

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИТ СО РАН

член-корреспондент РАН

Алексеенко С. В.

16 » мая 2016 г.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Диссертация «Многопараметрическая триангуляция геометрии динамичных объектов в фазово-неоднородных средах» выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН (ИТ СО РАН).

В период подготовки диссертации соискатель Двойнишников Сергей Владимирович работал в ИТ СО РАН, отделе физической гидродинамики, лаборатории проблем тепломассопереноса, старшим научным сотрудником.

В 2006 г. окончил магистратуру Новосибирского государственного университета по специальности физика.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему: «Разработка оптоэлектронных систем для измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения» по специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы защищена в 2009 году на заседании диссертационного Совета ДМ 212.251.01 Сибирской государственной геодезической академии.

Научный консультант: Меледин Владимир Генриевич, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, отдел физической гидродинамики, лаборатория проблем тепломассопереноса, главный научный сотрудник;

ПРИСУТСТВОВАЛИ: 24 сотрудника ИТ СО РАН, в том числе: чл.-корр. РАН Алексеенко С.В., д.ф.-м.н. Евсеев А.Р., д.ф.-м.н Куйбин П.А., д.т.н. Мальцев Л.И., д.т.н Меледин В.Г., д.т.н. Наумов И.В., д.т.н. Прибатурина Н.А., д.ф.-м.н. Хабахпашев Г.А., д.ф.-м.н. Шторк С.И., д.ф.-м.н. Яворский Н.И., , д.т.н. Ярыгин В.Н., к.ф.-м.н. Актершев С.П., к.ф.-м.н. Алексеев М.В., к.т.н. Месаркишвили З.С., к.ф.-м.н. Смовж Д.В. и соавторы соискателя: к.т.н. Аникин Ю.А., к.т.н. Кабардин И.К., к.т.н. Рахманов В.В., Главный В.Г., Климов А.В., Куликов Д.В., Павлов В.А., Садбаков О.В., Стрельник А.С.

СЛУШАЛИ: доклад с.н.с. ИТ СО РАН С.В. Двойнишникова "Лазерная многопараметрическая триангуляция динамических объектов в фазово-неоднородных средах".

По итогам обсуждения принято следующее ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

1. Диссертационная работа посвящена развитию методов лазерной многопараметрической триангуляции для бесконтактного измерения геометрических параметров динамических объектов в фазово-неоднородных средах.

2. Тема диссертации является актуальной. Развитие бесконтактных методов измерений геометрических параметров статичных и движущихся объектов в науке и в инновационных промышленных технологиях связано с возможностями оптики, источниках излучения и современных систем обработки информации. Методы многопараметрической триангуляции в этом плане

особенно перспективны, но требуют комплексного подхода к решению этой задачи. Широкий спектр научно-технических проблем возникающих в оптике, источниках излучения, фотoreгистрации и обработке сигналов, определяет многообразие способов их преодоления, отличающихся по функциональным возможностям и техническим решениям.

Проблема бесконтактных динамичных измерений геометрии крупногабаритных объектов в условиях фазово-неоднородных сред на момент начала работ оставалась нерешенной. Связано это с тем, что существующие методы и оптико-электронные измерители не в полной мере учитывали искажения оптических сигналов фазово-неоднородной средой и требовали адаптации под свойства измеряемых объектов. Кроме того, они были ориентированы на специалистов самой высокой квалификации, от которых требовалось умение не только профессионально обеспечивать необходимые режимы измерений, но и выявлять физический смысл полученных результатов.

Работа Двойнишникова С.В. посвящена анализу и решению обозначенной научно-технической проблемы и представляет несомненный научный и практический интерес.

**3. Цель работы** заключается в создании, развитии и реализации триангуляционных методов измерений геометрических параметров статичных и динамичных объектов в термоградиентных фазово-неоднородных средах для науки и современных промышленных технологий.

**4. Личное участие соискателя.** Основные научные результаты, включенные в диссертацию и выносимые автором на защиту, получены соискателем самостоятельно. Постановка задач исследования и научная проблематика разрабатывалась диссертантом как единолично, так и при участии научного консультанта д.т.н. В.Г. Меледина. Разработки измерительных систем на стадиях НИОКР, их практическая реализация и внедрения выполнялись сотрудниками научного коллектива под руководством и при непосредственном участии автора.

