

На правах рукописи



Рахманов Виталий Владиславович

**ДИАГНОСТИКА 3D ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТИ В МОДЕЛИ
ГИДРОТУРБИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ
ДОПЛЕРОВСКОЙ АНЕМОМЕТРИИ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Новосибирск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

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

доктор физико-математических наук,
доцент
Окулов Валерий Леонидович

Официальные оппоненты:

Бойко Виктор Михайлович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения РАН, заведующий лабораторией.

Кириянов Валерий Павлович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Защита состоится 16 ноября 2012 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д003.035.02 по присуждению ученой степени доктора наук в ФГБУН Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1 (факс (383) 330-72-68).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН.

Автореферат разослан 21 сентября 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук



И.М. Засыпкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Повышение эффективности, надежности и качества работы гидротурбин и других гидротехнических сооружений является актуальной научно-технической проблемой. Необходимость ее решения обусловлена тенденцией роста требований к энергоэффективности, безопасности при эксплуатации и острой конкуренцией среди производителей на мировом рынке.

Гидродинамическое проектирование турбин производится вариацией их геометрии на основе анализа и численного моделировании характеристик течения в проточном тракте. Для описания реальных течений в различных технических устройствах приемлемую точность численного решения можно получить только при такой расчётной сетке, ячейки которой меньше самого мелкого вихря. Это требует очень больших затрат расчётного времени даже на современных компьютерах. Поэтому на практике используются различные модели турбулентности, упрощающие расчёт реальных потоков (Черный С.Г., Чирков Д.В., Лапин В.Н. и др., 2006). Все модели турбулентности обладают одним общим недостатком: заранее нельзя сказать, какое из полуэмпирических предположений о связи между турбулентным касательным напряжением и осредненным движением потока наиболее близко соответствует физической действительности. Поэтому любая математическая модель должна быть верифицирована на основе данных экспериментальных исследований. Проверка соответствия результатов численного моделирования реальным характеристикам турбулентного течения должна производиться на гидродинамических стендах с применением самых современных измерительных систем.

В реальных условиях эксплуатации гидротурбины полностью снять закрученность потока за рабочим колесом реактивной гидротурбины невозможно, особенно на переходных режимах работы. Поэтому предельный КПД гидротурбины принципиально ограничен. В отсасывающей трубе гидротурбины зарождается вихрь, который берет свое начало на обтекателе рабочего колеса и уходит по отсасывающей трубе в нижний бьеф. В зависимости от режима работы гидротурбины и от напора воды этот вихрь может обладать прецессией. Значительные пульсации давления на стенке отсасывающей трубы, вызванные прецессией центрального вихря, вызывают повреждения конструкции плотины. Поэтому при производстве гидротурбин производитель стремится оптимизировать форму лопаток и отсасывающей трубы для уменьшения вероятности возникновения в потоке мощных вихрей.

С целью определения опасных режимов с вихреобразованием на этапе проектирования и изготовления гидротурбины проводят детальные исследования течения в проточной части. Естественно, на опасных режимах работа гидротурбины должна быть исключена или минимизирована. Надежность работы гидротурбины и ее КПД определяются качеством изготовления сложного гидротехнического сооружения, и его соответствия результатам физического и численного моделирования. Таким образом, исследования трехмерного течения в конусе отсасывающей трубы являются необходимой составляющей процесса проектирования и изготовления гидротурбины и всего проточного тракта.

Основным недостатком существующих работ по исследованию потока в конусе отсасывающей трубе на момент начала работы над диссертацией является недостаточное изучение трехмерной структуры потока. Авторы изучают либо двумерный поток, либо полученные трехмерные скорости имеют высокую погрешность и плохо согласуются с другими данными и теоретическими расчетами.

Решение задачи натурной диагностики 3D (3-х компонент) профилей скорости в конусе отсасывающей трубы требует разработки новых оригинальных методов измерения и создания специальных гидродинамических стендов с возможностью оптического невозмущающего контроля на основе ЛДА (лазерный доплеровский анемометр).

Цель диссертационной работы: создание научно обоснованной экспериментальной базы на основе коммутационных полупроводниковых 3D ЛДА и проведение экспериментальных исследований по диагностике 3D профилей скорости в конусе отсасывающей трубы при различных режимах работы гидротурбин.

Задачи исследований:

- 1) разработка и реализация методов измерения 3D профилей скорости в конусе отсасывающей трубы модели гидротурбины;
- 2) разработка и реализация методов синхронизации в коммутационной лазерной полупроводниковой анемометрии;
- 3) изучение поведения малой радиальной компоненты скорости в конусе отсасывающей трубы в режимах с вихревыми образованиями.

Научная новизна:

1) Впервые осуществлены натурные измерения 3D профилей скоростей в конусе отсасывающей трубы поворотно-лопастного рабочего колеса при помощи коммутационных полупроводниковых 3D ЛДА. Диагностированы все три компоненты скорости, включая относительно малые значения радиальной компоненты, необходимые для модернизации отсасывающих труб на современном этапе развития турбомашиностроения.

2) Обнаружен режим с развитым трехмерным приосевым вихрем, который ранее не определялся визуализацией, что является важным при обеспечении безопасности работы гидроагрегата. По результатам измерения получены его интегральные характеристики.

3) Разработан метод синхронизации коммутационных полупроводниковых ЛДА, позволивший провести измерения трехмерного поля скорости потока за рабочим колесом гидротурбины.

4) Разработана методика проведения диагностики 3D профилей скорости в конусе отсасывающей трубы модели гидротурбины. Методика основана на методе бинокулярного зрения и методе оптической иммерсии. Применение данной методики позволило минимизировать ошибку определения скорости потока и измерить слабую радиальную компоненту скорости в режимах с вихревыми образованиями.

Методы исследований. В работе использованы методы доплеровской анемометрии, триангуляции, применения оптической иммерсии, аналитической геометрии, математической статистики, синхронизации потоков данных.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается практическим применением разработанных методов, реализацией этих методов в действующих устройствах, допускающих прямые проверки и испытания в реальных условиях, результатами испытаний и сравнением экспериментальных данных с данными других авторов, полученными другими методами.

Практическая ценность результатов заключается в том, что полученные результаты и выводы могут использоваться для оптимизации конструкций и повышения КПД гидротурбин в энергетике. В диссертации созданы алгоритмы и реализованы модули для синхронизации данных лазерных доплеровских измерительных систем. Разработки применяются при исследованиях структурных и кинематических свойств нестационарных многофазных потоков конденсированных сред. Результаты работы расширяют функциональность лазерных доплеровских измерительных систем на измерение трех компонент скорости частиц в многофазных средах.

Результаты, изложенные в диссертации, используются для исследования потоков на стендах лаборатории водяных турбин Ленинградского металлического завода, филиал ОАО «Силовые машины», г. Санкт-Петербург, в Самарском государственном аэрокосмическом университете и Пермском государственном техническом университете.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Метод проведения диагностики 3D профилей скорости в конусе отсасывающей трубы модели гидротурбины, основанный на методе бинокулярного зрения и методе оптической иммерсии, обеспечивающий минимизацию ошибки определения скорости потока и позволяющий измерять слабую радиальную компоненту скорости в режимах с вихревыми образованиями.

2. Метод синхронизации данных в коммутационной лазерной полупроводниковой анемометрии, обеспечивающий согласование временных меток данных с погрешностью не более $5 \cdot 10^{-4}$ с.

