

На правах рукописи



ЗУЕВ

Владислав Олегович

**РАЗРАБОТКА АДАПТИВНЫХ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ
СИСТЕМ ДЛЯ ТОЧНОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ
ОБЪЕКТОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ И ЭНЕРГЕТИКЕ**

Специальность 2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и
комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск
2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: **Двойнишников Сергей Владимирович**
доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией

Официальные оппоненты: **Спектор Александр Аншелевич**
доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Новосибирский государственный технический университет, профессор

Голицын Александр Андреевич
кандидат технических наук, Новосибирский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится «17» декабря 2026 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.1.028.01 (Д 003.005.02) при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН и на сайте: <https://www.iae.nsk.su/ru/dissertation-council>.

Автореферат разослан «1» октября 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н.



Ильичев Л.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Возможность прецизионного контроля геометрических параметров высокотехнологичных изделий является важнейшим фактором снижения рисков техногенных катастроф и повышения эффективности машиностроения, энергетики и других отраслей промышленности.

Приоритетное направление развития технологий прецизионного контроля геометрических параметров объектов в машиностроении и энергетике определено Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации. Для перехода к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологичной продукции, а также экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике требуется проведение высокоинформативных опытно-конструкторских испытаний на силовых стендах и научных исследований процессов тепломассообмена и обледенения объектов энергетики на климатических и аэродинамических стендах. Для решения данных задач необходимо применение оптико-электронных систем дистанционного контроля изменения геометрии исследуемого объекта, изолированного в рабочем участке экспериментального стенда с оптическим доступом.

К моменту начала работы над диссертацией отечественными и зарубежными специалистами были заложены основы триангуляционных методов с использованием структурированного освещения для дистанционного контроля трехмерной геометрии объектов. Тем не менее, крайне важная для развития машиностроения и энергетики проблема оптической триангуляции объектов в процессе деформации в полной мере не была решена. Для высокоинформативного, одновременного контроля разных участков деформируемой поверхности с адаптивным локальным пространственным разрешением требовалось применение триангуляционной системы, состоящей из нескольких измерительных модулей. Данная возможность была ограничена при изоляции исследуемого объекта в рабочем участке экспериментального стенда с оптическим доступом из-за преломления оптических сигналов на его границах и возникновения нелинейных оптических искажений между триангуляционными модулями. Также существующие триангуляционные измерительные комплексы

требовали адаптации под светорассеивающие свойства измеряемых объектов. В случае деформации непрозрачной поверхности это приводило к росту погрешности контроля ее трехмерной геометрии из-за динамического изменения светорассеивающих свойств, нарушения согласованности ограниченных динамических диапазонов источника и приемника оптического излучения и непредсказуемого искажения характера нелинейности приемно-передаточной функции. В случае оптической триангуляции светопреломляющих поверхностей в исследованиях процессов тепломассообмена и обледенения в энергетике это приводило к недостоверным результатам измерений трехмерной геометрии. Связано это с существенным искажением характера модулируемого сигнала из-за рассеяния формируемого светового потока всей толщиной светопреломляющей поверхности, а также передней и задними гранями и регистрацией фотоприемником интегральной интенсивности.

Цель диссертационной 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.

Задачи диссертационной работы:

1) разработка адаптивных методов формирования, регистрации и обработки структурированных изображений для прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов в машиностроении и энергетике в условиях динамического 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.

Научная новизна диссертации:

1) предложен и внедрен новый метод фазовой триангуляции непрозрачных поверхностей в условиях динамического 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.

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 со светорассеивающими свойствами в широком диапазоне.

В работе использованы методы: оптической триангуляции, цифровой обработки сигналов и изображений, пространственно-временного корреляционного анализа, численной оптимизации, математической статистики, аналитической геометрии и объектно-ориентированной декомпозиции программного обеспечения.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждена аналитическими исследованиями, 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.

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.

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 и 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.

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).

Публикации. По материалам работы соискателем лично и в соавторстве опубликовано 65 печатных работ, из них 15 научных статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, 18 научных статей и 23 тезиса докладов в материалах научных конференций, 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и 5 патентов Российской Федерации на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 141 страницу и 84 рисунка. Список источников литературы содержит 105 работ отечественных и зарубежных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана краткая характеристика диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу существующих адаптивных к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейным искажениям оптико-электронных методов контроля трехмерной геометрии объектов.

Показано, что для дистанционного контроля трехмерной геометрии объектов на экспериментальных стендах закрытого типа с оптическим доступом перспективно применение триангуляционных методов с использованием структурированного освещения.

