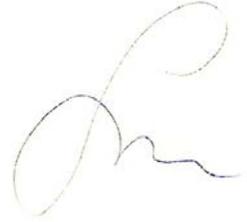


На правах рукописи



Белоусов Андрей Петрович

**РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛОКАЛЬНОЙ И ПОЛЕВОЙ  
ДИАГНОСТИКИ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Новосибирск – 2017

**Работа выполнена** в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный консультант – профессор, доктор физико-математических наук  
**Борыняк Леонид Александрович**

Официальные оппоненты: **Айрапетян Валерик Сергеевич**  
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», заведующий кафедрой «Специальные устройства и технологии»  
**Герасимов Сергей Иванович**  
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой «Строительная механика»  
**Корольков Виктор Павлович**  
доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

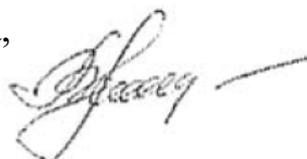
Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Защита состоится « 26 » декабря 2017 г. в 14 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.173.08 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru).

Автореферат разослан «    » ноября 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

 В. В. Вихман

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена разработке, исследованию и применению новых оптических систем диагностики (диапазон излучения 380-780 нм), многофазных потоков. По совокупности таких характеристик как точность, временное и пространственное разрешение, габариты, программный сервис и возможность работы в реальном времени разработанные системы существенно отличаются от применявшихся ранее. Они позволяют исследовать основные параметры газожидкостных потоков в реальном времени, автоматизировать процесс сбора и обработки экспериментальных данных.

*Актуальность темы.* Многие современные технологии тепловой и атомной энергетики, химического производства, трубопроводного транспорта основаны на использовании многофазных потоков. Интенсивное развитие этих технологий приводит к *проблеме совершенствования методов диагностики параметров многофазных потоков.* Наибольший интерес вызывают современные оптические методы. Преимущества очевидны: бесконтактность, скорость сбора информации, доступность панорамных и локальных методов. Однако практическая реализация оптической диагностики затруднена большим количеством границ раздела фаз, высокой концентрацией включений. Поэтому разработка и развитие оптических систем диагностики многофазных потоков является актуальной задачей.

*Степень разработанности темы.* Оптические методы диагностики двухфазных потоков являются высокоточными способами качественного и количественного определения основных параметров данного типа течений (скорость, размер и пространственное распределение фаз). Основы прямых измерений геометрических параметров частиц дисперсной фазы связаны с разработкой микроскопа И. Липперсгеем и З. Янсенем (1590). На развитие методических и аппаратных средств метода существенное влияние оказали работы Ф. Шмидта, К. Шмидта, Х. Фиссана, Мак Крона. К 1997 году были созданы популярные коммерческие системы измерения размеров частиц, такие как The American Innovation Videometric 150, VIDS V, Artek Omnicon 3600, VIA-20, 50, 100, Buehler Omnimet II, Compix C-Imaging 1280 System, Global Lab Image, Hitech Olympus Cue-3, Joyce Loebel Magiscan, AMF-100, Leica Quantimet 500, LeMont Oasys, Millipore  $\mu$ MC System, Nachet 1500, Nikon analytical microscopy workstation Microphot SA, Optomax V, TN-8500 Image Analysis System, Danfoss QueCheck Vision System. В настоящее время микроскопия часто используется как абсолютный метод анализа размеров частиц. Измерение

средней локальной концентрации фаз в газожидкостных потоках с высоким содержанием дисперсной фракции часто осуществляется с применением оптических зондов, где для передачи информации из исследуемой области потока в область фотоприемника используется волоконный световод. Такие системы разрабатывались Миллером и Митчи, Хинатой, Дэлэ, Пауэллой, В. Е. Накоряковым, О. Н. Кашинским, А. Р. Евсеевым. Работа метода основана на измерении интенсивности света, отраженного от торца световода, помещенного в поток. Коэффициент отражения зависит от того, находится ли датчик в жидкой или газовой фазе. Измерение скоростей фаз осуществляется двумя методами: доплеровским и корреляционным. Первый – основа лазерных доплеровских анемометров (ЛДА) – базируется на эффекте Доплера (смещение частоты излучения (электромагнитного, акустического) при относительном движении приемника и передатчика) (1842). Разрабатывался рядом российских и зарубежных исследователей Ю. Н. Дубнищевым, Б. С. Ринкевичюсом, С. Тропеа, Е. Мюллером, С. Нобахом и др. (1975-2011). Доплеровский метод измерения скорости реализован в системах TSI LDV System 1, 2, 3 – COMPONENT, Dantec Dynamic FiberFlow, FlowLite, FlowExplorer LDA Systems, 2D-ЛДА ABC, ЛАД-0566 ЛАД-079 и т.д. Второй метод основан на корреляционном анализе изображений трассеров (мелких частиц, добавляемых в поток) в двух кадрах, снятых с небольшой временной задержкой (М. Раффел, С. Виллерт, Й. Компенханс, Д. М. Маркович и др.), и широко применяется в настоящее время для измерения полей скоростей фаз. Реализован в системах Dantec Dynamics 2D/2D stereoscopic PIV, Volume mapping PIV (Particle Image Velocimetry), Volumetric Velocimetry, Multiphase Flow, Time Resolved PIV, LaVision PIV, TSI PIV Systems, автоматизированном комплексе диагностики одно- и двухфазных течений жидкости и газа ПОЛИС (1995-2011).

Перенос изображения из области исследования в область регистрации – основа методов визуализации течений. В системах с большим числом границ раздела часто используется метод оптической однородности, предложенный в 1884 году Х. Кристиансенем при исследовании прозрачности материалов. Для изучения течения в многофазной среде впервые применен В. Джонстоном, А. Диббсом и Р. Эдвардсом. Дальнейшее развитие получил в работах Т. Вонка, Дж. М. Бернарда, Р. М. Ли, С. П. Уонга, В. И. Волкова, В. Е. Накорякова, А. Р. Евсеева.

Ввиду ряда причин на момент начала исследования в распоряжении специалистов по гидромеханике многофазных сред практически отсутствовали диагностические комплексы, позволяющие осуществлять полевую диагностику

многофазных течений с определением размеров и пространственного распределения дисперсной фазы, а также скорости фаз). Возможность качественного улучшения используемых систем наступила в 90-е годы прошлого столетия с развитием вычислительной и фотографической техники, позволяющей фиксировать, хранить и обрабатывать большие массивы данных.

Работа по теме диссертации начата автором в 1999-2001 годах. Были приняты во внимание: а) необходимость высокоточной локальной и полевой диагностики течений для построения, оптимизации моделей взаимодействия фаз; б) необходимость в обновлении имеющегося в гидродинамических лабораториях приборов диагностики многофазных течений; в) широкое распространение вычислительной и детектирующей излучение техники, а также средств регистрации изображений на их основе; г) необходимость расширения области применения существующих диагностических средств на двухфазные течения в сложных геометрических условиях. Вышесказанное позволяет сделать вывод о том, что работа по теме диссертации является своевременной и актуальной.

На фоне видимых преимуществ оптических методов диагностики многофазных потоков проявились и их существенные недостатки: наличие засветки, вызванной большим количеством границ раздела, что ухудшает качество изображения; отсутствие алгоритмов коррекции изображения и получения информации о размерах и пространственном положении дисперсной фазы; низкое временное разрешение PIV систем. Поэтому *исследовательская* часть диссертации ориентирована на поиск способов снижения влияния указанных негативных факторов на качество получаемой информации и создание новых алгоритмов ее обработки. Это потребовало разработки новых оптических систем диагностики с развитым программным сервисом. *Прикладная* часть диссертации посвящена применению разработанных комплексов для диагностики широкого класса газожидкостных потоков (пузырьковых, газокапельных, пленочных).

Благодаря методической поддержке и участию в работе д. т. н. Л. И. Мальцева и д. ф.-м. н. А. Р. Евсеева (ИТ СО РАН, г. Новосибирск) был проведен первый цикл работ по созданию и применению оптоволоконных систем для исследования газонасыщенного пограничного слоя со снижением сопротивления. Д. т. н. А. Р. Богомолов (ИТ СО РАН, г. Новосибирск) поставил задачу изучения гидродинамической структуры течения при обтекании точек контакта элементов шаровой засыпки. Д. ф.-м. н. А. Р. Евсеев рассмотрел возможности применения эндоскопической техники для

исследования двухфазных течений в труднодоступных местах. Чл.-корр. Д. М. Маркович (ИТ СО РАН, г. Новосибирск) поставил задачу расширения функциональности стандартных PIV систем и их применения в диагностике пленочных, пузырьковых, газокапельных потоков. Создание, тестирование и применение систем выполнены при содействии и участии чл.-корр. Д. М. Марковича, к. т. н. П. Я. Белоусова, д. ф.-м. н. А. Р. Евсеева, д. т. н. Л. И. Мальцева, инж. В. Л. Долматова, к. т. н. В. Н. Васечкина, к. ф.-м. н. А. В. Бильского (ИТ СО РАН, г. Новосибирск). Автор выражает им искреннюю благодарность.

Научные направления, рассмотренные в диссертации, связаны с разработкой, совершенствованием и обоснованием функциональных возможностей оптических систем диагностики многофазных потоков, позволяющих получить важную информацию о локальной и полевой структуре течений в системах тепломассообмена, в химических, биологических, ядерных реакторах, необходимую для создания, оптимизации и повышения эффективности ряда промышленных устройств, используемых в промышленности Российской Федерации.

*Цель диссертации* – разработка, исследование и совершенствование оптических систем локальной и полевой диагностики газожидкостных потоков.

Для достижения этой цели решались следующие *задачи*:

- аналитический обзор современного состояния и перспектив развития локальной и полевой диагностики двухфазных потоков;
- разработка и исследование систем локальной диагностики, включая новые алгоритмы обработки оптической информации для определения скорости и размеров элементов частиц дисперсной фазы;
- разработка и совершенствование систем полевой диагностики, включая алгоритмы расчета энергетических свойств крупномасштабных вихревых структур, пространственного распределения и геометрических параметров дисперсной фазы;
- решение технических проблем, накладывающих ограничения на точность и доступность систем локальной и полевой диагностики, включая устранение дисторсии, определение пространственной локализации прозрачных границ раздела фаз с различными показателями преломления;

- создание технических средств для достижения поставленной цели и апробация действующих образцов для решения актуальных задач гидромеханики.

*Объект и предмет исследования.* При разработке оптических систем диагностики газожидкостных потоков объектами исследования являлись новые методы и процессы, которые могут быть положены в основу создания оптических и оптико-электронных систем и комплексов, а также характеристики приборов, систем и комплексов, использующих электромагнитное излучение оптического диапазона волн, предназначенных для решения задач измерения геометрических и физических величин, исследования и контроля параметров различных сред и объектов, в том числе при решении технологических задач передачи, приема, обработки и отображения информации, создания оптического и оптико-электронного оборудования для научных исследований и различных областях науки и техники. Предметом исследования является отражение и преломление оптического излучения границами раздела светопрозрачных фаз в газожидкостных потоках и применение разработанных теоретических моделей для создания локальных и полевых систем диагностики газожидкостных течений.

*Научная новизна.* Новыми результатами диссертации являются:

- модель отражения и преломления гауссова пучка границами раздела фаз для оптического волоконного зонда. Разработанный в рамках модели алгоритм обработки сигнала, позволяющий определять размер дисперсной фазы до момента контакта оптического волокна с дисперсной фазой;
- модель отражения и преломления гауссова пучка границами раздела фаз в схеме ЛДА с опорным пучком. Разработанный в рамках модели алгоритм обработки сигнала, позволяющий определять скорость и размер дисперсной фазы;
- модель отражения и преломления когерентного оптического излучения границами раздела фаз в схеме ЛДА с опорным пучком. Разработанный в рамках модели алгоритм определения скорости движения границ раздела фаз, дающий возможность исследовать динамику дисперсной фазы в потоке;
- модель отражения оптического излучения в дифференциальной схеме ЛДА дисперсной фазой (газовые пузырьки, капли жидкости) в газожидкостных потоках. Разработанный в рамках модели алгоритм определения скорости и размера дисперсной фазы;

- компенсация пространственных искажений, возникающих при переносе изображения в системах, состоящих из стеклянных шаров;
- модель отражения и преломления диффузного излучения границами раздела фаз. Разработанный в рамках модели способ определения геометрических параметров дисперсной фазы в газожидкостных потоках, а также ее пространственного распределения;
- методы, расширяющие функциональные возможности PIV систем в области диагностики многофазных потоков.

Оригинальность полученных решений подтверждена публикациями в журналах из перечня ВАК, международными патентами.

*Теоретическая и практическая значимость работы.*

Разработан и создан ряд локальных и полевых (по области выборки информации) оптико-электронных систем диагностики многофазных течений по совокупности характеристик, превосходящих применявшиеся ранее. Показана их применимость для диагностики многофазных течений.

Предложена аналитическая модель отражения и преломления гауссова пучка границами раздела фаз для оптического волоконного зонда. Разработан и апробирован алгоритм обработки сигнала, позволяющий определять размер дисперсной фазы до момента контакта оптического волокна с дисперсной фазой.

Предложена модель отражения и преломления гауссова пучка границами раздела фаз в схеме ЛДА с опорным пучком. Создан алгоритм обработки сигнала, позволяющий определять скорость и размер дисперсной фазы. Разработана и апробирована оптическая система диагностики газожидкостных потоков.

Предложена модель отражения и преломления когерентного оптического излучения границами раздела фаз в схеме ЛДА с опорным пучком. В рамках модели разработан алгоритм определения скорости движения границ раздела фаз, дающий возможность исследовать динамику дисперсной фазы в потоке.

Предложена модель отражения оптического излучения в дифференциальной схеме ЛДА дисперсной фазой (газовые пузырьки, капли жидкости) в газожидкостных потоках. Разработан алгоритм определения скорости и размера дисперсной фазы.

Компенсированы пространственные искажения в оптических системах, состоящих из стеклянных шаров. Создана и апробирована оптическая система диагностики газожидкостных течений, проходящих через ряд слоев кубической упаковки шаров (шаровые засыпки).

Разработана модель отражения и преломления диффузного излучения границами раздела фаз. Предложен способ определения геометрических параметров и пространственного распределения дисперсной фазы в газожидкостных потоках.

Разработаны методы, расширяющие функциональные возможности PIV систем в области диагностики многофазных потоков.

Полезность решений зафиксирована в патентах и научных статьях.