3. Результаты экспериментальных измерений трехмерных профилей скорости потока в конусе отсасывающей трубы модели гидротурбины на основе трехкомпонентного коммутационного лазерного полупроводникового анемометра.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и представлялись на VIII и IX Международных научно-технических конференциях «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2005, 2007); 11-th International symposium on unsteady aerodynamics, aeroacoustics and aeroelasticity of turbomachnes (Moscow 2006); II, III, V, VI, VII, IX Международных научно-практических конференциях «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (Санкт-Петербург, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010); VIII, IX, X, XI Всероссийских конференциях молодых ученых "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики" (Новосибирск, 2004, 2006, 2008, 2010); IV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь - 2007» (Барнаул, 2007); Всероссийской школе-семинаре молодых ученых «Физика неравновесных

процессов в энергетике и наноиндустрии» (Новосибирск, 2007); а также на различных научных семинарах и совещаниях.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации: постановка задач, способы решения и полученные при этом основные научные результаты принадлежат автору. Разработки на стадиях НИОКР измерительных систем, в состав которых входит впервые созданный метод адаптивной синхронизации и практическая реализация выполнялись сотрудниками научного коллектива при непосредственном участии автора. Представление совместных материалов согласовано с соавторами.

Публикации. При работе над диссертацией соискателем лично и в соавторстве опубликовано 42 печатные работы. По материалам диссертации опубликовано 24 работы, из которых 6 изданы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, получено решение о выдаче патента на изобретение РФ.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 3-х глав, выводов по работе и 3-х приложений, содержит 138 страниц, 70 рисунков и 6 таблиц. Список использованных источников включает 114 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, выполнен анализ развиваемого научного направления, сформулированы наиболее важные научные результаты и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор литературы, посвященный исследованиям течения в конусе отсасывающей трубы моделей гидротурбин. Анализ работ охватывает различные методы изучения потока в конусе отсасывающей трубы гидротурбины: визуализацию, измерения напорными трубками, термоанемометрический метод, современные бесконтактные методы неразрушающей диагностики, такие как PIV (Particle image velocimetry), ЛДА и другие. Выполнен анализ применимости методов для диагностики профилей скорости в конусе отсасывающей трубы на крупномасштабных стендах ОАО «Силовые машины», г. Санкт-Петербург. Показана актуальность проведения работ по диагностике 3D профилей скорости в конусе отсасывающей трубы моделей гидротурбин.

Современные исследования гидротурбин направлены на улучшение эффективности как радиально-осевых турбин (турбин Френсиса), так и поворотных-лопастных турбин (турбин Каплана). На момент начала работы над диссертацией акцент в исследовании течения во входном диффузоре отсасывающей трубы делался на изучение двумерного (осевого и тангенциального) течения. Но с ростом требований к КПД гидротурбин, когда производители борются даже за незначительное увеличение КПД гидротурбин, и развитием численных методов расчетов гидродинамических потоков, возникла необходимость в исследовании слабого радиального течения, которое является существенной частью потока в отсасывающей трубе.

Существует довольно много работ по численным расчетам трехмерных течений в конусе отсасывающей трубы, но производителю гидротурбин необходима верификация полученных в расчетах результатов.

Одним из самых распространенных инструментов для исследований происходящих явлений в отсасывающей трубе является визуализация течения. По результатам визуализации в работе Skotak A, Mikulasek J, Troubil P. (2001) можно определить, при каких режимах работы гидротурбины происходит образование центрального вихря. Однако визуализации недостаточно для изучения сложных трехмерных нестационарных течений, необходимы 3D измерения.

Самым распространенным методом измерения скорости потока в отсасывающей трубе долгое время были напорные трубки и их модификации. Измерения пятиточечным шаровым зондом позволяло получить распределение трех компонент скорости на входе в спиральную камеру, за рабочим колесом в конусе отсасывающей трубы, а также на выходе из отсасывающей трубы (Мостовский Н.П., 1999). Однако при таком методе измерения отмечалась кавитация на шаровой головке и цилиндрической державке, а также подсос воздуха по державке при высоких скоростях потока. Основными ограничениями метода являются малый диапазон линейных измерений скорости (1:3 — 1:4) и высокая погрешность (более 20%) измерения малой радиальной компоненты скорости на фоне высоких осевых и тангенциальных скоростей.

В работе Ciocan G.D., Avellan F., Verca E. L. (2002) при помощи термоанемометрического метода изучалась характеристика пограничного слоя во входном диффузоре отсасывающей трубы гидротурбины Френсиса в разных режимах работы модели гидротурбины и измерялась тангенциальная компонента скорости потока.

В рамках проекта FLINDT (Flow investigation in a Francis draft tube) Avellan F. и др. (2000, 2002) были проведены PIV измерения скорости во входном диффузоре для модели гидротурбины Френсиса. Однако для гидротурбин Каплана таких исследований не предпринималось.

В 1998 году G.D. Ciocan и др. была предпринята попытка исследовать трехмерное течение в межлопаточном пространстве для модели турбины Френсиса при помощи 2D ЛДА с фазовым осреднением и PIV методики. Измерения поля скорости при помощи ЛДА проводились последовательно под разными углами, и затем данные синхронизировали между собой по фазе вращения вала гидротурбины для получения поля трехмерных векторов скорости. Затем в 2000 году измерения были расширены на область отсасывающей трубы для той же модели гидротурбины. В работе показано осевое и тангенциальное поле скорости (рис. 1), и поле пульсаций скорости жидкости в конусе отсасывающей трубы.

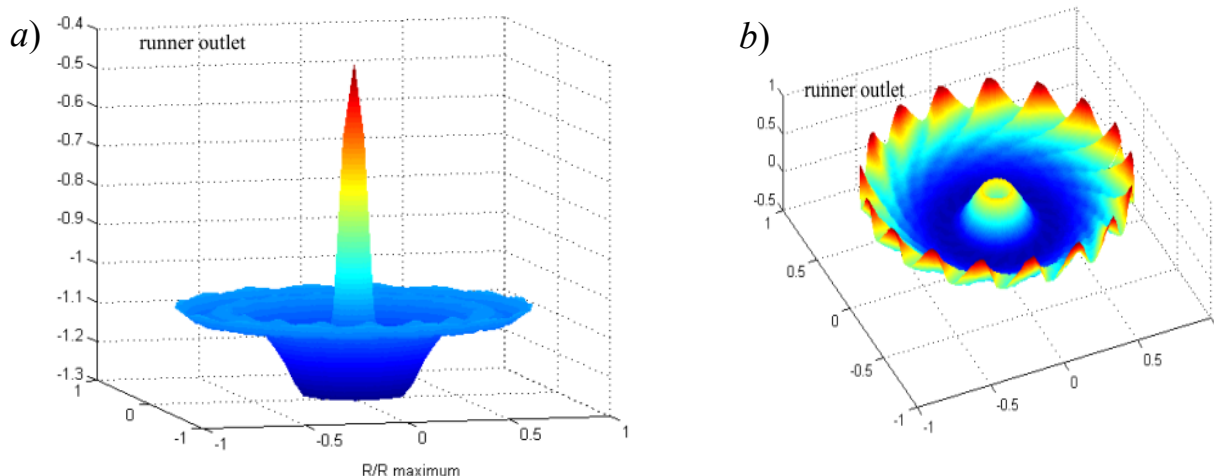


Рис. 1. Нормированное осевое (a) и тангенциальное (b) поле скорости в отсасывающей трубе (Ciocan G.D., 1998).

Несмотря на заявленные 3D измерения в работах отсутствуют данные о трехкомпонентном распределении характеристик потока. Еще одним недостатком данных работ является неодновременность ЛДА измерений. Это значительно уменьшает точность определения третьей компоненты скорости для нестационарного течения. Из приведенных результатов видны существенные расхождения между расчетом поля скорости по численной модели и измерениями при помощи напорных датчиков и ЛДА.