Установлено, что для расширения диапазона контролируемых размеров непрозрачных объектов требуется применение метода фазовой триангуляции, устойчивого к расфокусировке элементов оптической системы. При этом для прецизионного контроля трехмерной геометрии непрозрачных объектов в процессе деформации требуется разработка метода фазовой триангуляции с адаптацией к светорассеивающим свойствам диагностируемой поверхности и

нелинейности приемно-передаточной функции в соответствии с амплитудно-частотной характеристикой измерительного тракта.

Обоснована необходимость разработки адаптивного метода оптической триангуляции светопреломляющих поверхностей, не оказывающего на них разрушающего воздействия.

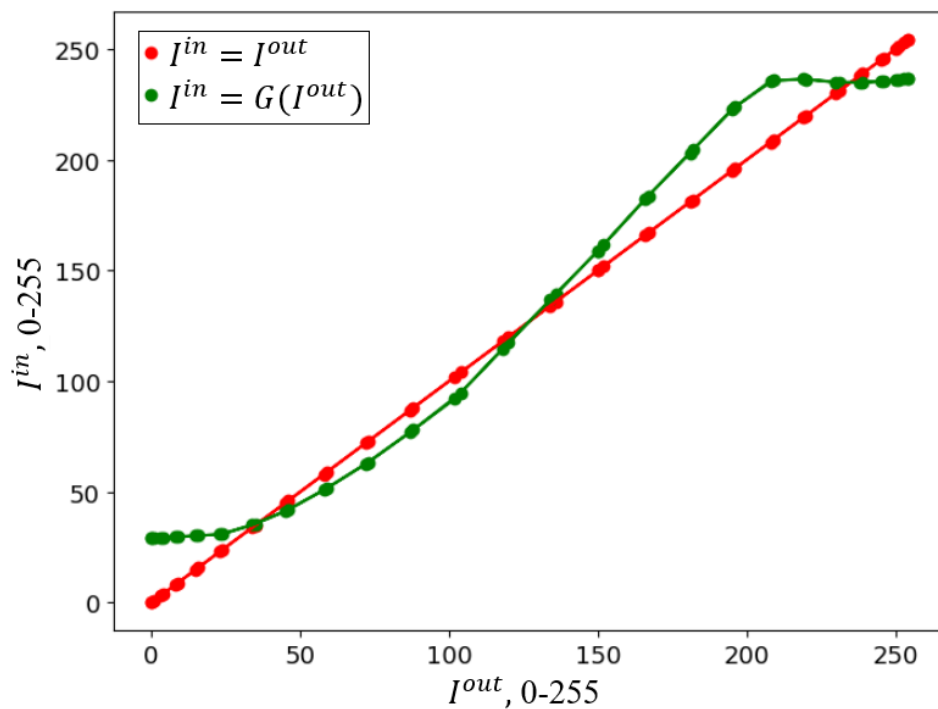
Вторая глава посвящена разработке адаптивных к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейным искажениям методов оптической триангуляции объектов в машиностроении и энергетике.

Для минимизации погрешности контроля трехмерной геометрии непрозрачных объектов в процессе деформации разработан метод фазовой триангуляции с адаптацией к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейности приемно-передаточной функции. В основе предложенного метода адаптации к нелинейности приемно-передаточной функции лежит алгоритм минимизации площади замкнутой фигуры (рис. 1), образованной значениями зарегистрированной интенсивности I_i^{in} от формируемой источником яркости I_i^{out} для заданного фазового сдвига. Восстановление начальной фазы φ основано на поиске значения из диапазона $[0, 2\pi)$ с минимальным значением метрики M , пропорциональной внутренней площади анализируемой замкнутой фигуры:

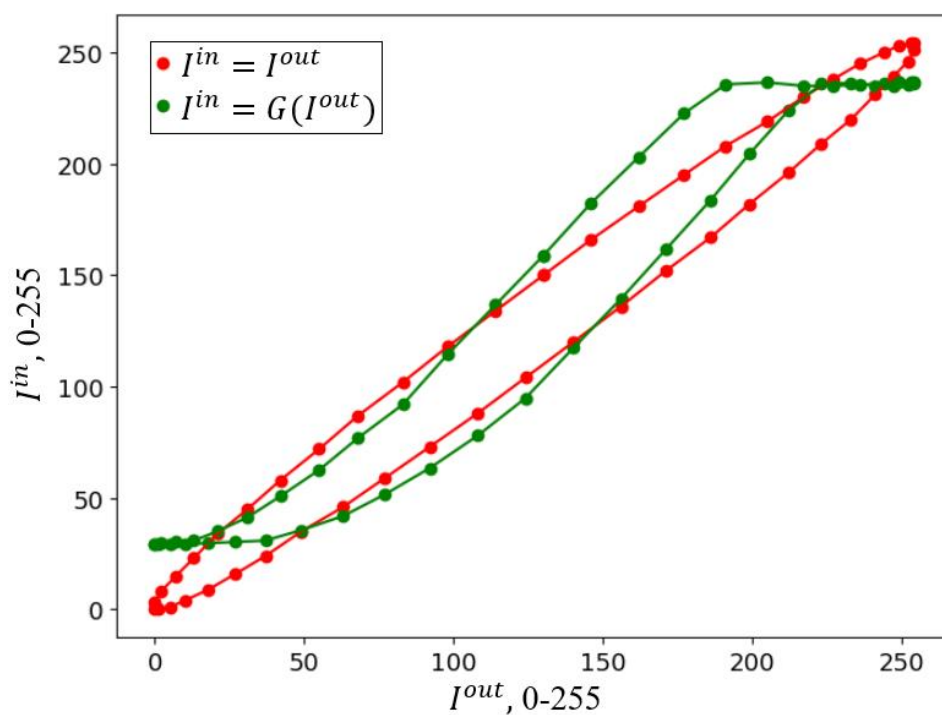
$$M(\varphi) = \left| \sum_{i=0}^{N-1} I_i^{in} \cdot \cos\left(\varphi + \frac{2\pi i}{N}\right) \right|, \quad (1)$$

