подобная физическая задача решалась, в основном, двумя способами – визуальным наблюдением за потоком и измерением пульсаций давления на стенках. Количественное исследование потока контактными методами (термоанемометрия и др.) невозможно потому, что распадающийся вихрь очень чувствителен к внешним возмущениям, и введение датчика вызывает распад вихря. С развитием методов ЛДА, лазерной доплеровской полупроводниковой анемометрии (Laser Dopler Semiconductor Anemometry, LDSA), и лазерной анемометрии по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry, PIV) появились работы с количественными данными о потоке в процессе распада вихря. При этом все исследования производились с использованием лабораторных простейших моделей с чистыми средами и хорошими оптическими свойствами. Для реальных технологических рабочих сред, как правило, обладающих плохой оптической разрешимостью, проводились только качественные визуальные наблюдения и, в основном, высказывались предположения на основе косвенных данных.

Применение методов лазерной доплеровской анемометрии для более строгого изучения структуры закрученных потоков в большинстве реальных вихревых аппаратов было осложнено многофазностью потоков и плохой оптической разрешимостью среды. Плохая оптическая разрешимость обусловлена

одновременным действием механизмов поглощения и многократного светорассеяния на неоднородных включениях, примесях, инородных частицах и пузырьках, имеющих широкий спектр размеров – от нанометров до миллиметров, различные оптические характеристики. Большинство методов, разработанных ранее в доплеровской анемометрии, в явной либо неявной форме используют модель одночастичного доплеровского сигнала от калиброванных частиц. Это требует от светорассеивающих частиц, взвешенных в потоке, характеристик, близких к идеальным (абсолютная сферичность, монодисперсность, зеркальная поверхность и т.д.). Такие светорассеивающие частицы производятся зарубежными компаниями и стоят достаточно дорого. Засеивание ими больших технологических объемов воды (сотни тонн) в натуральных экспериментах весьма проблематично. Использование естественных светорассеивателей (частички ржавчины, грязи и т.п.) в мутных многофазных средах с плохой оптической разрешимостью делает одночастичную модель и применение основанных на ней методов анемометрии в целом малоэффективными, особенно при диагностике сложных пульсирующих градиентных закрученных потоков.

Данная работа, посвященная исследованию закрученного потока в кубическом контейнере с проведенной автором адаптацией использования доплеровского полупроводникового анемометра для жидкостей с плохой оптической разрешимостью и использованием натуральных светорассеивателей, актуальна и представляет несомненный научный и практический интерес.

Цель работы

Целью работы является определение критических чисел Рейнольдса, при которых происходит переход к нестационарным режимам закрученного течения в кубическом контейнере, а также исследование пульсационных характеристик потока с целью сопоставления течений в кубическом и цилиндрическом контейнерах.

В данном исследовании необходимо провести физическое моделирование важных особенностей течений, возникающих в реальных вихревых аппаратах и связанных с неосесимметричностью формы их рабочих участков и наличием углов, а также исследовать особенности сигналов, вызванных плохой оптической разрешимостью рабочей жидкостной среды в присутствии естественных светорассеивателей случайной формы.

Для достижения указанной цели необходимо разработать методы обработки сигналов лазерного доплеровского анемометра, которые позволят существенно расширить класс задач, решаемых лазерными доплеровскими анемометрами. Необходимо развить новые методы обработки доплеровских сигналов с низким соотношением сигнал/шум. Методы должны быть адаптированы к сигналам, на свойства которых влияет использование полупроводникового лазера в оптической схеме лазерного доплеровского анемометра, при измерениях в мутных средах и использовании естественных светорассеивателей. Результаты должны способствовать дальнейшему развитию более надежных и дешевых LDSA и позволить использовать LDSA в натуральных экспериментах с условиями, далекими от лабораторных.

Научная новизна

1. Впервые экспериментально исследовано возникновение и рост нестационарных возмущений в кубическом контейнере с вращающейся верхней крышкой с использованием лазерной доплеровской измерительной системы на полупроводниковом лазере, произведено сопоставление чисел Рейнольдса, при которых возникают и развиваются нестационарные явления в закрученных потоках с разными формами рабочих участков (цилиндрическим и кубическим).
2. Выполнены исследования спектральных характеристик закрученного потока в кубическом контейнере для чисел Рейнольдса в диапазоне от 1000 до 2400.
3. Для обработки сигналов LDSA от естественных светорассеивателей в средах с плохой оптической разрешимостью предложено применение многочастичной модели сигнала и метода определения доплеровской частоты путем вычисления спектрального «центра масс», отличающегося введением дополнительных параметров доплеровского процессора: частоты дискретизации, уровня порога фильтрации спектрального шума, ширины спектрального окна и их автоматической адаптивной подстройкой.
4. Предложена функциональная схема LDSA, позволяющая автоматизировать адаптивную обработку сигнала и процесс проведения эксперимента.

Достоверность

Достоверность полученных в работе результатов подтверждена результатами испытаний, анализом погрешностей, сопоставлением экспериментальных результатов, полученных различными методами измерений, в том числе другими авторами. Предложенные методы, созданные на их основе действующие алгоритмы и программные модули прошли прямые испытания и экспериментальные проверки.

Практическая ценность работы

Полученные в диссертации результаты по сопоставлению роста пульсаций закрученного потока в цилиндрическом и кубическом контейнерах имеют принципиальное значение для развития вихревых технологий – вихревого горения, описания процессов в вихревых биохимических реакторах и других, в которых на процессы тепломассопереноса существенно влияют нестационарность потока и явление прецессии вихревого ядра.

Кроме того, для достижения данного результата были разработаны и реализованы алгоритмы и программные компоненты для обработки сигналов лазерных доплеровских измерительных систем, использованные в измерительных системах серий «ЛАД-03», «ЛАД-05», «ЛАД-056 ЛМЗ». Эти измерительные системы успешно используются в научных исследованиях для определения структуры течений и кинематических характеристик нестационарных многофазных потоков конденсированных сред в Институте гидродинамики СО РАН, в лабораториях Института теплофизики СО РАН, на большом кавитационном стенде ОАО "Силовые машины", г. Санкт-Петербург, в Самарском, Томском, Новосибирском и Пермском университетах. Результаты работы расширяют функциональность и область применения лазерных доплеровских измерительных

систем для определения скорости частиц в оптически плотных многофазных средах на натуральных светорассеивателях. Новые экспериментальные результаты, полученные с помощью лазерной доплеровской измерительной системы «ЛАД-05 ЛМЗ», используются для улучшения технических характеристик гидротурбин. Измерительная система «ЛАД-015» используется в составе Государственного эталона скорости воздушного потока России во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии им. Менделеева, г. Санкт-Петербург.