Полученные опытные данные о диапазоне применимости оптических методов измерения скалярных и векторных параметров газожидкостных потоков, результаты тестовых и гидромеханических исследований могут быть полезны специалистам в соответствующих областях:

- модель отражения и преломления оптического излучения границами раздела фаз: разработка оптоволоконных систем диагностики многофазных потоков с высокой концентрацией дисперсной фазы, гидромеханика многофазных потоков;

- модель отражения и преломления оптического излучения границами раздела фаз в схеме ЛДА с опорным пучком: разработка и применение оптических доплеровских измерителей скорости в диагностике газожидкостных потоков, измерении параметров дисперсной фазы, изучении динамических явлений (колебание границ раздела, деформация пузырька и т.д.)

- модель отражения оптического излучения границами раздела фаз в дифференциальной схеме ЛДА: разработка и применение оптических доплеровских измерителей скорости в диагностике многофазных потоков, определении размера и скорости дисперсной фазы;

- компенсация пространственных искажений в системах, содержащих стеклянные шары: разработка оптических систем переноса изображения, разработка систем теплообмена;

- модель отражения и преломления диффузного излучения границами раздела фаз: системы освещения, разработка оптических методов диагностики потоков, информация о размере и пространственном распределении дисперсной фазы;

- методы диагностики газожидкостных течений системой PIV: теоретическая и экспериментальная гидромеханика многофазных течений.

*Методология и методы исследований.* В диссертационном исследовании использовалась широко представленная в научной и учебной литературе системная методология геометрической и волновой оптики. Основным методом является расчет оптической системы с последующей экспериментальной

проверкой на тестовых объектах и применением в реальных гидромеханических экспериментах. Результаты исследований, представленных в диссертации, получены с применением цифровой обработки сигнала. Программы создавались самостоятельно с использованием среды Microsoft Visual Studio C++. Результаты тестовых и физических экспериментов сравнивались с данными, полученными независимыми методами.

*Основные положения, выносимые на защиту:*

- 1) лазерная оптическая система на основе одномодового оптического волокна позволяет определить размер сферических газовых пузырьков диаметром (0,15–2) мм, движущихся близко к оси волокна с известной постоянной скоростью в оптически прозрачных средах с высокой концентрацией дисперсной фазы до момента контакта приемного торца световода с исследуемым объектом;
- 2) доплеровские технологии на основе методов когерентной оптики позволяют определить размер и компоненты скоростей границ (>50 мкм/с) пузырьков (капель) диаметром (~ 1 мм) в потоках с низкой концентрацией дисперсной фазы;
- 3) система, формирующая изображение области контакта элементов шаровой засыпки, состоящая из двух стеклянных шаров и корректирующей линзы, помещенной в плоскость промежуточного изображения и симметризирующей положение входного зрачка, позволяет получить угловое поле зрения до 69 градусов и остаточные пространственные искажения не выше 1%.
- 4) оптическая технология, основанная на корректном освещении светопрозрачных границ раздела фаз диффузными протяженными источниками излучения, позволяет формировать изображение, определять пространственное положение и геометрические параметры границ раздела фаз с относительной погрешностью, не превышающей  $1/d$ , где  $d$  – размер объекта на изображении в пикселах;
- 5) технология, использующая двумерные поля скорости, полученные корреляционным анализом пары изображений трассеров в потоке жидкости, зафиксированных через определенный интервал времени, позволяет определять пространственное положение, геометрические, энергетические и статистические свойства крупномасштабных (> 1 мм) вихревых структур

*Степень достоверности и апробация результатов работы.*

Физико-технические и технологические решения, положенные в основу созданных измерительных оптических систем и их частей, прошли многолетнюю экспериментальную и теоретическую проверку. Точность методов измерения и обработки экспериментальных данных подтверждена анализом погрешности измерений, повторяемостью результатов, выполняемых на разных объектах, в разное время, постановкой специальных тестовых экспериментов, сравнением с экспериментальными и теоретическими результатами других авторов.

Основные результаты работы регулярно обсуждались по месту выполнения и на семинарах Лаборатории физических основ энергетических технологий Института теплофизики СО РАН, докладывались на Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы использования Канско-Ачинских углей» (Красноярск, 2000 г.), 39 Международной студенческой конференции (Новосибирск, 2001 г.), VII, VIII Всероссийских конференциях молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидродинамики» (Новосибирск, 2002, 2004), V международном симпозиуме по PIV (Bussan, Korea, 2003), VII, VIII, IX, X, XI, XII международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011, 2013), международной конференции «СибОптика–2016».

*Внедрение результатов работы.* Система компенсации пространственных искажений в системах, содержащих стеклянные шары, применяется в производстве одноразовых эндоскопов: получены 2 патента на изобретение, научно-методические результаты диссертации используются в учебном процессе на факультете радиотехники и электроники при реализации основных образовательных программ кафедры общей физики НГТУ, на кафедре специальных устройств и технологий СГУГиТ, при проведении научных исследований в Институте химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН.

*Публикации.* Всего опубликовано 58 печатных работ, в том числе 40 по теме диссертации, из которых 15 научных статей в журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК для докторских диссертаций, 2 патента на изобретения, 20 работ в сборниках трудов международных конференций, 3 учебных пособия.

Все результаты, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии в ходе многолетней работы в Новосибирском государственном техническом университете и Институте теплофизики СО РАН. Представление в диссертации результатов,

полученных в совместных исследованиях, согласовано с коллегами, которым автор выражает благодарность за сотрудничество.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 160 наименований. Общий объем работы 220 страниц, включая 111 рисунков, 8 таблиц, 1 приложение.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

*Во введении* дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, определены цель, задачи исследований, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, изложено краткое содержание диссертации.

*В первой главе* представлен обзор публикаций по методам диагностики многофазных течений. Рассматривается используемая аппаратура, выявляются факторы, сдерживающие развитие и применение методов диагностики газожидкостных течений.

*Вторая глава* посвящена разработке оптической одноволоконной контактной системы для исследования динамики газожидкостных потоков с высоким содержанием межфазных границ раздела. Обычно такие устройства применяют при необходимости оценки средней концентрации по отношению времени нахождения датчика в газовой фазе ко времени измерения, а также размера пузырька по средней скорости потока и времени между проколом границ (времяпролетный метод). Связь сигнала с измеряемыми характеристиками осуществляется калибровкой на тестовых объектах. Автор предлагает использовать для реализации системы одномодовое волокно с источником когерентного излучения, сформировать в потоке гауссов пучок с известными характеристиками и измерить радиус кривизны ближайшей к волокну стенки пузырька. Скорость, необходимая для расчетов, определяется как независимо, так и по доплеровскому сдвигу частоты.

Для апробации была реализована оптоволоконная система, представленная на рисунке 1. Излучение He-Ne лазера ЛГ-79-1 (632.8 нм, 15 мВт) проходит через призму Волластона, при помощи юстировочного узла согласуется со штатным устройством ввода в одномодовое оптическое волокно с радиусом сердцевины 3.5 мкм и внешним диаметром 125 мкм. Для обеспечения жесткости в потоке волокно помещается в арматуру внешним диаметром 0.5 мм и, далее в оплетку ПВХ диаметром 0.8 мм. После отражения от границ раздела,

часть излучения возвращается обратно в волокно, отклоняется призмой, попадает на фотоприемник ФЭУ–146. Полученный электрический сигнал преобразуется в дискретную форму с использованием АЦП (SB Creative Audigy 2).

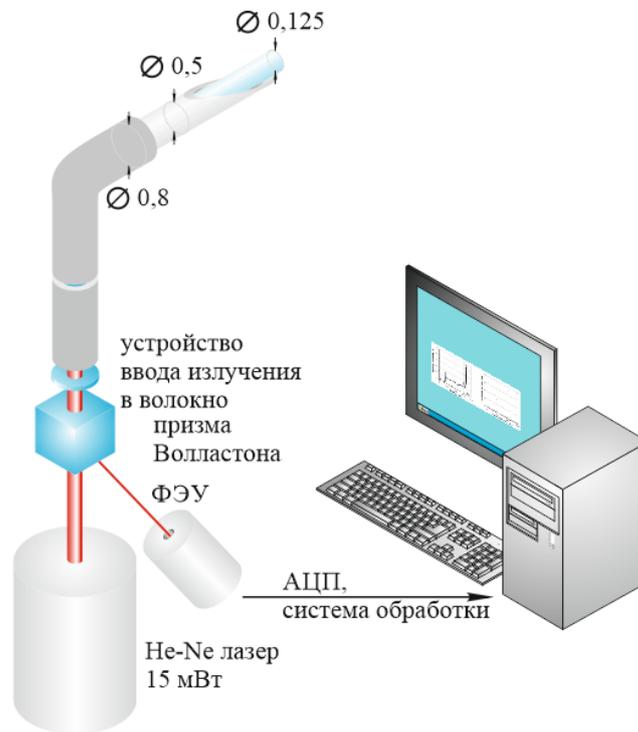


Рисунок 1 – Схема оптоволоконного зонда

Процесс взаимодействия зонда с границей раздела деформирует пузырь, что приводит к искажению результатов измерений, необходимости введения поправочных коэффициентов к данным, получаемым при помощи времяпролетного метода. Рассмотрение отражения и преломления гауссова пучка пузырьком газа методами матричной оптики (рисунок 2) позволяет создать математическую модель процесса.

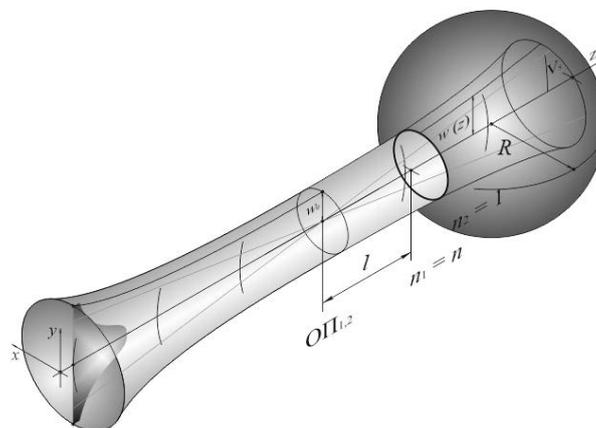


Рисунок 2 – Отражение и преломление гауссова пучка пузырьком газа

Существует два этапа: первый – от момента обнаружения пузырька системой до момента контакта с датчиком (рисунок 3а), второй – зонд в пузырьке.

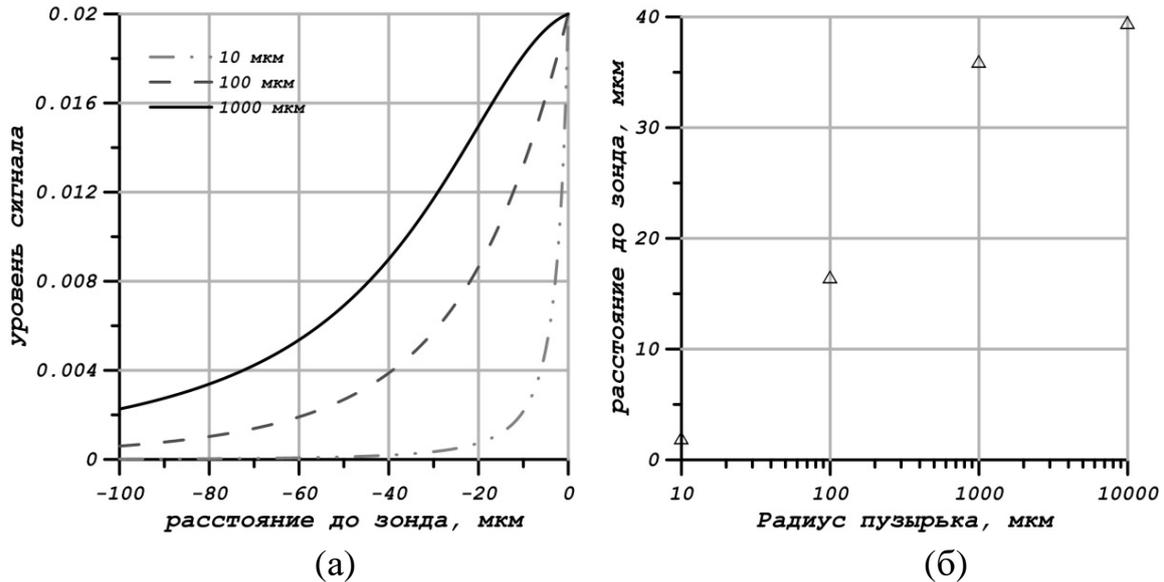


Рисунок 3 – Отражение гауссова пучка от передней границы раздела пузырька  
 (а) сигнал, формируемый передней границей раздела пузырька  
 (б) зависимость чувствительности от радиуса пузырька

Анализ полученной информации показывает, что первый этап может быть использован для получения информации о размере пузырька до момента контакта с зондом. На рисунке 3б приведена зависимость чувствительности (расстояния, на котором система начинает «видеть» пузырек) от радиуса пузырька. Уровень сигнала, по которому определяется чувствительность, составляет величину 0,01. Как показывают расчеты, чувствительность – однозначная функция радиуса, что может быть использовано для определения размеров пузырька.

На рисунке 4 приведен сигнал от газового пузырька, полученный при помощи оптоволоконной системы, представленной на рисунке 1. Проведем оценку диаметра пузырька по времени нахождения зонда в газовой фазе  $\Delta t \approx 0,5$  мс. Скорость потока жидкости  $V \approx 3,2$  м/с. Таким образом, размер пузырька  $d = V \cdot \Delta t = 1,7$  мм. Оценка диаметра с использованием нового алгоритма дает величину  $d \approx 1,7$  мм. Таким образом, с помощью независимых методов получены близкие значения диаметра частицы дисперсной фазы, что позволяет сделать вывод о возможности применения разработанной системы для

определения радиуса кривизны передней границы газового пузыря. Погрешность метода определяется параметрами цифрового сигнала.

