УТВЕРЖДАЮ

директор ИТ СО РАН, академик

Маркович Д.М.

5 марта 2026 г.

М.П.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ С.С.КУТАТЕЛАДЗЕ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
АКАДЕМИИ НАУК

По диссертации Зуева Владислава Олеговича «Разработка адаптивных триангуляционных систем для точного контроля геометрии объектов в машиностроении и энергетике» на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности *2.2.6 "Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы"*. Диссертация выполнена в Лаборатории основ безопасности и эффективного использования реакторных установок ИТ СО РАН. В 2021 г. соискатель ученой степени окончил бакалавриат НГУ по направлению подготовки 03.03.02 Физика. В 2023 г. соискатель ученой степени окончил магистратуру НГУ по направлению подготовки 03.04.02 Физика. В период с 01.09.2023 по 31.08.2027 обучается в аспирантуре ИТ СО РАН, научный руководитель: Двойнишников Сергей Владимирович, заведующий лаб. 6.4 ИТ СО РАН, д.т.н.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Актуальность темы обоснована необходимостью развития технологий прецизионного контроля геометрических параметров высокотехнологичных изделий для снижения рисков техногенных катастроф и повышения эффективности машиностроения, энергетики и других отраслей промышленности.

2. Цель работы: разработка и практическая реализация методов оптической триангуляции, адаптивных к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейным искажениям, для прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов в машиностроении и энергетике.

Поставлены и решены следующие задачи:

1. разработка адаптивных методов формирования, регистрации и обработки структурированных изображений для прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов в машиностроении и энергетике в условиях динамичного изменения светорассеивающих свойств поверхности и нелинейной приемно-передаточной функции;
2. создание методов калибровки триангуляционных систем для обеспечения возможности контроля трехмерной геометрии объектов в машиностроении и энергетике с адаптивным локальным пространственным разрешением в условиях нелинейных оптических искажений;
3. практическая реализация и испытания адаптивных к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейным оптическим искажениям триангуляционных систем для прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов в машиностроении и энергетике.

3. Научная новизна основных положений, результатов и выводов, полученных в диссертации:

1. предложен и внедрен новый метод фазовой триангуляции непрозрачных поверхностей в условиях динамичного изменения их светорассеивающих свойств на основе адаптивной компенсации нелинейности приемно-передаточной функции и оптимизации параметров пространственно-временной модуляции интенсивности;
2. разработан и апробирован новый метод оптической триангуляции светопреломляющих поверхностей на основе динамического светового сечения и адаптивной декомпозиции регистрируемого сигнала от аддитивного светового потока;
3. обеспечен динамический контроль трехмерного профиля наледи с адаптивным локальным пространственным разрешением в исследованиях процессов обледенения объектов энергетики в условиях изменения светорассеивающих свойств поверхности и нелинейных оптических искажений.

4. Практическая ценность и реализация результатов работы:

На основе полученных результатов и выводов разработаны действующие прототипы адаптивных к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейным оптическим искажениям триангуляционных систем с возможностью прецизионного контроля

трехмерной геометрии и деформаций исследуемых объектов в процессах статического нагружения, сублимации и обледенения в задачах машиностроения и энергетики. С использованием разработанной адаптивной многомодульной триангуляционной системы в машиностроении обеспечена возможность дистанционной одновременной микро- и макромасштабной диагностики поля деформаций объектов с комплексным напряженно-деформированным состоянием при их статическом нагружении. Благодаря применению разработанных адаптивных триангуляционных систем на действующих аэродинамических и климатическом стендах закрытого типа в Институте теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН обеспечены возможности бесконтактной диагностики параметров массообмена в теплофизических исследованиях, нацеленных на разработку эффективных энергетических установок и динамического контроля трехмерного профиля наледи с адаптивным локальным пространственным разрешением в рамках поиска эффективных методов борьбы с обледенением объектов энергетики. Результаты работы активно используются в АО «УМЗ», АО «Вектор-Бест», ООО «Сигма-Про», ООО «ЛИСТ», ОАО «ИОИТ», ООО «БИТ» и ряда институтов СО РАН, а сфера их применения может быть расширена на другие области науки и промышленных технологий в машиностроении и энергетике.

5. Степень достоверности результатов:

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждена аналитическими исследованиями, математическим моделированием, созданием действующих прототипов адаптивных к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейным оптическим искажениям триангуляционных систем для прецизионного контроля трехмерной геометрии и деформаций исследуемых объектов в процессах статического нагружения, сублимации и обледенения, результатами их лабораторных и производственных испытаний.