На защиту выносятся

1. Результаты исследования пульсирующих закрученных течений в кубическом контейнере с вращающейся верхней крышкой, полученные с помощью разработанного LDSA. Исследованы радиальная и осевая скорости потока в точке $h=H/4$, $r=R/2$. Установлено, что при $Re = 1400$ поток начинает испытывать гармонические пульсации скорости, сначала одномодовые, затем двух- и трехмодовые. При $Re > 2300$ отдельные моды не выделяются, а поток становится существенно нестационарным.
2. Сопоставление уровня пульсаций в вихревых устройствах с рабочими участками кубической и цилиндрической формы. Выявлено, что пульсации в кубическом контейнере возникают существенно раньше ($Re = 1400$), чем в цилиндрическом ($Re = 2500$), а амплитуда пульсаций при $Re = 1400 \div 2300$ растет линейно с числом Рейнольдса.
3. Модифицированный метод и устройство определения доплеровской частоты, основанные на вычислении спектрального «центра масс», отличающиеся автоматической адаптивной подстройкой параметров (частоты дискретизации, уровня порога спектрального шума, ширины спектрального окна). Метод снижает погрешность определения доплеровской частоты и скорости естественных светорассеивателей в 1.5 – 3 раза для соотношения сигнал/шум 0-15 дБ.
4. Программная реализация параметризованного адаптивного метода обработки сигнала в измерительной системе LDSA, предназначенной для исследования сложных пульсирующих течений с плохой оптической разрешимостью.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы прошли апробацию на VII, VIII, IX и X Всероссийской конференции молодых ученых "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики" (Новосибирск, 2002, 2004, 2006, 2008), VII, VIII и IX Международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2003, 2005, 2007), II, III, V, VII, IX Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (Санкт-Петербург, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010), IV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь - 2007» (Барнаул 2007), Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации.» (Новосибирск, 2008), а также на различных научных семинарах и совещаниях.

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в адаптации моделей сигналов LDSA, разработке методов обработки таких сигналов, реализации методов в виде алгоритмов программного обеспечения (ПО) измерительного комплекса. Эксперименты по исследованию пульсационных характеристик в кубическом контейнере, обработка и анализ его результатов выполнены автором при участии сотрудников научного коллектива.

Реализация конкретных измерительных систем с использованием созданных алгоритмов и программных модулей обработки сигнала выполнялись сотрудниками научного коллектива при непосредственном участии автора. Представление изложенных в диссертации и выносимых на защиту результатов, полученных в совместных исследованиях, согласовано с соавторами.

Публикации

Во время работы над диссертацией соискателем лично и в соавторстве опубликовано 54 печатных работы, из них по материалам диссертационной работы 30, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, получен один патент на изобретение РФ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 разделов, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 143 страницы, включая 62 иллюстрации и 202 наименования цитируемой литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел содержит обзор литературы, посвященной изучению закрученных потоков. Проанализированы работы по использованию закрученных потоков в практических приложениях и показана актуальность и необходимость их лабораторного моделирования. Анализ работ по изучению закрученных потоков в лабораторных условиях был ограничен результатами изучения особенностей потоков в объемах цилиндрической и прямоугольной формы. Это делалось с целью выявления специфики перехода от канонических цилиндрических форм рабочих участков к упрощенным конструктивным формам натуральных объектов с прямоугольными сечениями.

При идентичных параметрах (числе Рейнольдса и отношении высоты контейнера к радиусу диска) наблюдаются существенные различия приосевой структуры потока в цилиндрическом и кубическом контейнерах. В кубическом контейнере при низких числах Рейнольдса отсутствуют стационарный режим течения и пузыревидный осесимметричный распад приосевой вихревой структуры.

Проведен обзор методов диагностирования закрученных потоков и возникающих проблем. Выполнен анализ источников погрешностей, влияющих на формирование доплеровского сигнала.

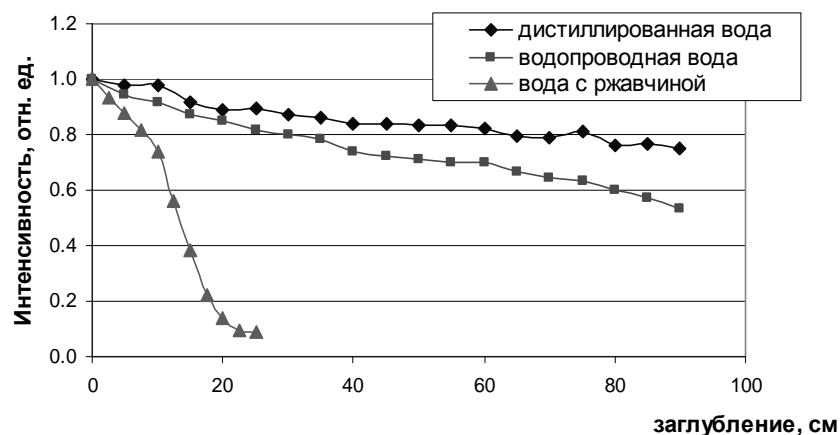


Рис. 1. График оптической проницаемости (интенсивности на фотоприемнике в зависимости от заглубления) воды различного качества для полупроводникового лазера с длиной волны 650 нм.

Показано, что использование естественных светорассеивателей имеет критическое влияние на доплеровский сигнал и методы обработки такого сигнала (рис. 1). Натуральные частицы имеют сложную форму, значительно отличающуюся от формы специальных сфер (рис. 2). Сигнал становится сложным, появляется фазовый шум, резко снижается общее соотношение сигнал/шум.

Отдельное внимание уделено обзору методов обработки доплеровских сигналов полупроводниковых анемометров и сильно зашумленных сигналов. На основе проведенного анализа сформулированы требования к создаваемым методам обработки доплеровского сигнала.