где N – количество фазовых шагов.

Обеспечена повышенная устойчивость разработанного метода расшифровки фазового распределения к случайным аддитивным оптическим помехам. Для этого структурированное изображение, соответствующее фазовому сдвигу $\Delta\varphi_i$, проецируется k раз, а зарегистрированные значения интенсивности усредняются.



а)



б)

Рис. 1. Характерный вид контура (I_i^{out}, I_i^{in}) при ошибках восстановления фазы 0 (а), $\frac{\pi}{20}$ (б) и приемно-передаточных функциях: линейной и G – нелинейной.

Показано, что высокий уровень достоверности результатов работы предложенного метода фазовой триангуляции не зависит от характера амплитудно-частотной характеристики измерительного тракта и нелинейности приемно-передаточной функции (рис. 2).

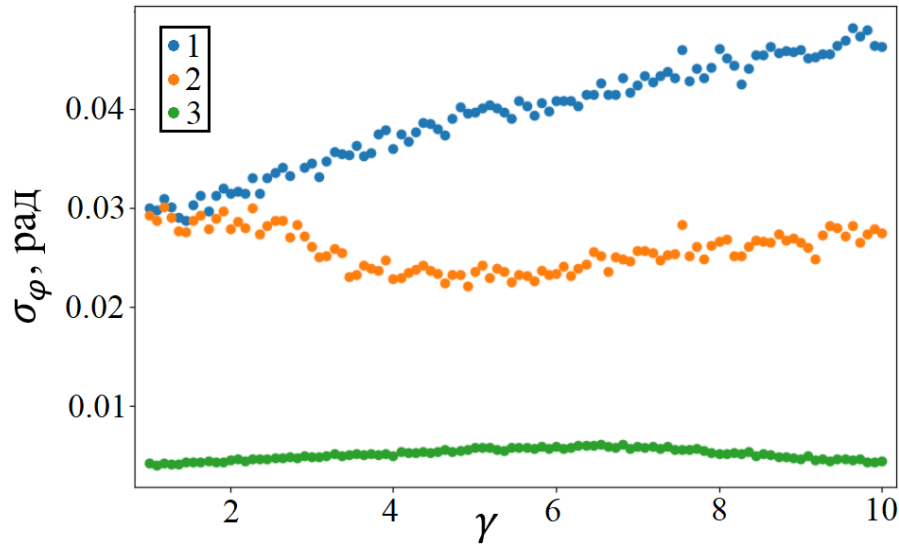


Рис. 2. Зависимость от параметра нелинейности приемно-передаточной функции γ среднеквадратичного отклонения σ_φ фазового распределения, восстановленного методами фазовой триангуляции: на основе ортогональных отношений тригонометрических функций (1), разработанным (2) и разработанным с повышенной устойчивостью к случайным аддитивным помехам (3).

Для минимизации погрешности измерений предложенным методом фазовой триангуляции в условиях динамического изменения светорассеивающих свойств диагностируемой поверхности автоматизирован поиск оптимальных значений частоты фазовой модуляции интенсивности, амплитуды формируемого излучения и экспозиции фотоприемника. Оптимизация данных параметров реализована в соответствии с светорассеивающими свойствами диагностируемой поверхности и основана на минимизации среднеквадратичного отклонения фазы с расширенным динамическим диапазоном PG :

$$\sigma_{PG} = \frac{2^{M-0.5}\sigma_I}{\pi f \sqrt{NI}}, \quad (2)$$

где σ_I – среднеквадратичное отклонение зарегистрированной интенсивности, N – количество фазовых шагов, f – частота фазовой модуляции интенсивности, 2^{M-1} – размерность кодирования фазы с расширенным динамическим диапазоном, I – амплитуда зарегистрированного сигнала.