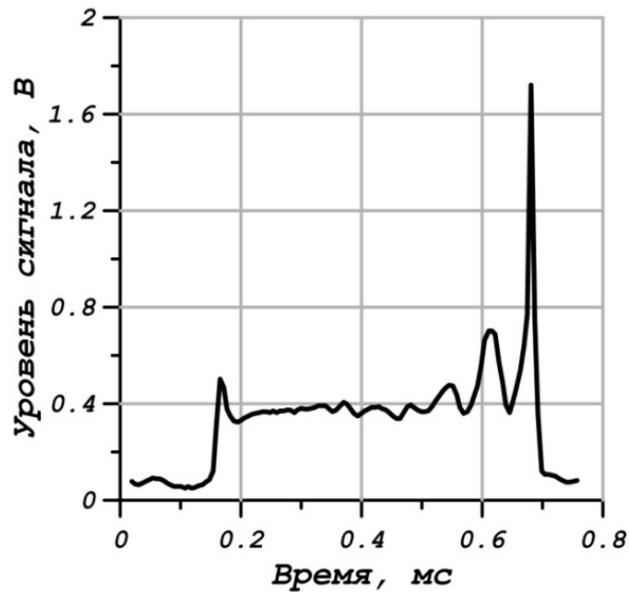


Рисунок 4 – Сигнал от газового пузырька

В третьей главе разрабатываются лазерные доплеровские технологии диагностики газожидкостных течений. Рассматриваются принципы формирования сигнала, методы определения скорости и размеров элементов дисперсной фазы. Подчеркивается, что основной проблемой, ограничивающей использование доплеровских систем в экспериментальной газожидкостной механике, является отсутствие корректных моделей отражения и преломления зондирующих гауссовых пучков границами раздела фаз. Проводится аналитическое рассмотрение проблемных вопросов и реализация полученных решений в известных схемах доплеровских измерителей скорости на обратном рассеянии. Основными результатами исследования являются:

1. Теоретическое обоснование полимодального характера доплеровского сигнала, с частотами, определяемыми динамикой дисперсной фазы. Реализована схема лазерного доплеровского анемометра с опорным пучком (рисунок 5). В качестве источника излучения применялся He-Ne лазер ГН–05 ( $\lambda = 632.8$  нм); параметры области измерения:  $d = 100$  мкм,  $l = 20$  мм; сигнал с фотоприемного устройства ФЭУ-31 подавался на АЦП (SB Creative Audigy 2), сохранялся в виде .wav файла и обрабатывался программными средствами, созданными с использованием пакета MS Visual Studio C++.

Доплеровский сдвиг частоты связан со скоростью движения границы раздела сред, как  $f_D = 2\pi \cdot \Delta k v_z$ , что составляет 3.16 МГц для воздуха и 4.2 МГц для воды ( $n = 1.33$ ). Тестирование теоретических предположений проводилось на экспериментальном стенде, в котором зондирующий лазерный пучок фокусировался в зону всплытия пузыря сквозь толстое плоскопараллельное стеклянное окно, наполовину затопленное в жидкость. Таким образом, всплывающий пузырь взаимодействовал с нижней поверхностью окна, изменяя свою форму. После остановки сплюснутый пузырь сползал на край пластины, и воздух выходил на свободную поверхность жидкости, а поверхность окна вновь смачивалась жидкостью. Диаметр воздушных пузырей варьировался от 2 мм до 4 мм.

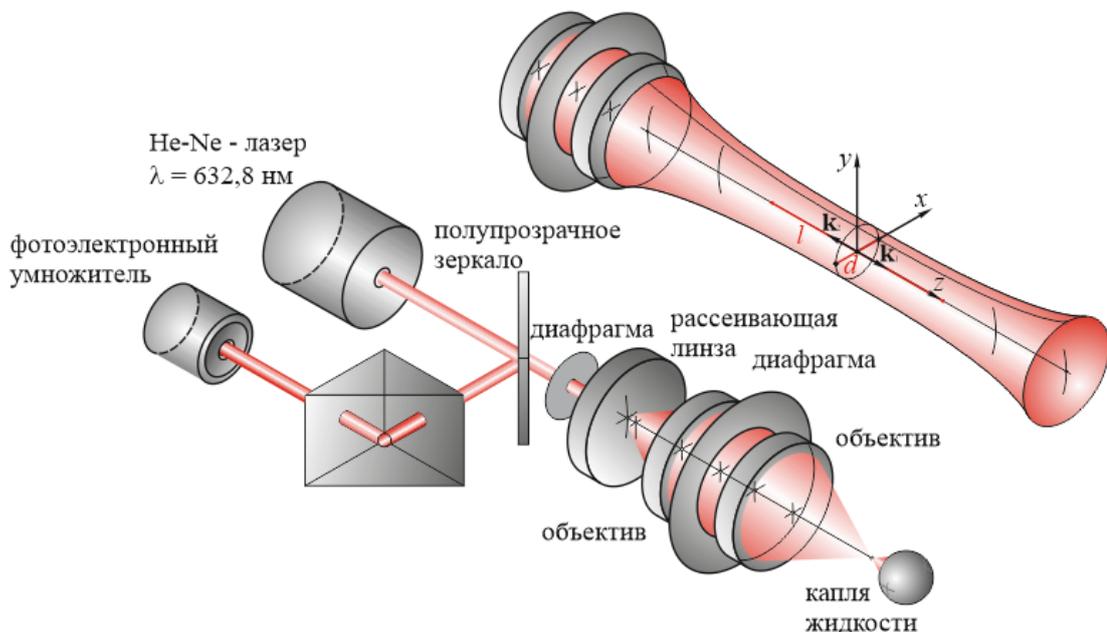


Рисунок 5 – Лазерный доплеровский измеритель скорости с опорным пучком

На рисунках ба и бб представлен доплеровский сигнал  $f(t)$  и зависимость скорости от времени  $V(t)$ , соответственно, для случая пузырька газа, всплывающего в вязкой жидкости, и взаимодействующего с горизонтальной стенкой. На рисунке ба видно, что после некоторого момента времени существует две доплеровские частоты. Одна частота пропорциональна скорости передней границы пузыря, а вторая зависит от скоростей передней и задней границ ( $V_1$  и  $V_2$ ). Разумно предположить, что скорость передней границы пузыря, обращённой к плоской стенке, будет меньше и уменьшится до нуля раньше, чем скорость задней границы раздела.

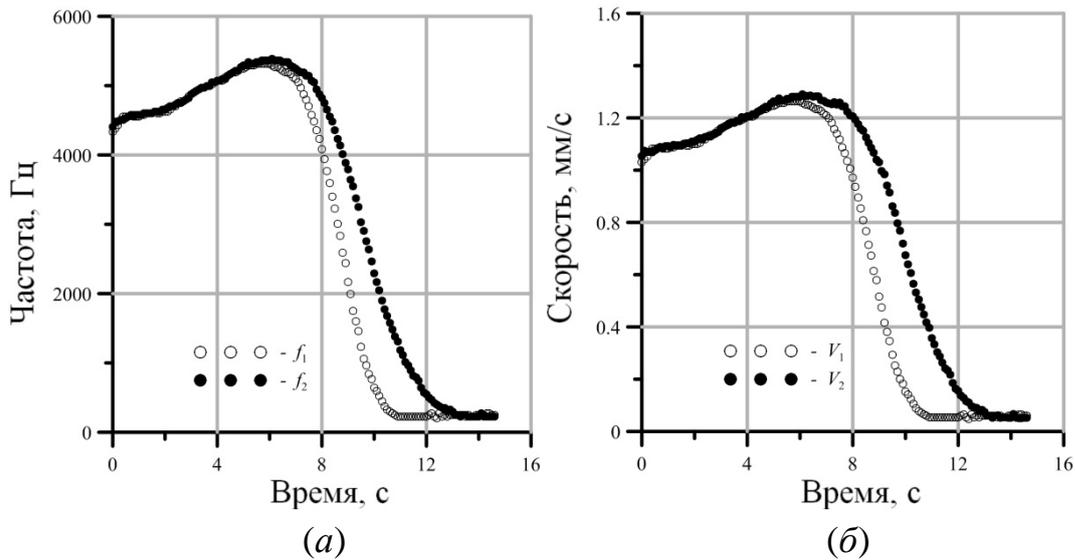


Рисунок 6 – Зависимость от времени частоты доплеровского сигнала (а) и скоростей передней и задней границ раздела (б)

Погрешность измерения скорости определяется характеристиками системы и параметрами цифрового сигнала.

2. Аналитическое моделирование отражения и преломления гауссова пучка каплями жидкости (пузырьками газа), показывающее наличие нескольких максимумов в сигнале на выходе фотоприемного устройства (Рисунок 5), положение которых определяется радиусами кривизны передней и задней границ раздела, а также показателем преломления  $n$  для пузыря (Рисунок 7).

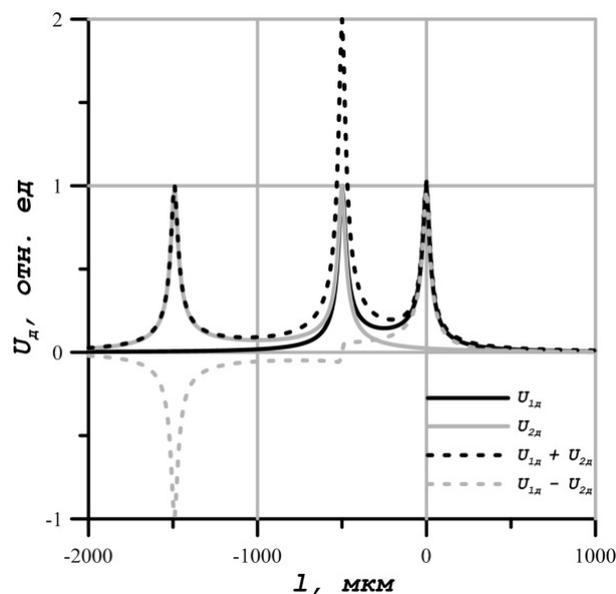


Рисунок 7 – Зависимость амплитуды доплеровского сигнала от положения капли в пространстве

Одновременное измерение скорости дает возможность определения геометрических параметров капли (пузырька) при прохождении через область перетяжки гауссова пучка. Результаты тестовых измерений приведены на Рисунках 8, 9. Отклонение от данных, полученных при помощи микрометра, находится в пределах 10%. Нижняя граница определяется качеством поверхности анализируемого объекта.

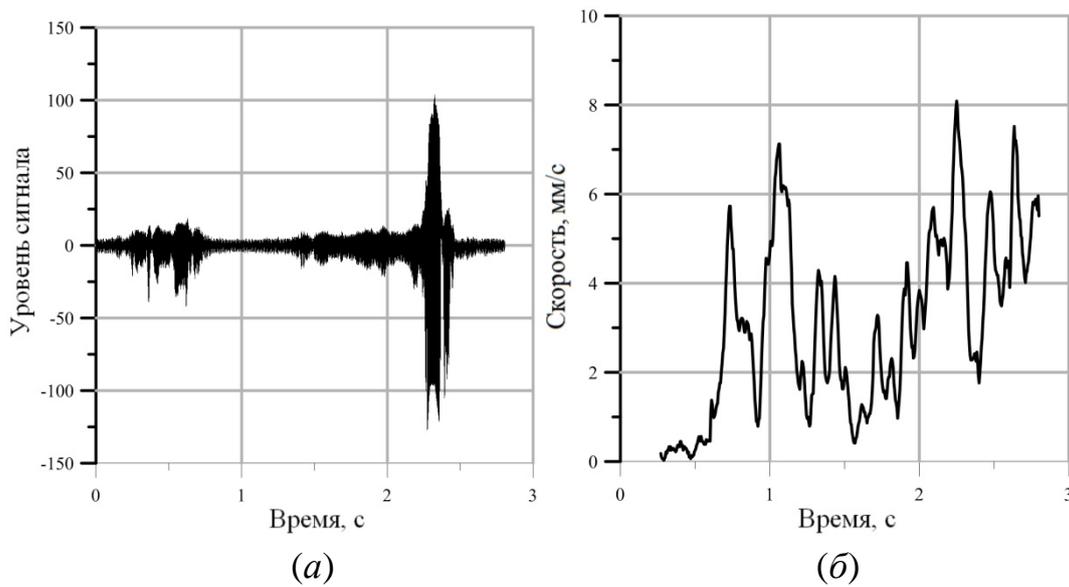


Рисунок 8 – Доплеровский сигнал от стеклянного шара радиусом 5 мм

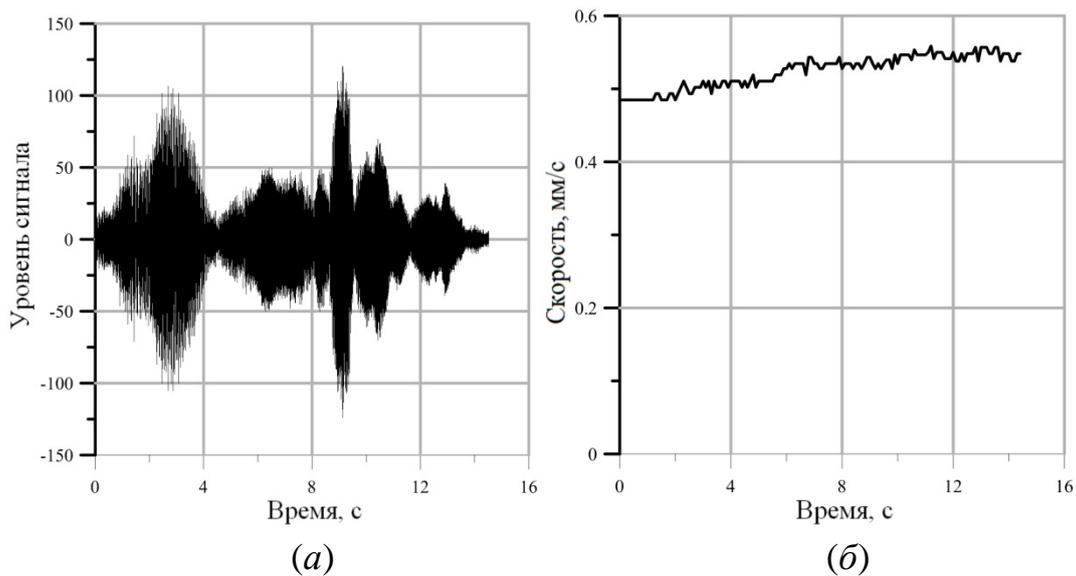


Рисунок 9 – Доплеровский сигнал от воздушного пузырька радиусом 3.3 мм

3. Аналитическое моделирование отражения гауссовых пучков пузырьками (каплями) жидкости, показавшее, что за счет колебаний пузырьков и капель на собственных частотах (формула Рэлея:  $\omega_l = \sqrt{\sigma l(l-1)(l+2) / \rho R^3}$ , где  $\sigma$  – поверхностное натяжение,  $R$  – радиус пузырька (капли),  $\rho$  – плотность жидкости,  $l$  – номер моды) к доплеровской частоте добавляются компоненты, смещенные на частоту собственных колебаний. Их число определяется отношением глубины частотной модуляции рассеянной волны к частоте собственных колебаний сферической границы раздела. Корректная обработка доплеровского сигнала позволяет получить информацию, как о скорости движения, так и о размерах дисперсной фазы.