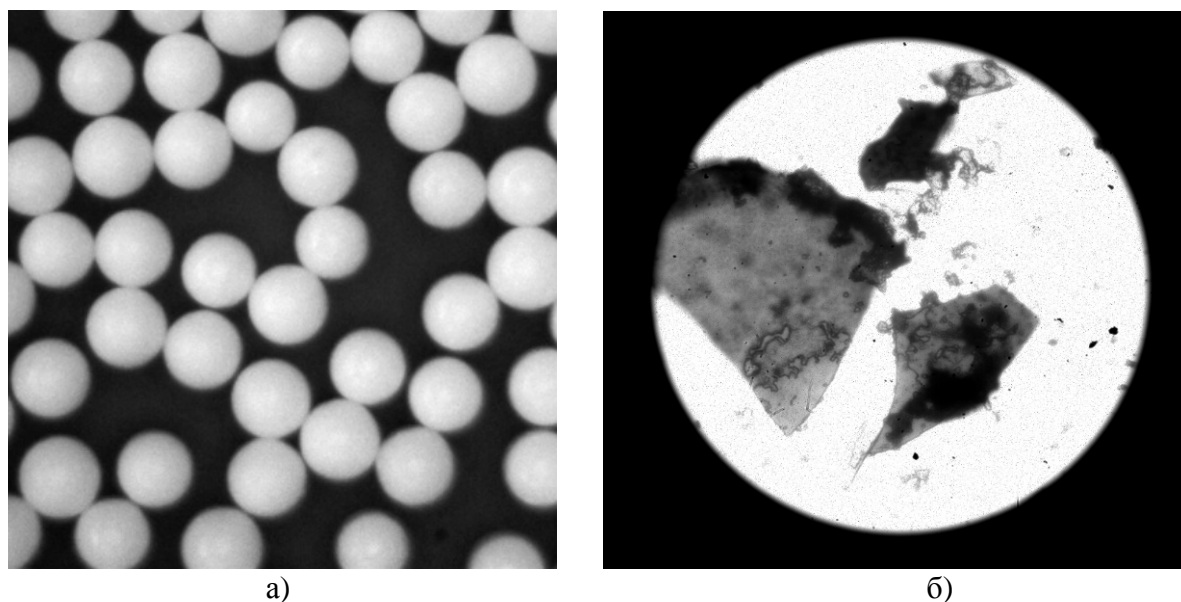


Рис. 2. Изображение специальных светорассеивателей (а - полиэтиленовые микросферы диаметром 10 мкм) и случайных светорассеивателей (б - ржавчина, размер 100 мкм).

Для применения LDSA в натуральных экспериментах с естественными рассеивателями в средах с плохой оптической разрешимостью необходимо развитие методов обработки сигналов LDSA с низким отношением сигнал/шум (до 15 дБ).

Второй раздел посвящен методам обработки сигналов LDSA. Показано, что сигнал LDSA от случайных светорассеивателей не вполне соответствует общепринятой одночастичной модели доплеровского сигнала.

Для моделирования сигналов от частиц со случайной формой и несколькими участками поверхности, формирующих оптический отклик, предложено использовать параметрическую многочастичную модель.

Аналитическая модель многочастичного сигнала выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} p_i = \sum_{k=1}^N A_{Pk} \cdot \exp\left[-\left(\frac{pf_{Dk}}{n_l}\right)^2 (t_i - T_k)^2\right] \\ s_i = \sum_{k=1}^N A_{Sk} \cdot \exp\left[-\left(\frac{pf_{Dk}}{n_l}\right)^2 (t_i - T_k)^2\right] \cdot \sin\left[2pf_{Dk}(t_i - T_k)\right] + \max(A_{Sk}) / SNR \cdot noise_i \\ c_i = \sum_{k=1}^N A_{Sk} \cdot \exp\left[-\left(\frac{pf_{Dk}}{n_l}\right)^2 (t_i - T_k)^2\right] \cdot \cos\left[2pf_{Dk}(t_i - T_k)\right] + \max(A_{Sk}) / SNR \cdot H(noise_i) \end{cases} \quad (1)$$

где p_i – пьедестал (низкочастотная составляющая) доплеровского сигнала, s_i и c_i – синусоидальная и косинусоидальная компоненты; t_i – отсчеты времени; N – количество частиц во вспышке, принимает случайное целое значение от 1 до 4; n_l – количество интерференционных полос в измерительном объеме по уровню $1/e$, k – индекс частицы, f_{Dk} , T_k – доплеровская частота и время прохождения k -ой частицы; A_{Pk} , A_{Sk} – амплитуды пьедестала и синусоидальной компоненты k -ой частицы, $noise_k$ – случайные функции с равномерным распределением и СКО, равным 1 (белый шум), H – преобразование Гильберта.

Согласно модели, каждая частица во вспышке может иметь собственную доплеровскую частоту – этим моделируется возможное вращение частицы, отклонение частоты частиц от средней заданной задается не больше, чем 5-10%. Соотношением A_{Sk} / A_{Pk} моделируется контрастность каждой частицы. Соотношение сигнал/шум рассчитывается для максимальной среди всех частиц амплитуды синусоидальной компоненты. Принимается, что шум пьедестала мал, поскольку аналоговый тракт пьедестала содержит низкочастотный фильтр. Сигнал пьедестала служит только для детектирования частиц в измерительном объеме и не участвует в дальнейших вычислениях доплеровской скорости.

Показывается, что реальный и модельный сигналы подобны во временном и спектральном представлении. Это означает, что модель содержит необходимый набор параметров, диапазон значений этих параметров соответствует реальным значениям наблюдаемого сигнала. Учтены все источники влияния на сигнал LDSA. На рис. 3 отображены сигналы, полученные при помощи предложенной модели.

Проведен анализ соответствия модели реально наблюдаемому сигналу, сделан вывод об адекватности используемой модели.