Несмотря на обилие работ по исследованию течения в конусе отсасывающей трубы, большая часть публикаций на момент начала работы над диссертацией посвящена изучению течений для моделей гидротурбины Френсиса. Это обусловлено тем, что основные проблемы возникают именно у этого типа турбин при работе на режимах с неполной загрузкой. Во многих случаях, при напорах, лежащих в пределах от 10 до 80 метров, целесообразней использовать поворотно-лопастные гидротурбины. Для них также необходимо детальное исследование трехмерного течения в проточном тракте гидротурбины для оптимизации режимов.

Показано, что основным недостатком опубликованных на момент начала работы над диссертацией работ по экспериментальным измерениям в конусе отсасывающей трубы является недостаточное изучение трехмерной структуры потока. Авторы изучают либо двумерный поток, либо полученные трехмерные скорости имеют высокую погрешность и плохо согласуются с другими данными и теоретическими расчетами. Кроме того, большинство научных работ на момент начала работы над диссертацией были посвящены изучению потока жидкости в гидротурбине Френсиса, течения в гидротурбине Каплана были изучены существенно хуже.

Отдельное внимание в работе уделено сравнению существующих методов измерения 3D профилей скорости в конусе отсасывающей трубы модели гидротурбины. Рассмотрены такие методы измерения трехмерных векторов скорости, как метод многоточечных напорных трубок, трехкомпонентный термоанемометрический метод, 3D Stereo и Tomographic PIV, 3D PTV (Particle tracking velocimetry), модификация LIF (Laser induced fluorescence) метода,

теневого и 3D ЛДА. Даны их описания и оценена применимость в условиях натуральных экспериментов – гидродинамических потоков с большим количеством ржавчины и газовой фазы, проблематичностью засеивания гидродинамического контура калиброванными светоотражающими частицами и ограниченным оптическим доступом к физическим процессам.

Для преодоления этих сложностей в работе Садбаков О.Ю., Окулов В.Л., Наумов И.В. и др. (2004) уже использовался метод ЛДА, но для диагностики двумерных профилей скорости (рис. 2).

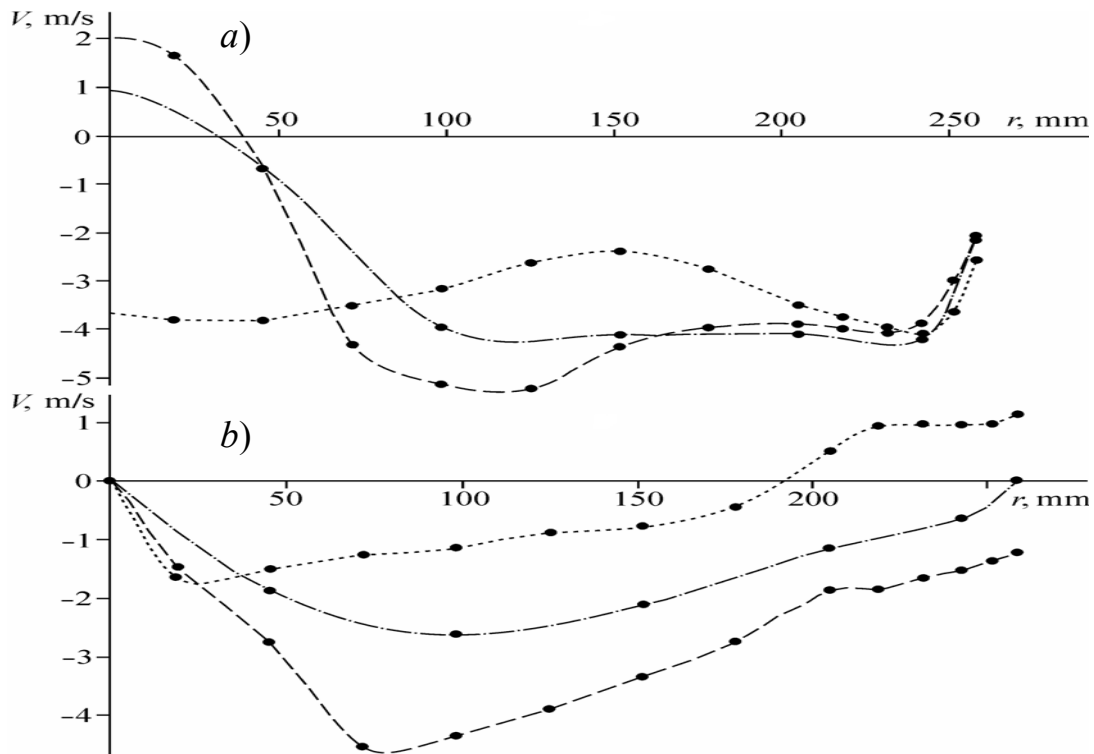


Рис. 2. Радиальные профили осевой (а) и окружной (б) скорости в отсасывающей трубе за рабочим колесом радиально-осевой турбины с открытием направляющего аппарата: $a=2$ (пунктирная линия), 28 (штрихпунктирная), 30 (штриховая).

В диссертационной работе показано, что наиболее приемлемым методом для измерения 3D профилей скорости в крупномасштабных моделях гидротурбин является метод лазерной доплеровской анемометрии.

Во второй главе рассмотрены методы построения 3D ЛДА при помощи двух одно- и двухкомпонентных лазерных доплеровских анемометров. Показаны недостатки различных методов применительно к задаче измерения трех ортогональных компонент вектора скорости на крупномасштабных стендах и предложен новый метод построения 3D ЛДА.

Наиболее просто реализуемым методом получения 3D профилей скорости в конусе отсасывающей трубы является метод фазового осреднения. Метод основан на получении трехмерного вектора скорости путем последовательного измерения 3-х компонент скорости потока в измерительном объеме (рис. 3). Метод дает усредненный по времени 3D вектор скорости. Применение синхронизации измерений с гидродинамическим процессом (если есть цикличность) позволяет по реперным меткам в развертке пульсаций давления на

стенке восстановить трехмерные вектора скорости в зависимости от периода повторяющегося процесса.

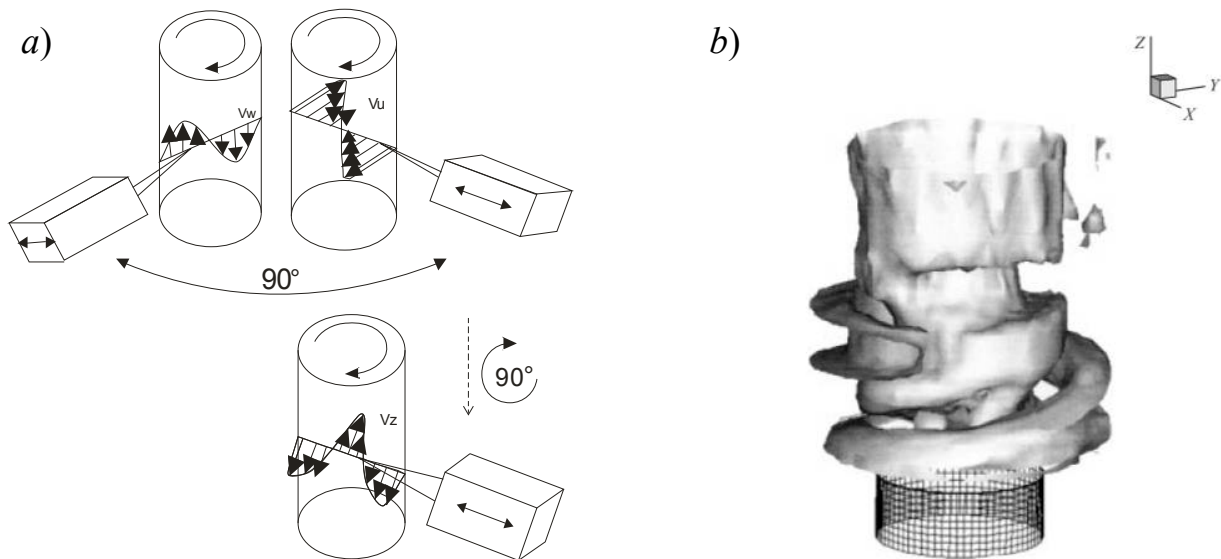


Рис. 3. Схема реализации метода фазового осреднения для получения 3D профилей скорости с помощью одного ЛДА (a) и пример результата, полученного с применением данного метода (Шторк С.И. и др. (2005) (b).