Материалы, представленные в разделе 1.1, 1.4, получены при участии Меледина В.Г., Главного В.Г., Куликова Д.В.; 1.5, 1.9 – Меледина В.Г., Аникина Ю.А., Наумова И.В.; 1.10, 1.11 – Меледина В.Г., Рахманова В.В., Кабардина И.К.; 3.1 – Главного В.Г., Куликова Д.В.; 3.2, 3.3, 3.4 – Меледина В.Г., Бакакина Г.В., Павлова В.А., Куликова Д.В., Аникина Ю.А.; 3.5., 4.2. – Аникина Ю.А., 3.6. – Главного В.Г., Рахманова В.В.; 4.3 – Меледина В.Г., Куликова Д.В., Наумова И.В.; 4.4. – Меледина В.Г., Куликова Д.В., Аникина Ю.А. Представление изложенных в диссертации и выносимых на защиту результатов, полученных в совместных исследованиях, согласовано с соавторами.

### **5. Научная новизна проведенных исследований:**

Соискателем предложены и реализованы новые методы многопараметрической триангуляции с применением пространственной и временной модуляции оптического источника и статистического анализа структуры фазово-неоднородной среды, обеспечившие точные и устойчивые измерения геометрических параметров статичных и динамичных объектов в фазово-неоднородных средах.

Впервые на основе методов многопараметрической триангуляции в фазово-неоднородных средах выполнены бесконтактные натурные измерения трехмерной геометрии лопастей рабочего колеса лопастно-поворотной турбины.

Предложена, обоснована и апробирована радиационно-безопасная технология мониторинга толщины горячего металлопроката на основе многопараметрической синхронной дифференциальной облачной триангуляции, с рекордно малым уровнем погрешности  $10^{-6}$  в лабораторных и  $10^{-5}$  в производственных условиях металлургического горячего цеха.

**6. Практическая ценность результатов** заключается в том, что на основе полученных результатов и выводов разработан действующий прототип оптоэлектронной системы для измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе многопараметрической триангуляции. Прибор применен для впервые выполненных бесконтактных измерений 3D геометрии лопасти рабочего колеса лопастно-поворотной турбины в процессе производства ОАО “Силовые

машины-ЛМЗ” с применением методов пространственно-временной модуляции источника оптического излучения. Сфера применения может быть расширена на другие области научного эксперимента и промышленного производства.

На основе полученных результатов и выводов разработана действующая оптоэлектронная измерительная система для измерения толщины горячего проката. Работа измерительного комплекса основана на методах многопараметрической синхронной дифференциальной лазерной облачной триангуляции. Измеритель предназначен для работы в тяжелейших условиях эксплуатации горячего металлургического цеха. Измерительный комплекс успешно прошел цикл промышленных испытаний и введен в промышленную эксплуатацию в цехе горячего проката ОАО «Новосибирский металлургический завод им. Кузьмина» в 2013 году. Кроме того, результаты работы активно используются в лабораториях института теплофизики, ОАО «ИОИТ».

**7. Достоверность полученных в работе результатов** обеспечена аналитическими исследованиями, математическим моделированием, результатами экспериментальных исследований и длительными промышленными испытаниями реализаций предложенных методов и подходов.

**8. По материалам диссертации опубликованы** следующие работы в рецензируемых журналах:

1. Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Кабардин И.К., Куликов Д.В., Меледин В.Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного измерения профиля поверхности трехмерных крупногабаритных объектов сложной формы // Измерительная техника №1, 2016. – С.13-17.
2. S. Dvoynishnikov, V. Meledin, V. Pavlov Integrated Assessment Method of Impulse Response in Optical System of 3D Scanner with Phase Triangulation / 2015 International Conference on Computer Science and Environmental Engineering, May 17-18, 2015, Beijing, China (CSEE2015) ISBN: 978-1-60595-240-6. - p. 527-531.

3. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Главный В.Г., Наумов И.В., Чубов А.С. Оценка оптимальной частоты пространственной модуляции излучения 3D-измерений // Измерительная техника №5, 2015. – С.24-27.
4. Dvoynishnikov S., Rakhmanov V. Power installations geometrical parameters optical control method steady against thermal indignations // EPJ Web of Conferences, № 82, 2015. pp. 01035-3. DOI: 10.1051/epjconf/20158201035
5. Рахманов В.В., Кабардин И.К., Двойнишников С.В. Синхронная визуализация волнового пленочного течения на вращающемся диске // Международный научно-исследовательский журнал №11 (42), Часть 2. Декабрь 2015. – С.89-91.
6. Naumov I.V., Dvoynishnikov S.V., Kabardin I.K., Tsoy M.A. Vortex breakdown in closed containers with polygonal cross sections // Physics of Fluids. – 2015. - Vol. 27 (12). - p.124103.
7. S.Dvoynishnikov, V.Meledin, G.Bakakin, D.Kulikov Laser Cloudy Triangulation Method for Geometrical Measurements Under the Optical Refraction Conditions / 2015 International Conference on Computer Science and Environmental Engineering, May 17-18, 2015, Beijing, China (CSEE2015) ISBN: 978-1-60595-240-6. - p.532-538.
8. Двойнишников С.В., Рахманов В.В., Меледин В.Г., Куликов Д.В., Аникин Ю.А., Кабардин И.К. Экспериментальная оценка применимости лазерных триангуляторов для измерений толщины горячего проката // Метрология №12, 2014. - С. 9 - 21.
9. Dvoynishnikov S. Development methods of steam turbines 3D geometry optical control for effective heat power equipment quality improvement / Thermophysical Basis of Energy Technologies, EPJ Web of Conferences, Vol. 76, 2014. 1003-4
- 10.Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Куликов Д.В., Павлов В.А., Прибатури Н.А. Прецизионная диагностика трехмерной геометрии лопастей турбин для гидроэнергетики // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2; URL: [www.science-education.ru/108-8795](http://www.science-education.ru/108-8795)

- 11.Главный В.Г., Пененко А.В., Двойнишников С.В. О статистической оценке ошибки оператора СЛАУ в задаче калибровки лазерного измерителя толщины горячего проката / Сибирские электронные математические известия – 2013 г.- часть I - С.16-27.
- 12.Ануфриев И.С., Кузнецов Г.В., Шадрин Е.Ю., Шарыпов О.В., Аникин Ю.А., Двойнишников С.В., Куликов Д.В., Рахманов В.В. Исследование структуры вихревого течения в топочной камере нового типа методом цифровой трассерной визуализации // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – с. 31-35.
- 13.Меледин В.Г., Кротов С.В., Бакакин Г.В., Двойнишников С.В., Наумов И.В., Павлов В.А., Рахманов В.В., Садбаков О.Ю. Лазерная доплеровская анемометрия горячего проката // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2; URL: [www.science-education.ru/108-8812](http://www.science-education.ru/108-8812)
- 14.Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Шпольвинд К.В. Метод компенсации нелинейности тракта источник–приемник оптического излучения при 3D-измерениях на основе фазовой триангуляции / Измерительная техника, ISSN 0368-1025. №2 2012, С. 12-16.
- 15.Куликов Д.В., Меледин В.Г., Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Бакакин Г.В., Главный В.Г., Кротов С.В., Павлов В.А., Чубов А.С., Прибатурина Н.А. Метод лазерной диагностики динамической формы вращающихся объектов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2; URL: [www.science-education.ru/108-8793](http://www.science-education.ru/108-8793)
- 16.Кабардин И.К., Рахманов В.В., Меледин В.Г., Елисеев И.А., Двойнишников С.В. Оптический метод измерения мгновенного поля толщины пленки жидкости на основе полного внутреннего отражения // Теплофизика и аэромеханика, 2012, том 19 - С 89-95.
- 17.I. Kabardin, V. Meledin, S. Dvoynishnikov The investigation of hydraulic jump disruption in liquid film flow on a surface of a rotating disk // 6-th international topical team workshop on Two-phase systems for ground and space application, books of abstracts.- Italy.- 2011.- p.98.

- 18.Двойнишников С.В., Куликов Д.В., Меледин В.Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного восстановления профиля поверхности трехмерных объектов сложной формы // Метрология №4, 2010. – С. 15-27.
- 19.Куликов Д.В., Аникин Ю.А., Двойнишников С.В., Меледин В.Г. Лазерная технология определения геометрии ротора под нагрузкой // Электрические станции №7, 2010. - С. 39-43.
- 20.Двойнишников С.В. Устойчивый метод расшифровки интерферограмм с пошаговым сдвигом / Компьютерная оптика, Т. 31, №2, апрель-июнь 2007.- С.21-25.

Результаты, представленные в диссертации, опубликованы более чем в 110 научных работах, в том числе в 15 работах в периодических изданиях, рекомендованных ВАК для публикации материалов докторских диссертаций, 11 патентов Российской Федерации.