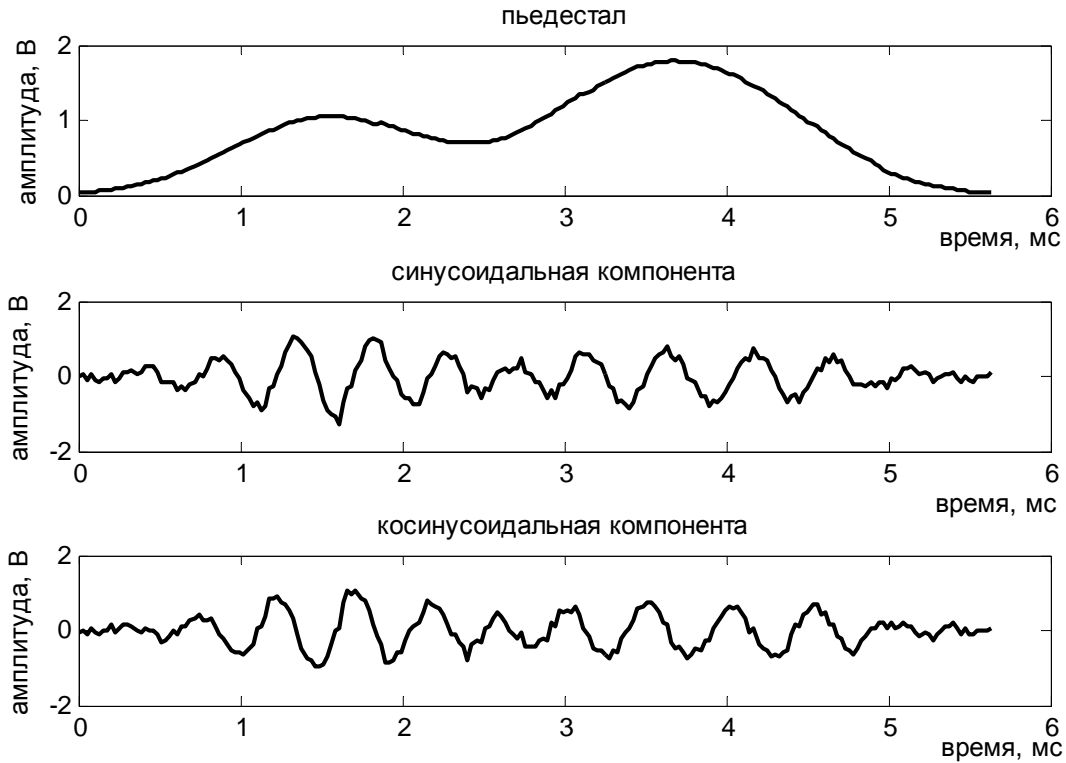


Рис. 3. Сигнал, полученный при помощи предложенной модели многочастичной вспышки. Для данного сигнала количество частиц равно 3, SNR=20 дБ.

Показаны границы применимости и достижимые точности существующих методов обработки сигнала ЛДА. Предложено использование метода определения доплеровской частоты многочастичного доплеровского сигнала путем вычисления «центра масс» спектра. Метод использует спектральное представление сигнала, рассчитанное при помощи алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Сначала выявляется частота с максимальной спектральной мощностью F_{max} , затем рассчитывается величина окна спектральной фильтрации N_F вокруг частоты F_{max} , рассчитывается «центр масс» площади фигуры, ограниченной спектральной функцией, границами окна и порогом (рис. 4).

$$F_D = \frac{\sum_{i=L}^R S(f_i) \cdot f}{\sum_{i=L}^R S(f_i)}, \quad S(f_i) > A_{thr}, \quad (2)$$

$$L, R = F_{max} \pm N_F / 2, \quad N_F = 6p \frac{L_{sp}}{N_T}, \quad (3)$$

где A_{thr} – уровень порога, выше которого считается "центр масс", L и R – индексы правой и левой границы окна, F_{max} – частота с максимальной мощностью в спектре, N_F – ширина спектрального окна в дискретах спектра, L_{sp} – длина спектра в дискретах, N_T – длина вспышки в отсчетах.

Порог выбирается таким образом, чтобы максимально захватить спектральный пик, относящийся к сигналу, но не захватить пики, порожденные шумами. Определяя динамически соотношение сигнал/шум и используя эту информацию для

установки порога, можно уменьшить погрешность метода на 0.5% – 1%. Если соотношение сигнал/шум равномерно распределено в диапазоне 0-20 дБ, то оптимальное значение порога составляет величину 0.3.

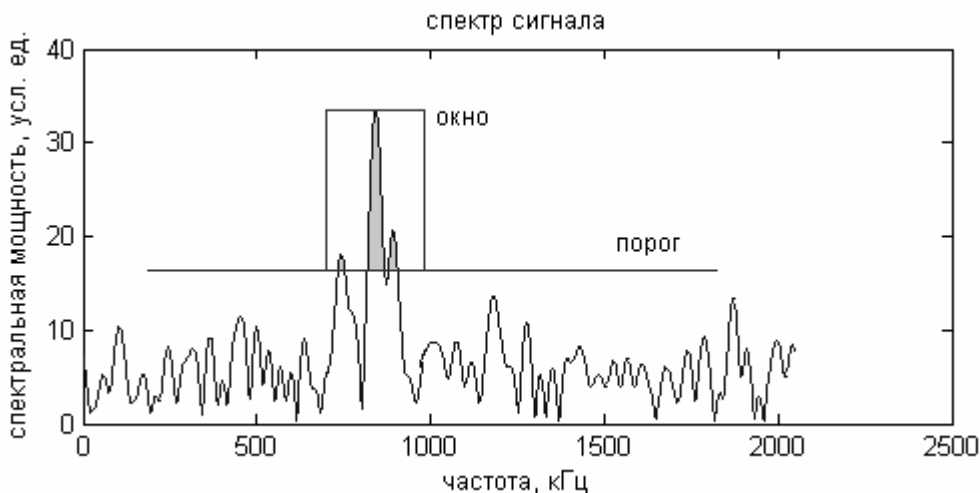


Рис. 4. Определение центра масс спектрального пика доплеровского сигнала с окном и порогом.

Показано, что развитие данного метода, а именно введение параметров порога фильтрации спектрального шума и ширины спектрального окна, и автоматическая адаптивная подстройка этих параметров и частоты дискретизации, уменьшает погрешность определения частоты 1.5 – 3 раза в случае многочастичного сигнала и в области низких значений отношения сигнал/шум, от 0 до 15 дБ (рис. 5). Метод особенно применим к сигналам LDSA для мутных сред со случайными светорассеивателями.