Реализована дифференциальная схема доплеровского анемометра (Рисунок 10). Измерительная система содержала He-Ne лазер ЛГ-58-1 ( $\lambda = 632.8$  нм), акустооптический модулятор бегущей волны (МЛ-201, 80 МГц), зеркало с диафрагмами для отклонения рассеянного излучения и составной объектив ( $f = 500$  мм), формирующий измерительный объем с размерами ( $d = 50$  мкм,  $l = 1.5$  мм). Рассеянное пузырьком излучение поступало на фотоприемное устройство ФЭУ-146, демодулировалось, преобразовывалось АЦП (SB Creative Audigy 2). Полученный сигнал сохранялся в виде .wav файла и обрабатывался программными средствами, созданными с использованием пакета MS Visual Studio C++.

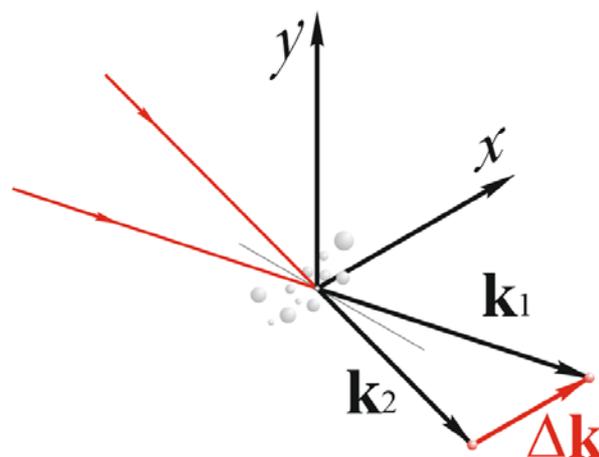


Рисунок 10 – Дифференциальная схема ЛДА

Доплеровский сдвиг частоты связан со скоростью движения границы раздела сред, как  $f_D = 2\pi \cdot \Delta k v_x$ , и составлял 140 кГц. Тестовые

измерения диаметров пузырьков, сидящих на линейке, показали, что погрешность диагностического метода не превышает 15% и, в случае использования гармоник с ( $l > 2$ ), может быть уменьшена до величины  $< 1\%$ . Важное свойство системы – отсутствие принципиальных ограничений размера исследуемых объектов.

В четвертой главе разрабатываются оптические системы полевой диагностики многофазных потоков. В первом параграфе представлены результаты исследования оптической системы переноса изображения в засыпках из шаровых элементов. Оптимизация теплообменников, конденсаторов требует изучения движения пленки жидкости в области контакта элементов шаровых засыпок. Стандартные подходы, заключающие в выравнивании показателей преломления жидкости и стекла, предложенные Х. Кристиансенем, в такой постановке неприменимы.

Была поставлена задача, заключающаяся в разработке оптической системы, состоящей из двух стеклянных шаров. Характерная для подобных систем бочкообразная дисторсия может быть компенсирована симметризацией положения входного зрачка при помощи коллектива с фокусным расстоянием  $f$ , помещенным в плоскость изображения (Рисунок 11).

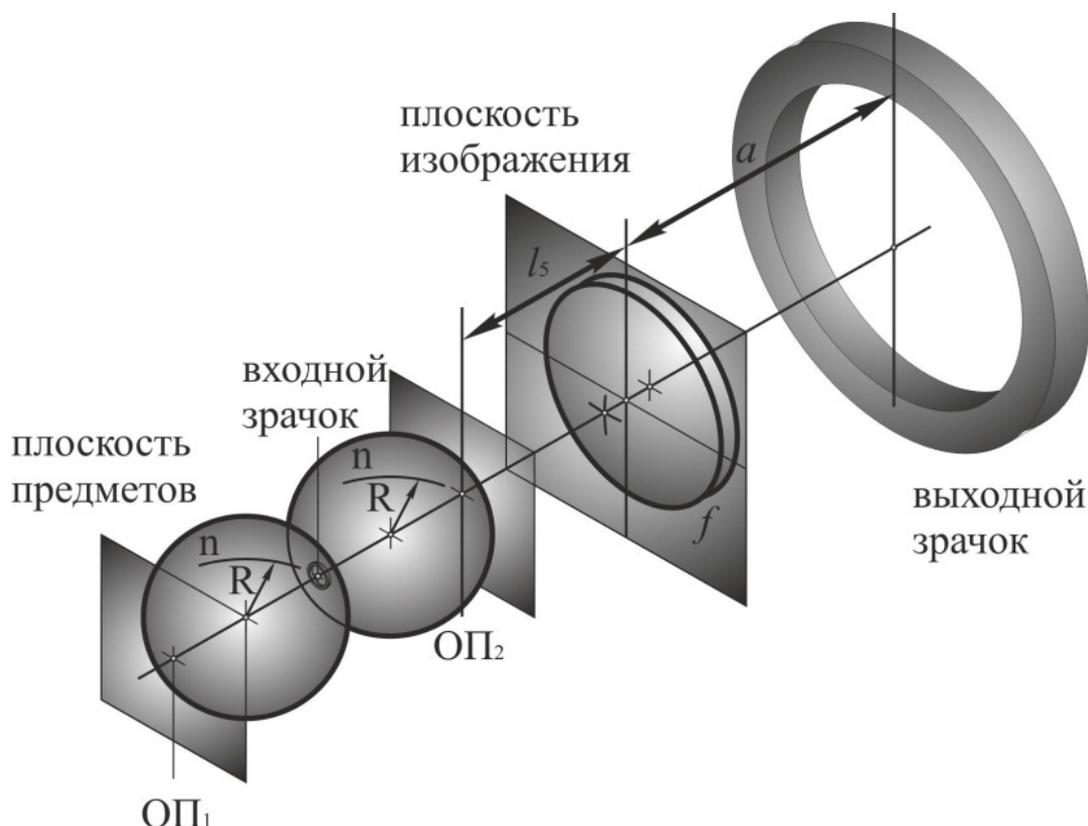


Рисунок 11 – Исправление дисторсии в системе из двух шаровых линз

Остаточные искажения не превышают величины 1%. (Рисунок 12). Численное моделирование осуществлялось при помощи пакета программ OSLO 6.01 LT.

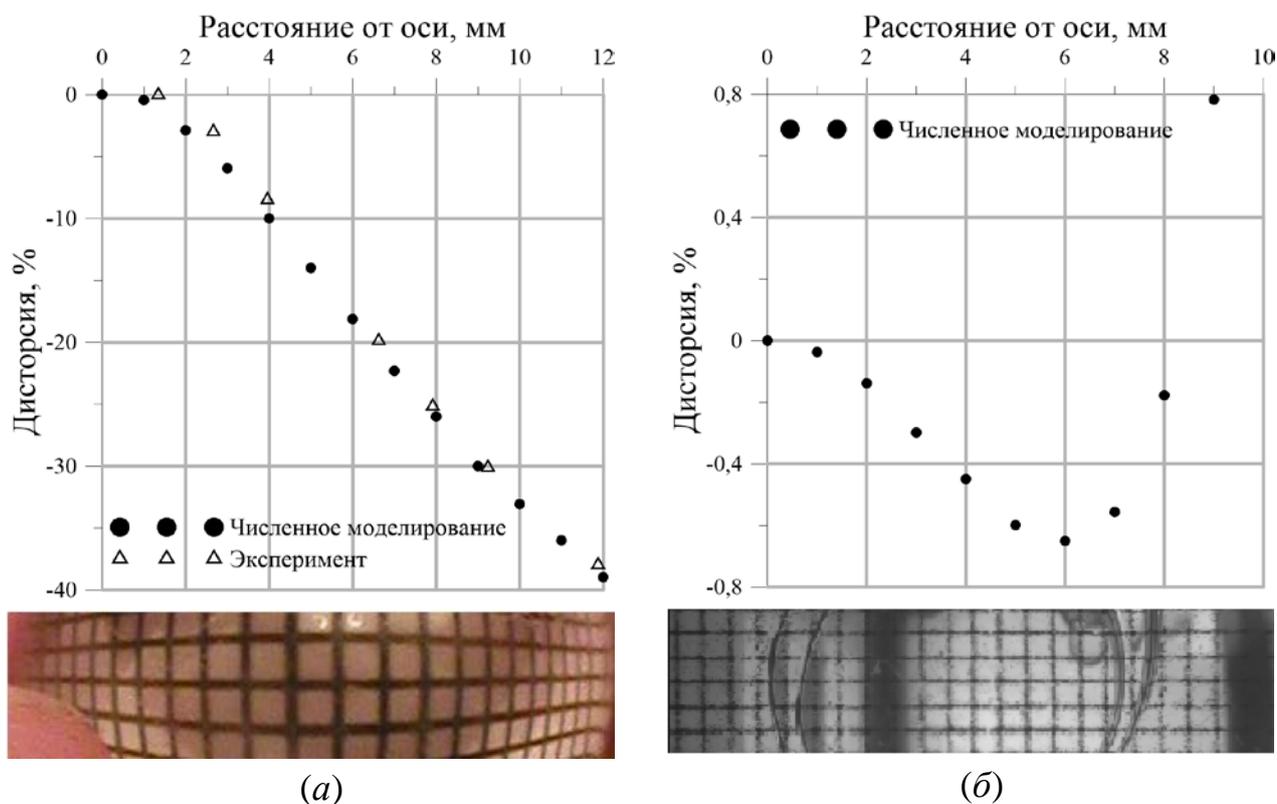


Рисунок 12 – Коррекция дисторсии в системе из двух шаровых линз  
 (а) – дисторсия в системе из двух шаров до коррекции. Расстояние между штрихами 1 мм  
 (б) – дисторсия в системе из двух шаров после коррекции. Расстояние между штрихами 0,5 мм

Во втором параграфе изучается формирование изображения диффузного протяженного источника границей раздела фаз на матрице цифровой камеры согласно оптической схеме (Рисунок 13а). Постановка задачи вызвана необходимостью определения размера и пространственного положения элементов дисперсной фазы на фотографическом изображении газожидкостного потока. Теневой метод, рассмотренный в работах О. Н. Кашинского, К. Бонгиованни обладает рядом ограничений, связанных с организацией схемы освещения объектов. Корректное описание отражения и преломления излучения границами раздела фаз позволило снять существующие ограничения и сформировать универсальный метод освещения, который может

быть положен в основу ряда оптических систем. На Рисунке 13б приведено отображение протяженного диффузного источника света стеклянным шаром.

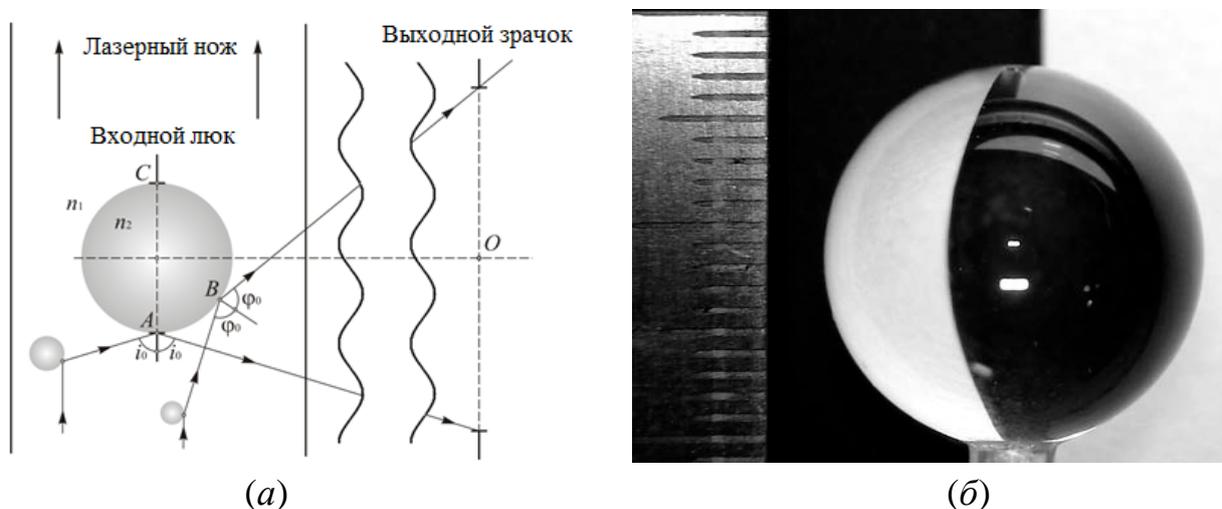


Рисунок 13 – Формирование изображения диффузного протяженного источника границей раздела фаз

(а) – схема освещения пузырька в плоскости лазерного ножа

(б) – отображение сферической линзой протяженного диффузного источника света

Результаты измерений радиуса входного люка:  $\bar{r} = 8.993$  мм,  $\sigma_r = 0.33$  мм,  $n = 42$ . Радиус стеклянного шара, измеренный микрометром  $r_0 = 9.005$  мм. Как показали результаты исследования, метод обладает высокой точностью (не превышающей  $1/d$ , где  $d$  – размер объекта на изображении в пикселах), совместим с полевыми измерительными технологиями, основанными на анализе изображений.

*Пятая глава* посвящена применению разработанных систем полевой диагностики для решения ряда задач экспериментальной гидромеханики.

#### Система оптической коррекции дисторсии в шаровых засыпках.

Параметры течения изучались при помощи системы PIV (Particle Image Velocimetry). На Рисунке 14 приведена общая схема. Перед началом эксперимента в поток добавляются трассеры (мелкие частицы с размером  $\sim 10$  мкм и плотностью, равной плотности среды). Световое излучение анаморфотной оптической системой преобразуется в плоскость (световой нож), выделяя в потоке исследуемую область. Рассеянное трассерами излучение фиксируется пленочной или цифровой камерой. При использовании пленочных камер, проводится последующая оцифровка изображения. Трассеры,

находящиеся в световом ноже, освещаются дважды. Временная задержка между импульсами зависит от средней скорости потока и увеличения оптической системы. Полагают, что трассеры во время между импульсами перемещаются равномерно. Для обработки цифровое изображение разбивается на области, называемые «расчетными». Вектор локального смещения для изображений трассеров на первом и втором кадре определяется для каждой расчетной области статистическими (авто- и кросскорреляционными) методами.