Основным недостатком данного метода является неодновременность измерения компонент вектора скорости, что не позволяет изучать сложные гидродинамические течения без цикличности процесса, в т.ч. процессы, происходящие в отсасывающей трубе на переходных режимах работы гидротурбины. Кроме того у данного метода затраты времени на проведение эксперимента значительно больше, так как необходимо последовательно во времени измерять несколько компонент скорости. Метод дает дополнительную погрешность за счет возможной неточности позиционирования измерительной области ЛДА в пространстве в объеме отсасывающей трубы.

Для построения 3D вектора скорости применяется метод хроматического разделения каналов. Использование нескольких источников лазерного излучения с разными длинами волн и селективной приемной частью позволяет фильтровать сигналы только необходимой длины волны для получения трех векторов скорости. Таким образом, становится возможным одновременно измерять все три компоненты вектора скорости в точке измерения (рис. 4), что снижает затраты на время проведения эксперимента и устраняет необходимость привязки к фазе процесса для оценки мгновенного значения 3D вектора скорости потока в точке измерения.

Для измерения скорости гидродинамического потока в конусе отсасывающей трубы данный метод также не пригоден по причине возникновения дополнительной неустранимой погрешности, появляющейся из-за дисперсии коэффициента преломления в воде или исследуемых средах. В результате использования лучей с разной длиной волны лазерного излучения, измерительные зоны разных лучей расходятся в воде вдоль оптической оси прибора, в зависимости от заглубления в измерительный объем. При заглублении на 500 мм (диаметр конуса модели отсасывающей трубы) расхождение может составлять в зависимости от длины волн используемых лазеров до 3 мм.

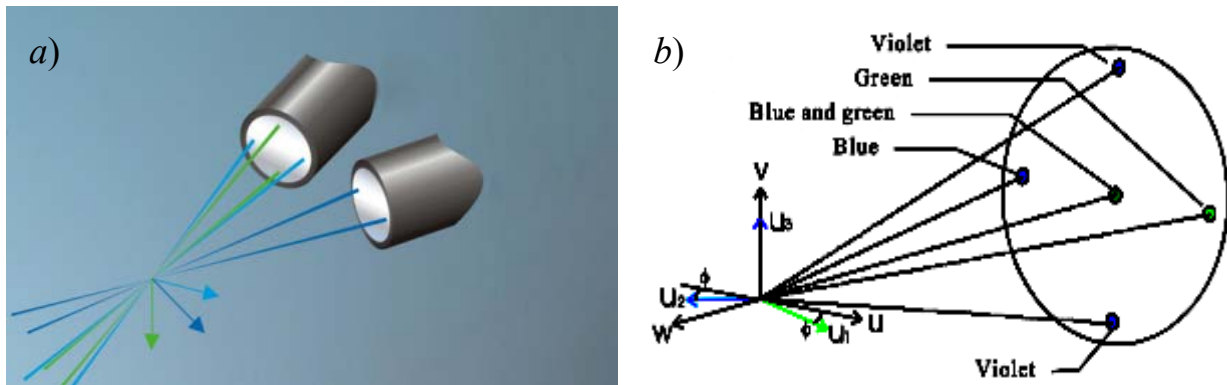


Рис. 4. 3D ЛДА с хроматическим разделением каналов. *a* - пример использования двух оптических головок для построения 3D ЛДА, *b* - одного ЛДА с пятью лучами.

Данного недостатка лишен метод построения 3D ЛДА при помощи временного разделения сигналов в оптических каналах. Метод позволяет использовать один источник и один приемник лазерного излучения. Измерения компонент векторов скорости разносятся во времени принудительной коммутацией оптических каналов внутри заданного временного интервала, соответствующего времени пересечения измерительного объема светорассеивающей частицей. 3D вектор скорости восстанавливается по трем полученным однокомпонентным векторам. Метод позволяет использовать лазерное излучение с одной длиной волны. Пространственных расхождений перетяжек лазерных лучей из-за рефракции не возникает. За счет малых времен коммутации время измерения 3D профилей скорости значительно сокращается.

Недостатком подхода является малая эффективность использования мощности лазерного излучения, поскольку на оптический канал, измеряющий одну компоненту скорости, приходится менее трети энергии лазерного источника. Указанный недостаток особенно сильно проявляется при измерениях скорости в режиме обратного рассеяния, когда интенсивность светового сигнала падает в среднем на два-три порядка по сравнению с интенсивностью света, рассеянного вперед. Осуществляется принудительная коммутация каналов внутри интервала, соответствующего времени пересечения измерительного объема рассеивающей частицей, и энергия лазерного излучения за время существования одного доплеровского радиоимпульса остается поделенной между оптическими каналами. Это приводит к понижению точности измерений вследствие коммутационных помех, а также сложность измерений в условиях, когда в оптическом поле находится несколько рассеивающих частиц. Совокупность минусов данного метода не позволяет использовать ЛДА с временным разделением каналов для диагностики 3D профилей скорости гидродинамических потоков в конусе отсасывающей трубы в крупномасштабных стендах моделей гидротурбин.

Для преодоления отмеченных недостатков предложен метод получения 3D профилей скорости с использованием впервые разработанного метода синхронизации коммутационных полупроводниковых 2D ЛДА. Технический результат, который достигается при использовании этого метода, выражается в уменьшении погрешности измерения 3D вектора скорости гидродинамических

потоков и существенном снижении затрат времени на эксперименты. Метод основан на модификации метода измерения 2D компонент скорости потока с адаптивным временным разделением сигналов в оптических каналах с целью получить 3D вектор скорости. Метод адаптивного временного разделения сигналов позволяет улучшить чувствительность приемной части за счет того, что весь рассеянный свет от частицы приходится на одну компоненту скорости, а не делится между компонентами. Показано, что применение адаптивной временной селекции позволяет существенно повысить отношение сигнал/шум и точность измерений. Это особенно эффективно в тех случаях, когда необходимо выделять информацию о компонентах вектора скорости потока при дистанционных измерениях в режиме обратного рассеяния (единственно возможный режим при наличии только одного оптического окна в конусе отсасывающей трубы).

Описана реализация предложенного метода построения 3D ЛДА. Для 3D измерений вектора скорости используется два 2D ЛДА с взаимно ортогонально поляризованными лазерными лучами (ЛАД-05 и ЛАД-06). Каждый из приборов одновременно принимает рассеянный свет только от своего источника излучения за счет поляризационной фильтрации. Восстановление полного вектора скорости обеспечивается сведением в одну точку измерительных зон приборов, размещенных под углом друг к другу (рис. 5). Компоненты вектора скорости, расположенные в горизонтальной плоскости (V_x и V_z) восстанавливаются из геометрии лазерных лучей.