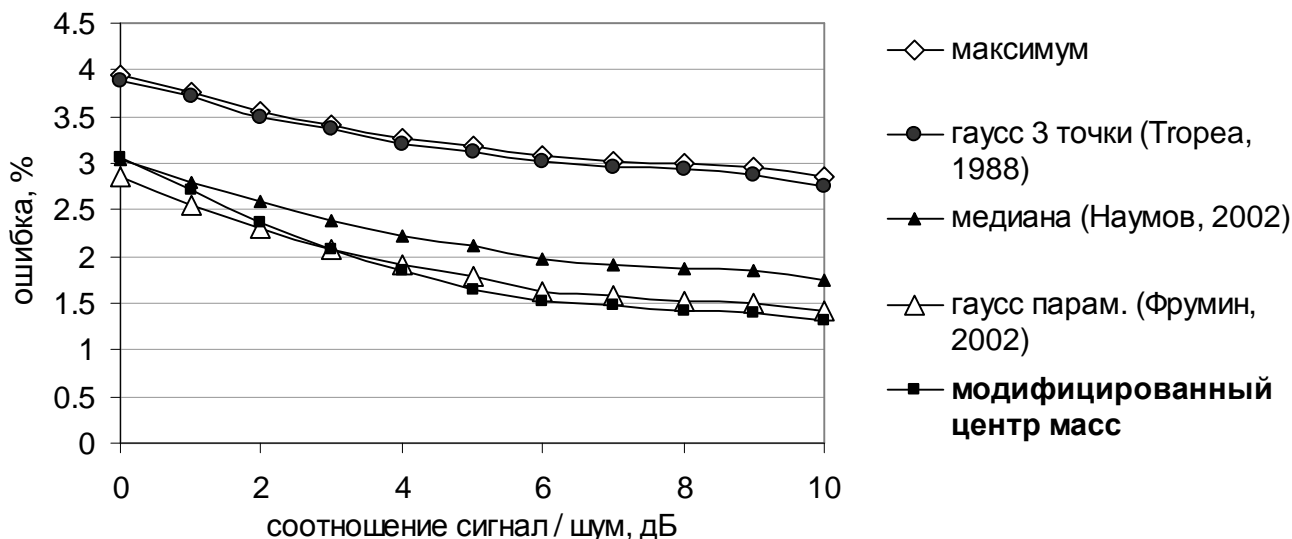


Рис. 5. Сравнение методов определения доплеровской частоты многочастичной вспышки для различных соотношений сигнал / шум.

Предложен метод увеличения статистической точности оценки доплеровской частоты для сигналов с низким соотношением сигнал/шум (рис 6). Это достигается

путем селекции результатов вычисления по принципу вычисления предложенного «признака достоверности» – отношения максимума функции спектральной плотности к ее среднему значению – и применения пороговой фильтрации к этому признаку.

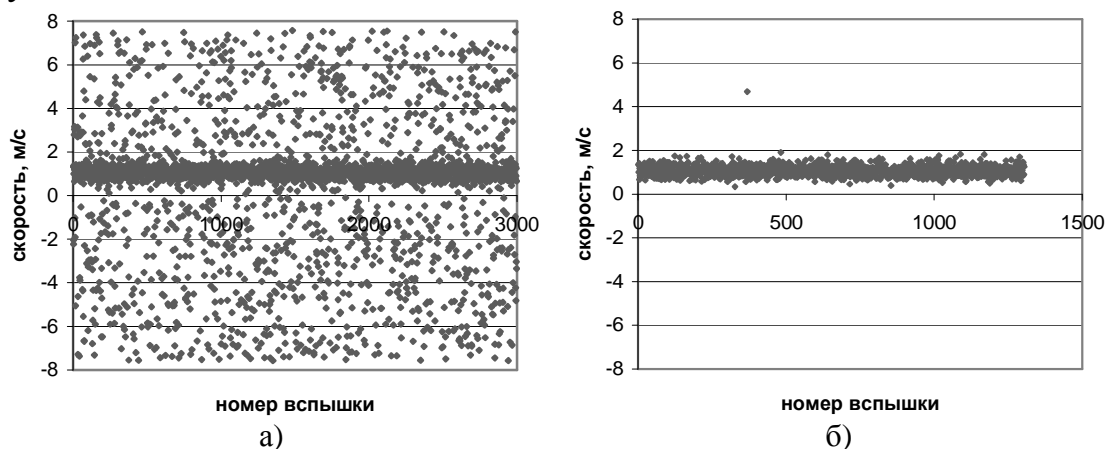


Рис. 6. Результаты применения метода ЦМ с фильтрацией по значению признака достоверности (минимально допустимое значение достоверности равно 4).
 а) результаты вычислений скорости до фильтрации; б) после фильтрации.

Описана реализация предложенных методов в алгоритмах доплеровского процессора и в программном обеспечении LDSA. Кратко описаны программные компоненты, реализующие разработанные методы, и алгоритмы работы доплеровского процессора.

Таблица 1

Характеристика	Значение
Максимальная частота пульсаций исследуемого процесса (в длительном эксперименте), [Гц]	1500
Статическая погрешность отслеживания спектрального пика доплеровского сигнала, не хуже, [%]	± 0.1
Погрешность единичного измерения скорости, для различных соотношений сигнал/шум, [%]	$\pm 1.5...6$
Погрешность измерения средней скорости (осреднение по 500 доплеровским вспышкам), не более, [%]	± 0.5
Диапазон измеряемых скоростей, [м/с]	$\pm 0.0001...30$

На основе разработанных методов, алгоритмов и решений были созданы лазерные доплеровские измерительные 2D системы ЛАД-03, ЛАД-05, ЛАД-06 в 3D системы ЛАД-056, использующие полупроводниковый лазер.

В третьем разделе представлены результаты физических экспериментов, по моделированию закрученных потоков в объектах с нецилиндрической геометрией рабочего участка. Изучалось возникновение нестационарности закрученного потока в кубическом контейнере для выявления отличий от течений в контейнере традиционной цилиндрической формы. Для диагностики течения использовался доплеровский анемометр на многомодовых полупроводниковых лазерах (рис. 7).



Рис. 7. Внешний вид экспериментальной установки.