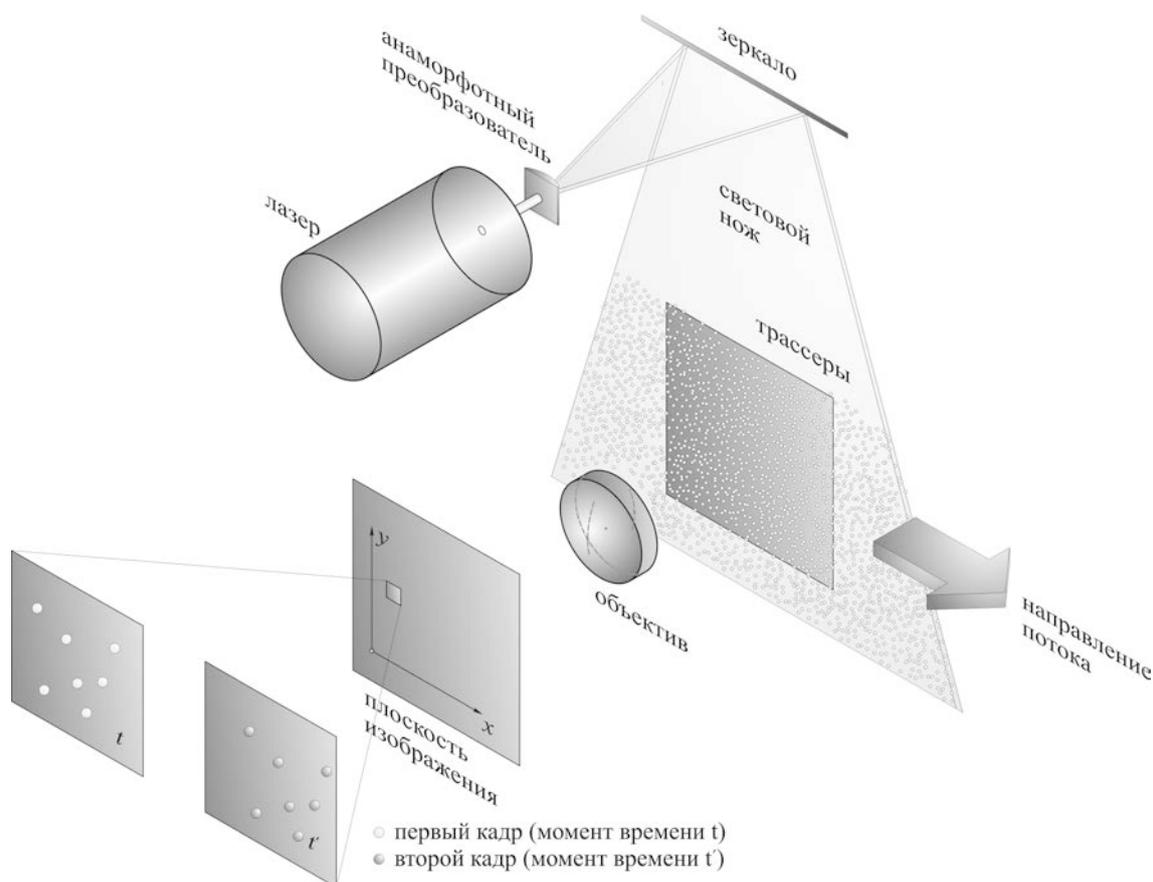


Рисунок 14 – Общая схема метода PIV

Процесс обработки повторяется для всех расчетных областей изображений. С использованием современных фоточувствительных полупроводниковых матриц ССD-камер ( $1000 \times 1000$  и более чувствительных элементов) существует возможность записывать более 100 изображений в минуту. Высокоскоростная фиксация при помощи взаимодополняющих МОП-структур (СМOS) позволяет фиксировать изображения с частотой порядка килогерца. Расчет нескольких тысяч мгновенных векторов скорости (в зависимости от размера изображения и алгоритма обработки) занимает порядка секунды на стандартных компьютерах.

Существуют коммерческие системы, позволяющие проводить мониторинг потока в реальном времени.

Схема экспериментальной установки показана на Рисунке 15. Жидкость из бака постоянного уровня 1 по системе гибких трубок, вентиляей 2, ротаметров 3 и капилляров 4 подавалась в тестовый объект и растекалась в виде тонкой пленки. Изображение трассеров с помощью системы переноса, состоящей из двух шаров и коррекционной оптики 6, фиксировалось камерой 7 и обрабатывалось системой 8.

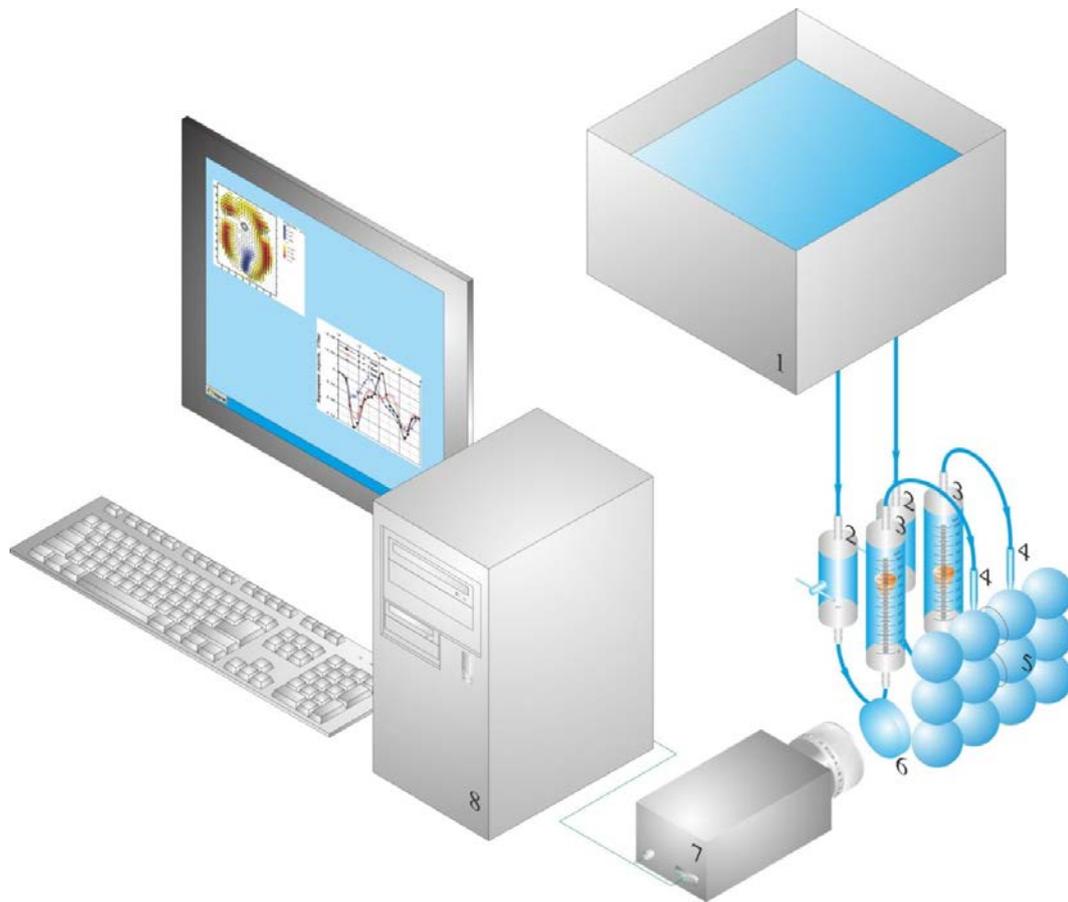


Рисунок 15 – Экспериментальная схема изучения пленочного газожидкостного течения в шаровых засыпках

Как показало исследование, структура течения при пленочном обтекании боковых точек контакта элементов шаровой засыпки аналогична течению за цилиндром. В диапазоне чисел Рейнольдса  $\approx 6$  (Рисунок 16а) наблюдается безвихревое движение жидкости,  $Re = (10-24)$  (Рисунок 16б) – формируется устойчивая вихревая пара,  $Re = (24-83)$  (Рисунок 16в) – неустойчивые вихревые структуры,  $Re > 83$  (Рисунок 16г) – формирование пленки в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка;

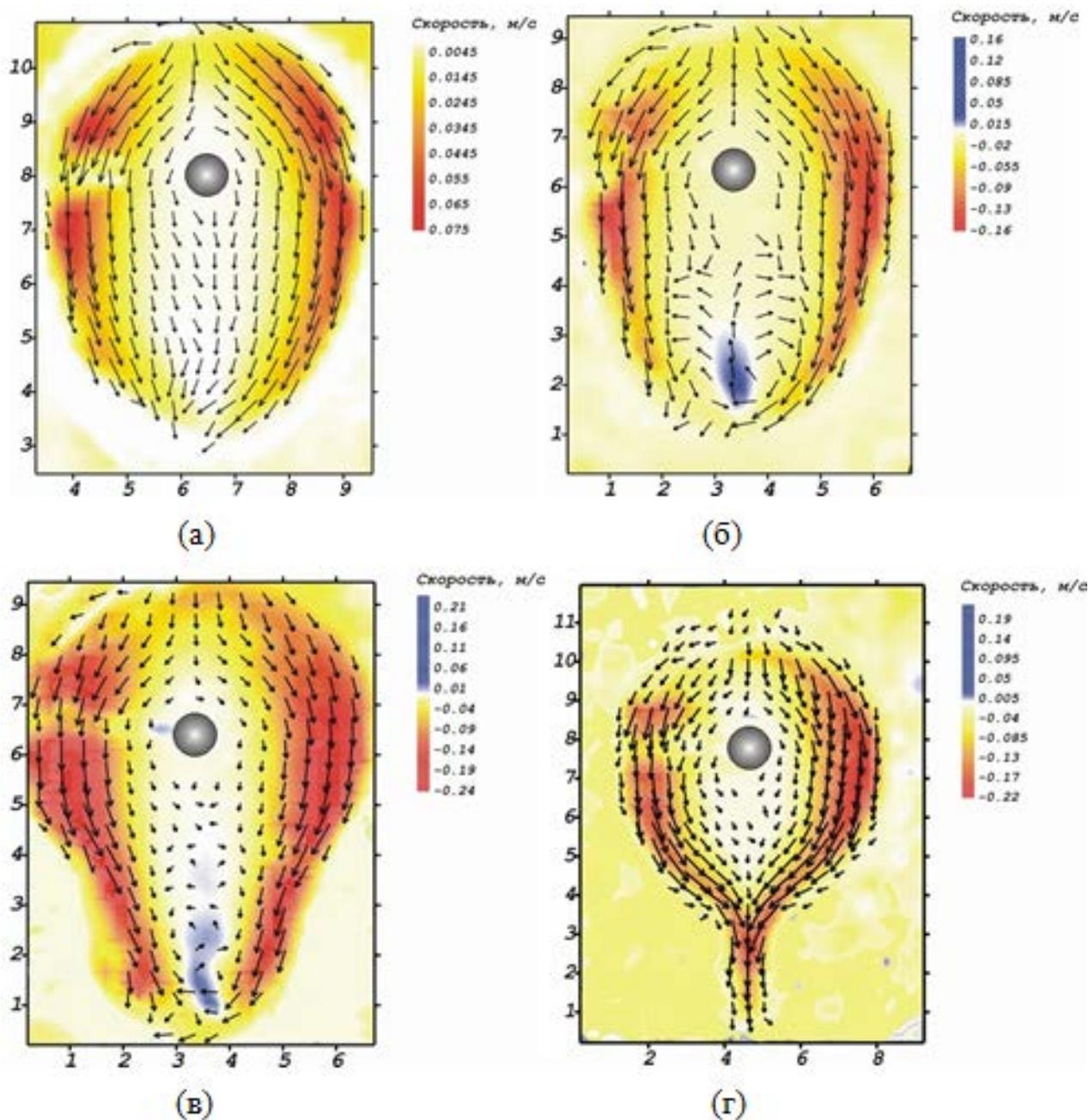


Рисунок 16 – Структура течения пленки жидкости в боковой точке контакта элементов шаровой засыпки

Применение диффузного источника для освещения светопрозрачных границ раздела фаз.

1. Определение толщины пленки стекающей по поверхности шара.

На базе метода диффузного освещения разработана оптическая система измерения поля толщины пленки жидкости. В качестве тестового объекта была выбрана сфера диаметром 20 мм. На рисунке 17 приведена схема экспериментальной установки.

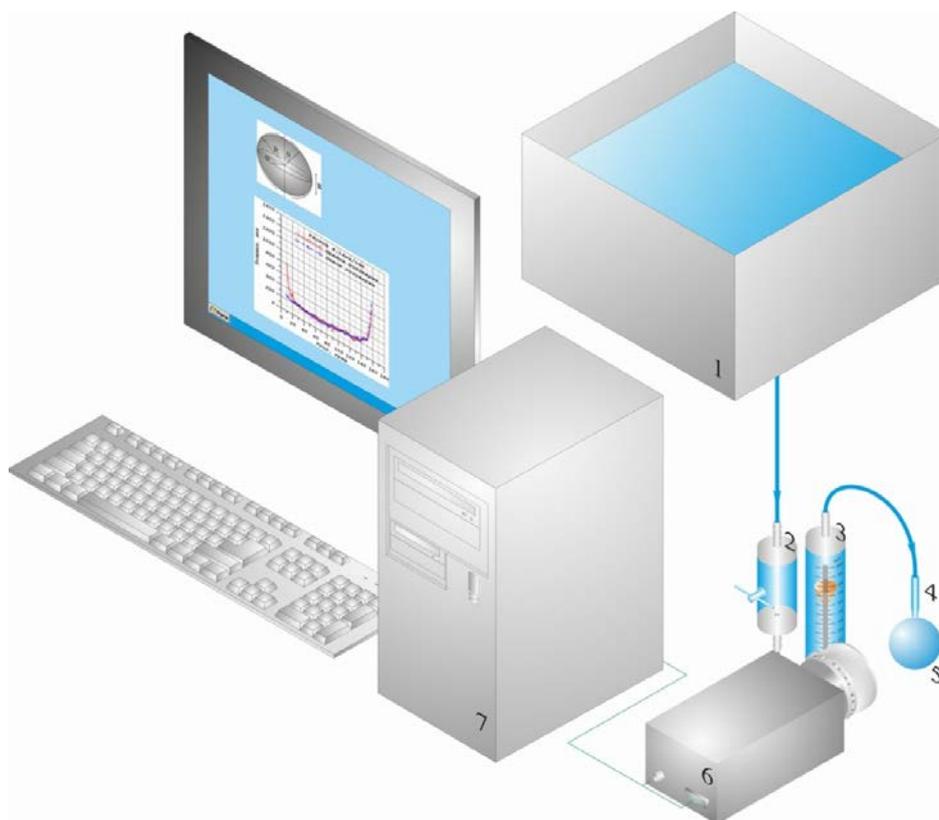


Рисунок 17 – Схема измерительной системы определения поля толщины пленки жидкости на поверхностях сложной формы

Жидкость из бака постоянного уровня 1 проходила через вентиль 2, ротаметр 3, инжектор 4 и в виде тонкой пленки растекалась по сфере 5. Внутренний диаметр инжектора 2 мм. Изображение сферы фиксировалось CCD – камерой 6 (3200×2400 пикселей) и обрабатывалось системой 7.