6. Основные положения, выносимые на защиту:

1. использование устойчивого к изменению светорассеивающих свойств поверхности метода фазовой триангуляции с адаптивной компенсацией нелинейности приемно-передаточной функции в условиях ограниченного динамического диапазона оптической системы обеспечивает контроль трехмерной геометрии непрозрачных объектов с погрешностью на уровне 0.02 % от глубины измерительного объема;
2. применение адаптивного метода оптической триангуляции на основе пространственно-временной модуляции интенсивности в виде динамического

светового сечения обеспечивает контроль трехмерной геометрии светопреломляющих поверхностей с погрешностью на уровне 0.07 % от глубины измерительного объема;

3. автоматизированная калибровка триангуляционных систем с регрессионным и дифференциальным анализом фазовых распределений обеспечивает компенсацию нелинейных оптических искажений и возможность контроля трехмерной геометрии объектов с адаптивным пространственным разрешением;
4. адаптивная обработка данных оптической триангуляции на основе пространственно-временного корреляционного анализа и многопараметрического восстановления полигональной поверхности обеспечивает возможность контроля трехмерных деформаций объектов в машиностроении и энергетике с светорассеивающими свойствами в широком диапазоне.

7. Личный вклад автора:

Основные научные результаты, включенные в диссертацию и выносимые автором на защиту, получены соискателем самостоятельно. Постановка задач исследования и анализ научной проблематики выполнялись диссертантом как единолично, так и при участии научного руководителя д.т.н. С.В. Двойнишникова. Разработка программных интерфейсов, методов измерения и калибровки адаптивных триангуляционных систем, их внедрение, испытания и обработка измерительных данных выполнялись автором самостоятельно. Проектирование функциональных узлов и практическая реализация адаптивных триангуляционных систем выполнялись сотрудниками научного коллектива при непосредственном участии соискателя.

8. Список работ автора по тематике диссертации, опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

1) Kabardin I., Dvoynishnikov S., Gordienko M., Kakaulin S., Ledovsky V., Gusev G., Zuev V., Okulov V. Optical methods for measuring icing of wind turbine blades // Energies. – 2021. – Vol. 14. – № 20.

2) Зуев В.О., Двойнишников С.В., Кабардин И.К., Меледин В.Г. Система измерения трёхмерной геометрии методами фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея: программный комплекс для настройки // Измерительная техника. – 2022. – № 8. – С. 46-51.

3) Зуев В.О., Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Рахманов В.В., Садбаков О.Ю., Кабардин И.К. Измерение геометрических параметров наледи методом фазовой

триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов // Теплофизика и аэромеханика. – 2023. – Т. 30. – № 1. – С. 127-132.

4) Двойнишников С.В., Зуев В.О., Бакакин Г.В., Павлов В.А. Алгоритм обработки изображений с кодом Грея для измерения трёхмерной геометрии сложнопрофильных объектов // Измерительная техника. – 2024. – №. 11. – С. 19-26.

5) Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Кабардин И.К., Рахманов В.В., Зуев В.О. Метод фазовой триангуляции со статистической фильтрацией для измерений в условиях случайных аддитивных помех и ограниченного динамического диапазона фотоприёмника // Измерительная техника. – 2022. – № 6. – С. 36-40.

6) Kabardin I.K., Dvoynishnikov S.D., Gordienko M.R., Kakaulin S.V., Ledovsky V.E., Zuev V.O. Development of multivariable triangulation method for diagnostics of icing of wind turbine blades // Journal of Engineering Thermophysics. – 2022. – Vol. 31. – P. 567-572.

7) Kabardin I.K., Meledin V.G., Dvoynishnikov S.V., Stepanov K.I., Mukhin D.G., Zuev V.O., Gordienko M.R., Kakaulin S.V., Zezyulin I.V., Ledovsky V.E., Zubanov K.S. Features of using nanostructured plastic polymer coatings for protection against icing of industrial structures // Journal of Engineering Thermophysics. – 2023. – Vol. 32. – P. 54-61.

8) Двойнишников С.В., Бакакин Г.В., Зуев В.О., Кашкарова М.В., Павлов В.А. Расширение динамического диапазона измерительной системы, реализующей метод фазовой триангуляции // Измерительная техника. – 2023. – № 9. – С. 25-30.

9) Двойнишников С.В., Бакакин Г.В., Зуев В.О., Меледин В.Г. Адаптивный алгоритм обработки данных в условиях аддитивных помех фотоприёмника в задачах измерения трёхмерной геометрии методами фазовой триангуляции // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2023. – Т. 26 – № 1. – С. 47–54.