В диссертационной работе предложен адаптивный метод оптической триангуляции светопреломляющих поверхностей на основе динамического

светового сечения. В процессе его работы реализовано восстановление массива горизонтальных координат P_x элементов матрицы источника, сигнал от которых по разным траекториям достигает анализируемого пиксела матрицы фотоприемника (рис. 3). Для этого на исследуемую поверхность проецируется серия структурированных изображений в виде двух прямоугольников: черного и белого, имеющих общую вертикальную границу. Горизонтальная координата границы между черным и белым прямоугольниками равна порядковому номеру структурированного изображения. После сбора промежуточных измерительных данных для каждого пиксела (x, y) матрицы фотоприемника формируется зависимость $I_{(x,y)}(P_x)$ зарегистрированной интенсивности от номера сформированной засветки. Далее выполняется поиск порядкового номера засветки, характеризующийся резким скачком интенсивности (рис. 4). Данный факт указывает на переход формируемой засветки от белого прямоугольника к черному и определяет горизонтальную координату P_x матрицы источника оптического излучения, соответствующую анализируемому пикселу матрицы фотоприемника.

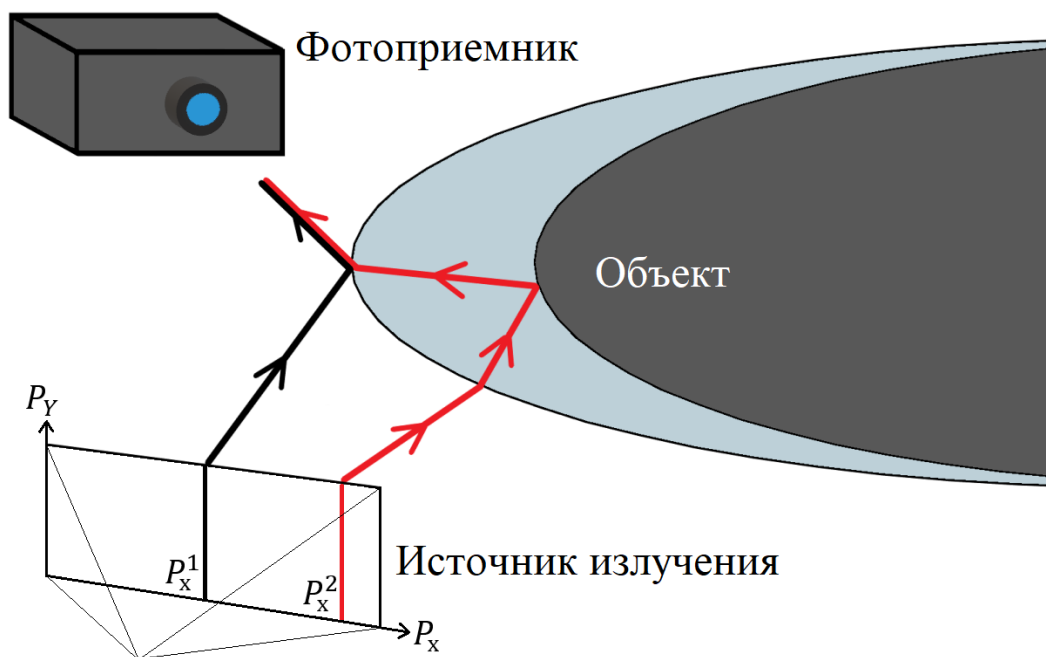


Рис. 3. Регистрация фотоприемником интегральной интенсивности от элементов матрицы источника излучения с координатами P_x^1 и P_x^2 при триангуляционном контроле светопреломляющей поверхности с двумя гранями.