Условия экспериментов были приближены к реальным натурным и производственным не только за счет изменения формы рабочего участка, моделирующего технологические упрощения реальных установок, но и за счет использования реальных рабочих сред с плохой оптической разрешимостью. В качестве рабочей жидкости применялась загрязненная вода, взятая из контура большого кавитационного стенда Ленинградского металлического завода. Естественные случайные частицы – частички грязи и ржавчины были использованы в качестве светорассеивателей.

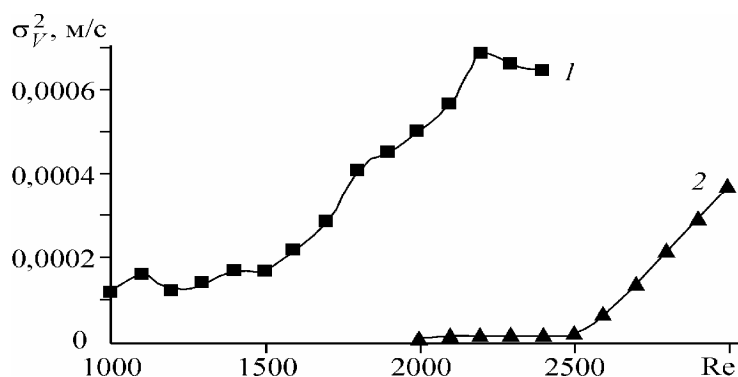


Рис. 8. Зависимости дисперсии скорости от числа Рейнольдса.
 линия 1 с квадратными маркерами – квадратное сечение контейнера,
 линия 2 с треугольными маркерами – круглое сечение контейнера [Наумов, Окулов, 2003].

Исследовалось возникновение нестационарности в потоке, закрученном в кубическом контейнере вращающимся диском, врезанном в его верхний торец. Исследования флуктуаций осевой и радиальной компонент скорости закрученного потока выполнены в точке на расстоянии 30 мм ($R/2$) от вертикальной оси контейнера, соосной оси вращения диска, и на высоте 30 мм ($H/4$, где H — вертикальный размер контейнера). Для различных режимов течения получены временные распределения, соответствующие значениям скорости движения жидкости внутри контейнера и ее дисперсии в зависимости от числа Рейнольдса (рис. 8).

Показано, что в закрученном потоке в кубическом контейнере не только реализуется отличный от известного сценарий перехода к нестационарному течению, но и пульсации в потоках развиваются по-разному. Имеется, по крайней мере, два существенных различия закрученных потоков в контейнерах разного сечения, играющих важную роль при интерпретации полученного результата. В отличие от цилиндра, где закрученный поток вдали от ядра на периферии непосредственно взаимодействует со стенкой, поток в центре куба сглаживается вдоль вертикальных ребер угловыми вихрями, не имея прямого контакта со стенкой. За счет разных потерь на взаимодействие с периферией приосевые вихри в разных контейнерах характеризуются разным градиентом давления в осевом направлении от неподвижного доньшка к вращающейся крышке, что приводит к реализации разных сценариев развития закрученных течений и, по-видимому, к разным моментам возникновения роста пульсаций в потоке. Помимо этого, за счет наличия углов в кубе всегда существует мощное неосесимметричное возмущение центрального осесимметричного вихря, которое инициирует пульсации в потоке. По этим причинам слабые пульсации одинаковой амплитуды существуют в кубе уже при малых числах Рейнольдса, а при их увеличении рост пульсаций появляется намного раньше, чем в цилиндре.

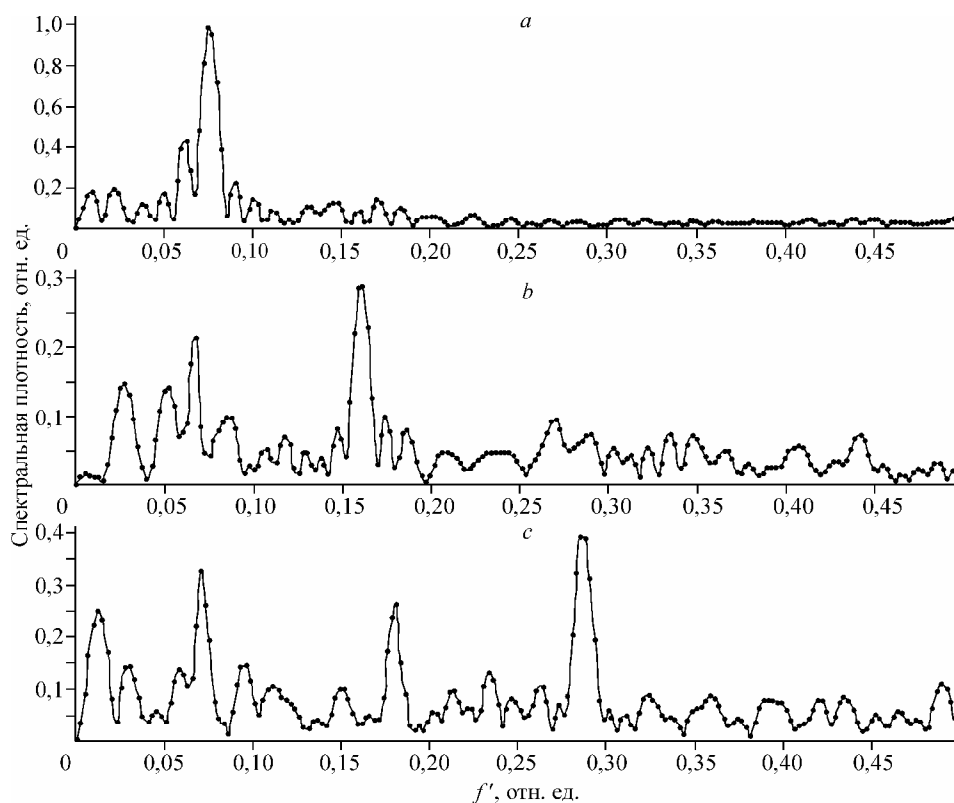


Рис. 9. Спектральная мощность частот пульсаций, отнесенных к частоте вращения диска, в точке $r = R/2$, $h = H/4$ для трех характерных режимов течения в кубическом контейнере ($a - Re=1800$, $b - Re=2100$, $c - Re=2300$).