9. Материалы диссертации докладывались и представлялись на всероссийских и международных конференциях, среди которых: Основные результаты диссертации докладывались на следующих научных мероприятиях: International Conference on Computer Science and Environmental Engineering (Beijing, 2015), Научно-практическая Internet-конференция «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики» (Ульяновск, 2015), Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные проблемы науки» (Уфа, 2015), Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современной науки» (Стерлитамак, 2015), Международная научно-практической конференция «Современное состояние и перспективы развития технических наук» (Уфа, 2015), Международная научно-практическая конференция “Фундаментальные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности” (Санкт-Петербург, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2014), Международная научно-практическая конференция «Приоритетные направления

развития науки» (Уфа, 2014), Международная научно-практическая конференция «Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве» (Новотроицк, 2014), Всероссийская научно-практическая конференция «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2013), Международная научная конференция «Информационные технологии XXI века» (Хабаровск, 2013), Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы физики» (Саранск, 2013), International topical team workshop on Two-phase systems for ground and space application (Italy, 2011), Международная конференция "Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках" (Новосибирск, 2011), Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков», Москва (2003, 2007), Всероссийская школа-семинар молодых ученых «Физика неравновесных процессов в энергетике и наноиндустрии» (Новосибирск, 2007), Всероссийская конференция молодых ученых «Физика - космосу» (Байконур, 2014), Всероссийская школа-конференция с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014), Международная молодежная научная школа-конференция «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач» (Новосибирск, 2012), Международная молодёжная конференция «Энергетическое обследование как первый этап реализации концепции энергосбережения» (Томск, 2012), Всероссийская молодежная научная конференция «Современные проблемы математики и механики» (Томск, 2012), Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации.» (Новосибирск, 2008), Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2004, 2006, 2007), Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (Новосибирск, 2006), Научно-практическая конференция молодых ученых и студентов НГУ и ИАиЭ СО РАН «Информационно-вычислительные системы анализа и синтеза изображений» (Новосибирск, 2006), а также на различных научных семинарах и совещаниях.

10. Результаты работы получили широкую известность и признание специалистов. Работа «Лазерный радиационно-безопасный измерительный комплекс для контроля геометрических параметров горячего и холодного металлопроката» была отмечена золотой медалью и дипломом I степени по итогам конкурса «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» XX Международной выставки-конгресса «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (НИ ТЕСН'2014).

Цикл работ, посвященных разработке методов многопараметрической триангуляции для измерения трехмерной геометрии крупногабаритных объектов в фазово-неоднородных средах отмечен медалью «За лучшую научную студенческую работу в области технических и гуманитарных наук» Министерства образования Российской Федерации (2006 г.).

Работа «Лазерный радиационно-безопасный измерительный комплекс для измерения геометрических параметров горячего и холодного проката ЛАД-ОРЗ» удостоена звания «Лауреат конкурса ЛАС 2013 года» в номинации "Лазерное оборудование и технологии для технических измерений, диагностики и контроля процессов" (Москва, 2013).

Результаты, отраженные в диссертационной работе признаны победителем конкурса «Лучшие аспиранты РАН» Фонда содействия отечественной науке (2007 г.), многократно поддержаны грантами для молодых кандидатов наук Фонда Президента РФ (2011, 2013, 2015 гг.), поддержана Фондом Бортника (2008, 2014 гг.), грантом РФФИ (2015).

11. Диссертация С.В. Двойнишникова представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую новые методы решения актуальных задач экспериментальной науки и промышленных технологий. Данная работа определила научное направление, связанное с разработкой методов и устройств прецизионной оптико-лазерной диагностики геометрических параметров статичных и движущихся объектов в условиях нестационарных фазово-неоднородных сред. Работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора

технических наук. Семинар считает, что результаты работы, её объём и изложение соответствуют всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям.

Диссертация «Многопараметрическая триангуляция геометрии динамичных объектов в фазово-неоднородных средах» Двойнишникова Сергея Владимировича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Заключение принято на заседании семинара отдела "Физическая гидродинамика".

Присутствовало на заседании 24 чел. Результаты голосования: «за» - 24 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол № 3 от «13» мая 2016 г.

  
Прибатури<sup>н</sup> Николай Алексеевич,  
д.т.н, гл. н.с, отдел физической  
гидродинамики, заместитель  
заведующего лаборатории проблем  
тепломассопереноса.