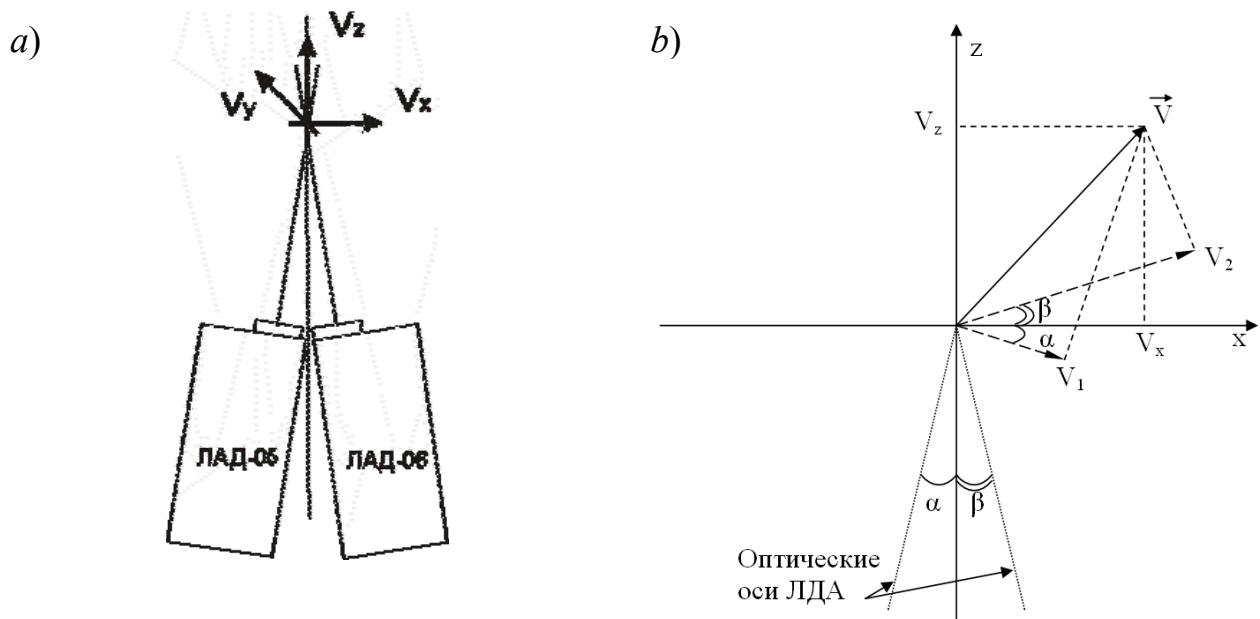


Рис. 5. Получение 3D ЛДА с помощью двух 2D ЛДА (a) и координатный базис для измерения ортогональных компонент вектора скорости (b).

Системы координат, связанные с направлениями распространения лазерных лучей и искомые вычисленные вектора скорости V_x и V_z связаны соотношениями:

$$V_x = \frac{V_2 + V_1}{2\cos\alpha}, \quad V_z = \frac{V_2 - V_1}{2\sin\alpha}, \quad (1)$$

где V_1 и V_2 – компоненты вектора скорости, измеренные первым и вторым прибором соответственно, при условии равенства углов ($\beta = \alpha$).

Такой способ построения 3D ЛДА позволяет проводить одновременные 2D измерения скоростей потока в одной точке двумя приборами, что существенно сокращает и упрощает процесс построения 3D вектора скорости. При этом дополнительно обеспечивается возможность верификации компоненты вектора скорости V_Y , перпендикулярной плоскости расположения приборов, так как данная скорость измеряется одновременно обоими приборами.

В главе обсуждается метод синхронизации в коммутационной лазерной полупроводниковой анемометрии. Обосновываются преимущества метода, приводится его описание. Показано, что применение UDP протокола передачи данных, который реализован в ЛДА, обуславливает необходимость введения меток времени о событиях в обоих приборах для точной идентификации события во времени в лабораторной системе отчета. Для выполнения уравнения (1) необходимо, чтобы скорости V_1 и V_2 были получены в один момент времени в лабораторной системе отсчета времени. В общем случае это не выполняется, так как временные метки, которые присваиваются данным о скорости потока, синтезируются из показаний внутренних часов приборов. При этом они независимы друг от друга.

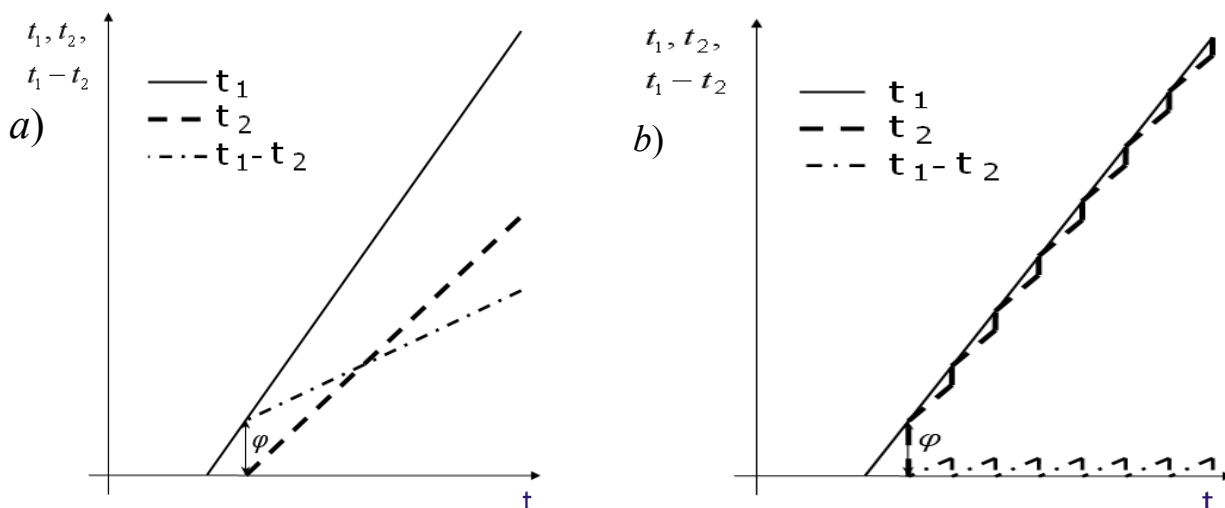


Рис. 6. Реконструированные временные функции внутренних часов: без синхронизации (a) и с применением синхронизации (b).

На рис. 6 схематично представлены реконструированные временные функции внутренних часов приборов. Сплошной линией обозначена временная функция первого прибора t_1 , а пунктирной – второго t_2 . Данные функции имеют разный наклон и разную начальную фазу. Штрихпунктирной линией показана разностная функция $t_1 - t_2$, которая определяет максимальное рассогласование показания внутренних часов двух приборов. В общем случае, эта функция не ограничена по величине. На рис. 6, b проиллюстрировано применение синхронизации. Периодически показания одних внутренних часов устанавливается равным показаниям других. Разностная функция является строго ограниченной и не превышает величину расхождения внутренних часов за период синхронизации.

Метод синхронизации реализован сразу на двух уровнях – аппаратном и программном. Каждый из них может работать независимо друг от друга, либо дополнять друг друга. Это сделано с целью увеличения надежности и оптимизации затрат вычислительных мощностей препроцессоров ЛДА.

Для проведения экспериментов в конусе отсасывающей трубы гидротурбины недостаточно использования программной реализации метода синхронизации. Показано, что необходимо использование аппаратной синхронизации для пульсаций потока свыше 10 Гц.