Выполнены исследования спектральных характеристик закрученных потоков. На рис. 9 приведены спектры пульсаций для трех характерных режимов: $Re=1800$ – одна мода гармонических пульсаций; $Re=2100$ – две моды, $Re=2300$ – три моды.

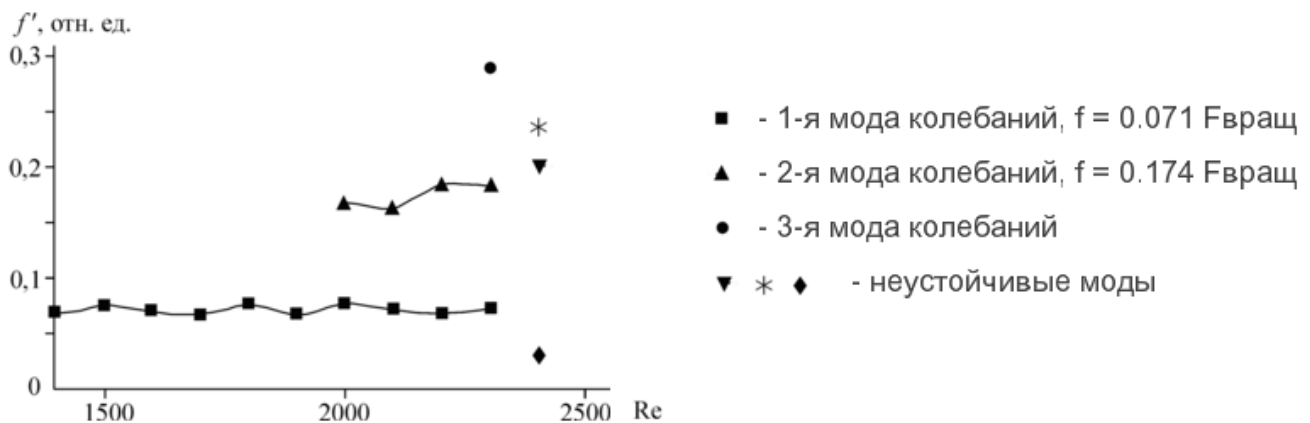


Рис. 10. Изменение частот пульсаций, отнесенных к частоте вращения диска, для различных мод колебаний при росте числа Рейнольдса.

На рис. 10 приведена диаграмма изменений безразмерных частот ($f' = f/\Omega$ – частота, отнесенная к частоте вращения диска) в зависимости от роста числа Рейнольдса. Было установлено, что для режимов с $Re = 1400 \div 2300$ существует устойчивая пульсация с частотой, составляющей $0,071 \pm 0,004$ от частоты вращения диска Ω . При $Re = 2000 \div 2300$ появляется дополнительная пульсация с другим отношением частот $0,174 \pm 0,007$. При дальнейшем росте числа Рейнольдса возникают три и более моды колебаний, причем дисперсия этих колебаний начинает уменьшаться, что требует дальнейшего изучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено исследование закрученного потока в кубическом контейнере доплеровским полупроводниковым анемометром для жидкостей с плохой оптической разрешимостью.

Проведено физическое моделирование особенностей нестационарных закрученных потоков, возникающих в реальных вихревых аппаратах из-за неосесимметричности формы их рабочих участков, и особенностей доплеровских сигналов, вызванных плохой оптической разрешимостью рабочей среды в присутствии естественных светорассеивателей случайной формы. На основании выполненных научных исследований:

1) впервые установлено с помощью анализа спектрально-частотных характеристик, что при $Re = 1400$ закрученный поток в кубическом контейнере с вращающейся верхней крышкой начинает испытывать гармонические пульсации скорости, сначала одномодовые, затем двух- и трехмодовые. При $Re > 2300$ отдельные моды не выделяются, а поток становится существенно нестационарным;

2) сопоставлены уровни пульсаций в вихревых устройствах с рабочими участками кубической и цилиндрической формы. Выявлено, что пульсации в кубическом контейнере возникают существенно раньше, чем в цилиндрическом ($Re = 2500$), амплитуда пульсаций при $Re = 1400 \div 2300$ растет линейно с числом Рейнольдса. Существенно различаются не только моменты возникновения

пульсаций скорости, но и сценарии развития нестационарности закрученного потока.

При получении данного результата было достигнуто существенное развитие методов диагностирования сложных многофазных течений.

3) Экспериментально показано, что сигнал полупроводникового анемометра от жидкости с плохой оптической разрешимостью и естественных светорассеивателей является сложным случайным процессом, с наличием фазового шума и низким соотношением сигнал/шум, что требует применения параметрической многочастичной модели сигнала. Развита метод определения доплеровской частоты путем вычисления «центра масс» спектра, отличающийся введением и автоматической адаптивной подстройкой параметров доплеровского процессора. Показано, что данный метод снижает погрешность определения частоты 1.5 – 3 раза для сигналов с соотношением сигнал/шум 0-15 дБ от естественных светорассеивателей. Предложен метод увеличения статистической точности определения доплеровской частоты на основе введения признака достоверности вычисленного результата и фильтрации результатов по признаку достоверности. Предложенные методы обработки сигнала полупроводникового доплеровского анемометра реализованы в виде алгоритмов доплеровского процессора. Разработано специализированное программное обеспечение для измерительной системы ЛАД-0ХХ. Системы ЛАД-0ХХ на практике доказали свою применимость в натурных экспериментах с плохой оптической разрешимостью рабочей среды.

Полученные результаты по исследованиям закрученного потока в кубическом контейнере доплеровским полупроводниковым анемометром для жидкостей с плохой оптической разрешимостью имеют принципиальное значение для развития вихревых технологий – вихревого горения, описания процессов в вихревых биохимических реакторах и пр., в которых на процессы тепломассопереноса существенно влияют нестационарность потока и явления вихревого распада. Результаты, касающиеся развития методов обработки сигнала LDSA, улучшают характеристики используемых в физических исследованиях технических средств и существенно расширяют функциональность и область применения лазерной доплеровской диагностики.