Для определения толщины пленки использовался следующий подход (Рисунок 18).

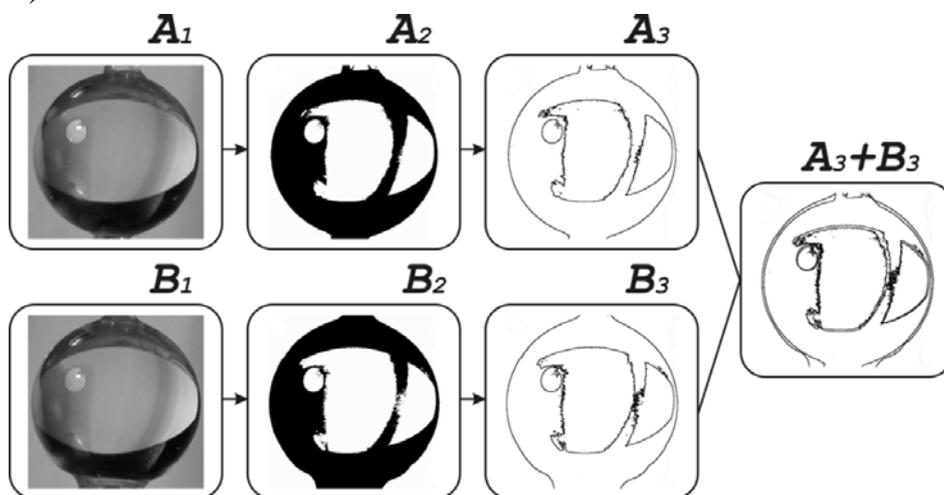


Рисунок 18 – Измерение толщины пленки

В первую очередь проводилась съемка сферы без пленки, кадр  $A_1$ . Затем без сдвига камеры производились снимки сферы с текущей по ней пленкой  $B_1$  при различных расходах жидкости. Полученные изображения контрастировались и определялось положение границ (кадры  $A_2, B_2, A_3, B_3$ ). Далее изображения  $A_3$  и  $B_3$  складывались. Измерение расстояния между границами позволило определить толщину пленки при заданной угловой координате. Следует отметить скорость, простоту и точность получения информации, что является важным преимуществом предложенной системы по сравнению с аналогами. Результаты эксперимента, приведенные на рисунке 19, послужили основой для разработки модели пленочного обтекания сферы при различных параметрах расхода.

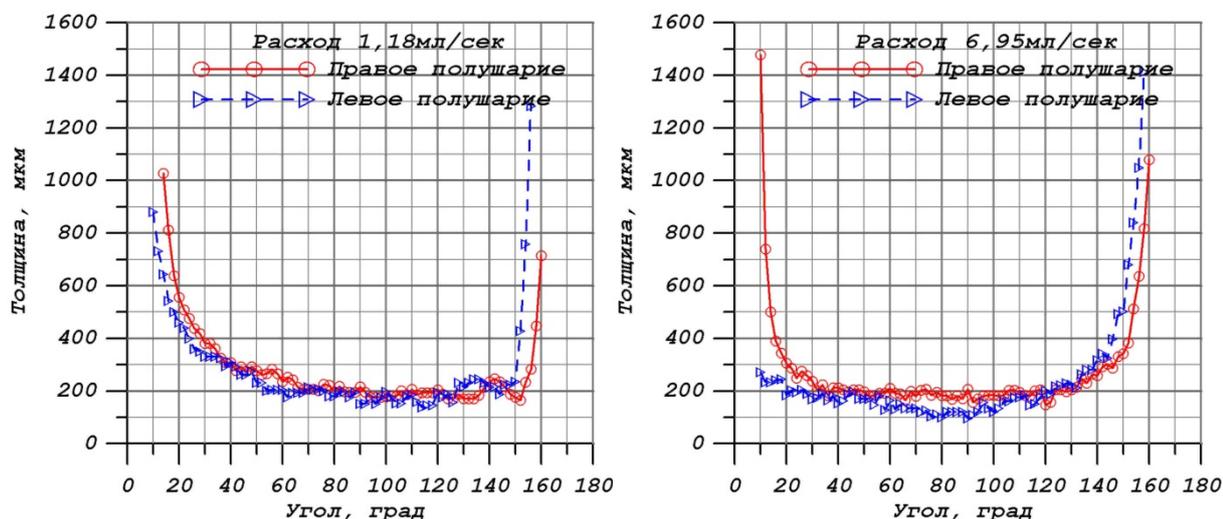
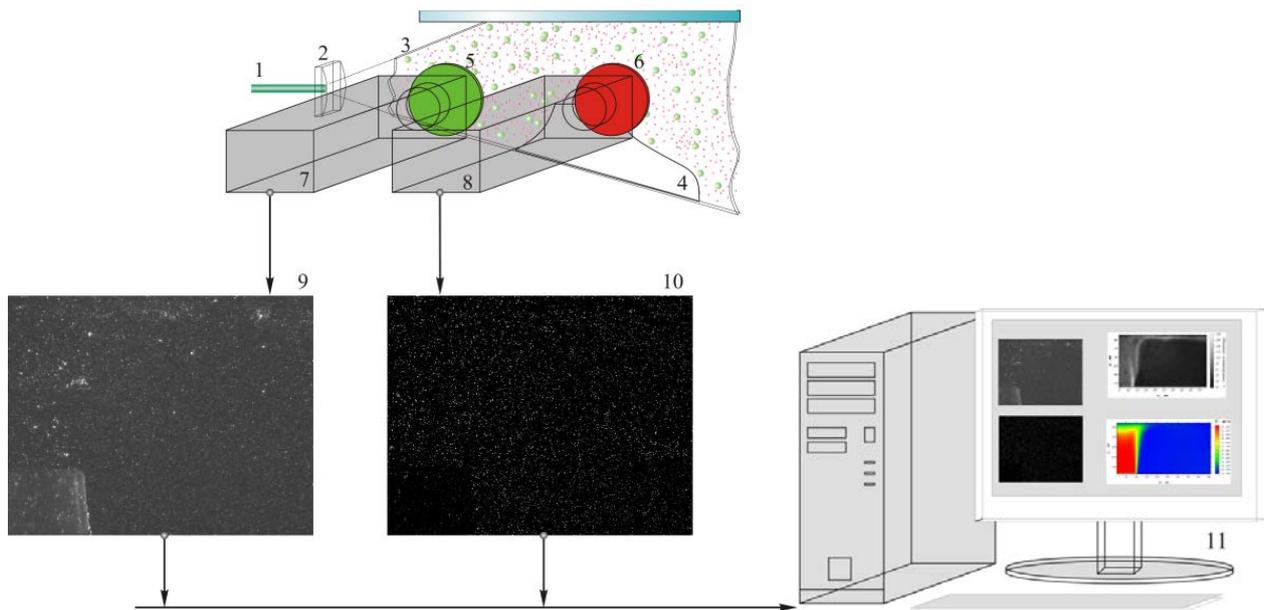


Рисунок 19 – Поля толщины пленки жидкости, движущейся по сферической поверхности

## 2. Исследование газонасыщенной осесимметричной импактной струи.

Оптическая система на базе полевого измерителя скорости Dantec Dynamics с программным обеспечением Dantec Flow Manager 4.0 изображена на рисунке 20. Излучение импульсного лазера Nd:YAG (532 нм, вторая гармоника) 1, анаморфотной оптической системой 2 преобразуется в световой нож 3, который выделяет в потоке исследуемое сечение (толщина 2 мм). Лазер дает две последовательные вспышки. Вторичное излучение трассеров и пузырьков проходит через световые фильтры 5 и 6. Так как в качестве трассеров используются флуоресцентные частицы, свет, рассеянный ими, имеет более низкую частоту по сравнению с излучением лазера. Таким образом, камера 7

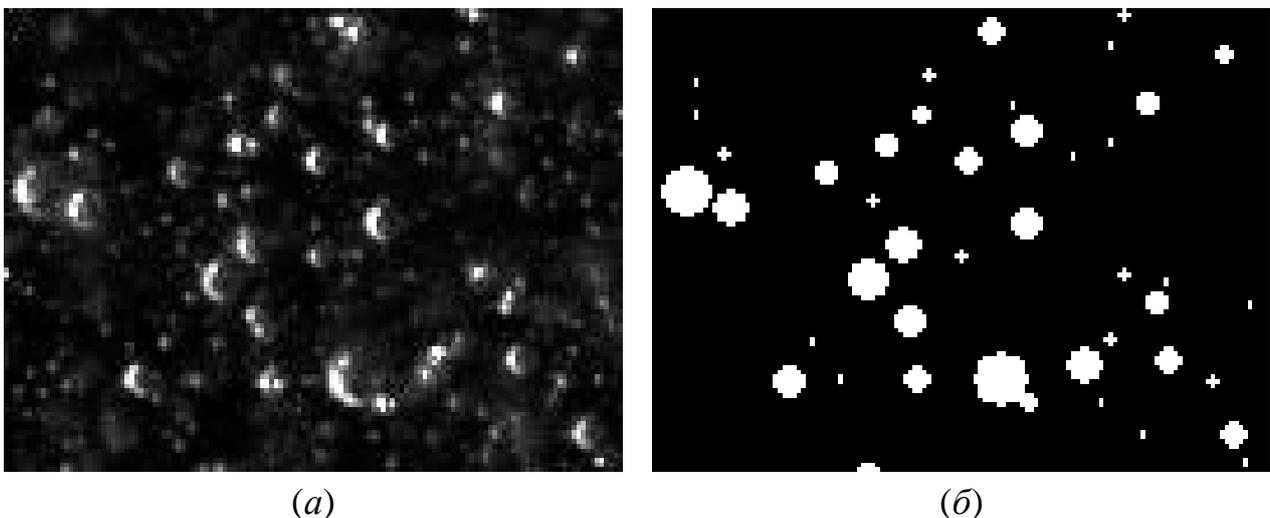
фиксирует изображение пузырьков (9), а камера 8 – изображение трассеров (10). Полученные данные анализируются комплексом 11.



1 – лазерный пучок; 2 – анаморфотный преобразователь; 3 – лазерный нож; 4 – сопло; 5 – светофильтр с максимумом пропускания в зеленой области спектра; 6 – светофильтр с максимумом пропускания в красной области спектра; 7,8 – CCD – камеры; 9 – изображение пузырьков; 10 – изображение трассеров; 11 – система обработки.

Рисунок 20 – Схема измерительной системы

С помощью метода диффузного освещения определяется (Рисунок 21а), а затем восстанавливается положение и размер объекта (Рисунок 21б).



(а)

(б)

Рисунок 21 – Применение метода диффузного освещения к определению пространственного распределения дисперсной фазы

Концентрация дисперсной фазы в плоскости пропорциональна отношению площадей  $\varphi_S = S_{d,b}/S_a$ , где  $S_a$  – площадь исследуемой области, а  $S_{d,b}$  – площадь капель (пузырьков), находящихся в ней. Переход к объемной концентрации можно осуществить, используя нормировочные коэффициенты, которые рассчитываются следующим образом. Обозначим толщину лазерного ножа  $h$ . Предположим, что все пузырьки, видимые на изображении, полностью лежат в лазерном ноже, тогда  $\varphi_V = V_{d,b}/V_a$ , где  $V_a$  – объем исследуемой области, а  $V_{d,b}$  – объем капель (пузырьков), находящихся в ней. Предположим, что пузырьки представляют собой сферы радиуса  $R$ , тогда отношение концентраций  $\varphi_V$  и  $\varphi_S$  примет вид

$$\frac{\varphi_V}{\varphi_S} = \frac{\left( \frac{4}{3} \pi \sum_{i=1}^n R_i^3 \right) S_a}{\left( \pi \sum_{i=1}^n R_i^2 \right) S_a h} = \frac{4 \sum_{i=1}^n R_i^3}{3h \sum_{i=1}^n R_i^2}.$$

Точность метода определяется корректностью допущений (постоянство толщины лазерного ножа, предположение о том, что все пузырьки лежат в лазерном ноже). Предложенные подходы были использованы для определения дисперсного состава и пространственного распределения пузырьков газа в газонасыщенной импактной струе ( $Re = 12500, 25000$ ;  $Sh = 0,5$ ;  $H/d = 2$ , где  $H = 30$  мм – расстояние до импактной поверхности,  $d = 15$  мм – диаметр сопла). Характерные распределения дисперсной фазы приведены на рисунке 22а, б.

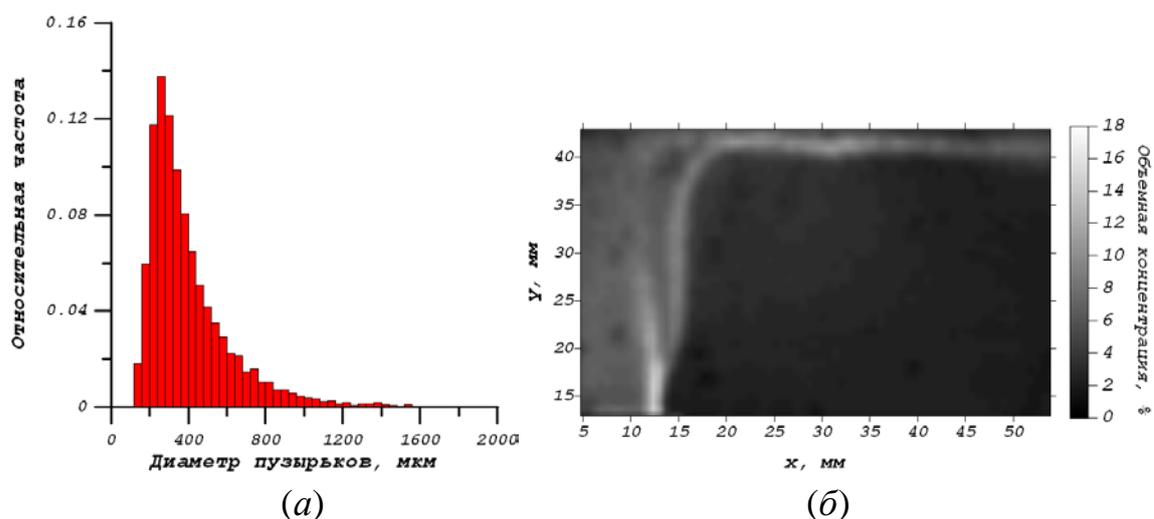


Рисунок 22 – (а) дисперсный состав газожидкостного потока  $Re = 12500$   
 (б) пространственное распределение газовой фазы  $Re = 25000$

Полученные результаты говорят об определяющей роли крупномасштабных вихревых структур в динамике газовых пузырьков.