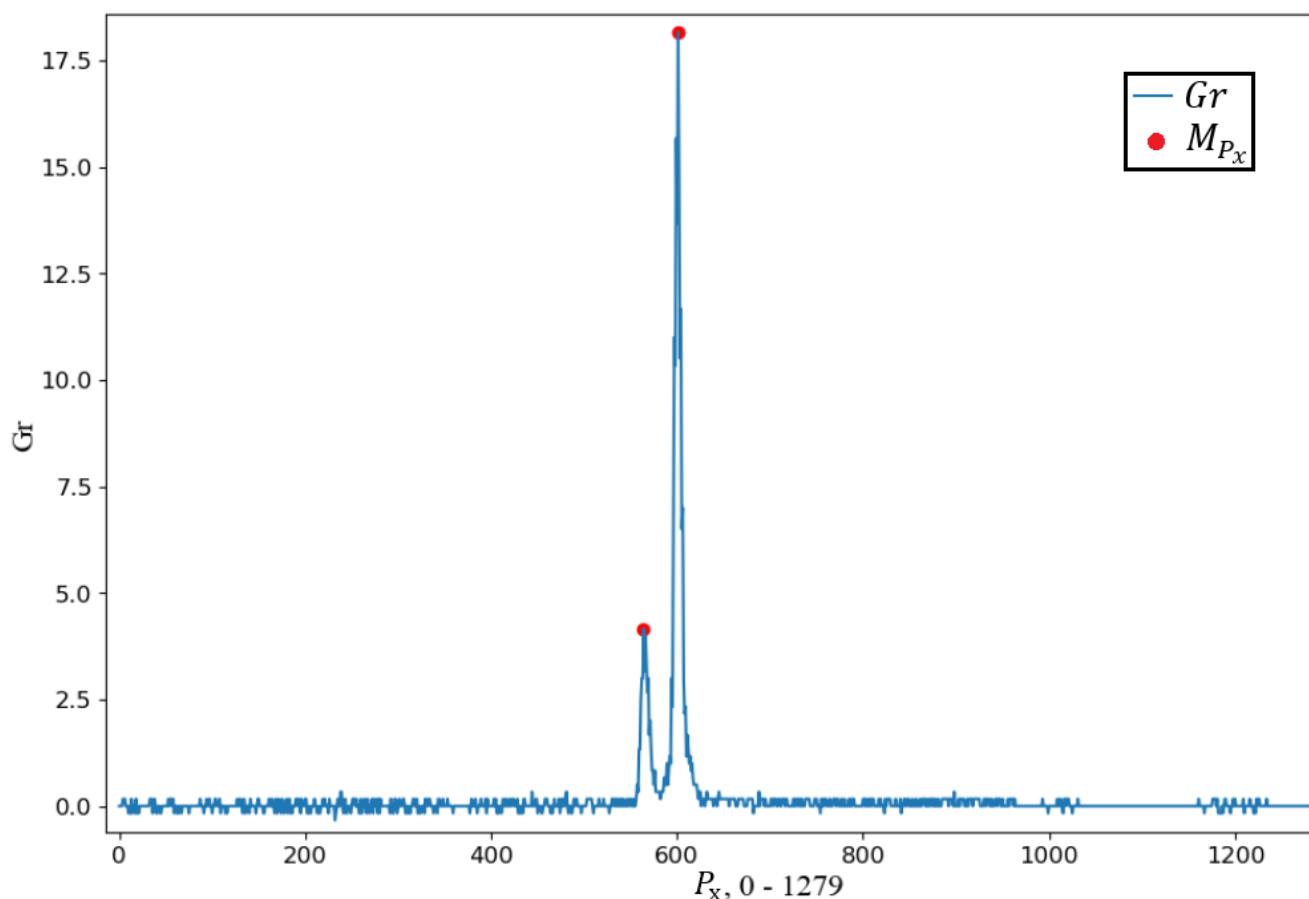


Рис. 4. Результат поиска M_{P_x} – локальных максимумов $Gr = (I_{(x,y)}(P_x))'$.

Обеспечена возможность контроля трехмерных деформаций диагностируемой поверхности на основе результатов ее оптической триангуляции. Для этого разработан адаптивный к текстуре поверхности комплекс методов триангуляционного контроля трехмерных деформаций. Их работа основана на поиске смещений участков поверхности объекта с помощью пространственно-временного корреляционного анализа и многопараметрического восстановления полигональной поверхности.

Третья глава посвящена практической реализации адаптивных триангуляционных систем (рис. 5-8) для прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов на аэродинамических, климатических и силовых экспериментальных стендах в задачах машиностроения и энергетики.

Для высокоинформативного контроля трехмерной геометрии как всей регистрируемой поверхности, так и отдельных участков с адаптивным пространственным разрешением разработанные системы включают 2 триангуляционных модуля. Компенсация нелинейных оптических искажений и

согласование результатов их трехмерных измерений обеспечены с помощью предложенного метода автоматизированной калибровки с регрессионным и дифференциальным анализом фазовых распределений.



Рис. 5. Адаптивная триангуляционная система контроля деформаций трехмерного профиля объектов в процессе статического нагружения на силовом стенде.



Рис. 6. Адаптивная триангуляционная система для прецизионного контроля параметров массообмена на аэродинамическом стенде ИТ СО РАН.