СПИСОК ОСНОВНЫХ НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. Аникин Ю.А., Наумов И.В., Меледин В.Г., Окулов В.Л., Садбаков О.Ю. Исследование пульсационных характеристик закрученного потока в кубическом контейнере // Теплофизика и Аэромеханика. 2004. Т.11, №4. С. 571–576.
2. Садбаков О.Ю., Окулов В.Л., Наумов И.В., Аникин Ю.А., Мостовский Н.П., Ильин С.Я., 2004. Лазерная доплеровская диагностика структуры потока за рабочим колесом гидротурбины на оптимальных и форсированных нагрузках // Теплофизика и аэромеханика. 2004. Т. 11, №4. С. 577–582.

3. Куликов Д.В., Аникин Ю.А., Двойнишников С.В., Меледин В.Г. Лазерная технология определения ротора гидрогенератора под нагрузкой. // Электрические станции. 2010. №7. С. 39–43.
4. Саломатов В.В., Шарыпов О.В., Ануфриев И.С., Аникин Ю.А., Х. Энхжаргал Физическое моделирование внутренней аэродинамики вихревой топки энергетического парогенератора // Вестник Новосибир. гос. ун-та. Серия: Физика. 2011. Т.6., вып. 1. С.60-65.

Другие публикации

5. Патент на изобретение РФ № 2334195. Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Главный В.Г., Меледин В.Г. "Способ бесконтактного измерения линейных размеров трехмерных объектов". Приоритет от 29.05.2006 г.
6. V. Meledin, Yu. Anikin, G. Bakakin, V. Glavniy, S. Dvoinishnikov, D. Kulikov, I. Naumov, V. Okulov, V. Pavlov, V. Rakhmanov, O. Sadbakov, N. Mostovskiy, S. Ilyin., 2006. Laser Doppler semiconductor anemometry of vortex flow behind the vane wheel rotor of the water turbine // Optical Methods of Flow Investigation. – SPIE Vol. 6262. 2006. P. 123-133.
7. V. Meledin, Yu. Anikin, G. Bakakin, V. Glavniy, S. Dvoinishnikov, D. Kulikov, I. Naumov, V. Okulov, V. Pavlov, V. Rakhmanov, O. Sadbakov, S. Ilyin, N. Mostovskiy, I. Pylev, 2006. Laser Doppler diagnostic of flow in draft tube behind hydroturbine runner // Turbomachines: Aeroelasticity, Aeroacoustics, and Unsteady Aerodynamics. Moscow: Torus Press Ltd., 2006. P. 446-457.
8. Садбаков О.Ю., Аникин Ю.А., 2002. Система сбора экспериментальных данных на основе FPGA интерфейса. // VII Всероссийская конференция молодых ученых “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики”. Тезисы докладов. Новосибирск 2002. С.181-182.
9. Аникин Ю.А., Садбаков О.Ю., Двойнишников С.В., 2003. Препроцессор сигнала лазерного доплеровского анемометра на основе FPGA-технологии. // Оптические методы исследования потоков: Труды 7-й международной научно-технической конференции. М.: Изд. МЭИ, 2003. С. 322-323.
10. Аникин Ю.А. Главный В. Г., 2004. Определение частоты многочастичного доплеровского сигнала при измерениях кинематики оптически плотных сред // VIII Всероссийская конференция молодых ученых “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики”. Тезисы докладов. Новосибирск: 2004, С. 151-152
11. Аникин Ю.А., Меледин В.Г., Наумов И.В., 2005. Селекция сигнала ЛДИС с использованием динамических моделей // Труды 8-й международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков». М.: Изд. МЭИ, 2005. С. 94-97.
12. Двойнишников С.В., Аникин Ю.А. Меледин В.Г., Павлов В.А., 2006. Автоматизированная метрология лазерных анемометров для металлургии. // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т. 5: Сборник трудов Второй международной научно-практической конференции “Исследование, разработка и применение

- высоких технологий в промышленности“. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. С. 326–327.
13. Меледин В.Г., Аникин Ю. А., Бакакин Г.В., Главный В.Г., Двойнишников С.В., Наумов И.В., Куликов Д.В., Окулов В. Л., Павлов В.А., Рахманов В.В., Садбаков О.Ю., Шархов А.С., 2006. Лазерная доплеровская измерительная система для 2D диагностики газожидкостных потоков ЛАД 05 // Сб.тр. 2 международной научно-практ. конференц «Исследов, разработка и примен. высоких технол. в промышленности.» Т.5 07-09.01.2006. С-Пб: Изд. Политехн. ун-та, 2006. – С. 343-344.
 14. Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., 2007. Визуализация 2D вектора скорости потока в реальном времени по данным лазерного доплеровского измерителя скорости в реальном времени // Оптические методы исследования потоков: Труды IX Международной научно-технической конференции. М.: Изд. МЭИ, 2007. С. 104-107.
 15. Рахманов В.В., Меледин В. Г., Аникин Ю. А., Бакакин Г.В., Главный В.Г., Двойнишников С.В., Елисеев И.А., Кабардин И.К., Куликов Д.В., Наумов И. В., Окулов В. Л., Павлов В.А., Садбаков О.Ю., Шархов А.С., 2007. Диагностика 3D профилей скорости в конусе отсасывающей трубы гидротурбины с использованием коммутационной лазерной полупроводниковой анемометрии // Оптические методы исследования потоков: Труды IX Международной научно-технической конференции. М.:Изд. МЭИ, 2007.С. 378-381.
 16. Ануфриев И.С., Саломатов В.В., Шарыпов О.В., Аникин Ю.А. Экспериментальное исследование структуры течения в модели энергетического парогенератора вихревого типа. // Материалы всероссийской конференции «Математическое и физическое моделирование опасных природных явлений и техногенных катастроф». Томск, Изд-во Томского университета, 2010. С. 14-15.

Кроме того, тезисы в сборниках докладов IX и X Всероссийских конференций молодых ученых "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики" (Новосибирск, 2008, 2010), Всероссийской школы-семинара молодых ученых «Физика неравновесных процессов в энергетике и наноиндустрии» (Новосибирск, 2007, 2009), II, III, V, VII, IX Международных научно-практических конференциях “Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности“ (Санкт-Петербург, 2007, 2008, 2009, 2010), и других конференций. Всего по теме диссертации опубликовано 30 работ.

Подписано к печати 6 апреля 2011 г. Заказ № 15
Формат 60/84/16. Объем 1 уч.-изд.л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в Институте теплофизики СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Акад. Лаврентьева, 1