Измерение спектральных свойств турбулентных пульсаций традиционно требует высокого временного разрешения. Ввиду фиксации полного 2D, 3D поля скоростей поток данных, записываемых PIV системой на жесткий диск, сравнительно высок, что затрудняет изучение пульсационных характеристик скорости. Для оценки параметров турбулентности предлагается новый подход статистической оценки энергетических свойств вихревых образований. На рисунке 23 показана измерительная система и тестовый объект.

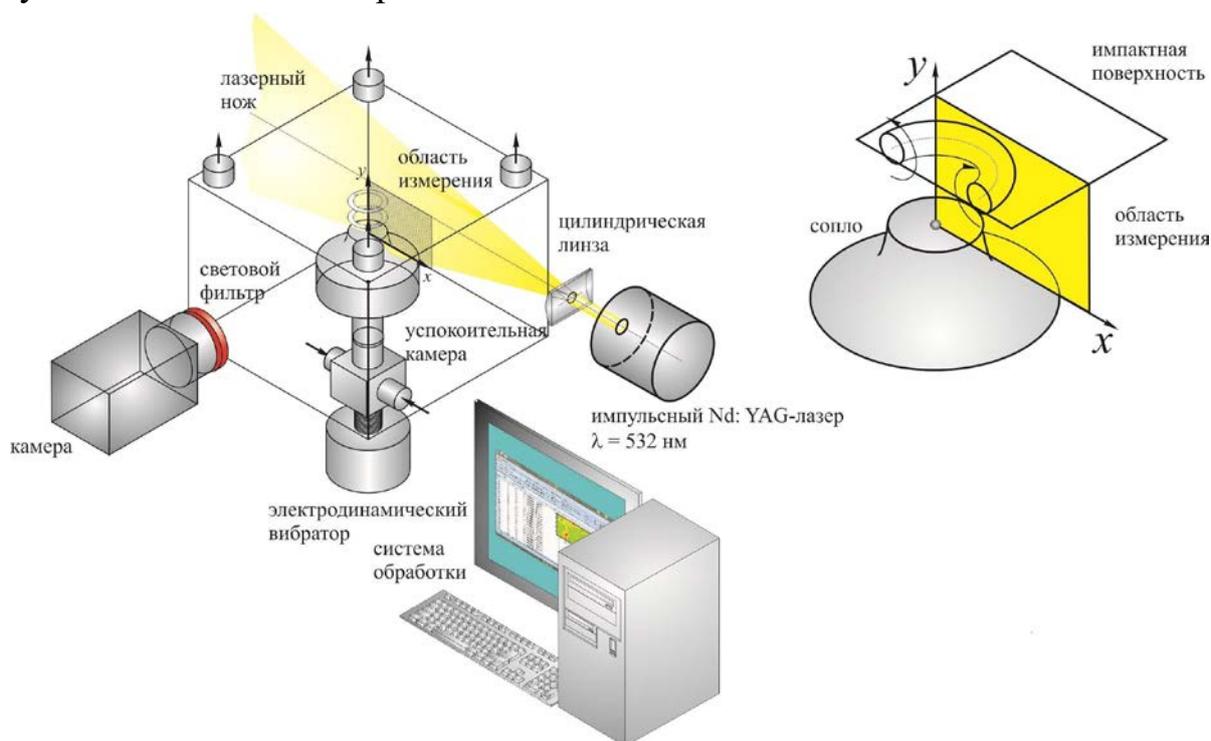


Рисунок 23 – Измерительная система и тестовый объект

Жидкость (дистиллированная вода  $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) циркулировала в замкнутом гидродинамическом контуре, который состоял из прямоугольного бака с размерами  $200 \times 200 \times 300$  мм, изготовленного из органического стекла, резервуара, системы соединительных труб и датчиков для контроля параметров эксперимента. В прямоугольный бак вертикально через дно вводилось сопло ( $d = 15$  мм, профиль соответствует зависимости Витошинского, длина сопла  $2d$ , степень поджатия 3) так, чтобы поток жидкости натекал на импактную поверхность под углом  $90^{\circ}$ . Для создания периодического возмущения потока использовался стандартный электродинамический вибратор ESE-201, соединенный с успокоительной камерой через сиффон.

Для измерения поля скорости применялась система PIV. Излучение импульсного лазера Nd:YAG (вторая гармоника  $\lambda = 532$  нм) преобразовывалось анаморфотной оптической системой в лазерный нож, который выделял в потоке исследуемое сечение. Лазер давал две последовательные вспышки. Вторичное излучение флуоресцентных трассеров (полимерные частицы, плотность близка к плотности воды, диаметр 20 мкм) для улучшения качества изображения проходило через световой фильтр и фиксировалось камерой, что позволяло избавиться от шумовой засветки. Полученные изображения анализировались системой обработки. Трассеры добавлялись в жидкость перед началом эксперимента и распределялись в потоке равномерно. Объемная концентрация составляла  $\sim 8 \cdot 10^{-3}$  %. Измерения проводились при числе  $Re = 25\,000$ . Расстояние между срезом сопла и импактной поверхностью  $H = 30$  мм ( $H / d = 2$ ), что соответствует характерным режимам работы струйных теплообменников. Параметры PIV системы: программное обеспечение (Dantec Flow Manager v. 4.0), время между последовательными вспышками лазера 20 мс, физический размер области измерения  $53 \times 30$  мм, разрешение 0.67 мм/вектор, размер расчетной области  $32 \times 32$  пиксела ( $1.34 \times 1.34$  мм), ширина ножа 1 мм. Относительная погрешность измерения скорости не превышала 5%. Измерения проводились при упорядоченной генерации вихревых образований путем внешнего периодического воздействия, позволяющего создавать в потоке когерентные структуры. Частота воздействия  $f$  определялась оптимальным для данной системы значением числа Струхала  $Sh = 0.5$ . На рисунке 24а приведена зависимость энергии вихревой структуры от ее размера. Пространственная локализация вихревых структур показана на рисунке 24б.

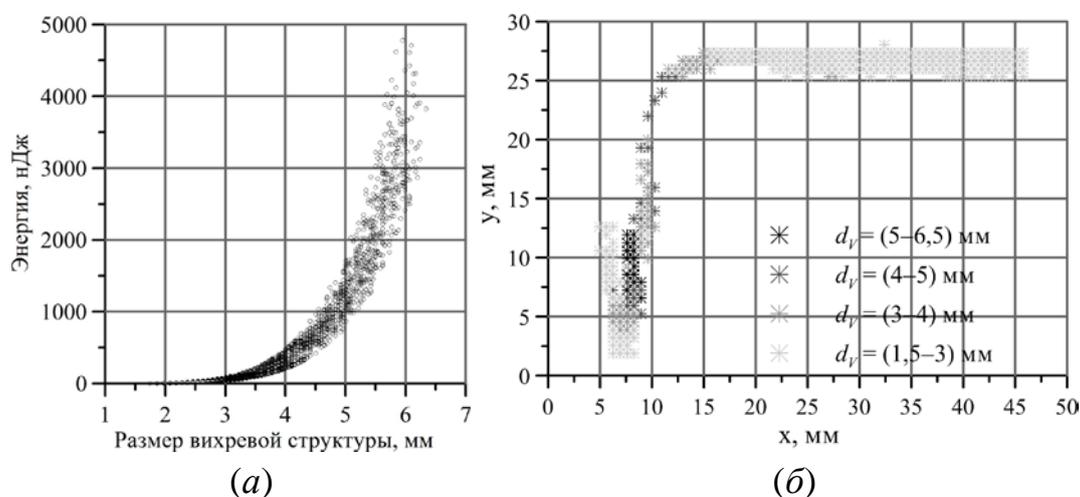


Рисунок 24 – Зависимость кинетической энергии (а) и пространственной локализации (б) от размера вихревой структуры

Полученные данные подтверждают корректность современных теоретических моделей вихревой динамики. Погрешность измерения параметров вихревых структур без использования сглаживания полей скорости 30%. Следует отметить корреляцию с данными, представленными на рисунке 22б, что подтверждает важную роль когерентных структур в переносе дисперсной фазы.

### 3. Исследование газок капельного течения.

Схема оптической системы на базе полевого измерителя скорости ПОЛИС с программным обеспечением Actual Flow v.2.1 приведена на рисунке 25. В качестве тестового объекта был выбран поток, создаваемый пневматической форсункой внутреннего смешения Raasche. Давление воздуха на входе – 1 атм., диспергируемая жидкость дистиллированная вода ( $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), средняя скорость капель жидкости на выходе из сопла – 50 м/с. Определение параметров дисперсной фазы выполнялось с помощью метода диффузионного освещения. Программы для обработки изображения создавались с использованием MS Visual Studio C++.

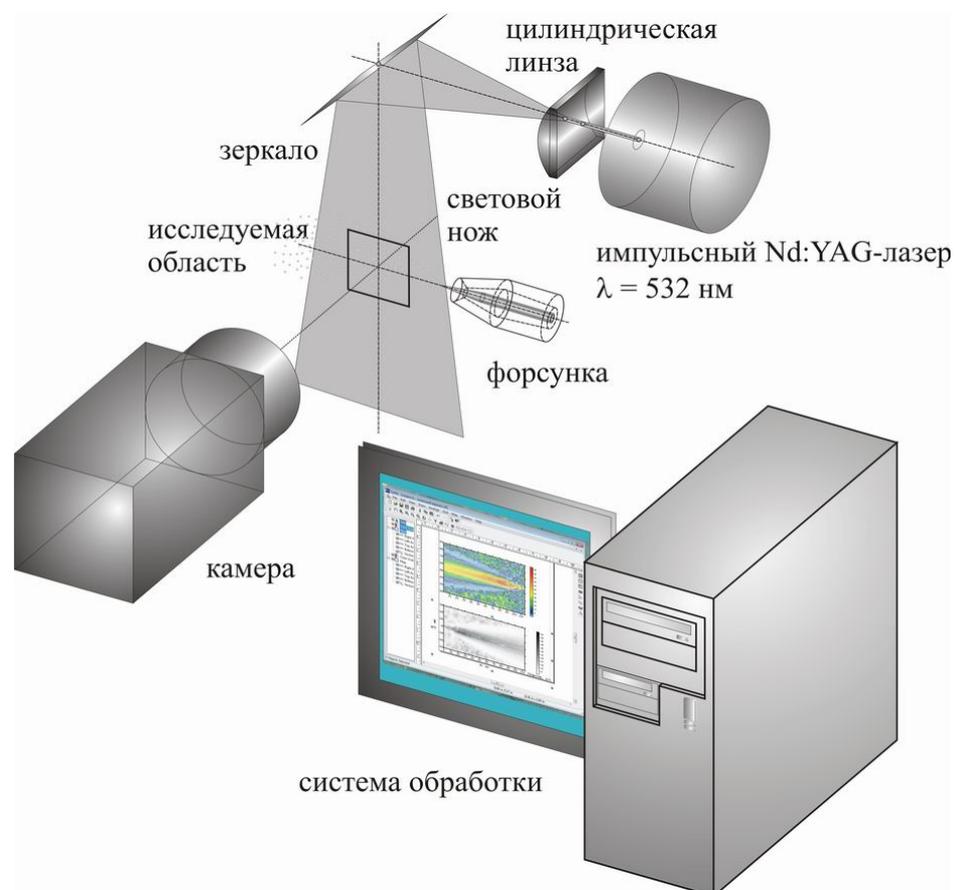


Рисунок 25 – Схема измерительной системы

На рисунке 26 приведен дисперсный состав потока. Размер выборки  $\approx 500$  тыс. капель. Средний размер – 24 мкм, что совпадает с данными, полученными независимо интерферометрическим методом.

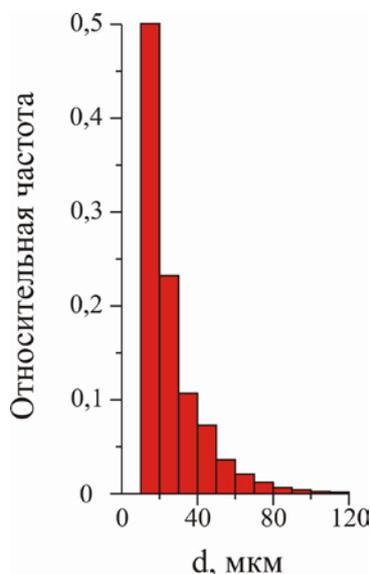


Рисунок 26 – Дисперсный состав газок капельного потока

На рисунке 27а, б представлено пространственное распределение капель жидкости для различных фракций. Использовались следующие интервалы: (0–20 мкм), и свыше (80 мкм).  $S_A = 32 \times 32$  пиксела. Строилось поле средней концентрации размером  $128 \times 128$  пикселей при выборке – 2000 изображений. На основании проведенного исследования получена важная информации о времени жизни ( $\tau < 0.5$  мс) мелкодисперсной ( $d < 20$  мкм) фракции в потоке.

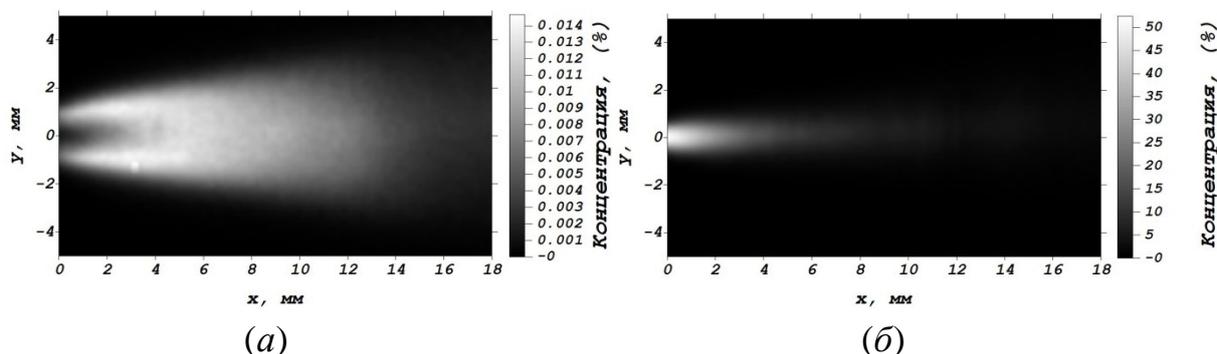


Рисунок 27 – Пространственное распределение капель жидкости разных фракций

(а) – диаметр капли меньше 20 мкм

(б) - диаметр капли больше 80 мкм

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы и экспериментов изучена практическая применимость ряда локальных и полевых оптических методов для диагностики многофазных потоков с целью получения информации о дисперсном составе, пространственном распределении дисперсной фазы, а также измерения турбулентных параметров потоков в условиях низкой частоты выборки полей скорости. Исследованы особенности каждого метода, их недостатки и преимущества в применении к конкретным объектам. Созданы технические средства локальной и полевой диагностики для достижения поставленной в диссертационном исследовании цели. Проведена апробация действующих образцов для решения актуальных задач гидромеханики. Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что созданы физико-математические модели отражения и преломления оптического излучения границами раздела фаз, которые позволили оптимизировать, а также создать ряд оптических систем полевой и локальной диагностики газожидкостных течений.