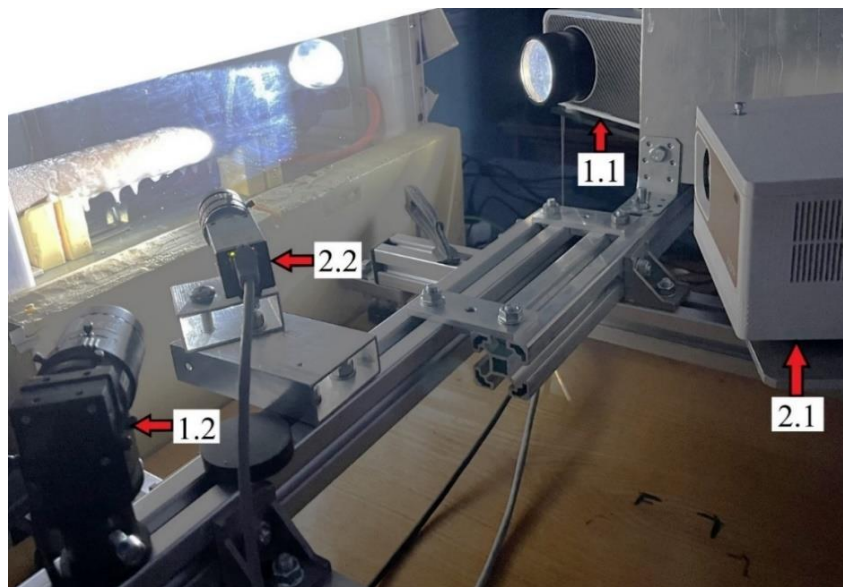


Рис. 7. Адаптивная триангуляционная система для прецизионного контроля трехмерной геометрии наледи на климатическом стенде ИТ СО РАН для исследований процессов обледенения объектов энергетики. 1.1, 1.2 и 2.1, 2.2 – источник излучения и фотоприемник в составе триангуляционных модулей.

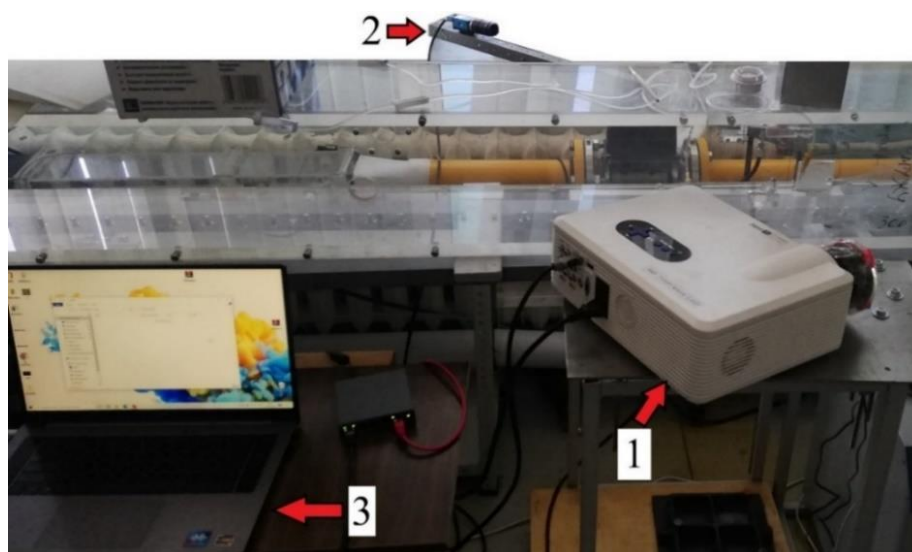


Рис. 8. Адаптивная триангуляционная система для прецизионного контроля трехмерной геометрии наледи на аэродинамическом стенде ИТ СО РАН для исследований процессов обледенения ветрогенераторов. 1 – источник излучения, 2 – фотоприемник, 3 – компьютер.

Четвертая глава посвящена лабораторным и производственным испытаниям разработанных адаптивных триангуляционных систем.

В ходе лабораторных испытаний подтверждена работоспособность и выполнен анализ их метрологических характеристик. Показано, что использование метода фазовой триангуляции с адаптивной компенсацией

нелинейности приемно-передаточной функции в условиях ограниченного динамического диапазона оптической системы обеспечивает возможность контроля трехмерной геометрии непрозрачных объектов с погрешностью на уровне 0.02 % от глубины измерительного объема. Установлено, что применение адаптивного метода оптической триангуляции на основе пространственно-временной модуляции интенсивности в виде динамического светового сечения обеспечивает возможность контроля трехмерной геометрии светопреломляющих поверхностей с погрешностью на уровне 0.07 % от глубины измерительного объема.

Для демонстрации степени готовности разработанных адаптивных триангуляционных систем представлены результаты их производственных испытаний и практического применения в задачах машиностроения и энергетики. В результате производственных испытаний разработанной адаптивной триангуляционной системы (рис. 5) на действующем силовом стенде подтверждено достижение требуемого малого уровня погрешности контроля деформаций трехмерного профиля объектов в процессе статического нагружения – менее 0.02 % от глубины измерительного объема. С помощью применения разработанной адаптивной триангуляционной системы (рис. 6) на действующем аэродинамическом стенде ИТ СО РАН обеспечена возможность динамического контроля трёхмерного профиля спрессованного в форму нафталина в процессе сублимации (рис. 9) для расчета локальных коэффициентов массообмена в теплофизических исследованиях, нацеленных на разработку эффективных энергетических установок. В рамках исследований на действующих аэродинамическом и климатическом стендах ИТ СО РАН, нацеленных на разработку технологий борьбы с обледенением объектов энергетики, обеспечена возможность диагностики трехмерной геометрии различных видов наледи с адаптивным локальным пространственным разрешением (рис. 10) с помощью применения разработанных адаптивных триангуляционных систем (рис. 7, 8).