Аппаратная реализация обеспечивает синхронизацию показаний внутренних часов двух приборов с рассогласованием не более $5 \cdot 10^{-4}$ с, что полностью перекрывает потребности гидродинамических экспериментов по диагностике 3D профилей скорости в конусе отсасывающей трубы модели гидротурбины. Основные характеристики разработанной 3D системы ЛДА приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристика	Значение
Диапазон измеряемых скоростей компоненты X, Y [м/с]	$\pm 0.01 \dots 30$
Диапазон измеряемых скоростей компоненты Z [м/с]	$\pm 0.01 \dots 100$
Погрешность измерения средней скорости, компоненты X, Y [%]	± 0.5
Погрешность измерения средней скорости компонента Z [%]	± 3.7
Фокусное расстояние выходных объективов [м]	0.5
Размер зондирующего оптического поля, не более [мм]	0.05×1

Разработанные методы и технические решения использованы в составе лазерных доплеровских измерительных 3D систем ЛАД-056.

В третьей главе описывается экспериментальная установка, особенности начальной юстировки 3D ЛДА и применение иммерсионного метода для уменьшения погрешности измерения в натурном эксперименте. Проводится анализ полученных экспериментальных данных по трехмерному распределению скорости течения в конусе отсасывающей трубы модели гидротурбины ПЛ 40-46 и сопоставление с результатами прямого замера интегральных характеристик течения, полученных с помощью стандартного расходомера.

Схема расположения размещения ЛДА и измерительного стенда Ленинградского металлического завода показана на рис. 7. С 2004 года по апрель 2005 г. на данном стенде впервые было осуществлено измерение трех проекций скоростей потока с помощью ЛДА. Описаны режимы работы гидротурбины, при которых совместно со специалистами Ленинградского металлического завода проводились измерения скорости потока в конусе отсасывающей трубы.

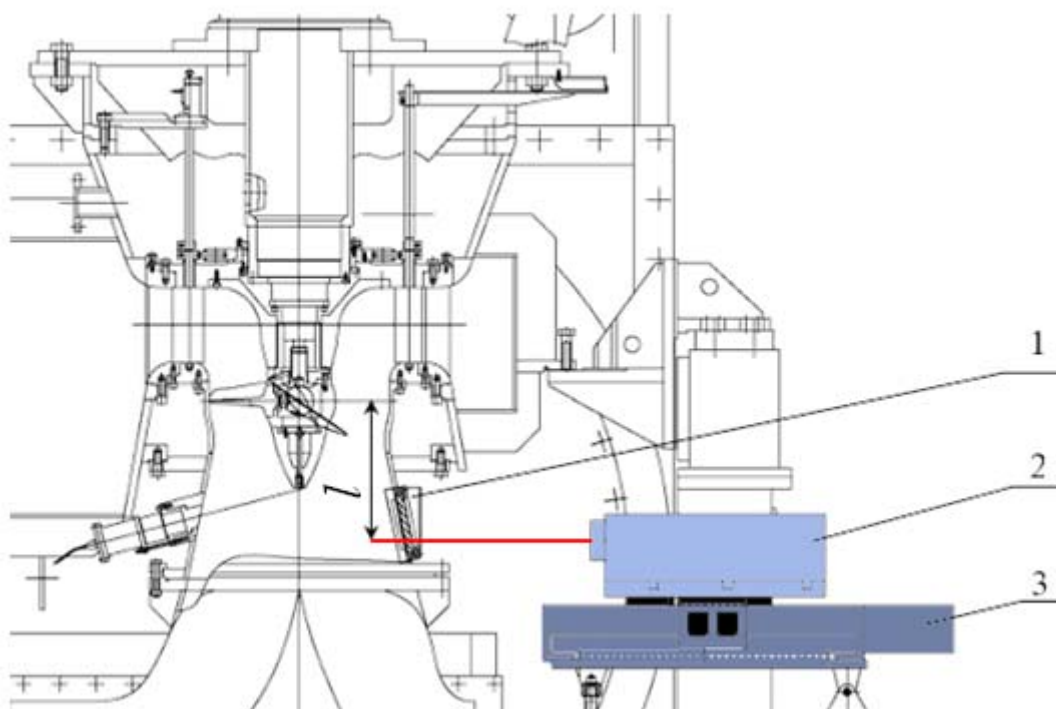


Рис. 7. Схема экспериментальной установки. 1 – иллюминатор, 2 – 3D ЛДА, 3 – координатно-перемещающее устройство, l – расстояние от оси поворота лопастей до оптической оси ЛДА ($l = 0.291\text{ м}$)

Изучено влияние отклонения оптической оси прибора относительно нормали границы раздела фаз воздух-стекло-вода в зависимости от угла. Показано, что при отклонении оптической оси прибора от нормали на 8 градусов и заглублении зондирующего оптического поля на 150 мм в воду происходит ослабление сигнала от ЛДА практически до нуля. Для решения этой проблемы предложен методика проведения эксперимента с использованием иммерсионного контейнера (рис. 8).

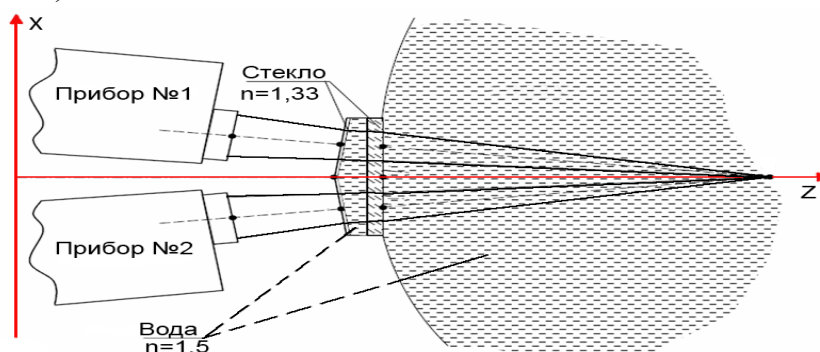


Рис. 8. Позиционирование ЛАД-056 относительно иммерсионного контейнера.

В работе показано, что применение иммерсионного контейнера позволило увеличить глубину проникновения в поток с 150 до 506.8 мм (полный диаметр сечения потока). Это позволило провести натурный эксперимент - диагностику 3D профилей скорости в конусе отсасывающей трубы гидротурбины.

Исследовано распределение полученных 3D профилей скорости в конусе отсасывающей трубы модели гидротурбины с использованием коммутационной лазерной полупроводниковой анемометрии. Окружная скорость (V_θ) всюду, от стенки ($r/R=-1$) до центра окружности ($r/R=0$) имеет один знак, т. е. жидкость вращается всюду в сторону вращения рабочего колеса (рис. 9). На оси конуса имеется зона резкого линейного изменения окружной скорости, что свидетельствует о наличии крупного вихря с вертикально расположенной осью, вращающегося в сторону вращения рабочего колеса. Распределение осевой скорости (V_x) на большей части радиуса равномерное, за исключением небольшой зоны вблизи оси, где наблюдается подъем значения скорости к нулевой отметке, т.е. происходит торможение потока за обтекателем и даже, для некоторых режимов работы гидротурбин, смена знака на противоположный (противоток). Отсасывающая труба гидротурбины слабо конична (расширяется книзу), и это влечет за собой возникновение слабого радиального движения. На середине радиуса имеется область, где радиальная скорость отрицательна $V_r < 0$, а жидкость течет к центру конуса. На графике значения скорости нормированы на среднерасходную скорость для данного режима (составляет 4,1 м/с).