- 1) разработана лазерная оптическая система на основе одномодового оптического волокна, позволяющая определить размер сферических газовых пузырьков диаметром (0,15–2) мм, движущихся близко к оси волокна с известной постоянной скоростью в оптически прозрачных средах с высокой концентрацией дисперсной фазы до момента контакта приемного торца световода с исследуемым объектом;
- 2) предложены доплеровские технологии на основе методов когерентной оптики, позволяющие определить размер и компоненты скоростей границ (>50 мкм/с) пузырьков (капель) диаметром (~ 1 мм) в потоках с низкой концентрацией дисперсной фазы;
- 3) разработана система, формирующая изображение области контакта элементов шаровой засыпки, состоящая из двух стеклянных шаров и корректирующей линзы, помещенной в плоскость промежуточного изображения, симметризирующей положение входного зрачка, позволяющая получить угловое поле зрения до 69 градусов и остаточные пространственные искажения не выше 1%;
- 4) разработана оптическая технология, основанная на корректном освещении светопрозрачных границ раздела фаз диффузными протяженными источниками излучения, позволяющая формировать изображение, определять пространственное положение и геометрические

параметры границ раздела фаз с относительной погрешностью, не превышающей  $1/d$ , где  $d$  – размер объекта на изображении в пикселах;

5) предложена технология, использующая двумерные поля скорости, полученные корреляционным анализом пары изображений трассеров в потоке жидкости, зафиксированных через определенный интервал времени, позволяющая определять пространственное положение, геометрические, энергетические и статистические свойства крупномасштабных ( $> 1$  мм) вихревых структур;

б) разработанные системы успешно использованы для получения экспериментальной информации о динамике газожидкостных течений:

- газовые пузырьки в жидкости концентрируются в области локализации вихревых структур;
- при пленочном обтекании сферы в диапазоне чисел Рейнольдса (20–120) толщина пленки не зависит от расхода жидкости в связи со сменой режима течения;
- концентрация мелких капель ( $< 20$  мкм) существенно снижается при удалении от пневматической форсунки, что вызвано процессами испарения;
- структура течения при пленочном обтекании боковых точек контакта элементов шаровой засыпки аналогична течению за цилиндром. В диапазоне чисел Рейнольдса  $\sim 6$  наблюдается безвихревое движение жидкости,  $Re = (10–24)$  формируется устойчивая вихревая пара,  $Re = (24–83)$  – неустойчивые вихревые структуры,  $Re > 83$  – формирование пленки в направлении, перпендикулярном направлению наблюдения;
- присутствие дисперсной фазы разрушает крупномасштабные вихревые структуры в газонасыщенной осесимметричной импактной струе при числах Рейнольдса 12500, 25000 и средних размерах дисперсной фазы 400 мкм, 100 мкм, соответственно.

### Основные публикации по теме диссертации

*Статьи в научных журналах, которые включены в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций, и в международные базы данных цитирования Web of Science или Scopus:*

1. Белоусов А. П. Оптический метод исследования газожидкостных потоков в шаровых засыпках / А. П. Белоусов, П. Я. Белоусов // Автометрия. – 2003. – Т. 39. – № 2. – С. 12–17.
2. Белоусов А. П. Гидродинамическая структура двухфазного течения в окрестности точек контакта элементов шаровых засыпок / А. П. Белоусов, А. Р. Богомолов, Д. М. Маркович // Теплофизика и аэромеханика. – 2004. – Т. 3. – № 3. – С. 429–440.
3. Белоусов А. П. Метод измерения дисперсного состава и локального газосодержания газожидкостных потоков / А. П. Белоусов, П. Я. Белоусов // Автометрия. – 2008. – Т. 44. – № 2. – С. 50–55.
4. Белоусов А. П. Влияние дисперсной фазы на турбулентную структуру осесимметричной затопленной импактной струи // Теплофизика и аэромеханика. – 2008. – Т. 15. – № 3. – С. 435–440.
5. Белоусов А. П. Пространственное распределение газовой фазы в осесимметричной затопленной импактной струе // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50. – №3. – С. 33–38.
6. Белоусов А. П. Измерение толщины пленки жидкости, движущейся по сферической поверхности / А. П. Белоусов, П. Я. Белоусов // Автометрия. – 2010. – Т. 46. – № 6. – С. 116–121.
7. Белоусов А. П. Оптическая диагностика газокапельных потоков / А. П. Белоусов, П. Я. Белоусов // Автометрия. – 2011. – Т. 47. – № 1. – С. 110–14.
8. Белоусов А. П. Влияние дисперсной фазы на энергетические свойства крупномасштабных вихревых структур // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т. 52. – №5. – С. 80–84.
9. Белоусов А. П. Математическая модель взаимодействия оптического зонда с пузырьками газа / А. П. Белоусов, П. Я. Белоусов, Л. А. Борыняк // Доклады ТУСУРа. – 2012. – Т. 25. – №1, Ч. 1. – С. 93–99.

10. Белоусов А. П. Применение метода диффузного освещения в диагностике газожидкостных потоков / А. П. Белоусов, П. Я. Белоусов, Л. А. Борыняк // Доклады ТУСУРа. – 2012. – Т. 25. – №1, Ч. 1. – С. 229–240.
11. Белоусов А. П. Оптическая диагностика газочапельных потоков / А. П. Белоусов, П. Я. Белоусов, Л. А. Борыняк // Автометрия. – 2013. – Т. 49. – № 2. – С. 106–114.
12. Белоусов А. П. Доплеровская диагностика дисперсной фазы в газожидкостных потоках / А. П. Белоусов, П. Я. Белоусов, Л. А. Борыняк // Научный вестник НГТУ. – 2013. – Т. 53. – № 4. – С. 63–69.
13. Белоусов А. П. Расширение функциональных возможностей PIV-систем с низким временным разрешением // Научный вестник НГТУ. – 2014. – Т. 55. – № 2. – С. 132–138.
14. Белоусов А. П. Интерференционные измерения динамики температуры в твердотельных акустооптических модуляторах / А. П. Белоусов, П. Я. Белоусов, Л. А. Борыняк // Известия ТПУ. – Математика и механика. Физика. – 2014. – Т. 325. – № 2. – С. 137–142.
15. Белоусов А. П. Определение скорости и размера пузырьков в двухфазных потоках с помощью лазерного доплеровского анемометра / А. П. Белоусов, П. Я. Белоусов, Л. А. Борыняк // Автометрия. – 2015. – Т. 51. – № 6. – С. 47–51.

*Основные патенты и авторские свидетельства:*

16. Optical device for viewing of cavernous and/or inaccessible spaces // S. Alekseenko, P. Belousov, A. Belousov et al. / United States Patent, Patent No.: US 7 018 330 B2 Pub. Date: March 28, 2006.
17. Optical device for viewing of cavernous and/or inaccessible spaces // S. Alekseenko, P. Belousov, A. Belousov et al. / United States Patent, Patent No.: US 7 160 248 B2 Pub. Date: January 9, 2007.

*Публикации в других научных изданиях:*

18. Волоконно-оптические датчики для исследования структуры двухфазных потоков / А. Р. Евсеев, А. П. Белоусов // Проблемы использования Канско-Ачинских углей: материалы всероссийской научно-практической конференции. – Красноярск, 2000. – С. 330–333.

19. Белоусов А. П. Метод исследования газожидкостных потоков в шаровых засыпках / А. П. Белоусов, П. Я. Белоусов // Оптические методы исследования потоков: труды VII международной научно-технической конференции, Москва, 24–27 июня 2003 г. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – С. 340–343.
20. Белоусов А. П. Исследование структуры пленочного течения в окрестностях боковых точек контакта шаровых засыпок / А. П. Белоусов, Д. М. Маркович // Оптические методы исследования потоков: труды VII международной научно-технической конференции, Москва, 24–27 июня 2003 г. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – С. 78–81.
21. Belousov A. PIV Diagnostics of Two-phase Flow Inside the Regular Packing of Glass Balls / A. Belousov, A. Bilsky, D. Markovich // Proc. of 5<sup>th</sup> Int. Symposium on Particle Image Velocimetry, Busan, Korea, September 2003.
22. Белоусов А. П. Исследование газожидкостной импактной струи методом PIV/LIF / А. П. Белоусов, О. М. Гейнц, Д. М. Маркович // Оптические методы исследования потоков: труды VIII международной научно-технической конференции. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – С. 290–293.
23. Белоусов А. П. Эндоскопические измерения скорости и структуры потоков / А. П. Белоусов, П. П. Белоусов, Д. А. Герасимов // Оптические методы исследования потоков: труды VIII международной научно-технической конференции. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – С. 408–411.
24. Белоусов А. П. Исследование влияния газонасыщения на снижение трения в пограничном слое / А. П. Белоусов, А. Р. Евсеев, Л. И. Мальцев, А. Г. Малюга // Оптические методы исследования потоков: труды VIII международной научно-технической конференции. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – С. 416–419.
25. Белоусов А. П. Оптические измерения толщины пленки жидкости, движущейся по сферической поверхности / А. П. Белоусов, П. Я. Белоусов // Оптические методы исследования потоков: труды VIII международной научно-технической конференции. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – С. 440–443.
26. Белоусов А. П. Влияние дисперсной фазы на турбулентную структуру осесимметричной затопленной газожидкостной импактной струи // Оптические методы исследования потоков: труды IX международной научно-технической конференции. – М.: Изд-во МЭИ, 2007. – С. 394–397.

27. Белоусов А. П. Метод измерения дисперсного состава газочапельных потоков / А. П. Белоусов, П. Я. Белоусов // Оптические методы исследования потоков: труды IX международной научно-технической конференции. – М.: Изд-во МЭИ, 2007. – С. 298–301.
28. Белоусов А. П. Использование шаровых систем в диагностике многофазных течений // Оптические методы исследования потоков: труды IX международной научно-технической конференции. – М.: Изд-во МЭИ, 2007. – С. 302–305.
29. Белоусов А. П. Зависимость среднего диаметра капель жидкости от расстояния до сопла в факеле форсунки // Оптические методы исследования потоков: труды X международной научно-технической конференции. – М.: Изд-во МЭИ, 2009. – С. 306–309.
30. Белоусов А. П. Зависимость среднего диаметра капель жидкости от расстояния до сопла в факеле форсунки / А. П. Белоусов, Ю. А. Ложкин // Оптические методы исследования потоков: труды X международной научно-технической конференции. – М.: Изд-во МЭИ, 2009. – С. 122–125.
31. Белоусов А. П. Пространственное распределение капель жидкости в факеле форсунки // Оптические методы исследования потоков: труды X международной научно-технической конференции. – М.: Изд-во МЭИ, 2009. – С. 118–121.
32. Белоусов А. П. Измерение времени жизни мелкодисперсной фракции в газочапельных потоках // Оптические методы исследования потоков: XI Межд. науч-технич. конференция [Электронный ресурс]: труды конференции. – Электрон. дан. – М.: МЭИ (ТУ), 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Доклад № 37. 6 с. – ISBN 978-5-9902974-1-8 – № гос. регистрации 0321101669.
33. Белоусов А. П. Энергетические свойства крупномасштабных вихревых структур в осесимметричной затопленной импактной струе // Оптические методы исследования потоков: XI Межд. науч-технич. конференция [Электронный ресурс]: труды конференции. – Электрон. дан. – М.: МЭИ (ТУ), 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Доклад № 38. 6 с. – ISBN 978-5-9902974-1-8 – № гос. регистрации 0321101669.
34. Белоусов А. П. Влияние газовой фазы на энергетические свойства крупномасштабных вихревых структур в газонасыщенной осесимметричной импактной струе // Оптические методы исследования потоков: XI Межд. науч-технич. конференция [Электронный ресурс]:

- труды конференции. – Электрон. дан. – М.: МЭИ (ТУ), 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Доклад № 39. 5 с. – ISBN 978-5-9902974-1-8 – № гос. регистрации 0321101669.
35. Белоусов А. П. Динамика дисперсной фазы в затопленной осесимметричной импактной струе // Оптические методы исследования потоков: XI Межд. науч-технич. конференция [Электронный ресурс]: труды конференции. – Электрон. дан. – М.: МЭИ (ТУ), 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Доклад № 40. 8 с. – ISBN 978-5-9902974-1-8 – № гос. регистрации 0321101669.
36. Белоусов А. П. Доплеровский метод измерения среднего диаметра капель и пузырьков / А. П. Белоусов, П. Я. Белоусов // Оптические методы исследования потоков: XII Межд. науч-технич. конференция [Электронный ресурс]: труды конференции. – Электрон. дан. – М.: НИУ «МЭИ», 2013. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Доклад № 1-1, 8 с. – ISBN 978-5-91940-663-1 – № гос. регистрации 0321302584.
37. Белоусов А. П. Оптические системы локальной и полевой диагностики газожидкостных потоков / А. П. Белоусов, П. Я. Белоусов, Л. А. Борыняк // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр., 18–22 апреля 2016 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2016»: сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск: СГУГиТ, 2016. – С. 93–99.

#### *Учебные пособия*

38. Белоусов А. П. Механика. Электростатика. Электрический ток: курс лекций / А. П. Белоусов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 148 стр.
39. Белоусов А. П. Электромагнетизм. Колебания и волны. Оптика: учебное пособие / А. П. Белоусов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 240 стр.
40. Белоусов А. П. Оптическая диагностика многофазных потоков: учеб. пособие / А. П. Белоусов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 227 с.

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
Тел./факс. (383) 346-08-57  
Формат 60 × 84/16, объем 2,5 п.л., тираж 120 экз.  
Заказ № 1156, подписано в печать 20.09.2017.