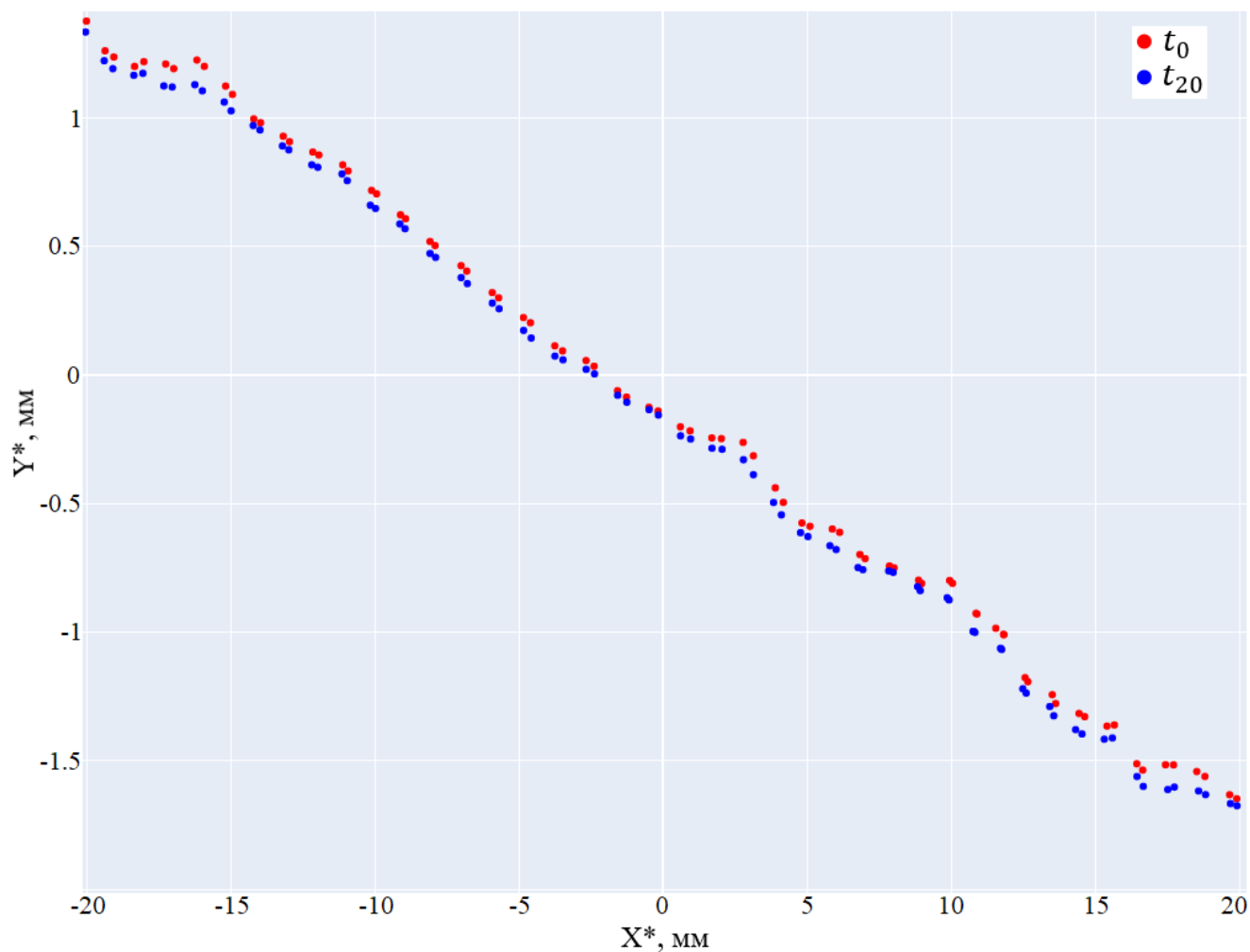


Рис. 9. Динамический контроль трехмерной геометрии нафталина в заданной плоскости на основе результатов измерений адаптивной триангуляционной системой в момент начала эксперимента (t_0) и спустя 20 минут (t_{20}).