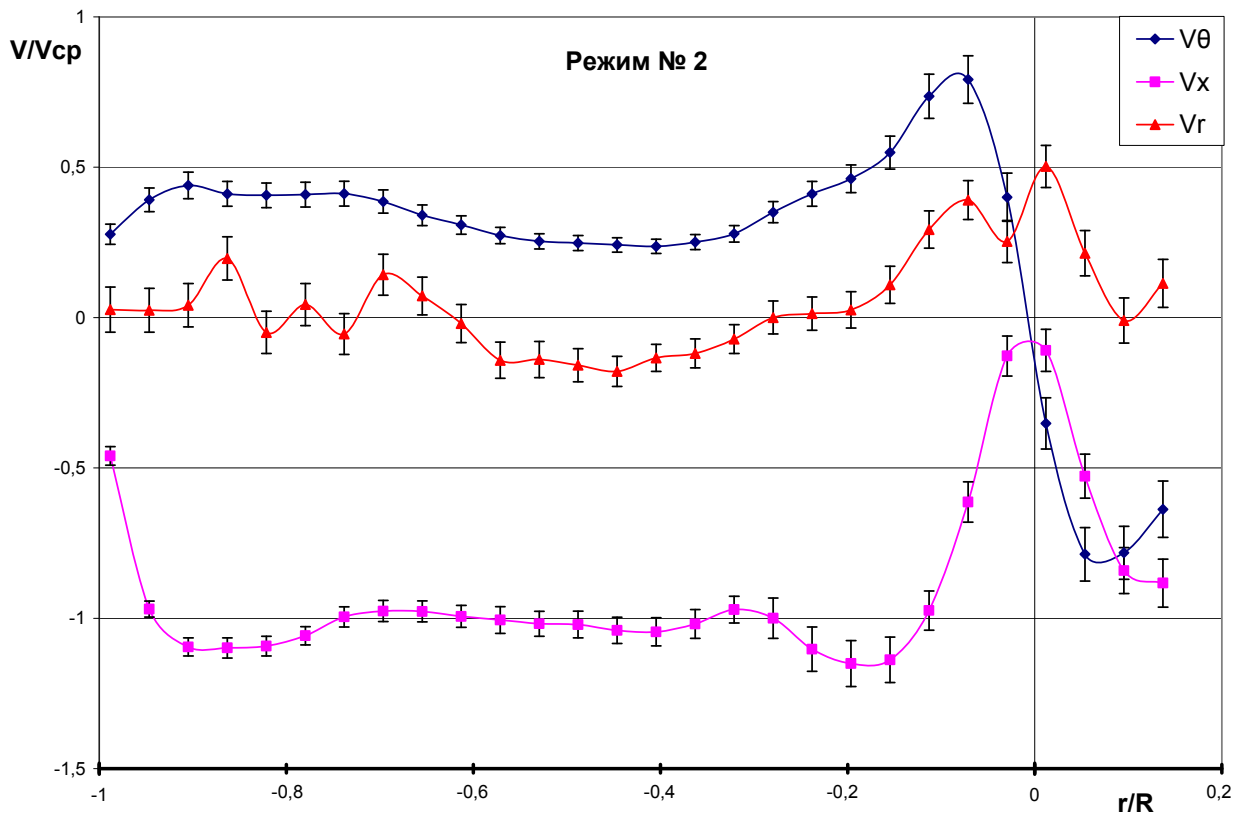


Рис. 9. Распределение нормированных компонент скорости потока вдоль радиуса для одного из режимов работы гидротурбины.

Впервые количественно диагностированы относительно малые значения радиальной компоненты скорости, необходимые для модернизации отсасывающих труб на современном этапе развития турбомашиностроения при помощи коммутационных полупроводниковых 3D ЛДА.

По полученным в работе данным были построены поля 3D векторов скорости течения в конусе отсасывающей трубы гидротурбины для каждого режима работы гидротурбины (Рис. 10,*a*).

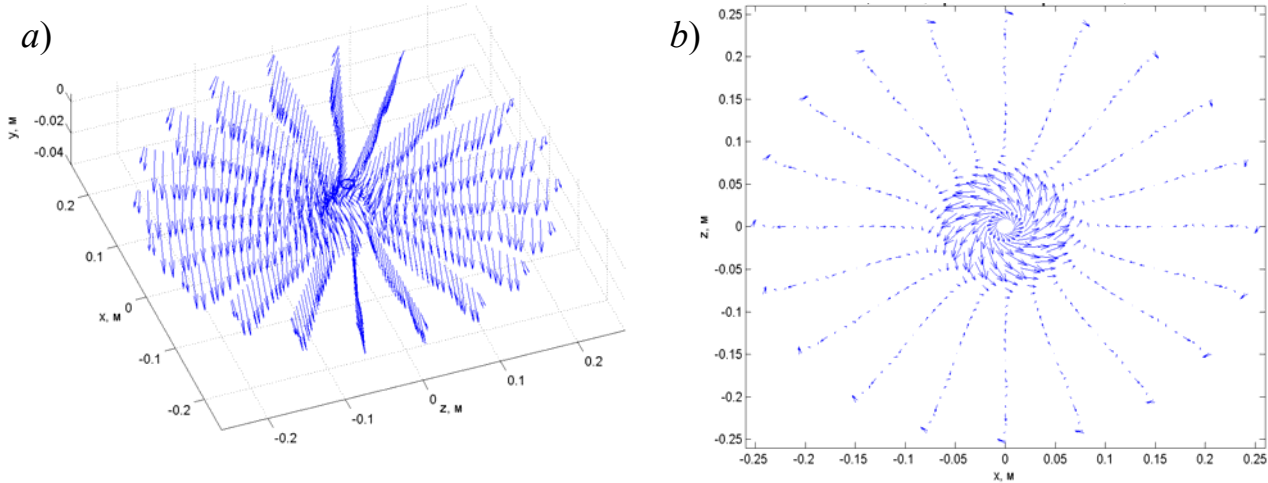


Рис. 10. Поле 3D векторов скорости (*a*) и проекция 3D векторов скорости (*b*) для одного из режимов работы гидротурбины.

Использовалось представление во вращающейся системе координат проекции поля 3D векторов скорости в плоскости ортогональной оси вращения турбины для выделения малой радиальной компоненты и центрального вихря (рис. 10,*b*).

По распределению окружной скорости были определены параметры центрального вихря (табл. 2). Область линейного изменения окружной скорости, соответствует ядру вихря (при r/R близком к нулю), где жидкость вращается как твердое тело. Область ядра вихря имеет четкие границы. Диаметры ядер вихрей определялись как расстояния между точками, в которых прекращается линейное изменение окружной скорости. Результаты измерения профилей скорости позволили обнаружить невизуализируемый ранее центральный вихрь и определить его параметры.

Таблица 2

№ режима	Приведенная частота n_{11} , об/мин	Приведенный расход Q_{11} , м ³ /с	Диаметр ядра d_{Γ} , мм	Скорость v_{Γ} , м/с	Интенсивность Γ , м ² /с	ΔQ , %
1	130	1.73	31	2.95	0.29	0.02
1-1	130	1.73	47	3.4	0.50	0.3
2	145	1.94	37	3.7	0.43	0.7
2*	150	1.96	68	3.3	0.70	1.0
3	122	1.63	42	3.2	0.42	-0.3

Значения интенсивности Γ центральных вихрей определены на основании экспериментальных данных по формуле: $\Gamma = \pi \cdot d_{\Gamma} \cdot v_{\Gamma}$, где d_{Γ} – диаметр ядра вихря, (м), v_{Γ} – среднее арифметическое абсолютных значений окружной скорости на левом и правом концах диаметра ядра вихря. ΔQ – относительное

отклонение расхода, полученного путем интегрирования осевой компоненты скорости вдоль радиуса, от расхода, полученного путем прямых замеров.

