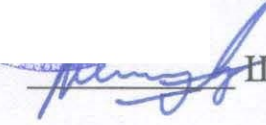


УТВЕРЖДАЮ

Ректор

омского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники,

доктор технических наук, профессор

 Шелупанов Александр Александрович

« 04 » декабря 2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу **Белоусова Андрея Петровича** «Разработка оптических систем локальной и полевой диагностики газожидкостных потоков», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.07 – оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Диссертационная работа А.П. Белоусова посвящена разработке, исследованию и применению новых оптических систем диагностики (диапазон излучения 380-780 нм) многофазных потоков. Такие системы позволяют исследовать основные параметры газожидкостных потоков в реальном времени, автоматизировать процесс сбора и обработки экспериментальных данных и имеют преимущества перед применявшимися ранее по совокупности таких характеристик как точность, временное и пространственное разрешение, габариты, программный сервис и возможность работы в реальном времени. Интенсивное развитие технологий тепловой и атомной энергетики, химического производства, трубопроводного транспорта и других, основанных на использовании многофазных потоков, приводит к проблеме совершенствования методов диагностики параметров таких потоков. Наибольший интерес вызывают современные оптические методы, обладающие рядом преимуществ, таких как бесконтактность, скорость сбора информации, доступность панорамных и локальных методов и т.д. В то же время практическая реализация оптической диагностики затруднена наличием большого количества границ раздела фаз, высокой концентрацией включений. Поэтому разработка и развитие оптических систем диагностики многофазных потоков является актуальной задачей. Работа А.П. Белоусова удовлетворяет **критерию новизны**, так как проводимые в рамках диссертационной работы исследования, связаны с разработкой, совершенствованием, обоснованием функциональных возможностей перспективных оптических систем диагностики многофазных потоков, позволяющих получить важную информацию о локальной и полевой структуре течений в системах теплообмена, химических, биологических, ядерных реакторах и др. Применение перспективных оптических

устройств и методов диагностики многофазных потоков для повышения эффективности ряда промышленных производств, используемых в Российской Федерации, определяют не только **новизну** но и **практическую значимость** проведенного А.П. Белоусовым исследования.

Новизна полученных в диссертационной работе А.П. Белоусова результатов заключается в следующем.

Диссертантом разработан и создан ряд локальных и полевых (по области выборки информации) оптико-электронных систем диагностики многофазных течений по совокупности характеристик, превосходящие 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.

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

Диссертантом 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.

Практическая значимость работы

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, имеют большое научно-практическое значение. Опыт создания и эксплуатации диагностических систем послужил толчком для развития измерительных технологий, как существующих, так и будущих комплексов. Аналитические, расчетные и экспериментальные данные о различных режимах эксплуатации, стали основанием для планирования и проведения ряда новых экспериментов, давших

важную информацию о структуре газожидкостных течений. Практическое значение имеют и разработанные автором расчетные модели, используемые на кафедрах Общей физики НГТУ и Специальных устройств и технологий СГУГиТ.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации А.П. Белоусова результатов подтверждается корректностью постановки задач и исходных теоретических положений. Анализ проведен при вполне обоснованном выборе математического аппарата и использовании известных литературных данных. Достоверность результатов подтверждается сопоставлением расчетных и экспериментальных данных, полученных автором, с аналитическими и численными решениями, данными аналогичных исследований; сравнением полученных результатов с теоретическими моделями многофазной гидромеханики; простотой используемых базовых алгоритмов, сравнением с результатами независимых оптико-механических измерений; результатами работ, доложенных на российских и международных конференциях и опубликованных в ведущих научных журналах.

К **основным научным и практическим результатам** диссертационного исследования А.П. Белоусова можно отнести следующее:

1. Диссертантом 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.

2. 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;

3. 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;

4. 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%;

5. 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 пикселях;

6. 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;

7. 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 ~ 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.

Результаты диссертационного исследования А.П. Белоусова могут быть полезными и **рекомендованными для использования** в научно-исследовательских институтах и университетах, занимающихся научными разработками в области оптических систем локальной и полевой диагностики газожидкостных потоков, а так же организациях и предприятиях нефтяной газовой и других отраслей промышленности с целью совершенствования систем и методов диагностики газожидкостных потоков.

По теме диссертационного исследования А.П. Белоусов **опубликовал 40 работ**, в том числе **15 статей** в журналах, включенных в Перечень ВАК. Кроме того, соискатель является автором 2-х патентов на изобретения, 20 работ в сборниках трудов международных конференций, 3 учебных пособия.

В опубликованных работах достаточно полно отражены основные результаты диссертационного исследования А.П. Белоусова, и эти результаты хорошо известны специалистам.

Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

В диссертационной работе можно отметить следующие **недостатки**:

1. Небольшой объем диссертации (изложена всего на 220 страницах). Ввиду этого в некоторых разделах ощущается недостаток поясняющего иллюстративного материала. Например, в главе 3 стр. 82 отсутствует схема всего измерительного комплекса, отображен лишь общий принцип формирования измерительного объема в дифференциальной схеме ЛДА.
2. На рис 5.2 рассматривается группа шариков, однако на стр 125, 126, 131 рассматривается обтекание одного шарика без учета взаимодействия боковых течений смежных элементов. Далее на стр 171 (нижний абзац) делается вывод о соответствии модели для импактной струи.
3. На стр 67 диссертации рассмотрен процесс выхода пузырей из жидкости, но не рассматривается обратный процесс, когда пузыри входят в жидкость (например эжектирование или повышение давления при транспортировке).
4. Глава 5 перегружена гидродинамическими расчетами и моделями. Данные результаты, возможно, лучше бы смотрелись в приложении.
5. При описании разрабатываемых комплексов было бы весьма полезно представить информационную часть, например, в виде диаграмм.

Замеченные недостатки не влияют на общее самое благоприятное впечатление от диссертационной работы А.П. Белоусова. Диссертация является законченной научной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны перспективные оптические системы диагностики многофазных потоков, позволяющие получить важную информацию о локальной и полевой структуре течений в системах теплообмена, химических, биологических, ядерных реакторах и др. Применение предложенных и разработанных автором оптических устройств и методов диагностики многофазных потоков особенно перспективно для повышения эффективности ряда промышленных производств, используемых в Российской Федерации.

По своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований и практической значимости полученных результатов представленная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Белоусов Андрей Петрович – достоин присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Доклад А.П. Белоусова по теме диссертации заслушан и одобрен на совместном научно-техническом семинаре кафедры электронных приборов факультета электронной техники и кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники радиотехнического факультета (Протокол № 1 от 30 августа 2017 года).

Настоящий отзыв заслушан и утвержден на совместном научно-техническом семинаре кафедры электронных приборов факультета электронной техники и кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники радиотехнического факультета (Протокол № 3 от 28 ноября 2017 года).

Старший научный сотрудник
Научно-образовательного центра
«Нелинейная оптика, нанофотоника и лазерные
технологии» Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники
доктор физико-математических наук
(специальность 01.04.03 – радиофизика)
Буримов Николай Иванович



Профессор кафедры Сверхвысокочастотной
и квантовой радиотехники
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники
доктор физико-математических наук
(специальность 01.04.05 – оптика),
старший научный сотрудник
Мандель Аркадий Евсеевич



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»
634050, Российская Федерация, г. Томск, пр. Ленина, 40
Телефон: (3822) 51-05-30; Факс: (3822) 51-32-62; WWW: <https://tusur.ru/>; E-mail: office@tusur.ru