10) Meledin V.G., Dvoynishnikov S.V., Stepanov K.I., Mukhin D.G., Gordienko M.R., Kakaulin S.V., Ledovsky V.E., Zubanov K.S., Zuev V.O., Yavorsky N.I., Bakakin G.V., Kabardin I.K. Reducing ice adhesion by Using Nanostructured Plastic Polymer Coatings for De-Icing of Wind Turbine Blades // Journal of Engineering Thermophysics. – 2023. – Vol. 32. – P. 591-595.

11) Меледин В.Г., Кабардин И.К., Двойнишников С.В., Степанов К.И., Мухин Д.Г., Гордиенко М.Р., Какаулин С.В., Ледовский В.Е., Зубанов К.С., Зуев В.О., Яворский Н.И., Бакакин Г.В. Экспериментальные исследования влияния обледенения на кинематику потоков и силовые параметры лопастей ветрогенераторов методами лазерной доплеровской анемометрии // Теплофизика и аэромеханика. – 2024. – Т. 31. – № 2. – С. 255-264.

12) Meledin V.G., Kabardin I.K., Dvoynishnikov S.V., Zuev V.O., Mukhin O.G., Kakaulin S.V., Gordienko M.R., Zubanov K.S., Stepanov K.I., Goltsev N.S., Tolstopyatov E.M., Grakovich P.N., Ivanov L.F., Brel D.V., Kalinin L.A. Experimental research on combined methods against

icing of wind turbine blades // Journal of Engineering Thermophysics. – 2025. – Vol. 33, No. 4. – P. 779-791.

13) Rakhmanov V.V., Kabardin I.K., Klimov A.V., Glavny V.G., Kulikov D.V., Meledin V.G., Dvoynishnikov S.V., Zuev V.O., Bakakin G.V., Pavlov V.A. Correcting spectral density of laser doppler anemometer signals during measuring of high-speed aerodynamic flows. Part 1 // Journal of Engineering Thermophysics. – 2025. – Vol. 33. – P. 12-24.

14) Kabardin I.K., Rakhmanov V.V., Klimov A.V., Glavny V.G., Kulikov D.V., Meledin V.G., Dvoinishnikov S.V., Zuev V.O., Bakakin G.V., Pavlov V.A. Correcting spectral density of laser doppler anemometer signals during measuring of high-speed aerodynamic flows. Part 2 // Journal of Engineering Thermophysics. – 2025. – Vol. 33. – P. 25-34.

9. Апробация работы:

Результаты работы представлялись и обсуждались на Национальной конференции с международным участием «СибОптика. Актуальные вопросы высокотехнологичных отраслей» (Новосибирск, 2022, 2023, 2024, 2025), Международной научной студенческой конференции (Новосибирск, 2021, 2022, 2023), Международной конференции по методам аэрофизических исследований (Новосибирск, 2022, 2024), Международной научно-практической конференции «Золотухинские чтения. Нефть, газ и энергетика в Арктическом регионе» (Архангельск, 2023), Всероссийской конференции с международным участием «XL Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2024, 2025), Всероссийской школе-конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Шерегеш, 2023), Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Севастополь, Сочи, Махачкала, Сочи 2021, 2022, 2023, 2025), Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (Онлайн, Новосибирск, Московская область, 2022, 2024, 2025), Международной конференции по химическим реакторам «ХимРеактор» (Минск, 2025).;

10. Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите:

Работа посвящена разработке адаптивных триангуляционных систем для точного контроля геометрии объектов в машиностроении и энергетике и, поэтому, её содержание соответствует специальности 2.2.6 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы».

11. Решение о рекомендации к защите:

Диссертация Зуева Владислава Олеговича «Разработка адаптивных триангуляционных систем для точного контроля геометрии объектов в машиностроении и энергетике» соответствует критериям, установленным в соответствии с Федеральным законом о науке и государственной научно-технической политике, и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.2.6 “Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы”. Настоящее заключение подготовлено на основании решения Секции Ученого совета по научному направлению **Теплофизические основы энергетики (включая горение).**

Присутствовало на заседании 13 человек, в том числе 1 академик РАН, 2 чл.-корр. РАН, 7 докторов наук, 3 кандидатов наук.

_____ Председатель Секции V Ученого Совета,

академик РАН Алексеенко С.В.

_____ Секретарь V Секции Ученого совета,

к.т.н. Лукашов В.В.

«5» марта 2026 г.