По результатам эксперимента показано, что наибольшей интенсивностью обладает вихрь, образующийся в режиме № 2*. Значения скорости v_T меньше среднерасходной только на 20-30 % для каждого из режимов работы гидротурбины.

Экспериментально показано, что для всех испытаний значения объемного расхода определенные по результатам измерения при помощи 3D ЛДА, отличаются от протокольных значений (по расходомеру Вентури) не более чем на 1%. Это говорит о высокой достоверности полученных результатов.

Посредством диагностики 3D профилей скорости с использованием коммутационной лазерной полупроводниковой анемометрии были получены и проанализированы экспериментальные данные о течении в отсасывающей трубе за моделью РК ПЛ 30-46 на разных режимах работы. Полученные данные были сопоставлены для различных режимов работы гидротурбины и даны рекомендации производителю по оптимальному использованию режимов данной гидротурбины.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Впервые осуществлены натурные измерения 3D профилей скоростей в конусе отсасывающей трубы поворотно-лопастного рабочего колеса гидротурбины при помощи коммутационной полупроводниковой лазерной доплеровской анемометрии. Обнаружен режим с развитым трехмерным приосевым вихрем, который ранее не определялся визуализацией. По результатам измерений получены его интегральные характеристики, знание которых позволяет повысить эффективность и безопасность работы гидроагрегата.
2. При помощи разработанного метода синхронизации коммутационных полупроводниковых ЛДА диагностированы относительно малые значения радиальной компоненты скорости, необходимые для модернизации отсасывающих труб на современном этапе развития гидротурбостроения.
3. Развита методика синхронизации коммутационных доплеровских систем, обеспечившая повышение точности временной привязки лазерных измерительных систем при измерениях трех компонент скорости в многофазных средах.

СПИСОК ОСНОВНЫХ НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. V. Meledin, Yu. Anikin, G. Bakakin, V. Glavniy, S. Dvoinishnikov, D. Kulikov, I. Naumov, V. Okulov, V. Pavlov, **V. Rakhmanov**, O. Sadbakov, N. Mostovskiy and S. Ilyin, "Laser Doppler semiconductor anemometry of vortex flow behind the vane wheel rotor of the water turbine" // Proc. SPIE 6262, 2006. - P. 123-133.

2. **Рахманов В.В.**, Бакакин Г. В., Главный В. Г., Меледин В.Г., Наумов И.В. Управляемый высоковольтный стабилизированный источник питания фотоэлектронного умножителя // Приборы и техника эксперимента, 2006.– № 5. – С. 90-92.
3. **Рахманов В.В.**, Главный В.Г., Бакакин Г.В., Меледин В.Г., Садбаков О.Ю.. Модуль предварительной обработки сигналов для теплофизических экспериментов // Приборы и техника эксперимента, 2007. – № 2. – С. 166-167.
4. Kabardin I. K., Meledin V. G., Eliseev I. A. and **Rakhmanov V. V.** Optical measurement of instantaneous liquid film thickness based on total internal reflection // Journal of Engineering Thermophysics, 2011. - Vol. 20. - No. 4. - P. 407-415.
5. Кабардин И.К., **Рахманов В.В.**, Меледин В.Г., Елисеев И.А., Двойнишников С.В. Модифицированный абсорбционный оптический метод диагностики волновой пленки жидкости на вращающейся поверхности // Теплофизика и аэромеханика, 2012 - Т. 19. - № 1. С. 89-95.
6. И.В. Наумов, **Рахманов В.В.**, Окулов В.Л., Велте К.М., Майер К.Е., Миккельсен Р.Ф. Диагностика течения за моделью ротора трехлопастной турбины // Теплофизика и аэромеханика, 2012. – Т. 19. - № 3. - С. 267-278.

Патенты:

7. Куликов Д.В., Двойнишников С.В., Аникин Ю.А. Меледин В.Г., Наумов И.В., Кротов С.В., Главный В.Г., **Рахманов В.В.**, Бакакин Г.В., Павлов В. А., Шпольвинд К.В., Кабардин И.К., Чубов А.С. Лазерное устройство для измерения воздушного зазора электрической машины / Заявка на патент РФ №2011128566, приоритет от 08.07.2011 г. Получено решение о выдаче патента на изобретение от 22.06.2012.

Другие публикации:

8. 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. 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.
9. Меледин В. Г., **Рахманов В.В.**, Аникин Ю. А., Бакакин Г.В., Главный В.Г., Двойнишников С.В., Куликов Д.В., Наумов И. В., Окулов В. Л., Павлов В.А., Садбаков О.Ю., Шархов А.С. Лазерная доплеровская измерительная система для 2D диагностики газожидкостных потоков ЛАД 05 // 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. 343-344.
10. **Рахманов В.В.**, Садбаков О.Ю. Расширение динамического диапазона доплеровского сигнала при исследовании многофазных гидродинамических потоков // Оптические методы исследования потоков: Труды 8-й международной научно-технической конференции. М.: Изд. МЭИ, 2005. - С. 92-93.
11. **Рахманов В.В.**, Садбаков О.Ю., Аникин Ю.А. Метод синхронизации данных для диагностики трех компонент скорости гидродинамических потоков // Материалы IX Всероссийской школы-конференции молодых ученых “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики”: ИТ СО РАН , Новосибирск, 2006. - С. 99-100.
12. **Рахманов В.В.**, Двойнишников С.В., Главный В.Г. Метод асинхронной передачи данных в лазерном доплеровском измерителе скорости для гидродинамических исследований // Там же. - С. 35-36.

13. 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., **Рахманов В.В.**, Садбаков О.Ю., Шархов А.С. Лазерная доплеровская измерительная система для 3D диагностики многофазных газожидкостных потоков ЛАД 056 // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т.8: Сборник трудов Третьей международной научно-практической конференции "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности". СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – С. 110-114.
14. **Рахманов В.В.**, Садбаков О.Ю. Метод двусторонней синхронизации данных для диагностики трех компонент скорости гидродинамических потоков // Оптические методы исследования потоков: Труды IX Международной научно-технической конференции. М.:Изд. МЭИ, 2007.- С. 248 – 251.
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. Диагностика 3D профилей скорости в конусе отсасывающей трубы гидротурбины с использованием коммутационной лазерной полупроводниковой анемометрии // Там же.- С. 378-381.
16. Куликов Д.В., Аникин Ю.А., **Рахманов В.В.**, Главный В.Г., Двойнишников С.В. Исследование течения жидкости в модели тепловыделяющей сборки методами лазерной анемометрии // Там же. - С 75-76.
17. Куликов Д.В., Меледин В.Г., Прибатурин Н.А., Аникин Ю.А., Главный В.Г., Двойнишников С.В., Павлов В.А., **Рахманов В.В.** Визуализация горизонтальной структуры закрученного течения жидкости в модели тепловыделяющей сборки энергетического реактора // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т. 13: Сборник трудов Пятой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – С. 207-209.
18. **Рахманов В.В.**, Кабардин И.К., Шпольвинд К.В. Видеоэндоскопическая система визуализации гидродинамических потоков // X Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидродинамики». Новосибирск, ИТ СО РАН, 2008. – С. 119-120.
19. Куликов Д.В., Аникин Ю.А., Бакакин Г.В., Главный В.Г., Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Наумов И.В., **Рахманов В.В.**, Павлов В.А. Пространственная адаптация лазерных модулей 3D анемометра при исследованиях потоков в каналах авиационных двигателей // Высокие технологии, исследования, промышленность. Т. 1: сборник трудов Девятой международной научно-практической конференции “Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности”. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С. 364-365.

Подписано к печати 13 сентября 2012 г. Заказ № 46
Формат 60/84/16. Объем 1 уч.-изд. лист. Тираж 100 экз.

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