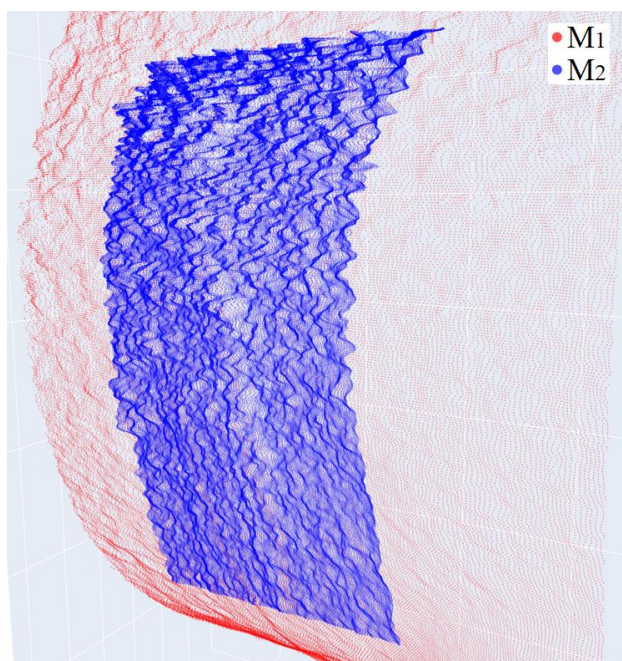


Рис. 10. Контроль трехмерной геометрии наледи триангуляционными модулями: M_1 и M_2 – с повышенным пространственным разрешением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Предложены и реализованы новые методы оптической триангуляции с адаптивной компенсацией нелинейности приемно-передаточной функции и декомпозицией регистрируемого сигнала от аддитивного светового потока для прецизионного контроля трехмерной геометрии непрозрачных и светопреломляющих поверхностей в условиях динамического изменения их светорассеивающих свойств.
- Разработаны и внедрены новые методы автоматизированной калибровки триангуляционных систем с регрессионным и дифференциальным анализом фазовых распределений для высокоинформативного контроля трехмерной геометрии объектов с адаптивным пространственным разрешением в условиях нелинейных оптических искажений.
- Создан и апробирован адаптивный к текстуре поверхности комплекс методов контроля трехмерных деформаций объектов на основе обработки данных оптической триангуляции с помощью пространственно-временного корреляционного анализа и многопараметрического восстановления полигональной поверхности.
- На основе проведенных исследований впервые создан ряд адаптивных систем оптической триангуляции непрозрачных и светопреломляющих поверхностей с погрешностью контроля геометрии на уровне 0.07 % от глубины измерительного объема, успешно прошедших лабораторные и промышленные испытания и получивших практическое применение на действующих аэродинамических, климатическом и силовом экспериментальных стендах в задачах машиностроения и энергетики.

В диссертации поставлена, обоснована и решена **важная научно-техническая проблема** разработки и практической реализации методов оптической триангуляции, адаптивных к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейным искажениям, для прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов в процессе деформации. Внедрение новых научно обоснованных технических решений, изложенных в диссертации,

способно внести значительный вклад в развитие отечественного приборостроения, машиностроения и энергетики, существенно повысив информативность и эффективность технологических процессов.

Список основных работ по теме диссертации

1. Зуев В.О., Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Павлов В.А., Бакакин Г.В. Способ бесконтактного измерения трехмерных профилей передней и задней стенок полупрозрачных трехмерных объектов // Патент на изобретение № 2845334. – 2025.
2. Зуев В.О., Какаулин С.В., Двойнишников С.В., Кабардин И.К., Янчат А.Т. Система триангуляционного контроля динамического трёхмерного профиля наледи в плоском сечении // Патент на изобретение № 2864550. – 2026.
3. Зуев В.О., Двойнишников С.В., Кабардин И.К., Какаулин С.В., Янчат А.Т., Меледин В.Г. Способ триангуляционного контроля динамического трёхмерного профиля наледи в плоском сечении // Патент на изобретение № 2868784. – 2026.
4. Зуев В.О., Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Бакакин Г.В. Инвариантный к характеру нелинейности приёмно-передаточной функции метод фазовой триангуляции // Автометрия. – 2026. – Т. 62. – № 3. – С. 92-99.
5. Zuev V.O., Kakaulin S.V., Dvoynishnikov S.V., Kabardin I.K., Yanchat A.T. Three-dimensional ice geometry triangulation measurement system spatial resolution increasing method // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2025. – Vol. 66. – P. 66-71.
6. Zuev V.O., Dvoynishnikov S.V., Kabardin I.K., Kakaulin S.V., Gordienko M.R. Three-dimensional ice profile flat cut triangulation control in dynamics // Thermophysics and Aeromechanics. – 2025. – Vol. 32. – P. 16-22.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
 12. 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.
 13. 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.
 14. 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.
 15. 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.
 16. 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.
 17. 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., Tolstoplyatov 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. – № 4. – P. 779-791.
 18. 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.